

Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνειο Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

# ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Εμμανουήλ Γ. Ποταμιανάκης

Αθήνα, Απρίλιος 2006



Εθνικό Μετσοβίο Πολυτεχνείο Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχ. Υπολογιστών Τομέλς Ηλεκτρικής Ισχύος

# ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ

## ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Εμμανουήλ Γ. Ποταμιανάκη

Συμβουλευτική Επιτροπή : Κωνσταντίνος Βουρνάς (επιβλέπων) Νικόλαος Χατζηαργυρίου Γεώργιος Κορρές

Εγκρίθηκε την 14η Απριλίου 2006

Η Εξεταστική Επιτροπή

W

Κ. Βουρνάς Καξηγητής Ε.Μ.Π.

Α. Κλαδάς Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ν. Χατζηαργυρίου Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. Παπαθανασίου AEKTOP EMI

Ν. Βοβός Καθηγητής Πολυτεχνικής Σχολής Παν. Πατράν

Stopp. S.

Τ/Κόρρες Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Η.

all de Co

Τ. Προυαυλίδης Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Εμμανουήλ Γ. Ποταμιανάκης

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Εμμανουήλ Γ. Ποταμιανάκης, 2006 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διατριβή, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην ανάλυση ευστάθειας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), όπως αυτή διαμορφώνεται σε αποκεντρωμένο περιβάλλον από πλευράς παραγωγής, λόγω της αυξημένης διείσδυσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Ειδικότερα, η διατριβή εστιάζει στη διερεύνηση των προβλημάτων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης τα οποία οφείλονται σε μηχανές επαγωγής, είτε αυτές λειτουργούν ως φορτία σε οικιακούς, εμπορικούς ή βιομηχανικούς καταναλωτές είτε ως γεννήτριες σε αιολικά πάρκα.

Κυρίαρχο θέμα στη διατριβή είναι η ανάπτυξη ενός προγράμματος προσομοίωσης ΣΗΕ. Το εξεταζόμενο πρόγραμμα ονομάζεται WHSSP (Wind-Hybrid System Simulation Package) και έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον MATLAB/SIMULINK στο Εργαστήριο ΣΗΕ του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Το πρόγραμμα WHSSP θεωρείται κατάλληλο για δυναμικές προσομοιώσεις και μελέτες ευστάθειας μικρών έως μεσαίων διασυνδεδεμένων ή αυτόνομων δικτύων, στα οποία έχουν διεισδύσει μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και ειδικότερα αιολικά πάρκα. Επιπρόσθετα, το λογισμικό πακέτο WHSSP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Μία από τις αρχικές αιτίες ενός φαινομένου βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης είναι ο βραχυπρόθεσμος περιορισμός στο ρεύμα διέγερσης των σύγχρονων γεννητριών και η συνακόλουθη αδυναμία στήριξης των τάσεων στους αντίστοιχους ζυγούς. Συνεπώς, δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην επέκταση του μοντέλου Συστήματος Προστασίας Υπερδιεγέρσεως για σύγχρονες μηχανές, το οποίο ανάλογα με το μέγεθος της υπερδιέγερσης έχει τη δυνατότητα να δράσει τόσο στη μακροπρόθεσμη όσο και στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Στην παρούσα διατριβή μελετάται, με τη βοήθεια του προγράμματος WHSSP, η συμβολή διαφόρων παραγόντων στην εκδήλωση των φαινομένων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης και ειδικότερα οι μηχανισμοί που μπορεί να οδηγήσουν στην εμφάνιση περαιτέρω καταστροφικών φαινομένων όπως αστάθειας γωνίας των σύγχρονων μηχανών. Σημειώνεται ότι αυτό έχει πέραν της ακαδημαϊκής αξίας (ακριβέστερη διάκριση μεταξύ των τύπων αστάθειας και των χρονικών κλιμάκων) και πρακτική χρησιμότητα, αφού από την ανάλυση θα προκύψουν μέτρα αντιμετώπισης της αστάθειας.

Ειδικότερα, διερευνάται η χρονική αλληλουχία μεταξύ των φαινομένων της αστάθειας τάσης και γωνίας στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, η οποία σε αρκετές περιπτώσεις είναι αρκετά δύσκολο να εξακριβωθεί. Για το λόγο αυτό, αναπτύσσεται πρόγραμμα για την παρακολούθηση των ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων του συστήματος κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, η ανάλυση των οποίων μπορεί να υποδείξει τις μεταβλητές κατάστασης και άρα τις διατάξεις του μηχανισμού βραχυπρόθεσμης αστάθειας.

Η παρακολούθηση των ιδιοτιμών του συστήματος πραγματοποιείται στο λογισμικό πακέτο WHSPP με τη βοήθεια μίας διαδικασίας γραμμικοποίησης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, σύμφωνα με την οποία κατασκευάζεται σε κάθε χρονική στιγμή ο Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης του συστήματος. Ωστόσο, επειδή το σύστημα δεν λειτουργεί απαραίτητα σε σημείο ισορροπίας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ο υπολογιζόμενος Ιακωβιανός πίνακας πρέπει να θεωρηθεί ότι αναφέρεται σε ένα εν δυνάμει σημείο ισορροπίας, το οποίο προκύπτει εάν οι τιμές των μεταβλητών εισόδου τροποποιηθούν κατάλληλα ώστε να επιτευχθεί ισορροπία για τις τρέχουσες τιμές των μεταβλητών κατάστασης. Οι πληροφορίες και τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη διαδικασία της γραμμικοποίησης κατά την προσομοίωση δεν αποτελούν ακριβείς και αυστηρές ενδείξεις της ευστάθειας του συστήματος, αποδεικνύονται ωστόσο ιδιαίτερα χρήσιμες στον χαρακτηρισμό της φύσης ενός φαινομένου αστάθειας.

Στη διατριβή εξετάζονται δύο περιπτώσεις βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης, οι οποίες εκδηλώνονται μετά το βραχυπρόθεσμο περιορισμό υπερδιέγερσης των τοπικών σύγχρονων γεννητριών και οδηγούν τελικά σε κατάρρευση τάσεως του δικτύου.

Στην πρώτη περίπτωση, η αστάθεια εκδηλώνεται αρχικά σε μία ομάδα ανεμογεννητριών, οι οποίες παραμένουν συνδεδεμένες στο δίκτυο, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρουν και τις υπόλοιπες σε αστάθεια. Σημειώνεται ότι η τοπική σύγχρονη γεννήτρια παραμένει σε συγχρονισμό με το δίκτυο για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Στη δεύτερη περίπτωση, παρουσιάζονται σημαντικές δυσκολίες στην εξακρίβωση του είδους της βραχυπρόθεσμης αστάθειας, διότι οι χρονικές προσομοιώσεις αποδεικνύουν ότι εκδηλώνονται σχεδόν ταυτόχρονα τα φαινόμενα της επιβράδυνσης τριών κινητήρων επαγωγής και του αποσυγχρονισμού μίας τοπικής σύγχρονης γεννήτριας. Στην περίπτωση αυτή, η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας γραμμικοποίησης οδηγεί στη διάκριση της χρονικής αλληλουχίας μεταξύ των φαινομένων της αστάθειας τάσης και γωνίας.

Σημειώνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις προτείνονται και αξιολογούνται κατάλληλα μέτρα για την αντιμετώπιση της αστάθειας.

Τέλος, το πρόγραμμα προσομοίωσης του λογισμικού πακέτου WHSSP χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση - από πλευράς βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης - της συνδεσμολογίας ενός συγκεκριμένου επιπέδου αιολικής διείσδυσης σε ένα ασθενές δίκτυο.

#### Λέξεις Κλειδιά

Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Δυναμικές Προσομοιώσεις, Μοντελοποίηση, Γραμμικοποίηση, Χρονικές Κλίμακες, Ευστάθεια Τάσης, Ευστάθεια Γωνίας, Διεσπαρμένη Παραγωγή, Αιολικά Πάρκα, Σύστημα Προστασίας Υπερδιεγέρσεως

# ABSTRACT

The subject of this thesis is Power System stability analysis in the environment of increasing penetration of dispersed generation units. In particular, the thesis focuses on the investigation of short-term voltage instability problems caused by induction machines, operating either as motors contributing in residential, commercial, or industrial loads, or as generators in wind farms.

Firstly, a simulation tool for short-term and long-term time scale is developed. The examined tool stems from an educational purpose simulation software developed in MATLAB/SIMULINK and was adapted for research purposes in a package called WHSSP (Wind-Hybrid System Simulation Package). WHSSP is suitable for dynamic simulations and stability studies of interconnected or autonomous power systems with dispersed generation and in particular wind power penetration.

One reason of short-term voltage instability phenomena is the transient field current limitation of local synchronous generators, leading to the reduction of local voltage support in the short-term. Thus, a model of overexcitation limiter for synchronous machines is developed and included in WHSSP, which acts both in long-term and in short-term time scale.

In this thesis, the software package WHSSP is used to study the mechanisms of short-term voltage instability phenomena, which are likely to lead in further undesirable situations, such as angle instability of synchronous machines and the contribution of various devices in the instability. It should be noted that this is done both for academic reasons (more accurate distinction between instability types and time frames) and for practical ones, since this analysis is useful to suggest countermeasures against possible instability.

Specifically, the time sequence between voltage and angle instability phenomena is investigated in cases, where the time domain simulations cannot provide a clear distinction. In these cases, it is necessary to develop special tools and in particular an eigenvalue tracking routine, which together with eigenvector and participation factor analysis is used to identify the components and system variables involved in the instability.

An on-line linearization routine during the simulation has been developed in this thesis and incorporated in the WHSSP simulation package. This routine is building the state Jacobian matrix at selected time instants during the simulation and computes its eigenvalues. Since the system is not necessarily at equilibrium during the simulation, the state Jacobian computed during simulation can be thought to belong to an implicit equilibrium point, for which the inputs have been changed to obtain an equilibrium point for the current values of the state variables. The information provided by the on-line linearization eigenvalues is not a strictly rigorous indication of stability, but it is quite useful in order to characterize the nature of a possible instability.

Case studies of two short-term voltage instability phenomena are included in the thesis. In both cases, the instability phenomena are appeared after the transient limitation of local synchronous machines and finally lead to voltage collapse.

In the first case, the short-term instability is contained to induction wind generators only, while the synchronous machines remain in synchronism.

In the second system examined in the thesis, we will show a short-term voltage instability case followed by loss of synchronism. In this latter case, time-domain simulations cannot provide a clear distinction between induction motor and synchronous generator instability. This distinction is investigated by modal analysis and eigenvalue tracking, using the on-line linearization routine of WHSSP.

In both above-mentioned cases, we suggest and examine appropriate countermeasures against the detected short-term instability.

Finally, the simulation program of WHSSP is used to investigate the optimal topology of a specific wind penetration level in a weak network from the viewpoint of short-term voltage stability.

#### **Key Words**

Power Systems, Dynamic Simulations, Modeling, Linearization, Time Scales, Voltage Stability, Angle Stability, Dispersed Generation, Wind Farms, Overexcitation Limiter

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή άρχισε να εκπονείται επίσημα τον Μάρτιο του 2001 στον Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου και ολοκληρώθηκε τον Απρίλιο του 2006. Επιβλέπων Καθηγητής ήταν ο κ. Κ. Βουρνάς.

Επιθυμώ να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον Καθηγητή κ. Κ. Βουρνά για τη συνεχή και πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής. Η άριστη επιστημονική κατάρτιση, η μεθοδικότητα και η απαιτητικότητά του συνέβαλλαν τα μέγιστα στο να ολοκληρωθεί η εργασία αυτή.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ν. Χατζηαργυρίου, ο οποίος μου έδωσε τη δυνατότητα να συμμετάσχω στα ερευνητικά προγράμματα της Ευρωπαϊκής Ένωσης «DISPOWER», «Microgrids» και «EU-DEEP».

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους διδάκτορες Γ. Μάνο, Β. Νομικό, Μ. Καρυστιανό και τους υποψήφιους διδάκτορες Β. Νικολαϊδη, Γ. Τσουράκη, Ν. Σακελλαρίδη, με τους οποίους κατά καιρούς μοιράστηκα το χώρο του Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, ανταλλάσσοντας γόνιμες επιστημονικές απόψεις.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ την Αναστασία Στεφάνου για την πολύπλευρη στήριξη και συμπαράσταση.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια Αντ. Ψαχούλια για την πολύτιμη βοήθεια όλων των μελών της κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς και τον αδερφό μου, οι οποίοι από την αρχή των σπουδών μου έως σήμερα, δεν έχουν πάψει ποτέ να πιστεύουν σε μένα.

Αθήνα, Απρίλιος 2006

Εμμανουήλ Γ. Ποταμιανάκης

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩ	2ГН	1
	1.1 Γen	IIKA	1
	1.2 ΔIE	σπαρμένη Παραγωγή – Αιολικά Παρκά	2
	1.3 Мн	Γραμμικά Σύστηματα – Γραμμικοποίηση	4
	1.3.1	Ύπαρζη και μονοσήμαντο λύσεων	4
	1.3.2	Σημεία ισορροπίας – Ευστάθεια	5
	1.3.3	Διαχωρισμός χρονικών κλιμάκων	9
	1.4 Eyz	ταθεία Σύστηματών Ηλεκτρικής Ενεργείας	9
	1.4.1	Ορισμός ευστάθειας ΣΗΕ	9
	1.4.2	Κατηγοριοποίηση φαινομένων ευστάθειας ΣΗΕ	10
	1.4.3	Ευστάθεια γωνίας	11
	1.4.4	Ευστάθεια τάσης	13
	1.4.5	Ευστάθεια συχνότητας	16
	1.4.6	Συμπεράσματα από την κατηγοριοποίηση των φαινομένων ευστάθειας ΣΗΕ	16
	1.5 ΣΥΝ	ντομη Περιγραφή Διατάξεων	17
	1.5.1	Διατάξεις στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα	17
	1.5.2	Διατάζεις στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα	19
	1.6 Eпп	ΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ	20
	1.6.1	Διεσπαρμένη παραγωγή και διείσδυση αιολικής ενέργειας	20
	1.6.2	Μέθοδοι ανάλυσης φαινομένων αστάθειας ΣΗΕ	21
	1.6.3	Ανάπτυξη εκπαιδευτικών εργαλείων προσομοίωσης ΣΗΕ	24
	1.6.4	Διερεύνηση προβλημάτων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης – Μέτρα	
		αντιμετώπισης	25
	1.7 ANT	ΓΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	27
	1.8 ΔOM	ин тнх $\Delta$ іатрівнх	30
2	ΠΑΡΑΣ	ΤΑΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	33
	2.1 SVI	νρονίες Γενινμέτριες	22
	2.1 2.11	Courcá	55
	2.1.1 2.1.2	Γενικα	55
	2.1.2	Περιγραφή συγχρονής μηχανής με τις εςισωσεις του Γαικ	54
	2.1.5	Εςιοωσεις κινησης σρομεα	50
	2.1.4	Μοντελο τεταρτής ταξέως ουγχρονής γεννητριάς	20
	2.1.3	20γχρονο πλαιοίο αναφοράς Γοματή Ρυφμική Τακίκ	59
	2.2 AT	Γουνκά	41
	2.2.1	Τενικα	41
	2.2.2	10 ανα μοναθα οθοιημα του οθοιηματός οτεγεροης	45
	2.2.3	Μοντέλο ΑΡΤ με διαγέρτρια Συνέχους Γεσμαιός	45
	2.2.4	Μουτόλο ΑΡΤ με διεγεριρία Εναλλασούμενου Γεσμαίος	45
	2.2.J	ΤΠΟΛΙΈΛΟ ΑΓΤ με ΔΙΕγεριρία Διατικού Τύπου	45
	2.5 <u>2</u> Y2 721	Πηνική προμοαιού συστύματος προστασίας υπορδιουόρσους	40
	2.3.1	1 ενικη περιγραφή ουοτηματος προστασίας υπεροιεγεροεως	40 10
	2.3.2	νιονιέλο ουοτηματός προστασίας υπεροιεγεροέως	40
	∠.4 ∠1A 2.5 Mit	υθεγυπυίπτες Δτ21ΗΜΑΤΟΣ12λτΟΣ νανιές Επαρορίας	33 51
	2.3 MH	ΑΑΝΕΣ ΕΠΑΙ ΩΙ ΗΣ	34
	2.3.1	Περιγραφή μοντελού μηχανής επαγωγής με τις εςισωσεις του Park	30
	2.3.2	Μοντελο τριτης ταξεως μηχανης επαγωγης	37

	2.5.3	Σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς	59
	2.5.4	Μηχανικό φορτίο	60
2	.6 Θi	PMOHΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ	60
	2.6.1	Μοντέλο ατμοπαραγωγού	61
	2.6.2	Μοντέλο ατμοστροβίλου	64
	2.6.3	Μοντέλο ρυθμιστή στροφών	67
	2.6.4	Ντηζελοηλεκτρικοί σταθμοί	68
2	.7 Y	ροηλεκτρικοι Σταθμοι	68
	2.7.1	Γενική περιγραφή υδροηλεκτρικών σταθμών	68
	2.7.2	Περινραφή μοντέλου υδροστροβίλου	69
	2.7.3	Περινραφή ρυθμιστή στροφών υδροστροβίλου	
2	.8 M	ΟΝΤΕΛΑ ΦΟΡΤΙΟΥ	
	2.8.1	Στατικά φορτία	
	2.8.2	 Λυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία	
2	9 M	Ξονοφικού εισοφοροφικός του φοροιοποίο ΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ	74
_	2.9.1	Γενικά για μετασχηματιστές και συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο	
	292	Παράσταση μετασγηματιστών	75
	293	Μηγανισμός συστήματος αλλανής τάσης υπό φορτίο	75
2	$10 \Sigma y$	Σκενές Παραλληλής Αντισταθμίσης από φυριο	
-	2 10 1	Αυτόματοι μηνανισμοί ζεύζης-απόζευζης στατών πυκνωτών	
	2.10.1	Στατά συστήματα αέργου αντιστάθωσης	
2	$11  \Pi_{4}$	Στατά συστηματά ασγου αντιστασμισης	
-	2111	Μοντέλο δικτύου σε διανυσματική μορφή	
	2.11.1 2 11 2	Αιατύπωση αλνεβοικών εξισώσεων δικτύου	
3	ПЕРІГ	ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP	85
3	ПЕРІГ	ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP	85
<b>3</b>	<b>TEPIT</b>	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b> Σάγωγη στο Λογισμικό Περιβάλλον του WHSSP	<b> 85</b>
<b>3</b> 3 3	<b>ΠΕΡΙΓ</b> .1 Επ .2 Γε	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b> εαγωγή στο Λογισμικό Περιβάλλον του WHSSP νικό Μοντελό Συστηματός Ηλεκτρικής Ενεργείας	<b> 85</b> 85 88
<b>3</b> 3 3	ПЕРИ .1 Ел. .2 Ге <i>3.2.1</i>	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b> εαγωγή στο Λογισμικό Περιβάλλον του WHSSP νικό Μοντελό Συστηματός Ηλεκτρικής Ενεργείας Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου	<b> 85</b> 85 88 88
<b>3</b> 3 3	<b>ΠΕΡΙΓ</b> .1 Επ .2 Γε <i>3.2.1</i> <i>3.2.2</i>	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b> ΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ WHSSP ΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου	<b> 85</b> 85 88 88 89
<b>3</b> 3 3	ПЕРІГ .1 Еп. .2 Ге 3.2.1 3.2.2 3.2.3	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b> ΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ WHSSP ΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Ακαριαία απόκριση: αλγεβρικές εζισώσεις	<b>85</b> 85 88 88 89 89
<b>3</b> 3 3	ПЕРІГ .1 Ег. .2 Ге 3.2.1 3.2.2 3.2.3 .3 ПА	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b> ΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ WHSSP ΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Ακαριαία απόκριση: αλγεβρικές εζισώσεις	85 85 88 88 89 89 89 89
<b>3</b> 3 3	ПЕРІГ .1 Еп. .2 Ге 3.2.1 3.2.2 3.2.3 .3 Пл 3.3.1	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b> ΕΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ WHSSP ΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Ακαριαία απόκριση: αλγεβρικές εζισώσεις ΝΡΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ Μεταβλητές κατάστασης συνεχούς χρόνου - Διαφορικές εζισώσεις	85 85 88 88 89 89 89 89 89
<b>3</b> 3 3	ПЕРІГ .1 Еп. .2 Ге. 3.2.1 3.2.2 3.2.3 .3 Пл 3.3.1 3.3.2 2.2.2	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b> ΕΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ WHSSP ΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Ακαριαία απόκριση: αλγεβρικές εξισώσεις ΝΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ Μεταβλητές κατάστασης συνεχούς χρόνου - Διαφορικές εζισώσεις Μεταβλητές κατάστασης διακριτού χρόνου - Εζισώσεις διαφορών	85 85 88 88 89 89 89 89 89 95
<b>3</b> 3 3	ПЕРІГ .1 Еп. .2 Ге 3.2.1 3.2.2 3.2.3 .3 Пл 3.3.1 3.3.2 3.3.3 2.2	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b> ΕΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ WHSSP ΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Ακαριαία απόκριση: αλγεβρικές εξισώσεις ΝΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ Μεταβλητές κατάστασης συνεχούς χρόνου - Διαφορικές εξισώσεις Μεταβλητές κατάστασης διακριτού χρόνου - Εξισώσεις διαφορών Αλγεβρικές μεταβλητές και εξισώσεις δικτύου	85 85 88 88 89 89 89 89 97 97
<b>3</b> 3 3	ПЕРІГ .1 Еп. .2 Ге. 3.2.1 3.2.2 3.2.3 .3 П. 3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.3.4	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b> ΕΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ WHSSP ΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Ακαριαία απόκριση: αλγεβρικές εξισώσεις ΛΡΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ Μεταβλητές κατάστασης συνεχούς χρόνου - Διαφορικές εξισώσεις Μεταβλητές κατάστασης διακριτού χρόνου - Εζισώσεις διαφορών Αλγεβρικές μεταβλητές και εξισώσεις δικτύου Εναλλακτική μέθοδος προσομοίωσης μη γραμμικών φορτίων	85 85 88 89 89 89 89 89 89 89 89 
<b>3</b> 3 3 3 3	ПЕРИ .1 Еп. .2 Ге. 3.2.1 3.2.2 3.2.3 .3 Пл 3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.3.4 .4 Еп.	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b> ΕΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ WHSSP ΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Ακαριαία απόκριση: αλγεβρικές εξισώσεις Ακαριαία απόκριση: αλγεβρικές εξισώσεις Μεταβλητές κατάστασης συνεχούς χρόνου - Διαφορικές εζισώσεις Μεταβλητές κατάστασης διακριτού χρόνου - Διαφορικές εζισώσεις Μεταβλητές κατάστασης διακριτού χρόνου - Εζισώσεις διαφορών Αλγεβρικές μεταβλητές και εξισώσεις δικτύου Εναλλακτική μέθοδος προσομοίωσης μη γραμμικών φορτίων	85 85 88 89 89 89 89 95 97 103 104
<b>3</b> 3 3 3 3	ПЕРИ .1 ЕП .2 ГЕ 3.2.1 3.2.2 3.2.3 .3 ПА 3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.3.4 .4 ЕП 3.4.1 2.4.1	ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP	85 85 88 88 89 89 89 89 97 97 103 104 105
<b>3</b> 3 3 3 3	ПЕРІГ .1 Еп. .2 Ге. 3.2.1 3.2.2 3.2.3 .3 П. 3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.3.4 .4 Еп. 3.4.1 3.4.2 2.4.1	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b> ΕΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ WHSSP ΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Ακαριαία απόκριση: αλγεβρικές εξισώσεις Ακαριαία απόκριση: αλγεβρικές εξισώσεις Μεταβλητές κατάστασης συνεχούς χρόνου - Διαφορικές εξισώσεις Μεταβλητές κατάστασης διακριτού χρόνου - Διαφορικές εξισώσεις Μεταβλητές κατάστασης διακριτού χρόνου - Εξισώσεις διαφορών Αλγεβρικές μεταβλητές και εξισώσεις δικτύου Εναλλακτική μέθοδος προσομοίωσης μη γραμμικών φορτίων ΝΑΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΑΡΧΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ Αρχική ροή φορτίου Αρχικοποίηση μηχανών επαγωγής	85 85 88 88 89 89 89 89 95 95 97 103 104 105 105
<b>3</b> 3 3 3 3	ПЕРІГ .1 ЕП .2 ГЕ 3.2.1 3.2.2 3.2.3 .3 ПА 3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.3.4 .4 ЕП 3.4.1 3.4.2 3.4.3	ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP ΕΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ WHSSP ΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	85 85 88 89 89 89 89 95 97 103 104 105 106
<b>3</b> 3 3 3 3	ПЕРІГ .1 ЕП .2 ГЕ 3.2.1 3.2.2 3.2.3 .3 ПА 3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.3.4 .4 ЕП 3.4.1 3.4.2 3.4.3 3.4.4 2.4.2	ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP ΕΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ WHSSP ΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου Διαφορικές εξισώσεις Διαφορικές εξισώσεις Δεταβλητές κατάστασης συνεχούς χρόνου - Διαφορικές εξισώσεις Μεταβλητές κατάστασης διακριτού χρόνου - Εξισώσεις διαφορών Αλγεβρικές μεταβλητές και εξισώσεις δικτύου Εναλλακτική μέθοδος προσομοίωσης μη γραμμικών φορτίων Αρχικοποίηση μηχανών επαγωγής Αρχικοποίηση σύγχρονων γεννητριών	85 85 88 88 89 89 89 95 97 103 105 105 106 107
<b>3</b> 3 3 3 3	ПЕРІГ .1 ЕГ .2 ГЕ 3.2.1 3.2.2 3.2.3 .3 ПА 3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.3.4 .4 ЕГ 3.4.1 3.4.2 3.4.3 3.4.4 3.4.5	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b> ΕΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ WHSSP ΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Δναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Ακαριαία απόκριση: αλγεβρικές εξισώσεις	85 85 88 88 89 89 89 95 95 97 103 104 105 105 106 107 108
<b>3</b> 3 3 3 3	ПЕРІГ .1 ЕП .2 ГЕ 3.2.1 3.2.2 3.2.3 .3 ПА 3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.3.4 .4 ЕП 3.4.1 3.4.2 3.4.3 3.4.4 3.4.5 3.4.6	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b> ΕΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ WHSSP ΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Δναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Ακαριαία απόκριση: αλγεβρικές εξισώσεις Δεταβλητές κατάστασης συνεχούς χρόνου - Διαφορικές εξισώσεις Μεταβλητές κατάστασης διακριτού χρόνου - Διαφορικές εξισώσεις Μεταβλητές κατάστασης διακριτού χρόνου - Εξισώσεις διαφορών Αλγεβρικές μεταβλητές και εξισώσεις δικτύου Εναλλακτική μέθοδος προσομοίωσης μη γραμμικών φορτίων Αρχικοποίηση μηχανών επαγωγής Αρχικοποίηση σύγχρονων γεννητριών	85 85 88 88 89 89 89 95 97 103 104 105 106 106 108 108
<b>3</b> 3 3 3	ПЕРІГ .1 ЕП .2 ГЕ 3.2.1 3.2.2 3.2.3 .3 ПА 3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.3.4 .4 ЕП 3.4.1 3.4.2 3.4.3 3.4.4 3.4.5 3.4.6 3.4.7	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b>	85 85 88 88 89 89 89 95 97 103 105 105 105 106 107 108 108 109
<b>3</b> 3 3 3 3 3 3	<b>ПЕРІГ</b> .1 ЕГ .2 ГЕ 3.2.1 3.2.2 3.2.3 .3 ПА 3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.3.4 .4 ЕГ 3.4.1 3.4.2 3.4.3 3.4.4 3.4.5 3.4.6 3.4.7 .5 ПА	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b>	85 85 88 88 89 89 89 95 95 97 103 104 105 105 106 107 108 108 109 111
<b>3</b> 3 3 3 3 3	<b>ПЕРІГ</b> .1 ЕГ .2 ГЕ <i>3.2.1</i> <i>3.2.2</i> <i>3.2.3</i> .3 П.4 <i>3.3.1</i> <i>3.3.2</i> <i>3.3.3</i> <i>3.3.4</i> .4 ЕГ <i>3.4.1</i> <i>3.4.2</i> <i>3.4.3</i> <i>3.4.4</i> <i>3.4.5</i> <i>3.4.6</i> <i>3.4.7</i> .5 П.4 <i>3.5.1</i>	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b> ΕΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ WHSSP ΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων σιακριτού χρόνου Δναμική συμπεριφορά διατάζεων διακριτού χρόνου Ακαριαία απόκριση: αλγεβρικές εξισώσεις ΝΕΤΑβλητές κατάστασης συνεχούς χρόνου - Διαφορικές εξισώσεις Μεταβλητές κατάστασης διακριτού χρόνου - Εξισώσεις διαφορών Αλγεβρικές μεταβλητές και εξισώσεις δικτύου Εναλλακτική μέθοδος προσομοίωσης μη γραμμικών φορτίων ΜΑΤΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΑΡΧΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ Αρχικοποίηση μηχανών επαγωγής Αρχικοποίηση σύγχρονων γεννητριών Αρχικοποίηση λοιπών διατάξεων σύγχρονων γεννητριών Αρχικοποίηση κινητήριων μηχανών και ρυθμιστών στροφών ΚΡΑΣΙΓΜΑ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΣΗΕ ΣΤΟ WHSSP	
<b>3</b> 3 3 3 3 3 3	<b>ПЕРІГ</b> .1 ЕГ .2 ГЕ 3.2.1 3.2.2 3.2.3 .3 ПА 3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.3.4 .4 ЕГ 3.4.1 3.4.2 3.4.3 3.4.4 3.4.5 3.4.4 3.4.5 3.4.6 3.4.7 .5 ПА 3.5.1 3.5.2	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b> ΕΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ WHSSP ΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Δυναμική συμπεριφορά διατάζεων συνεχούς χρόνου Ακαριαία απόκριση: αλγεβρικές εξισώσεις <b>ΝΕΤΑβλητές κατάστασης συνεχούς χρόνου -</b> Διαφορικές εξισώσεις <b>ΝΕταβλητές κατάστασης συνεχούς χρόνου -</b> Διαφορικές εξισώσεις <b>Μεταβλητές κατάστασης συνεχούς χρόνου -</b> Διαφορικές εξισώσεις Μεταβλητές κατάστασης συνεχούς χρόνου - Διαφορικές μεταβλητές και εξισώσεις δικτύου Εναλλακτική μέθοδος προσομοίωσης μη γραμμικών φορτίων	85           88           88           89           89           89           95           97           103           104           105           106           107           108           109           111           113
<b>3</b> 3 3 3 3 3 3	<b>ПЕРІГ</b> .1 ЕГ .2 ГЕ 3.2.1 3.2.2 3.2.3 .3 ПА 3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.3.4 .4 ЕГ 3.4.1 3.4.2 3.4.3 3.4.4 3.4.5 3.4.6 3.4.7 .5 ПА 3.5.1 3.5.2 3.5.3	<b>ΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP</b>	85 85 88 88 89 89 97 97 97 97 103 104 105 105 106 107 108 108 108 109 111 113

	3.5.4	Προσομοίωση τριφασικού βραχυκυκλώματος	119
	3.6	$\Sigma$ YГКРI $\Sigma$ H ME EUROSTAG	123
	3.6.1	Περιγραφή δικτύου 33 ζυγών της CIGRE	123
	3.6.2	Ρ Προσομοίωση σεναρίου αστάθειας τάσης	124
4	ГРА	ΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	127
	11		127
	4.1	Γραμμγοποίηση Συγνθονον Γεννητρίον	127
	ч. <u>∠</u> //2/	1 ΓΑΜΜΙΚΟΠΟΙΠΖΗ ΖΗ ΑΓΟΝΣΙΝ ΓΕΝΝΙΤΓΕΙΣΙΝ	120
	4.2.1	Γοαμμικοποιημένο μοντέλο σύνγοονης μηγανής	131
	4.2.2	Γραμμικοποιημένο μοντέλο ΣΠΥ	132
	4.2.5	Γραμμικοποιημένο μοντέλο σταθεροποιητή συστήματος ισχύος	132
	425	Γραμμικοποιημένο μοντέλο ΑΡΤ τύπου ΑC4 κατά ΙΕΕΕ	134
	426	Γραμμικοποιημένο μοντέλο μονάδας παραγωνής	135
	43	Γραμμικοποιήμογο μογισμό μογισμ Γισμογραφιματισμό μογισμό μογισ	135
	4 4	Γραμμικοποίηση Μη Γραμμικον Στατικον Φορτίον	137
	4.5	Γραμμικοποίηση Συστηματός Πολλών Μηχανών	139
	4.5.1	Μεθοδολογία εξαγωγής δικτύου ελαττωμένης τάξεως	139
	4.5.2	Γραμμικοποίηση αλγεβρικών εζισώσεων δικτύου	140
	4.5.3	Υπολογισμός πίνακα κατάστασης γραμμικοποιημένου συστήματος πολλών	
		μηχανών	143
	4.6	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ	146
	4.7	Παραδειγμα Βραχύπροθέσμης Ασταθείας Μηχανών Επαγωγής	148
	4.7.1	Περίπτωση 1: Απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας	149
	4.7.2	Περίπτωση 2: Απώλεια έλζης ευσταθούς βραχυπρόθεσμου σημείου	
		ισορροπίας	157
	4.8	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	160
5	ANA	ΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΝΟΤΙΑΣ ΕΥΒΟΙΑΣ	167
	51	Σύνοπτική Περιγραφή Δικτύου Νότιας Ευβοίας	167
	5.2	Προσομοιώστη Σεναρίου Βραχύπροφεσμής Ασταφείας Ανεμογεννητρίων	170
	5.3	Αναλύστιστιστιστιστιστιστιστιστιστιστιστιστισ	
	5.4	ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗΣ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	175
	5.4.1	Προστασία υπερτάχυνσης ανεμογεννητριών	176
	5.4.2	Προστασία υποτάσεως ανεμογεννητριών	179
	5.4.3	Συνδυασμένη προστασία υπερτάχυνσης και υποτάσεως ανεμογεννητριών	183
	5.4.4	Εγκατάσταση στατών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης (SVC)	183
6	ПРС	ΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΣΕ ΑΣΘΕΝΕΣ	
	ΔΙΚ	ТҮО	187
	6.1	Σύνοπτική Περιγραφή Δικτύου	187
	6.2	Προσδιορισμός Βελτίστης Σύνδεσμολογίας Αιολικής Διεισδύσης Από Πλε	ΥΡΑΣ
		Βραχύπροθέσμης Ασταθείας Τάσης	189
	6.2.1	Απώλεια γραμμής διανομής στην Αλεξανδρούπολη	189
	6.2.2	Γ Τριφασικό βραχυκύκλωμα σε γραμμή διανομής στην Αλεζανδρούπολη	192
	6.2.3	Συμπεράσματα	194

7	ANA	ΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ	105
	BIU	WIHAANIKUYZ-UIKIAKUYZ KINHTHPEZ	195
	7.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ-ΟΙΚΙΑΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	195
	7.2	Προσομοιώση Σεναρίου Βραχύπροθέσμης Ασταθείας Κινητήρων Επαγώγης.	198
	7.3	Αναλύση Ρυθμών	200
	7.3.1	Προσδιορισμός διακλάδωσης σαγματικού κόμβου	200
	7.3.2	2 Ανάλυση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων	200
	7.4	Εξελιξή Ιδιοτιμών και Ιδιοδιανύς ματών	202
	7.4.1	Ι Αστάθεια κινητήρων επαγωγής	202
	7.4.2	2 Αποσυγχρονισμός σύγχρονων γεννητριών	204
	7.5	Μετρα Αντιμέτωπισης Βραχύπροθέσμης Ασταθείας Κινητήρων Επαγωγής	205
	7.5.1	Προστασία υποτάσεως βιομηχανικού κινητήρα	205
	7.5.2	2 Εγκατάσταση στατών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης (SVC)	207
8	ΣΥΝ	ΑΒΟΛΗ. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΛΙΑΤΡΙΒΗΣ	211
5			

ІВЛІОГРАФІА
-------------

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

# 1.1 Γενικά

Η γενικευμένη χρήση της Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι πλέον ανάγκη του σύγχρονου πολιτισμού και αποτελεί μία από τις βασικότερες παραμέτρους για την οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη μίας χώρας. Η δυσκολία αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας δημιούργησε την ανάγκη για την κατασκευή εκτεταμένων δικτύων μεταφοράς και διανομής, τα οποία εξασφαλίζουν την άμεση παροχή του ενεργειακού αγαθού στον τελικό καταναλωτή.

Η διαρκής αύξηση των ενεργειακών αναγκών και η συνακόλουθη αύξηση των ηλεκτρικών φορτίων έχουν σαν αποτέλεσμα την απαίτηση όλο και μεγαλύτερης μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος μέσω των ηλεκτρικών δικτύων. Ωστόσο, η επέκταση των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να καλυφθούν οι αυξανόμενες ανάγκες των κέντρων κατανάλωσης, καθίσταται ολοένα και δυσκολότερη τα τελευταία χρόνια είτε λόγω περιβαλλοντικών (κυρίως στον ανεπτυγμένο κόσμο), είτε λόγω οικονομικών (στον αναπτυσσόμενο κόσμο) περιορισμών. Επίσης, η κατασκευή, η συνέχιση της λειτουργίας ή η επαναλειτουργία σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κοντά σε αστικά κέντρα (όπου βρίσκεται συγκεντρωμένο το μεγαλύτερο μέρος των ηλεκτρικών φορτίων), συναντά επίσης πολλές και ενδεχομένως δικαιολογημένες αντιδράσεις. Επομένως, η διαρκής αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά στα αστικά και βιομηχανικά κέντρα, επιβάλλει την εντατικότερη χρήση των διαθέσιμων δικτύων μεταφοράς [Kar05].

Οι ιδιαίτερα έντονες συνθήκες φόρτισης οδήγησαν ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 στην εμφάνιση νέου τύπου φαινομένων αστάθειας σε πολλά Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) σε διάφορα σημεία του πλανήτη. Τα βασικά χαρακτηριστικά των καινούριων φαινομένων είναι η αργή ή απότομη βύθιση της τάσης. Τα φαινόμενα εντοπίζονται συνήθως σε μία περιοχή του δικτύου, αλλά μπορεί να επεκταθούν σταδιακά και στο υπόλοιπο δίκτυο. Τα φαινόμενα αστάθειας τάσης χαρακτηρίζονται με το γενικό όρο αστάθεια τάσης. Σημειώνεται ότι τα φαινόμενα αστάθειας τάσης εμφανίστηκαν ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 σε όλες σχεδόν τις ανεπτυγμένες χώρες (π.χ. Γαλλία, Ηνωμένο Βασίλειο, Σουηδία, Καναδάς, Η.Π.Α., Ιαπωνία), ακριβώς γιατί στις χώρες αυτές η αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας συνδυάζεται με την έντονη περιβαλλοντική ευαισθησία [Tay94]. Στη χώρα μας, παρόμοια περιστατικά αστάθειας τάσης καταγράφηκαν σε συνθήκες αιχμής του Ιούλιο του 1996 [Man98,VMK00] και τον ίδιο μήνα του 2004 [VNT05], οδηγώντας σε διαχωρισμό του συστήματος, με αποτέλεσμα την ολική σβέση στο νότιο τμήμα.

Η αστάθεια τάσης είχε αναλυθεί αρχικά με στατικά μοντέλα και σχετίστηκε με το όριο μέγιστης μεταφοράς ισχύος του δικτύου. Ως δυναμικό φαινόμενο ωστόσο, συνδέεται με τη δυναμική φύση των φορτίων. Πολλά φορτία (π.χ. κινητήρες επαγωγής, θερμοστατικά φορτία) έχουν την τάση να ανακτούν την καταναλισκόμενη ισχύ τους ύστερα από μία διαταραχή στο δίκτυο, η οποία μειώνει την τάση τροφοδοσίας τους. Επίσης, η λειτουργία των Συστημάτων Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) των μετασχηματιστών διανομής και άλλων παρόμοιων διατάξεων (π.χ. ρυθμιστές τάσεως διανομής) προκαλεί έμμεσα το ίδιο αποτέλεσμα, αφού επαναφέροντας την τάση στους ζυγούς φορτίου επαναφέρουν και το εξαρτώμενο από αυτήν φορτίο. Το σημείο Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος αποτελεί το όριο μεταφοράς ισχύος σε ένα σημείο του δικτύου, από το συνδυασμένο σύστημα παραγωγής-μεταφοράς [Man98]. Μετά το σημείο αυτό η διαδικασία ανάκτησης του φορτίου γίνεται ασταθής, πράγμα που σημαίνει ότι αντί για παράδειγμα να αυξάνει η καταναλισκόμενη ισχύς του φορτίου μετώνει την αύξηση της ζήτησης, μετά από μία βύθιση της τάσης του αντίστοιχου ζυγού, αυτή μειώνεται. Ο μηχανισμός αυτός αστάθειας είναι η κύρια αιτία των προβλημάτων αστάθειας τάσης.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι, εκτός από τα φορτία, στην αστάθεια τάσης συνεισφέρουν και διάφορες άλλες διατάξεις των ΣΗΕ, όπως τα συστήματα ελέγχου και προστασίας των σύγχρονων γεννητριών, οι διασυνδετικές γραμμές συνεχούς ρεύματος με ρύθμιση ισχύος κτλ.

Τα τελευταία χρόνια, η απελευθέρωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και η αλλαγή της σύνθεσης των ηλεκτρικών φορτίων έχουν προσδώσει νέο ενδιαφέρον στις μελέτες ευστάθειας των ΣΗΕ.

Ειδικότερα, η απελευθέρωση των ενεργειακών αγορών καταργεί το καθετοποιημένο σύστημα παραγωγής-μεταφοράς-διανομής και επομένως παρέχει τη δυνατότητα στους υποψήφιους ανεξάρτητους παραγωγούς να επενδύσουν σε περιοχές της επιλογής τους ανάλογα με τα συμφέροντά τους. Παράλληλα, η ολοένα αυξανόμενη χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας οδηγεί στη σύνδεση όλο και περισσότερων διεσπαρμένων γεννητριών στο δίκτυο, με αποτέλεσμα τη μείωση της ηλεκτρικής απόστασης μεταξύ των παραγωγών και των καταναλωτών και τη μεταβολή της ροής ισχύος στο εσωτερικό του συνδυασμένου συστήματος μεταφοράς-διανομής. Επιπρόσθετα, στο νέο καθεστώς «ελεύθερης αγοράς» που διαμορφώνεται σε πολλές χώρες, τα ηλεκτρικά δίκτυα τείνουν σε λειτουργικές συνθήκες υψηλότερης φόρτισης, καθώς ολοένα και μεγαλύτερο βάρος δίνεται στα λειτουργικά κόστη του συστήματος.

Από την άλλη πλευρά, η χαρακτηριστική των σύγχρονων φορτίων καθιστά ολοένα και πιο ευάλωτα τα δίκτυα στις μεταβολές της τάσης, λόγω α) της αυξανόμενης διείσδυσης μηχανών επαγωγής (είτε ως κινητήρες σε οικιακούς και βιομηχανικούς καταναλωτές είτε ως γεννήτριες σε αιολικά πάρκα), β) της διείσδυσης φορτίων ανεξάρτητων της τάσης που ελέγχονται από κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος, γ) της εκτεταμένης χρήσης συστημάτων πυκνωτών για αντιστάθμιση αέργου ισχύος, καθώς επίσης και δ) της αυξημένης χρήσης γραμμών Συνεχούς Ρεύματος (ΣΡ) στο επίπεδο της Υψηλής Τάσης (ΥΤ).

Στα πλαίσια αυτά, η παρούσα διατριβή αποσκοπεί να συμβάλλει στην διερεύνηση των ταχέων φαινομένων αστάθειας τάσης, όπως αυτά διαμορφώνονται στα σύγχρονα ΣΗΕ, λαμβάνοντας υπόψη την αυξημένη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και ειδικότερα αιολικών πάρκων με απλές ασύγχρονες ανεμογεννήτριες.

## 1.2 Διεσπαρμένη Παραγωγή – Αιολικά Πάρκα

Ο όρος διεσπαρμένη παραγωγή χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό μικρών γεννητριών ονομαστικής ισχύος από 15 kW έως 10 MW, οι οποίες είναι διασκορπισμένες σε ένα ΣΗΕ [AAS01,EKS04]. Σύμφωνα με έναν άλλο ορισμό, η διεσπαρμένη παραγωγή περιλαμβάνει όλες τις μικρές γεννήτριες στο επίπεδο της διανομής, είτε αυτές συνδέονται στο δίκτυο προς τη μεριά των καταναλωτών ή λειτουργούν απομονωμένα από το δίκτυο τροφοδοτώντας κάποιο συγκεκριμένο τύπο φορτίου [WS00].

Στην κατηγορία της διεσπαρμένης παραγωγής ανήκουν γεννήτριες μικρής ονομαστικής ισχύος, οι οποίες χρησιμοποιούν συμβατικές τεχνολογίες, όπως είναι για παράδειγμα οι γεννήτριες Ντήζελ (ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη), συνδυασμένου κύκλου ή άλλου είδους στρεφόμενες μηχανές. Εκτός αυτών, στη διεσπαρμένη παραγωγή συμπεριλαμβάνονται οι κυψέλες καυσίμου και οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), οι οποίες συναντώνται στα αιολικά και στα φωτοβολταϊκά πάρκα, καθώς επίσης και τα μικρά υδροηλεκτρικά εργοστάσια.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι συνιστώσες της διεσπαρμένης παραγωγής συνδέονται στο δίκτυο διανομής μέσης ή χαμηλής τάσης σε σημεία πολύ κοντά στους καταναλωτές. Αυτός ο τρόπος σύνδεσης μεταβάλλει ριζικά την τοπολογία των σύγχρονων ΣΗΕ, καθώς εγκαταλείπεται η κλασσική καθετοποιημένη δομή των παλαιότερων δικτύων, όπου η παραγωγή της ζητούμενης ηλεκτρικής ισχύος γινόταν από μεγάλους κεντρικούς σταθμούς σε μεγάλη απόσταση από τους καταναλωτές.

Οι ΑΠΕ αποτέλεσαν την πρώτη μορφή διεσπαρμένης παραγωγής στις αρχές της δεκαετίας του 1970, όταν εξαιτίας της πετρελαϊκής κρίσης άρχισε να γίνεται όλο και περισσότερο κοινή συνείδηση η ανάγκη αποτελεσματικότερης αξιοποίησης των προσφερόμενων από τη φύση ενεργειακών πόρων. Αυτό επιβάλλεται καταρχήν από το πεπερασμένο των συμβατικών - μη ανανεώσιμων - πηγών ενέργειας, καθώς οι ορυκτές πρώτες ύλες που χρησιμοποιούν για καύσιμο δεν διατίθενται σε ανεξάντλητες ποσότητες. Εκτός αυτού, η εκτεταμένη χρήση των συμβατικών μονάδων παραγωγής συμβάλλει στην έξαρση των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Συγκεκριμένα η λειτουργία των μονάδων αυτών συνοδεύεται με την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), καθώς επίσης και οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>) και του αζώτου (NO<sub>x</sub>). Το διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο αναπόφευκτα εκπέμπεται σε κάθε καύση, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία και διατήρηση του λεγόμενου φαινόμενου του θερμοκηπίου, στο οποίο ως γνωστόν οφείλονται αρκετές από τις σύγχρονες δυσμενείς περιβαλλοντικές αλλαγές, όπως για παράδειγμα η συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας σε όλες τις περιοχές του πλανήτη, το λιώσιμο των πάγων στους πόλους κτλ. Επίσης, τα οξείδια του θείου και του αζώτου προκαλούν

φωτοχημική ρύπανση και νέφος κυρίως στα αστικά κέντρα, αλλά και όξινη βροχή η οποία καταστρέφει τα δάση.

Τη γενικότερη στροφή προς τις ΑΠΕ ενίσχυσε στις αρχές τις δεκαετίας του 1990 το πρωτόκολλο του Κιότο, σύμφωνα με το οποίο καθίσταται επιβεβλημένη η ανάγκη καταπολέμησης του φαινομένου του θερμοκηπίου, το οποίο κατά κύριο λόγο δημιουργήθηκε και συντηρείται λόγω της εκτεταμένης χρήσης των συμβατικών σταθμών παραγωγής.

Επίσης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η απελευθέρωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία λαμβάνει χώρα στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες, δίνει την ευκαιρία στους υποψήφιους ανεξάρτητους παραγωγούς να επενδύσουν σε μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που χρησιμοποιούν είτε συμβατικές τεχνολογίες είτε ΑΠΕ.

Ο όρος ΑΠΕ αναφέρεται κυρίως στις ακόλουθες μορφές ενέργειας [Pap97]:

- 1. Την αιολική ενέργεια.
- 2. Την ηλιακή ενέργεια.
- 3. Τις μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες.
- 4. Την ενέργεια των θαλασσίων κυμάτων.
- 5. Τη γεωθερμική ενέργεια.
- 6. Την ενέργεια της βιομάζας.

Κοινό χαρακτηριστικό των παραπάνω πηγών είναι ότι ανανεώνονται διαρκώς από τη φύση τους, δίνοντας στον άνθρωπο το δικαίωμα της εκμετάλλευσής τους χωρίς κόστος καυσίμου.

Με βάση τη σημερινή τεχνολογία ο αποδοτικότερος τρόπος αξιοποίησης των ΑΠΕ είναι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως παρά τα τεράστια βήματα προόδου που έχουν γίνει κατά το δεύτερο μισό του εικοστού αιώνα προς το σκοπό αυτό, μόνο η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας (κινητική ενέργεια του ανέμου) παρουσιάζει κόστος συγκρίσιμο με αυτό των συμβατικών μονάδων ηλεκτρικής ενέργειας. Οι υπόλοιπες ανανεώσιμες μορφές βρίσκονται ακόμα στο στάδιο της έρευνας για την αξιοποίησή τους και της αναζήτησης αποδοτικών εναλλακτικών τεχνικών. Εξαίρεση από τον κανόνα αυτό αποτελεί η ηλιακή ενέργεια, η οποία όμως χρησιμοποιείται κυρίως για την κάλυψη μικρών σε ισχύ αναγκών (ζέσταμα νερού, φόρτιση μπαταριών κτλ.) χωρίς την ενδιάμεση μετατροπή σε ηλεκτρική ισχύ που ρέει στο δίκτυο.

Η αιολική ενέργεια προέρχεται από τους ανέμους. Οι άνεμοι αποτελούν κινήσεις αερίων μαζών, οι οποίες προκαλούνται από διαφορές θερμοκρασιών εντός της γήινης ατμόσφαιρας. Οι διαφορετικές θερμοκρασίες και άρα και οι αντίστοιχοι άνεμοι οφείλονται κυρίως:

- Στη διαφορά γεωγραφικού πλάτους, οπότε οι άνεμοι είναι σχετικά σταθεροί. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι λεγόμενοι εποχικοί άνεμοι βασικό χαρακτηριστικό των οποίων είναι η μεγάλη περίοδος μεταβολής (της τάξεως του έτους).
- Στη διαφορετική φύση και επιφάνεια του εδάφους (βουνά, πεδιάδες κτλ.). Στην περίπτωση αυτή, οι εμφανιζόμενοι άνεμοι χαρακτηρίζονται από μικρή χρονική διάρκεια.

Η μέση ισχύς των ανέμων σε ολόκληρο τον πλανήτη έχει εκτιμηθεί σε 3.6 δισεκατομμύρια MW, ισχύς πολλαπλάσια από τις σημερινές ενεργειακές ανάγκες όλων των κρατών. Επειδή όμως η αιολική ενέργεια αποτελεί μία αραιή ή ήπια μορφή ενέργειας, είναι δηλαδή μικρή η ποσότητά της που μπορεί να δεσμευθεί ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας, γίνεται αντιληπτό ότι είναι δυνατό να αξιοποιηθεί μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό της παραπάνω ισχύος.

Στα πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας περιλαμβάνεται η απ΄ ευθείας μετατροπή της σε μηχανική, η οποία με τη σειρά της μπορεί να μετατραπεί με απλά μέσα και με υψηλό βαθμό απόδοσης σε οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας.

Από την άλλη πλευρά όμως, σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί ο εντελώς μη ελεγχόμενος και ταχέως μεταβαλλόμενος ρυθμός παροχής της ενέργειας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η αιολική ενέργεια είναι ουσιαστικά - όπως προαναφέρθηκε - η κινητική ενέργεια του ανέμου και επομένως εξαρτάται άμεσα από το στατιστικό μέγεθος της ταχύτητας του ανέμου, του οποίου η μεταβλητότητα είναι αρκετά μεγάλη.

Η αιολική ενέργεια είναι από τις πρώτες πηγές ενέργειας που αξιοποιήθηκε σε μηχανική μορφή αρχικά για την κίνηση των πλοίων και αργότερα στους ανεμόμυλους για το άλεσμα των δημητριακών και την άντληση νερού. Μία πολύ πρόσφατη εφαρμογή αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας για άντληση νερού μέσω γεννήτριας μεταβλητών στροφών και ηλεκτρικού κινητήρα παρουσιάζεται στην εργασία [MNB00].

Η πρώτη αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος χρονολογείται λίγο μετά το τέλος του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου και αφορούσε την τροφοδότηση απομονωμένων κυρίως περιοχών. Ωστόσο, η μαζική διείσδυση της αιολικής ενέργειας στα ΣΗΕ, ώστε να καλύπτουν ποσοστό των απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια, αποτελεί φαινόμενο των τελευταίων τριάντα ετών, σύμφωνα με τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Επιπρόσθετα, τα τελευταία χρόνια οι συνεχείς βελτιώσεις του συστήματος της ανεμογεννήτριας έχουν μειώσει το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο συγκρίσιμο με το αντίστοιχο των συμβατικών μονάδων παραγωγής. Επίσης ολοένα αυξανόμενα είναι τα ονομαστικά μεγέθη ισχύος των ανεμογεννητριών, αν ληφθεί υπόψη ότι το εμπορικό μέγεθος ανεμογεννήτριας το 1980 ήταν 50 kW, το 1995 600 kW ενώ σήμερα βρίσκεται στα 1500 kW βρισκόμενες όμως σε λειτουργία και ανεμογεννήτριες των 3000 kW [Pap97] έως και 5000 kW.

## 1.3 Μη Γραμμικά Συστήματα – Γραμμικοποίηση

Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 1.1, η αστάθεια τάσεως είναι δυναμικό φαινόμενο. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά η μαθηματική θεωρία για τα μη γραμμικά δυναμικά συστήματα.

### 1.3.1 Υπαρξη και μονοσήμαντο λύσεων

Τα συνεχή δυναμικά συστήματα [VCV98] μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από N συνήθεις διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες γράφονται υπό διανυσματική μορφή ως εξής:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \tag{1.1}$$

όπου **x** είναι το  $N \times 1$  διάνυσμα κατάστασης και κάθε συνάρτηση  $f_i$  (*i*=1,...,*N*) είναι στη γενική περίπτωση μία μη γραμμική συνάρτηση όλων των μεταβλητών κατάστασης  $x_i$  (*i*=1,...,*N*). Το διάνυσμα **x** ορίζει ένα σημείο στο χώρο των καταστάσεων.

Η απόκριση κάθε δυναμικού συστήματος στο πεδίο του χρόνου προϋποθέτει τη λύση του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων (1.1) έχοντας δεδομένη μία αρχική συνθήκη, η οποία ορίζει την τιμή του διανύσματος κατάστασης τη χρονική στιγμή *t*=0:

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \tag{1.2}$$

Η αρχική συνθήκη (1.2) και οι διαφορικές εξισώσεις (1.1) συνθέτουν το πρόβλημα των αρχικών συνθηκών.

٦

Η λύση  $\mathbf{x}(t)$  για μία δεδομένη αρχική συνθήκη  $\mathbf{x}_0$  εμφανίζεται ως μία καμπύλη στο χώρο των καταστάσεων και καλείται τροχιά του συστήματος. Για t>0 ορίζεται η θετική τροχιά, ενώ για t<0 η αρνητική τροχιά. Η απεικόνιση των τροχιών του συστήματος για διάφορες αρχικές συνθήκες στο χώρο των καταστάσεων ονομάζεται πορτραίτο φάσεων.

Οι ικανές και αναγκαίες συνθήκες για τις οποίες για κάθε αρχική συνθήκη υπάρχει λύση του μη γραμμικού συστήματος (1.1) περιγράφονται από το θεώρημα ύπαρξης και μοναδικότητας των λύσεων. Έστω ότι οι συναρτήσεις  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  είναι ορισμένες σε ένα σύνολο  $U \subseteq \mathbb{R}^N$ . Σύμφωνα με το υπόψη θεώρημα:

1. Αν η  $\mathbf{f} \in C^0(U, \mathbb{R}^N)$  (συνεχής στο U), τότε υπάρχει λύση  $\mathbf{x}(t)$  για όλες τις αρχικές συνθήκες  $\mathbf{x}_0$  στο U. Κάθε λύση ορίζεται σε ένα μέγιστο διάστημα ύπαρξης  $I_{x_0}$ , το οποίο εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες:

$$I_{x_0} : \alpha_{x_0} < t < \beta_{x_0} \tag{1.3}$$

Οι τιμές  $a_{x_0}$  και  $\beta_{x_0}$ , οι οποίες ορίζουν το κάτω και άνω όριο του διαστήματος ύπαρξης της λύσης αντίστοιχα, μπορεί να τείνουν στο άπειρο, οπότε η λύση υπάρχει για όλα τα  $t \in R$ .

- 2. Av  $\eta \mathbf{f} \in C^k(U, \mathbb{R}^N)$  (me sunereig paraywyoug mérch k-táchg), tóte  $\eta$  lús $\eta \mathbf{x}(t)$  me arrivég sundikég sundikég  $\mathbf{x}_0$  eínai monadiký me k sunereig paraywyoug. Epoménweg, mía ikaný sundýku gia ty monadikótyta tych lús sínai oi  $\mathbf{f}$  na eínai sunereig kai paraywyísimeg.
- 3. Όταν το μέγιστο διάστημα ύπαρξης είναι πεπερασμένο, τα οριακά σημεία των λύσεων της  $\mathbf{x}(t)$  για  $t \to \alpha_{x_0}^+$  ή  $t \to \beta_{x_0}^-$  είτε ανήκουν στο σύνορο του U όταν αυτό είναι φραγμένο, είτε απειρίζονται όταν το U δεν είναι φραγμένο.

Η κατάρρευση ενός φυσικού συστήματος μπορεί να περιγραφεί από διαφορικές εξισώσεις, οι λύσεις των οποίων ορίζονται σε ένα μέγιστο διάστημα με πεπερασμένο άνω όριο. Αυτό το πεπερασμένο άνω όριο ορίζει τη χρονική στιγμή της κατάρρευσης για δεδομένες αρχικές συνθήκες.

Το φαινόμενο της κατάρρευσης μπορεί να θεωρηθεί ως μία διακριτή μετάβαση τη χρονική στιγμή  $t = \beta_{x_0}$ , κατά την οποία το σύστημα μεταβαίνει σε μία άλλη κατάσταση, η οποία περιγράφεται από ένα

διαφορετικό σύνολο διαφορικών εξισώσεων από το (1.1). Η διακριτή αυτή μετάβαση είναι αποτέλεσμα της συνεχούς δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος, σε αντίθεση με άλλα συμβάντα που προκαλούνται εξωτερικά στο σύστημα (όπως π.χ. το άνοιγμα γραμμής ή τα βραχυκυκλώματα στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας).

Τέτοια διακριτά φαινόμενα σε ένα συνεχές σύστημα χαρακτηρίζονται από απειριζόμενες παραγώγους που οδηγούν σε πρακτικά ακαριαίες μεταβάσεις.

### 1.3.2 Σημεία ισορροπίας – Ευστάθεια

Ένα σημείο  $\bar{\mathbf{x}}$  καλείται σημείο ισορροπίας του συστήματος, το οποίο περιγράφεται από τη σχέση (1.1), εάν ικανοποιεί την ακόλουθη συνθήκη:

$$\mathbf{f}(\overline{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \tag{1.4}$$

η οποία αποτελεί ένα σύστημα N αλγεβρικών εξισώσεων με N αγνώστους.

Τα σημεία ισορροπίας χαρακτηρίζονται κατά Lyapunov ως προς την ευστάθειά τους ως εξής [VCV98]:

- Ένα σημείο ισορροπίας  $\overline{\mathbf{x}}$  είναι ευσταθές, εάν για κάθε περιοχή V του  $\overline{\mathbf{x}}$ , μπορεί να βρεθεί μία περιοχή  $V_1$  του  $\overline{\mathbf{x}}$ , τέτοια ώστε για όλα τα  $\mathbf{x}_0$  τα οποία ανήκουν στην  $V_1$ , υπάρχει λύση  $\mathbf{x}(t)$  και βρίσκεται εντός της περιοχής V για κάθε χρονική στιγμή  $t \ge 0$ .
- Ένα σημείο ισορροπίας  $\overline{\mathbf{x}}$  είναι ασυμπτωτικά ευσταθές, εάν όλες οι τροχιές του συστήματος με αρχική συνθήκη  $\mathbf{x}_0$  εντός της περιοχής  $V_1$  τείνουν στο  $\overline{\mathbf{x}}$ , καθώς ο χρόνος τείνει στο άπειρο ( $t \rightarrow \infty$ ).
- Ένα σημείο ισορροπίας  $\overline{\mathbf{x}}$  καλείται ασταθές εάν δεν είναι ευσταθές.

Η κατά Lyapunov ευστάθεια όπως προκύπτει από τα παραπάνω είναι μία τοπική ιδιότητα του συστήματος, αφορά δηλαδή περιοχές κοντά στα σημεία ισορροπίας. Εποπτικότερη εικόνα για τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος ως προς την ευστάθειά του δίνεται από τη μελέτη του πορτραίτου φάσεων, όπου φαίνεται η περιοχή από την οποία οι τροχιές του συστήματος καταλήγουν σε ένα ευσταθές σημείο ισορροπίας.

H megalútern perioch A, tétoia wste oi trociés tou susthmatos me arcikés sundhkes  $x_0 \in A$  na teínoun se éna asumptimiká eustadés shmelo isorropáias  $\overline{x}$ , kaleítai perioch éléns tou  $\overline{x}$ .

Στα γραμμικά συστήματα όπως αυτό της μορφής:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} \tag{1.5}$$

η ευστάθεια του σημείου ισορροπίας (εδώ μοναδικό σημείο ισορροπίας είναι το  $\overline{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$ ) καθορίζεται από τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης  $\mathbf{A}$ .

Οι ιδιοτιμές του πίνακα A δίνονται από τις τιμές της βαθμωτής παραμέτρου λ για τις οποίες υπάρχουν μη τετριμμένες λύσεις της εξίσωσης:

$$\mathbf{A}\mathbf{v}_i = \lambda \mathbf{v}_i \tag{1.6}$$

όπου  $\mathbf{v}_i$  το άγνωστο  $N \times 1$  διάνυσμα. Με τον όρο μη τετριμμένες λύσεις, εννοούνται λύσεις διάφορες της μηδενικής, δηλαδή  $\mathbf{v}_i \neq \mathbf{0}$ . Για τον υπολογισμό των ιδιοτιμών του πίνακα  $\mathbf{A}$ , η (1.6) γράφεται στη μορφή:

$$\left(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}_{N}\right)\mathbf{v}_{i} = \mathbf{0} \tag{1.7}$$

όπου  $\mathbf{I}_N$  ο μοναδιαίος πίνακας διαστάσεων  $N \times N$ . Η ύπαρξη μη τετριμμένων λύσεων της (1.7) προϋποθέτει ότι:

$$\det(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}_{N}) = 0 \tag{1.8}$$

Από την ανάπτυξη της παραπάνω ορίζουσας προκύπτει το χαρακτηριστικό πολυώνυμο του πίνακα **A**, του οποίου οι N λύσεις ( $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_N$ ) ορίζουν τις ιδιοτιμές του θεωρούμενου πίνακα.

Οι ιδιοτιμές μπορεί να είναι είτε πραγματικές ή μιγαδικές. Εάν ο πίνακας **A** είναι πραγματικός (υπόθεση που ισχύει σε όλα τα φυσικά συστήματα όπως είναι τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας), οι μιγαδικές ιδιοτιμές εμφανίζονται πάντα σε συζυγή ζεύγη.

Επανερχόμενοι στο θέμα της ευστάθειας των σημείων ισορροπίας, εάν όλες οι ιδιοτιμές έχουν αρνητικά πραγματικά μέρη, το σημείο ισορροπίας είναι ασυμπτωτικά ευσταθές. Αν έστω και μία ιδιοτιμή έχει θετικό πραγματικό μέρος, το σημείο είναι ασταθές. Σημειώνεται ότι στα γραμμικά συστήματα η περιοχή έλξης ενός ασυμπτωτικά ευσταθούς σημείου ισορροπίας είναι όλος ο χώρος των καταστάσεων [Kun94,VCV98].

Σε αντίθεση με τα γραμμικά συστήματα, το πλήθος των σημείων ισορροπίας σε ένα μη γραμμικό σύστημα ποικίλει. Συγκεκριμένα, ένα μη γραμμικό σύστημα μπορεί να έχει ένα, περισσότερα του ενός ή κανένα σημείο ισορροπίας. Επιπρόσθετα, η περιοχή έλξης ενός σημείου ισορροπίας σε ένα μη γραμμικό σύστημα μπορεί να είναι φραγμένη. Συνεπώς, η ύπαρξη ευσταθούς σημείου ισορροπίας δεν είναι επαρκής για να εγγυηθεί την ευσταθή απόκριση του συστήματος.

Στις περισσότερες περιπτώσεις μη γραμμικών συστημάτων, η μελέτη της ευστάθειας των σημείων ισορροπίας διευκολύνεται με γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από μία περιοχή του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας. Εάν οριστεί:

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \overline{\mathbf{x}} \tag{1.9}$$

και διατηρηθεί μόνο ο όρος πρώτης τάξης του αναπτύγματος Taylor γύρω από το  $\overline{\mathbf{x}}$ , το αντίστοιχο γραμμικοποιημένο σύστημα έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \,\Delta \mathbf{x} \tag{1.10}$$

Ο πίνακας κατάστασης **A** στην περίπτωση αυτή είναι ο Ιακωβιανός Πίνακας του συστήματος, ο οποίος υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{A} = \mathbf{f}_{\mathbf{x}} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}\Big|_{\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}}} = \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} \Big|_{\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}}} & \cdots & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_N} \Big|_{\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_N(\mathbf{x})}{\partial x_1} \Big|_{\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}}} & \cdots & \frac{\partial f_N(\mathbf{x})}{\partial x_N} \Big|_{\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}}} \end{vmatrix}$$
(1.11)

Με τον τρόπο αυτό, η μελέτη ευστάθειας των σημείων ισορροπίας του μη γραμμικού συστήματος ανάγεται στη μελέτη ευστάθειας του γραμμικοποιημένου συστήματος γύρω από κάθε σημείο ισορροπίας, δηλαδή στον υπολογισμό των ιδιοτιμών του πίνακα **A**.

Ένα σημείο ισορροπίας  $\overline{\mathbf{x}}$  του συστήματος (1.1) ονομάζεται υπερβολικό όταν ο Ιακωβιανός Πίνακας (1.11) δεν έχει καμία ιδιοτιμή με μηδενικό πραγματικό μέρος. Ως τύπος ενός υπερβολικού σημείου ισορροπίας ορίζεται ο αριθμός των ιδιοτιμών του Ιακωβιανού Πίνακα με θετικό πραγματικό μέρος.

Τα ασυμπτωτικά ευσταθή σημεία ισορροπίας ενός μη γραμμικού συστήματος ονομάζονται ευσταθείς κόμβοι.

Τα ασταθή σημεία ισορροπίας που έχουν όλες τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης με θετικά πραγματικά μέρη, ονομάζονται πηγές ή ασταθείς κόμβοι.

Τα ασταθή σημεία ισορροπίας, τα οποία έχουν μερικές ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης με θετικά πραγματικά μέρη και όλες τις άλλες με αρνητικά, ονομάζονται σαγματικά σημεία ή διάσελα.

Σημειώνεται ότι η γραμμικοποίηση δεν παρέχει πληροφορία για την ευστάθεια ενός σημείου ισορροπίας, όταν ο αντίστοιχος Ιακωβιανός Πίνακας κατάστασης έχει μία ή περισσότερες ιδιοτιμές με μηδενικό πραγματικό μέρος. Στην περίπτωση αυτή, το σημείο ισορροπίας χαρακτηρίζεται ως μη υπερβολικό, ενώ η ευστάθειά του προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τον ορισμό της ευστάθειας.

Ένας συγκεκριμένος τύπος μη υπερβολικού σημείου ισορροπίας είναι ο σαγματικός κόμβος, ο οποίος συναντάται συχνά στα ΣΗΕ. Η διακλάδωση σαγματικού κόμβου παρουσιάζεται με την εξαφάνιση ή την εμφάνιση ενός ζεύγους σημείων ισορροπίας (συνήθως ενός ευσταθούς και ενός ασταθούς) ως συνέπεια μίας μικρής μεταβολής των παραμέτρων του συστήματος. Επομένως, στα σημεία διακλάδωσης σαγματικού κόμβου ο Ιακωβιανός Πίνακας (1.11) δεν είναι αντιστρέψιμος. Η χαρακτηριστική ιδιότητα ενός σαγματικού κόμβου σύμφωνα με το Σχ. 1.1, είναι ότι υπάρχει μία κατεύθυνση στο χώρο των καταστάσεων, τέτοια ώστε οι τροχιές με αρχικές συνθήκες από τη μία μεριά του σημείου ισορροπίας να συγκλίνουν στο σημείο ισορροπίας, ενώ από την άλλη μεριά να αποκλίνουν από αυτό. Σημειώνεται ότι μολονότι η διακλάδωση σαγματικού κόμβου είναι μη γραμμικό φαινόμενο, μπορεί να εντοπιστεί από τη γραμμικοποιηση του συστήματος έχει απλή μηδενική ιδιοτιμή και η ορίζουσά του μηδενίζεται.

Ένας άλλος τύπος μη υπερβολικού σημείου ισορροπίας είναι το κέντρο. Το κέντρο είναι ένα σημείο ισορροπίας του οποίου ο Ιακωβιανός Πίνακας κατάστασης χαρακτηρίζεται από ένα ζευγάρι συζυγών μιγαδικών ιδιοτιμών με μηδενικό πραγματικό μέρος.

Στον Πίνακα 1.1 φαίνεται η διάκριση των σημείων ισορροπίας ως προς την ευστάθειά τους για ένα σύστημα δευτέρας τάξεως, ανάλογα με τις ιδιοτιμές του Ιακωβιανού Πίνακα κατάστασης.

Ιδιοτιμές	Είδος σημείου ισορροπίας	Ευστάθεια
$\lambda_1 \ge \lambda_2 > 0$	Κόμβος (πηγή)	Ασταθές
$\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq 0$	Κόμβος (ευσταθής)	Ασυμπτωτικά Ευσταθές
$\lambda_1 > 0 > \lambda_2$	Σαγματικό Σημείο	Ασταθές
1 1	$\Sigma_{\pi \alpha \beta \alpha \alpha \beta} \delta (E_{\pi \pi \beta \alpha})$	Ασταθές (σ>0)
$\lambda_1, \lambda_2 = o \pm J * \omega$	Ζπειροειοες σημείο (Εστια)	Ασυμπτωτικά Ευσταθές (σ<0)
$\lambda_1 = j * \omega, \lambda_2 = -j * \omega$	Κέντρο	Ευσταθές
$\lambda_1=0, \lambda_2<0$	Σαγματικός κόμβος	Ασταθές

Πίνακας 1.1: Ιδιότητες ευστάθειας σημείων ισορροπίας σε σύστημα δευτέρας τάζεως

Στο Σχ. 1.1 παρατίθενται κάποια πορτραίτα φάσεων για ένα γραμμικό σύστημα δεύτερης τάξης, όπου φαίνονται τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα του σημείου ισορροπίας  $\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$  (ή ισοδύναμα ( $x_1, x_2$ )=(0,0)).



**Σχ. 1.1:** (α) Ασυμπτωτικά ευσταθής κόμβος (λ<sub>1</sub><λ<sub>2</sub><0), (β) Ασταθής κόμβος (λ<sub>1</sub>>λ<sub>2</sub>>0), (γ) Σαγματικό σημείο (λ<sub>1</sub>>0>λ<sub>2</sub>)

Για κάθε ιδιοτιμή  $\lambda_i$ , το άγνωστο  $N \times 1$  διάνυσμα  $\mathbf{v}_i$  που ικανοποιεί την (1.6) ονομάζεται δεξί ιδιοδιάνυσμα του πίνακα **A** που σχετίζεται με την ιδιοτιμή  $\lambda_i$ . Ισχύει δηλαδή ότι:

$$\mathbf{A}\mathbf{v}_i = \lambda_i \mathbf{v}_i \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{1.12}$$

Το ιδιοδιάνυσμα  $\mathbf{v}_i$  έχει την εξής μορφή:

$$\mathbf{v}_i = \begin{bmatrix} v_{1i} & v_{2i} & \cdots & v_{Ni} \end{bmatrix}^T \tag{1.13}$$

Επειδή η (1.12) είναι ομογενής, το διάνυσμα  $k\mathbf{v}_i$  (με k βαθμωτό μέγεθος) είναι επίσης λύση της εξίσωσης αυτής.

Όμοια με το δεξί ιδιοδιάνυσμα, το  $N \times 1$  διάνυσμα  $\mathbf{w}_i$  που ικανοποιεί την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{A} = \lambda_i \mathbf{w}_i^T \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{1.14}$$

ορίζεται ως το αριστερό ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή  $\lambda_i$ .

Τα δεξιά και αριστερά ιδιοδιανύσματα τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές ιδιοτιμές είναι ορθογώνια μεταξύ τους. Δηλαδή, εάν η ιδιοτιμή  $\lambda_i$  δεν είναι ίση με την  $\lambda_j$ , ισχύει ότι:

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{v}_i = 0 \tag{1.15}$$

Αντίθετα, για τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στην ίδια ιδιοτιμή  $\lambda_i$ , ισχύει ότι:

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{v}_i = C_i \tag{1.16}$$

όπου C<sub>i</sub> είναι μία μη μηδενική σταθερά. Συνηθίζεται η κανονικοποιημένη μορφή των ιδιοδιανυσμάτων, η οποία προκύπτει για C<sub>i</sub>=1.

Αναφορικά με τη φυσική σημασία των ιδιοδιανυσμάτων, τα δεξιά ιδιοδιανύσματα δείχνουν τη σχετική δράση των μεταβλητών κατάστασης όταν διεγείρεται ένας συγκεκριμένος ρυθμός. Για παράδειγμα, το στοιχείο  $v_{ki}$  του δεξιού ιδιοδιανύσματος  $\mathbf{v}_i$  φανερώνει το βαθμό εμφάνισης της k μεταβλητής κατάστασης στον i ρυθμό.

Στην περίπτωση μιγαδικών ιδιοτιμών, το μέτρο κάθε στοιχείου του δεξιού ιδιοδιανύσματος  $\mathbf{v}_i$  παριστά το εύρος ταλάντωσης των μεταβλητών κατάστασης στον i ρυθμό, ενώ η γωνία κάθε στοιχείου δείχνει τη μετατόπιση φάσης των μεταβλητών κατάστασης κατά την ταλάντωση που εκφράζει ο εξεταζόμενος ρυθμός.

Το αριστερό ιδιοδιάνυσμα **w**<sub>i</sub> προσδιορίζει ποιος συνδυασμός μεταβλητών κατάστασης προκαλεί την εμφάνιση μόνο του *i* ρυθμού.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα στο να χρησιμοποιούνται ξεχωριστά τα δεξιά από τα αριστερά ιδιοδιανύσματα για την εξακρίβωση της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών κατάστασης και των ρυθμών είναι ότι τα στοιχεία των ιδιοδιανυσμάτων εξαρτώνται από τις μονάδες μέτρησης και τις κλίμακες των μεταβλητών κατάστασης. Για το λόγο αυτό, ορίζεται ο πίνακας **P** των συντελεστών συμμετοχής σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 & \mathbf{p}_2 & \cdots & \mathbf{p}_N \end{bmatrix}$$
(1.17)

όπου:

$$\mathbf{p}_{i} = \begin{bmatrix} p_{1i} & p_{2i} & \cdots & p_{Ni} \end{bmatrix}^{T} = \begin{bmatrix} v_{1i}w_{i1} & v_{2i}w_{i2} & \cdots & v_{Ni}w_{iN} \end{bmatrix}^{T}$$
(1.18)

Το στοιχείο  $v_{ki}$  ( $w_{ki}$ ) είναι το k στοιχείο του δεξιού (αριστερού) ιδιοδιανύσματος  $\mathbf{v}_i$  ( $\mathbf{w}_i$ ) που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή  $\lambda_i$ .

Το στοιχείο  $p_{ki} = v_{ki} w_{ik}$ ορίζεται ως συντελεστής συμμετοχής και αποτελεί ένα μέτρο της σχετικής συμμετοχής της k μεταβλητής κατάστασης στη διέγερση του i ρυθμού, και αντίστροφα.

Το πλεονέκτημα των συντελεστών συμμετοχής είναι ότι πολλαπλασιάζοντας τα στοιχεία των δεξιών και των αριστερών ιδιοδιανυσμάτων, προκύπτει το αδιάστατο το γινόμενο *p<sub>ki</sub>*, ανεξάρτητο δηλαδή από την επιλογή των μονάδων μέτρησης των μεταβλητών κατάστασης.

Λαμβάνοντας υπόψη την κανονικοποίηση των ιδιοδιανυσμάτων, το άθροισμα των συντελεστών συμμετοχής οι οποίοι σχετίζονται με οποιονδήποτε ρυθμό  $(\sum_{i=1}^{N} p_{ki})$  ή με οποιαδήποτε μεταβλητή

κατάστασης ( $\sum_{k=1}^{N} p_{ki}$ ) ισούται με 1.

Ένας άλλος ορισμός του συντελεστή συμμετοχής  $p_{ki}$  είναι η ευαισθησία της ιδιοτιμής  $\lambda_i$  ως προς το διαγώνιο στοιχείο  $a_{kk}$  του πίνακα κατάστασης **A**, δηλαδή:

$$p_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}} \tag{1.19}$$

Σε γενικές γραμμές, οι συντελεστές συμμετοχής είναι ενδεικτικοί του ποσοστού συμμετοχής των σχετικών μεταβλητών κατάστασης στη διέγερση των αντιστοίχων ρυθμών.

#### 1.3.3 Διαχωρισμός χρονικών κλιμάκων

Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι πρακτικά δύσκολο να αναλυθεί η λειτουργία ενός δυναμικού συστήματος χρησιμοποιώντας όλες τις διαφορικές εξισώσεις που το περιγράφουν. Προκειμένου να απλοποιηθεί το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος, διαχωρίζονται οι χρονικές κλίμακες που εμφανίζονται σε βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα φαινόμενα.

Όταν είναι εφικτός ο διαχωρισμός των δυναμικών φαινομένων ενός συστήματος σε χρονικές κλίμακες, είναι δυνατόν να εξαχθούν μοντέλα μειωμένης τάξης που να περιγράφουν τη συμπεριφορά του χωριστά σε κάθε χρονική κλίμακα, χρησιμοποιώντας την Ανάλυση Ιδιαζουσών Διαταραχών [VCV98]. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, μία μικρή παράμετρος ε, η οποία τείνει στο μηδέν, πολλαπλασιάζει μία ή περισσότερες μεταβλητές κατάστασης του συστήματος, χωρίζοντας το σύστημα σε δύο προσεγγιστικά υποσυστήματα μειωμένης τάξης. Συγκεκριμένα, το σύστημα (1.21) περιγράφει τα γρήγορα δυναμικά φαινόμενα, ενώ το σύστημα (1.20) τα αργά.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \varepsilon) \tag{1.20}$$

$$\varepsilon \dot{\mathbf{y}} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \varepsilon) \tag{1.21}$$

Ουσιαστικά, όταν εξετάζεται το αργό υποσύστημα, η απόκριση του γρήγορου υποσυστήματος θεωρείται ακαριαία, οπότε το τελευταίο αντικαθίσταται με τις εξισώσεις ισορροπίας του. Αντίστροφα, εάν προσεγγίζονται τα γρήγορα φαινόμενα, οι μακροπρόθεσμες μεταβλητές θεωρούνται σταθερές παράμετροι.

### 1.4 Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

#### 1.4.1 Ορισμός ευστάθειας ΣΗΕ

Η ευστάθεια των ΣΗΕ ορίζεται από την ικανότητα του συστήματος, για ένα δεδομένο αρχικό λειτουργικό σημείο, να επανακτά ένα αποδεκτό σημείο λειτουργίας μετά από μία διαταραχή, η οποία οδηγεί τις περισσότερες μεταβλητές του συστήματος κοντά στα όριά τους, ώστε το συνολικό σύστημα να παραμένει πρακτικά αμετάβλητο [Kun04].

Ο ορισμός αυτός μπορεί να εφαρμοστεί για τον χαρακτηρισμό της ευστάθειας ενός διασυνδεδεμένου ΣΗΕ. Ωστόσο, σε αρκετές περιπτώσεις το ενδιαφέρον ως προς την ευστάθεια επικεντρώνεται σε μία συγκεκριμένη περιοχή ή σε ένα σύνολο γεννητριών. Ειδικότερα, μία απομονωμένη γεννήτρια είναι πιθανό να αποσυγχρονιστεί από το δίκτυο, χωρίς να έχει προηγηθεί εμφάνιση φαινομένου αστάθειας στο υπόλοιπο σύστημα. Ομοίως, το ίδιο μπορεί να συμβεί εάν αντί για γεννήτριες, αναλυθεί η δυναμική συμπεριφορά ορισμένων δυναμικών φορτίων. Συγκεκριμένα, η απεριοδική επιβράδυνση ενός κινητήρα επαγωγής μπορεί να λάβει χώρα, χωρίς να εκδηλωθεί αστάθεια στο υπόλοιπο δίκτυο.

Τα ΣΗΕ είναι πολύπλοκα μη γραμμικά συστήματα τα οποία λειτουργούν σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, στο οποίο τα φορτία, οι έξοδοι των γεννητριών και ένα σύνολο λειτουργικών παραμέτρων αλλάζουν διαρκώς τιμές. Η διατήρηση της ευσταθούς λειτουργίας ενός ΣΗΕ στο ενδεχόμενο μίας διαταραχής εξαρτάται από τις αρχικές λειτουργικές συνθήκες, καθώς επίσης και από τη φύση της διαταραχής.

Τα ΣΗΕ υπόκεινται σε ένα μεγάλο πλήθος μικρών και μεγάλων διαταραχών. Οι μικρές διαταραχές συμβαίνουν διαρκώς, αν αναλογιστεί κανείς ότι το ηλεκτρικό φορτίο των διαφόρων καταναλωτών μεταβάλλεται συνεχώς. Στις περιπτώσεις αυτές, το εξεταζόμενο σύστημα θα πρέπει να διαθέτει την ικανότητα της άμεσης προσαρμογής στις εκάστοτε λειτουργικές συνθήκες, ώστε να αποκρίνεται ικανοποιητικά. Επίσης, είναι επιθυμητή η αντοχή του συστήματος σε ιδιαίτερα κρίσιμες διαταραχές,

όπως είναι για παράδειγμα ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μία γραμμή μεταφοράς ή η απώλεια μίας μεγάλης μονάδας παραγωγής. Μία κρίσιμη διαταραχή μπορεί να προκαλέσει την ενεργοποίηση ορισμένων διακοπτών προστασίας, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της τοπολογίας του δικτύου και τη δημιουργία δύο ή περισσότερων νησίδων.

Σε ένα σύνολο σημείων ισορροπίας, ένα ΣΗΕ μπορεί να είναι ευσταθές για μία δεδομένη μεγάλη διαταραχή και ασταθές για μία άλλη. Όπως γίνεται κατανοητό, η σχεδίαση των ΣΗΕ με σκοπό τη διατήρηση της ευστάθειας σε κάθε πιθανό σενάριο διαταραχών είναι ασύμφορη τόσο από πρακτικής όσο και από οικονομικής πλευράς. Αντιθέτως, η σχεδίαση αυτή πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις διαταραχές οι οποίες εμφανίζουν υψηλά ποσοστά εμφάνισης. Επομένως, η ευστάθεια μεγάλων διαταραχών αναφέρεται πάντα σε ένα συγκεκριμένο σενάριο διαταραχής. Ένα ευσταθές σύνολο σημείων ισορροπίας έχει μία πεπερασμένη περιοχή έλξης και μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή αυτή, τόσο πιο εύρωστο θεωρείται το σύστημα σε μεγάλες διαταραχές. Η περιοχή έλξης ων ευσταθών σημείων ισορροπίας μεταβάλλεται ανάλογα με τις λειτουργικές συνθήκες του εξεταζόμενου ΣΗΕ.

Η απόκριση ενός ηλεκτρικού δικτύου σε μία διαταραχή μπορεί να εμπλέξει ένα μεγάλο μέρος του εξοπλισμού. Για παράδειγμα, ένα σφάλμα σε ένα κρίσιμο στοιχείο και η συνακόλουθη απομόνωσή του λόγω της δράσης του αντίστοιχου εξοπλισμού προστασίας, μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στις ροές ισχύος των γραμμών, στις τάσεις των ζυγών και στις ταχύτητες των δρομέων των στρεφόμενων μηχανών. Οι μεταβολές των τάσεων των ζυγών επηρεάζουν τους ρυθμιστές τάσης των γεννητριών και των δικτύων μεταφοράς. Επίσης, οι μεταβολές στην ταχύτητα των σύγχρονων γεννητριών έχουν αντίκτυπο στη συμπεριφορά των στροβίλων και των ρυθμιστών στροφών. Ταυτόχρονα, οι μεταβολές της τάσης και της συχνότητας επηρεάζουν σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό την κατανάλωση των φορτίων, ανάλογα με την κατά περίπτωση χαρακτηριστική αυτών. Ακολούθως, οι παραπάνω μεταβολές είναι πιθανό να οδηγήσουν στην ενεργοποίηση ορισμένων διατάξεων προστασίας, οι οποίες με τη σειρά τους θα αποσυνδέσουν τις αντίστοιχες διατάξεις από το δίκτυο, με αποτέλεσμα την αστάθειας.

Εάν το δίκτυο αποκριθεί ευσταθώς μετά από μία διαταραχή, θα οδηγηθεί σε ένα νέο σημείο ισορροπίας, στο οποίο θα διατηρηθεί η ακεραιότητα του δικτύου, δηλαδή για παράδειγμα το σύνολο των γεννητριών και των φορτίων θα συνδέονται μεταξύ τους. Ένα πλήθος γεννητριών και φορτίων είναι πιθανό να αποσυνδεθεί από το δίκτυο είτε εξαιτίας της απομόνωσης του εξοπλισμού που συνδέεται με το σφάλμα είτε λόγω της σκόπιμης απόρριψης ορισμένων διατάξεων προκειμένου να διατηρηθεί η συνέχεια της λειτουργίας του υπόλοιπου συστήματος. Στις περιπτώσεις σοβαρών διαταραχών σε διασυνδεδεμένα συστήματος σε δύο ή περισσότερες νησίδες (ανεξάρτητες μεταξύ τους), προκειμένου να ικανοποιηθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του φορτίου. Στη συνέχεια, η δράση των αυτόματων ελεγκτών του συστήματος σε συνδυασμό με τους ανθρώπινους χειρισμούς θα αποκαταστήσουν σταδιακά την ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Σε αντίθετη περίπτωση, εάν δηλαδή το σύστημα αποδειχθεί ασταθές, θα οδηγηθεί σε διαδοχικές απώλειες των διατάξεων, με αποτέλεσμα τη σβέση ενός μεγάλου μέρους του συστήματος.

Όπως προαναφέρθηκε, τα ΣΗΕ υπόκεινται σε συνεχείς διακυμάνσεις μικρού πλάτους. Ωστόσο, στις μελέτες ευστάθειας θεωρείται ότι στο αρχικό σημείο λειτουργίας πριν την κατά περίπτωση εξεταζόμενη διαταραχή, το σύστημα βρίσκεται σε σημείο μονίμου καταστάσεως.

### 1.4.2 Κατηγοριοποίηση φαινομένων ευστάθειας ΣΗΕ

Ένα τυπικό σύγχρονο ΣΗΕ αποτελεί ουσιαστικά ένα πολυμεταβλητό σύστημα, του οποίου η δυναμική συμπεριφορά επηρεάζεται από ένα τεράστιο σύνολο διατάξεων με διαφορετικές χαρακτηριστικές και ποικίλους ρυθμούς απόκρισης. Ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου, τη λειτουργική κατάσταση του συστήματος και τον τύπο της διαταραχής, είναι πιθανόν να οδηγηθεί το σύστημα σε διαφορετικές μορφές αστάθειας.

Η ευστάθεια των ΣΗΕ αποτελεί ένα ενιαίο πρόβλημα. Εντούτοις, οι τύποι αστάθειας, οι οποίοι μπορεί να εμφανιστούν σε ένα ΣΗΕ, διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους και καθιστούν τη μελέτη της ευστάθειας περισσότερο εξειδικευμένη. Έτσι, η ανάλυση της ευστάθειας των ΣΗΕ πραγματοποιείται με κατάλληλες αναλυτικές τεχνικές κατά περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη ορισμένες απλουστευτικές παραδοχές. Οι παραδοχές αυτές οδηγούν σε ένα απλοποιημένο μοντέλο του συστήματος, στο οποίο όμως διατηρείται αναλλοίωτη η δυναμική των φαινομένων που ενδιαφέρουν κάθε φορά.

Συγκεκριμένα, η μελέτη της ευστάθειας των ΣΗΕ περιλαμβάνει την ανάλυση των φαινομένων τα οποία συνεισφέρουν στη διέγερση των μηχανισμών αστάθειας και στη συνέχεια την επεξεργασία μεθόδων ενίσχυσης της ευσταθούς λειτουργίας του συστήματος. Ανάλογα με τις επιπτώσεις της διαταραχής στο δίκτυο, διακρίνονται η ευστάθεια μικρών και μεγάλων διαταραχών. Η ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών πραγματοποιείται με γραμμικοποίηση του συστήματος πολύ κοντά στην περιοχή του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.3.2. Από την άλλη πλευρά, η μελέτη ευστάθειας μεγάλων διαταραχών προϋποθέτει συνήθως την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του δικτύου με ένα κατάλληλο πρόγραμμα προσομοίωσης.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η μελέτη ευστάθειας των ΣΗΕ διευκολύνεται σημαντικά εάν διαχωριστούν τα φαινόμενα της ευστάθειας σε κατάλληλες κατηγορίες. Στην αναφορά [Kun04] η κατηγοριοποίηση των φαινομένων ευστάθειας των ΣΗΕ πραγματοποιείται βάσει των ακόλουθων κριτηρίων:

- Τη φύση του ρυθμού αστάθειας που υποδεικνύεται από τις κυρίαρχες μεταβλητές του συστήματος στις αποκρίσεις των οποίων παρατηρείται η εμφανιζόμενη αστάθεια.
- Το μέγεθος της εξεταζόμενης διαταραχής, το οποίο επηρεάζει τη μεθοδολογία για τον υπολογισμό και την πρόβλεψη της αστάθειας.
- Τις διατάξεις, τις διαδικασίες και τη χρονική κλίμακα που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την εκτίμηση της ευστάθειας.

Στην παρούσα διατριβή υιοθετείται η κατηγοριοποίηση των φαινομένων ευστάθειας των ΣΗΕ σύμφωνα με τον Πίνακα 1.2, θεωρώντας τα εξής δύο κριτήρια, τη χρονική κλίμακα εξέλιξης των φαινομένων και την κινητήρια δύναμη των δυναμικών φαινομένων αστάθειας [VCV98].

Κινητήρια δύναμη	Παραγωγή	Φορτία
Χρονική κλίμακα	(Σύγχρονες Μηχανές)	(Μηχανές Επαγωγής)
Dogun zoślozum	ευστάθεια γωνίας	βραχυπρόθεσμη
Βραχυπροσεσμη	(μικρών διαταραχών/μεταβατική)	ευστάθεια τάσης
Μακοοσοάθοσμα	ευστάθεια συχνότητας	μακροπρόθεσμη
νιακροπροσεσμη		ευστάθεια τάσης

Πίνακας 1.2: Κατηγοριοποίηση ευστάθειας ΣΗΕ

Σημειώνεται ότι σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του Πίνακα 1.2, θεωρούνται πάντα σε ευσταθή ισορροπία τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα των γραμμών μεταφοράς και του στάτη των μηχανών κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων, οπότε λαμβάνονται υπόψη ως ακαριαία και παριστάνονται με αλγεβρικές εξισώσεις, όπως θα εξηγηθεί στην ενότητα 2.11. Ο λόγος για τον οποίο αμελούνται τα φαινόμενα αυτά είναι επειδή συμβαίνουν σε κλάσματα δευτερολέπτου και επομένως βρίσκονται σε ισορροπία πριν εκδηλωθούν οι προαναφερόμενοι μηχανισμοί αστάθειας.

Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά όλοι οι τύποι ευστάθειας που αναφέρονται στον Πίνακα 1.2.

### 1.4.3 Ευστάθεια γωνίας

Η ευστάθεια γωνίας αναφέρεται στην ικανότητα των σύγχρονων μηχανών ενός διασυνδεδεμένου συστήματος να παραμένουν σε συγχρονισμό με το δίκτυο μετά από μία διαταραχή. Η ευστάθεια αυτού του είδους εξαρτάται από την ικανότητα κάθε σύγχρονης μηχανής να διατηρεί ή να αποκαθιστά την ισορροπία μεταξύ της αναπτυσσόμενης ηλεκτρομαγνητικής και της μηχανικής ροπής εισόδου.

Το πρόβλημα της αστάθειας γωνίας προϋποθέτει την μελέτη των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Μία βασική παράμετρος στο εξεταζόμενο πρόβλημα είναι ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η ενεργός ισχύς εξόδου των σύγχρονων μηχανών, καθώς μεταβάλλονται οι αντίστοιχες γωνίες δρομέα. Σε συνθήκες μονίμου καταστάσεως (σημείο ισορροπίας), η μηχανική ροπή εισόδου είναι ίση με την αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή για κάθε γεννήτρια, ενώ επίσης η ταχύτητα δρομέα παραμένει σταθερή. Εάν συμβεί μία διαταραχή στο σύστημα, η προηγούμενη ισορροπία ανατρέπεται με αποτέλεσμα την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση των δρομέων των μηχανών σύμφωνα με τους νόμους κίνησης μίας στρεφόμενης μάζας. Εάν προσωρινά μία γεννήτρια περιστρέφεται πιο γρήγορα από μία άλλη, η σχετική γωνιακή θέση της πρώτης ως προς δεύτερη θα αυξάνεται. Οπότε, η επακόλουθη διαφορά των γωνιών δρομέα των δύο μηχανών θα μεταφέρει μέρος του φορτίου της βραδύτερης προς την ταχύτερη γεννήτρια, ανάλογα με τη χαρακτηριστική ενεργού ισχύος-γωνίας δρομέα. Αυτή η μεταφορά ισχύος τείνει να μειώσει τη διαφορά των ταχυτήτων περιστροφής των δύο γεννητριών και άρα και τη σχετική γωνιακή τους θέση. Σημειώνεται ότι η χαρακτηριστική ενεργού ισχύος-γωνίας δρομέα είναι εξόγως μη γραμμική. Εάν ξεπεραστεί ένα συγκεκριμένο όριο, τότε μία αύξηση στη διαφορά των δύο γωνιών συνοδεύεται από μία μείωση της μεταφερόμενης ισχύος, ώστε η γωνιακή διαφορά οδηγείται σε περαιτέρω αύξηση. Στην περίπτωση αυτή, η αστάθεια εκδηλώνεται εάν το σύστημα δεν έχει τη δυνατότητα να απορροφήσει την επιπλέον κινητική ενέργεια, η οποία αντιστοιχεί στην διαφορά των ταχυτήτων δρομέα. Για κάθε μία δεδομένη κατάσταση, η διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος εξαρτάται από το εάν οι αποκλίσεις των σχετικών γωνιών δρομέα οδηγούν σε ανάπτυξη επαρκών ροπών αποκατάστασης [Kun94]. Η απώλεια του συγχρονισμού μπορεί να συμβεί μεταξύ μίας μηγανής και του υπόλοιπου συστήματος, ή μεταξύ διαφορετικών ομάδων μηγανών. Στην τελευταία περίπτωση, ο διαχωρισμός και η νησιδοποίηση των διαφορετικών ομάδων μπορεί να διατηρήσει τον συγχρονισμό σε κάθε νησίδα.

Η μεταβολή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής μίας σύγχρονης μετά από μία διαταραχή μπορεί να αναλυθεί στις εξής δύο συνιστώσες:

- Συνιστώσα ροπής συγχρονισμού, η οποία είναι σε φάση με την απόκλιση της γωνίας δρομέα.
- Συνιστώσα ροπής απόσβεσης, η οποία είναι σε φάση με την απόκλιση της ταχύτητας δρομέα.

Η ευστάθεια γωνίας εξαρτάται από την ύπαρξη και των δύο παραπάνω συνιστωσών της ηλεκτρομαγνητικής ροπής για κάθε σύγχρονη γεννήτρια. Ειδικότερα, η έλλειψη ροπής συγχρονισμού οδηγεί σε απεριοδική αστάθεια, ενώ η έλλειψη ροπής απόσβεσης σχετίζεται με την εμφάνιση ταλαντώσεων αυξανομένου πλάτους.

Προκειμένου να διευκολυνθεί η ανάλυση και να επιτευχθεί εμβάθυνση στην εσωτερική φύση των προβλημάτων αστάθειας γωνίας, γίνεται περαιτέρω διαχωρισμός σε προβλήματα αστάθειας μικρών διαταραχών και προβλήματα μεταβατικής αστάθειας.

Η ευστάθεια γωνίας μικρών διαταραχών σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να παραμένει σε συγχρονισμό μετά από μικρές διαταραχές, το μέγεθος των οποίων επιτρέπει την ανάλυση της ευστάθειας με τη γραμμικοποίηση του συστήματος κοντά σε μία περιοχή του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας [CTF96,IWG95,Kun94].

Η ευστάθεια μικρών διαταραχών εξαρτάται από την αρχική λειτουργική κατάσταση του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή, η αστάθεια μπορεί να εκδηλωθεί με τους εξής δύο τρόπους: α) την αύξηση της γωνίας δρομέα μέσω ενός απεριοδικού ρυθμού λόγω της έλλειψης ροπής συγχρονισμού, ή β) ταλαντώσεις δρομέα αυξανόμενου πλάτους λόγω της έλλειψης ροπής απόσβεσης.

Στα σύγχρονα ΣΗΕ, τα προβλήματα ευστάθειας γωνίας μικρών διαταραχών συνδέονται κατά κύριο λόγο με την ανεπαρκή απόσβεση των ταλαντώσεων. Το πρόβλημα της απεριοδικής αστάθειας δεν εμφανίζεται όταν είναι σε λειτουργία οι αυτόματοι ρυθμιστές τάσης των σύγχρονων γεννητριών [VPS96]. Ωστόσο, ο κίνδυνος εκδήλωσης παρόμοιων προβλημάτων αστάθειας παραμένει ορατός σε περιπτώσεις κατά τις οποίες οι γεννήτριες λειτουργούν υπό συνθήκες περιορισμού της διέγερσής τους.

Τα προβλήματα αστάθειας γωνίας μικρών διαταραχών μπορεί να περιοριστούν σε τοπικό επίπεδο ή να γενικευθούν σε όλο το δίκτυο. Σε τοπικό επίπεδο, τα προβλήματα αυτά εμπλέκουν ένα μικρό μέρος του συστήματος και σχετίζονται με την εμφάνιση ταλαντώσεων δρομέα στις γεννήτριες ενός σταθμού παραγωγής ως προς το υπόλοιπο δίκτυο. Οι ταλαντώσεις αυτού του είδους καλούνται τοπικές ταλαντώσεις. Η απόσβεση των ταλαντώσεων αυτών εξαρτάται από: a) το μέγεθος του συστήματος μεταφοράς όπως αυτό φαίνεται από τον τοπικό σταθμός παραγωγής, β) τις διατάξεις ρύθμισης της διέγερσης των γεννητριών και γ) την έξοδο του σταθμού [Kun94].

Τα προβλήματα αστάθειας γωνίας μπορούν να επεκταθούν σε όλο το δίκτυο μέσω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ μεγάλων ομάδων από σύγχρονες μηχανές. Στην περίπτωση αυτή, εμφανίζονται ταλαντώσεις που εμπλέκουν το σύνολο των σύγχρονων μηχανών ενός συστήματος με τις μηχανές ενός γειτονικού συστήματος, όταν αυτά συνδέονται μέσω ενός ασθενούς δικτύου μεταφοράς. Οι ταλαντώσεις αυτές ονομάζονται ταλαντώσεις διασυνδέσεων και εμφανίζουν πολύπλοκα χαρακτηριστικά, τα οποία τις κάνουν να διαφέρουν σημαντικά από τις τοπικές ταλαντώσεις [Nom05]. Στη μελέτη των ταλαντώσεων διασυνδέσεων σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν επίσης οι χαρακτηριστικές των φορτίων.

Η ευστάθεια μεγάλων διαταραχών ή μεταβατική ευστάθεια γωνίας σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να παραμένει σε συγχρονισμό μετά από αρκετά σοβαρές διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μία γραμμή μεταφοράς. Η απόκριση ενός δικτύου σε μία τόσο σοβαρή διαταραχή διακρίνεται από μεγάλες μεταβολές των γωνιών δρομέα των γεννητριών, ενώ επηρεάζεται έντονα από τη μη γραμμική χαρακτηριστική ενεργού ισχύος-γωνίας δρομέα.

Η μεταβατική ευστάθεια εξαρτάται τόσο από το αρχικό σημείο λειτουργίας του συστήματος όσο και από τη σοβαρότητα της διαταραχής. Η μεταβατική αστάθεια εμφανίζεται συνήθως με τη μορφή απεριοδικής απομάκρυνσης των γωνιών λόγω ανεπαρκούς ροπής συγχρονισμού, ενώ χαρακτηρίζεται με τον όρο ευστάθεια πρώτης ταλάντωσης. Εντούτοις, σε μεγάλα ΣΗΕ, η μεταβατική αστάθεια δεν εμφανίζεται πάντα ως ευστάθεια πρώτης ταλάντωσης, η οποία σχετίζεται με έναν μοναδικό ρυθμό, καθώς μπορεί να εκδηλωθεί ως αποτέλεσμα της επαλληλίας μίας αργής ταλάντωσης διασύνδεσης και μίας τοπικής ταλάντωσης, η οποία προκαλεί μία μεγάλη μεταβολή της γωνίας δρομέα μετά την πρώτη ταλάντωση [Kun94]. Επιπρόσθετα, η μεταβατική αστάθεια μπορεί να προκληθεί από την επίδραση μη γραμμικών φαινομένων σε έναν απλό ρυθμό πέρα από το χρονικό εύρος της πρώτης ταλάντωσης.

Το χρονικό διάστημα σε μελέτες ευστάθειας γωνίας είναι συνήθως της τάξης λίγων δευτερολέπτων μετά τη διαταραχή. Ωστόσο, σε περιπτώσεις αρκετά μεγάλων ΣΗΕ το διάστημα αυτό μπορεί να επεκταθεί σε λίγες δεκάδες δευτερολέπτων λόγω της κυριαρχίας των ταλαντώσεων διασυνδέσεων.

### 1.4.4 Ευστάθεια τάσης

Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτές τιμές τάσεων σε όλους τους ζυγούς όταν υποβάλλεται σε μία διαταραχή από ένα δεδομένο αρχικό σημείο λειτουργίας. Στην παρούσα εργασία υιοθετείται ο ακόλουθος ορισμός για την αστάθεια τάσης [VCV98]:

Η αστάθεια τάσης προκαλείται από την απόπειρα του φορτίου (μέσω της δυναμικής του συμπεριφοράς) να αυζήσει την ισχύ που καταναλώνει πέρα από τη φυσική ικανότητα μεταφοράς του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς

Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, η ευστάθεια τάσης εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ή να αποκαθιστά την ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης ισχύος των φορτίων. Η αστάθεια τάσης ενός συστήματος μπορεί να διαρκέσει από μερικά δευτερόλεπτα έως και μερικές δεκάδων λεπτών. Η εξέλιξη ενός σεναρίου αστάθειας τάσης μπορεί να έχει μία από τις παρακάτω καταλήξεις [Man98]:

- Μία μη ομαλή μόνιμη κατάσταση λειτουργίας σε εξαιρετικά χαμηλό επίπεδο τάσεων. Η κατάσταση αυτή εμφανίζεται συνήθως όταν οι μηχανισμοί που συνεισφέρουν στην αστάθεια απενεργοποιούνται επειδή συναντούν τα άνω ή κάτω όρια λειτουργίας τους. Τυπική περίπτωση είναι τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών, των οποίων οι λήψεις έχουν περιορισμένη περιοχή ρύθμισης.
- 2. Μία επιτάχυνση του φαινομένου, η οποία οδηγεί στην απότομη βύθιση των τάσεων στην περιοχή εμφάνισης του προβλήματος. Στην περίπτωση αυτή, το φαινόμενο ονομάζεται κατάρρευση τάσης. Η κατάρρευση τάσης έχει ως αποτέλεσμα τη μερική ή ολική σβέση του συστήματος.

Κοντά στο σημείο κατάρρευσης, η χρονική απόκριση των τάσεων στην περιοχή εμφάνισης του προβλήματος γίνεται πολύ γρήγορη για να καταλήξει σε μία κατακόρυφη πτώση τη χρονική στιγμή της κατάρρευσης [Kun94,Tay94]. Δηλαδή, στο σημείο της κατάρρευσης έχουμε μία ασυνέχεια στη λειτουργία του συστήματος, η οποία οφείλεται στη συνεχή συμπεριφορά του και όχι σε εξωτερικά από το σύστημα συμβάντα, όπως είναι για παράδειγμα ένα βραχυκύκλωμα ή το άνοιγμα μίας γραμμής διασύνδεσης. Γενικεύοντας την έννοια της κατάρρευσης, μπορούμε να δώσουμε τον εξής ορισμό:

Με τον όρο κατάρρευση εννοούμε μία απότομη καταστροφική μετάβαση (πρακτικά ακαριαία) της κατάστασης ενός συστήματος

Η τελική έκβαση ενός σεναρίου αστάθειας τάσης μπορεί να είναι είτε η απόρριψη φορτίου σε μία περιοχή του δικτύου, είτε η απώλεια μερικών γραμμών μεταφοράς ή άλλων διατάξεων λόγω της δράσης των αντίστοιχων συστημάτων προστασίας, οδηγώντας σε διαδοχικές απώλειες πρόσθετων στοιχείων του συστήματος. Οι απώλειες αυτές σε συνδυασμό με τη λειτουργία ορισμένων σύγχρονων γεννητριών υπό συνθήκες περιορισμού του ρεύματος πεδίου μπορούν να προκαλέσουν τον αποσυγχρονισμό των τελευταίων [AS03,VCV98].

Έτσι, η διαρκής πτώση των τάσεων μπορεί να συσχετιστεί με την εμφάνιση φαινομένων αστάθειας γωνίας. Στην περίπτωση αυτή, η δράση των συστημάτων προστασίας θα πρέπει να διαχωρίσει τις δύο ομάδες μηχανών, ώστε οι τάσεις να αποκατασταθούν σε αποδεκτά επίπεδα τιμών. Ωστόσο, εάν η νησιδοποίηση του συστήματος πραγματοποιηθεί με λανθασμένο τρόπο, η απώλεια συγχρονισμού θα οδηγήσει τις μηχανές σε υπερπήδηση πόλων μεταξύ τους.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 1.2, η κινητήρια δύναμη για την αστάθεια τάσης θα πρέπει να αναζητηθεί στη δυναμική των φορτίων [PWH05,ZZL00]. Στην αναφορά [MHW03] τονίζεται η σημασία της επαρκούς παράστασης των φορτίων στις μελέτες ευστάθειας τάσης, ενώ στην εργασία [PAM97a] διερευνάται η επίδραση των δυναμικών φορτίων που εξαρτώνται τόσο από την τάση όσο από τη συχνότητα στην ευστάθεια τάσης μικρών διαταραχών.

Ειδικότερα, μετά από μία διαταραχή, η καταναλισκόμενη ισχύς των φορτίων τείνει να αποκατασταθεί από: α) τη μεταβολή της ολίσθησης των κινητήρων επαγωγής, β) τη δράση των ρυθμιστών τάσης στο δίκτυο διανομής, γ) την ενεργοποίηση των μηχανισμών ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών, ή δ) τη δυναμική των αυτορυθμιζόμενων φορτίων. Η αποκατάσταση των φορτίων αυξάνει την άεργο φόρτιση του συστήματος στο δίκτυο μεταφοράς, οδηγώντας σε περαιτέρω πτώση των τάσεων.

Ένας σημαντικός παράγοντας που συνεισφέρει στη διέγερση των φαινομένων αστάθειας τάσης είναι η πεπερασμένη ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής-μεταφοράςδιανομής. Η ικανότητα μεταφοράς περιορίζεται καταρχήν από τις απώλειες ενεργού και αέργου ισχύος στα παθητικά στοιχεία του συστήματος. Επίσης, η υποστήριξη των τάσεων μπορεί να μειωθεί από τον περιορισμό διεγέρσεως των σύγχρονων γεννητριών.

Μολονότι στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, η αστάθεια τάσης συνοδεύεται από βαθμιαία πτώση των τάσεων, στην αναφορά [VCM97] εξετάζεται μία περίπτωση αστάθειας τάσης με ανύψωση των τάσεων, η οποία προκλήθηκε από τη χωρητική συμπεριφορά του δικτύου (οι γραμμές μεταφοράς υπερυψηλής τάσης λειτουργούσαν κάτω από το όριο φυσικής φόρτισης), σε συνδυασμό με την δράση συστημάτων προστασίας υποδιέγερσης, τα οποία προστατεύουν τις σύγχρονες γεννήτριες από την απορρόφηση της περίσσειας αέργου ισχύος. Στην περίπτωση αυτή, η αστάθεια τάσης σχετίζεται με την ανικανότητα του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς να λειτουργεί κάτω από ένα επίπεδο φόρτισης. Ειδικότερα, η αστάθεια τάσης προκλήθηκε στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα από τη δράση των μηχανισμών ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών, όταν οι τελευταίοι προσπάθησαν να αποκαταστήσουν τη φόρτιση σε επίπεδα κάτω από το χαμηλότερο επιτρεπτό.

Επιπρόσθετα, προβλήματα αστάθειας τάσης είναι πιθανό να εκδηλωθούν στους τερματικούς ζυγούς των γραμμών ΣΡ, κατά τη διασύνδεση ασθενών συστημάτων. Τα προβλήματα αυτά εμφανίζονται στους σταθμούς των ανορθωτών ή των αντιστροφέων και σχετίζονται με την ανεπιθύμητη χαρακτηριστική της αέργου φόρτισης των μετατροπέων. Η στρατηγική ελέγχου των τερματικών σταθμών των γραμμών ΣΡ διαδραματίζει σημαντικό ρόλο την αποφυγή της αστάθειας, καθώς καθορίζει τη ροή ενεργού και αέργου ισχύος στους συνδέσμους συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος. Εάν ο παραπάνω έλεγχος προκαλέσει φόρτιση του εναλλασσόμενου συστήματος πέρα από την ικανότητα μεταφοράς του, θα δημιουργηθούν προβλήματα αστάθειας τάσης. Στην περίπτωση αυτή, η εξέλιξη του φαινομένου είναι αρκετά γρήγορη, καθώς εκδηλώνεται σε χρονικό διάστημα μικρότερο του ενός δευτερολέπτου. Εκτός αυτού, αστάθεια τάσης μπορεί να προκληθεί στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα λόγω του ελέγχου στους μετατροπείς των μηχανισμών ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών. Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο ότι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία των γραμμών ΣΡ (χρήση μετατροπέων πηγής τάσης και μετατροπέων με πυκνωτές μεταγωγής) έχουν αυξήσει σημαντικά τα όρια ευσταθούς λειτουργίας των γραμμών ΣΡ σε περιπτώσεις διασύνδεσης ασθενών συστημάτων, σε σχέση με τα αντίστοιχα όρια που προκύπτουν από τη χρήση μετατροπέων με μεταγωγή από την τάση της γραμμής.

Όπως και στην περίπτωση της ευστάθειας γωνίας, η ευστάθεια τάσης μπορεί να διαχωριστεί σε ευστάθεια μεγάλων και μικρών διαταραχών.

Η ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτά επίπεδα τάσεων σε όλους τους ζυγούς ύστερα από σοβαρές διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα η απώλεια μίας μεγάλης μονάδας παραγωγής ή μίας γραμμής διασύνδεσης. Η ικανότητα αυτή προσδιορίζεται από τις χαρακτηριστικές του δικτύου και των φορτίων, καθώς επίσης και από την αλληλεπίδραση μεταξύ των συνεχών και διακριτών συστημάτων προστασίας και ελέγχου. Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης μεγάλων διαταραχών προϋποθέτει την εξέταση της μη γραμμικής απόκρισης του συστήματος για ικανό χρονικό διάστημα, προκειμένου να εξακριβωθεί επακριβώς η συμπεριφορά και οι αλληλεπίδράσεις μεταξύ των συναμικών διατάξεων του δικτύου, όπως οι σύγχρονες γεννήτριες συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων ελέγχου και προστασίας, οι κινητήρες και τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών διανομής.

Η ευστάθεια τάσης μικρών διαταραχών αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτά επίπεδα τάσεων σε όλους τους ζυγούς, όταν υπόκειται σε μικρές διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα μία ελάχιστη αύξηση στη ζήτηση ενός συγκεκριμένου φορτίου. Ο εξεταζόμενος τύπος ευστάθειας εξαρτάται από τη χαρακτηριστική των φορτίων και των συνεχών ή διακριτών διατάξεων ελέγχου σε μία δεδομένη χρονική στιγμή λειτουργίας. Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης μικρών διαταραχών πραγματοποιείται με γραμμικοποίηση του συστήματος κοντά σε μία περιοχή του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας, λαμβάνοντας υπόψη ένα σύνολο απλουστευτικών παραδοχών. Η γραμμικοποίηση οδηγεί στον υπολογισμό διαφόρων δεικτών και μεγεθών, τα οποία επηρεάζουν την ευστάθεια του συστήματος. Επίσης, προσδιορίζεται η απόκριση των τάσεων σε μικρές μεταβολές των εισόδων ή των παραμέτρων του συστήματος. Σημειώνεται ότι η γραμμικοποίηση δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση των μη γραμμικών φαινομένων των ΣΑΤΥΦ στους μετασχηματιστές. Για τις περιπτώσεις αυτές, παρουσιάζεται στην αναφορά [GMK96] μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία αντιμετώπισης των γραμμικών και μη γραμμικών φαινομένων.

Στις μελέτες ευστάθειας τάσης, το χρονικό διάστημα του ενδιαφέροντος κυμαίνεται από λίγα δευτερόλεπτα έως μερικές δεκάδες λεπτών. Επομένως, τα φαινόμενα ευστάθειας τάσης μπορεί να ανήκουν τόσο στη βραχυπρόθεσμη όσο και στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, όπως φαίνεται και από την κατηγοριοποίηση του Πίνακα 1.2.

Η βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης αναφέρεται στη δυναμική συμπεριφορά των γρήγορων συνιστωσών ενός ΣΗΕ, όπως είναι οι σύγχρονες μηχανές, οι μηχανές επαγωγής (φορτία αλλά και γεννήτριες), τα ηλεκτρονικά ελεγχόμενα φορτία, καθώς επίσης και οι μετατροπείς ισχύος, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως τόσο για τη σύνδεση στο δίκτυο των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής όσο και στους τερματικούς σταθμών των γραμμών ΣΡ. Επιπρόσθετα, στις γρήγορες διατάξεις των ΣΗΕ συμπεριλαμβάνονται και τα Συστήματα Προστασίας Υπερδιεγέρσεως (ΣΠΥ) των σύγχρονων γεννητριών, εφόσον τα τελευταία ενεργοποιούνται στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Η απόκριση των δυναμικών αυτών διατάξεων παριστάνεται με κατάλληλα συστήματα διαφορικών εξισώσεων και εξισώσεων διαφορών. Επίσης, η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης σχετίζεται με την ανάλυση βραχυκυκλωμάτων κοντά στα φορτία, σε αντίθεση με την αστάθεια γωνίας όπου το αντίστοιχο ενδιαφέρον εστιάζεται κοντά στις μονάδες παραγωγής. Στην περίπτωση της βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης, η χρονική κλίμακα είναι της τάξεως μερικών δευτερολέπτων, όπως δηλαδή και στην περίπτωση της ευστάθειας γωνίας. Αυτό προκαλεί δυσκολία στην αναγνώριση και ταξινόμηση κάποιων φαινομένων [PR96,VSP96], όπως θα φανεί στη συνέχεια.

Από την άλλη πλευρά, στη μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης επιδρούν βραδύτερες διατάξεις ενός ΣΗΕ, όπως είναι η βαθμίδα περιορισμού του ρεύματος πεδίου στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή μονίμου καταστάσεως των ΣΠΥ των σύγχρονων γεννητριών, τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών διανομής, οι Αυτόματοι Μηχανισμοί Ζεύξεως-Αποζεύξεως Στατών Πυκνωτών και τα θερμοστατικά φορτία. Για την ανάλυση της μακροπρόθεσμης ευστάθειας τάσης απαιτούνται δυναμικές προσομοιώσεις της συμπεριφοράς του συστήματος για ένα χρονικό διάστημα μερικών λεπτών. Στις περιπτώσεις αυτές, η αστάθεια μπορεί να οφείλεται: α) στην απώλεια μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας, β) στην επίτευξη μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας, το οποίο ωστόσο είναι ασταθές από πλευράς ευστάθειας μικρών διαταραχών, ή γ) στην απώλεια της περιοχής έλξης του ευσταθούς σημείου ισορροπίας μετά τη διαταραχή, εάν για παράδειγμα οι διορθωτικές κινήσεις εφαρμοστούν σχετικά αργά. Σε πολλές μελέτες μακροπρόθεσμης ευστάθειας τάσης, χρησιμοποιούνται στατικές μέθοδοι ανάλυσης των φαινομένων [GMK96], προκειμένου να εκτιμηθούν τα όρια της ευστάθειας και να γίνει αναγνώριση των μηχανισμών που επηρεάζουν την ευστάθεια του δικτύου, καθώς επίσης και να αναλυθεί ένας μεγαλύτερος αριθμών διαταραχών λαμβάνοντας υπόψη ένα πλατύτερο εύρος λειτουργικών συνθηκών του συστήματος. Στις περιπτώσεις αξιολόγησης μέτρων αντιμετώπισης των προβλημάτων μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης, κατά τις οποίες η χρονική στιγμή λήψης των διορθωτικών μέτρων είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, απαιτούνται εκτεταμένες χρονικές προσομοιώσεις του δικτύου. Στις περιπτώσεις αυτές, χρησιμοποιούνται τεχνικές προσομοίωσης με Οιονεί Στατικές Μεταβολές [VCV98], για τις οποίες θα γίνει εκτενέστερη αναφορά σε επόμενη ενότητα.

### 1.4.5 Ευστάθεια συχνότητας

Η ευστάθεια συχνότητας αναφέρεται στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί τη συχνότητά του εντός ενός προκαθορισμένου εύρους τιμών μετά από μία διαταραχή, η οποία διαταράσσει το συνολικό ισοζύγιο μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος [Kun04,VCV98]. Ειδικότερα, η ευστάθεια συχνότητας εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ή να επαναφέρει το ισοζύγιο μεταξύ παραγωγής και ζήτησης με τη μικρότερη δυνατή απόρριψη παραγωγής ή φορτίου. Στην περίπτωση αυτή, μία πιθανή αστάθεια εκδηλώνεται με τη μορφή συνεχών ταλαντώσεων στην τιμή της συχνότητας, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στη διαδοχική αποκοπή μονάδων παραγωγής και φορτίων μέχρι την ολική σβέση του συστήματος.

Οι αρκετά σοβαρές διαταραχές δημιουργούν μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές της συχνότητας, των ροών ισχύος, των τάσεων και άλλων μεταβλητών του συστήματος, οδηγώντας σε ενεργοποίηση διατάξεων προστασίας και ελέγχου, των οποίων η συνεισφορά στην ανάλυση της μεταβατικής ευστάθειας ή της ευστάθειας τάσης θεωρείται αμελητέα. Στις διατάξεις αυτές περιλαμβάνονται οι ατμοπαραγωγοί των ατμοηλεκτρικών μονάδων, καθώς επίσης και τα συστήματα προστασίας που ενεργοποιούνται σε εξαιρετικά κρίσιμες καταστάσεις, όπως είναι για παράδειγμα τα συστήματα προστασίας μαγνητικής ροής (V/Hz limiters) των σύγχρονων γεννητριών. Σημειώνεται ότι οι διατάξεις αυτές αυτές ανήκουν κατά κύριο λόγο στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα, το ενδιαφέρον σε μελέτες ευστάθειας συχνότητας επικεντρώνεται στις λειτουργικές συνθήκες, οι οποίες δημιουργούνται μετά το διαχωρισμό του συστήματος σε ξεχωριστές νησίδες. Στις περιπτώσεις αυτές, το κρίσιμο ερώτημα είναι εάν κάθε νησίδα επιτύχει ευσταθές λειτουργικό σημείο μετά τη διαταραχή με τη μικρότερη δυνατή απόρριψη παραγωγής ή φορτίου. Η ευστάθεια συχνότητας προσδιορίζεται περισσότερο από τη συνολική απόκριση της μέσης συχνότητας κάθε νησίδας, παρά από τη σχετική δυναμική κίνηση των στρεφόμενων μηχανών.

Σε γενικές γραμμές, τα προβλήματα αστάθειας συχνότητας σχετίζονται με αστοχίες του εξοπλισμού προστασίας, με ανεπιτυχή συνεργασία μεταξύ των διατάξεων ελέγχου και προστασίας, με έλλειψη στρεφόμενης εφεδρείας ή με περίσσεια παραγωγής μετά από νησιδοποίηση [CTF99]. Σε απομονωμένα νησιωτικά συστήματα, η ανάλυσης της ευστάθειας συχνότητας εξετάζεται για κάθε σενάριο διαταραχής, το οποίο προκαλεί σημαντική απώλεια παραγωγής ή φορτίου [HKH98]. Η ανάλυση ευστάθειας συχνότητας συχνότητας πραγματοποιείται με εξαγωγή κατάλληλων ισοδυνάμων μοντέλων, σύμφωνα με τα οποία θεωρείται ότι όλες οι γεννήτριες και όλα τα φορτία κάθε νησίδας συνδέονται σε έναν κοινό ζυγό.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 1.2, τα φαινόμενα ευστάθειας συχνότητας κατατάσσονται στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, διότι στη διέγερσή τους κυρίαρχο ρόλο διαδραματίζουν ορισμένες αργές συνιστώσες του συστήματος, όπως είναι για παράδειγμα οι στρόβιλοι και οι αντίστοιχοι ρυθμιστές στροφών των μονάδων παραγωγής, καθώς επίσης και τα συστήματα ελέγχου και προστασίας των σύγχρονων γεννητριών.

#### 1.4.6 Συμπεράσματα από την κατηγοριοποίηση των φαινομένων ευστάθειας ΣΗΕ

Σύμφωνα με τα όσα προαναφέρθηκαν, στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι πιθανό να εκδηλωθούν προβλήματα αστάθειας δύο ειδών, τάσης και συχνότητας, τα οποία ωστόσο είναι σε μεγάλο βαθμό ευδιάκριτα μεταξύ τους. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από τους ορισμούς της ευστάθειας τάσης και συχνότητας, με την ειδοποιό διαφορά να εντοπίζεται στο ρόλο του δικτύου μεταφοράς. Ειδικότερα, στην ανάλυση της ευστάθειας συχνότητας το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στο

ισοζύγιο μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενεργού ισχύος, με το δίκτυο μεταφοράς να θεωρείται ως ένας ισοδύναμος ζυγός όπου συνδέονται παραγωγές και φορτία. Αντίθετα, στην περίπτωση της αστάθειας τάσης το δίκτυο μεταφοράς παίζει πρωτεύοντα ρόλο, αφού η υπέρβαση του ορίου μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος [VCV98,Man98] είναι αυτή που δεν επιτρέπει στην παραγόμενη ισχύ από τις γεννήτριες να μεταφερθεί στα φορτία.

Από την άλλη πλευρά, τα φαινόμενα αστάθειας στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα παρουσιάζουν μεγαλύτερες δυσκολίες ως προς τη διάκριση και αναγνώρισή τους [PR96,VSP96]. Κατά πρώτον, θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι η διάκριση μεταξύ των φαινομένων βραχυπρόθεσμης αστάθειας γωνίας και τάσης δεν μπορεί να βασιστεί στο συμβατικό διαχωρισμό και στην απόζευξη μεταξύ ενεργού ισχύος-γωνίας από τη μία και αέργου ισχύος-τάσης από την άλλη. Στην πραγματικότητα, οι παραπάνω διαχωρισμοί ισχύουν περισσότερο σε συνθήκες χαμηλής φόρτισης του δικτύου, ενώ οι αποκρίσεις τόσο των γωνιών δρομέα των σύγχρονων γεννητριών όσο και του μέτρου των τάσεων σε όλους τους ζυγούς εξαρτώνται σημαντικά από τις ροές ενεργού και αέργου ισχύος στο δίκτυο, όταν αυτό είναι κοντά στο όριο φόρτισης.

Καταλήγοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι η αναγνώριση της κινητήριας δύναμης σε ένα μηχανισμό αστάθειας, σύμφωνα με τον Πίνακα 1.2, δεν εξαιρεί την επίδραση των υπολοίπων συνιστωσών στο μηχανισμό αυτό. Για παράδειγμα, η δυναμική συμπεριφορά των φορτίων επηρεάζει σαφώς την ευστάθεια γωνίας του δρομέα των σύγχρονων γεννητριών [Nom05]. Ομοίως, η σωστή παράσταση των γεννητριών είναι σημαντική ώστε να αναλυθεί ορθά το φαινόμενο της ευστάθειας τάσης.

# 1.5 Σύντομη Περιγραφή Διατάξεων

### 1.5.1 Διατάξεις στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα

Οι κυριότερες συνιστώσες ενός ΣΗΕ, των οποίων η δυναμική κατατάσσεται στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, είναι οι εξής:

### 1. Σύγχρονες Γεννήτριες

Η δυναμική των σύγχρονων γεννητριών περιγράφεται από τις εξισώσεις ταλάντωσης δρομέα και τις ηλεκτρικές διαφορικές εξισώσεις των τυλιγμάτων του δρομέα της μηχανής (βλ. ενότητες 2.1.3 και 2.1.4). Οι εξισώσεις ταλάντωσης περιγράφουν τις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις, οι οποίες διεγείρονται στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα ύστερα από συγκεκριμένες διαταραχές [Kun94,SP98,VCV98]. Η ανάλυση των ταλαντώσεων αναφέρεται στη μελέτη ευστάθειας μονίμου καταστάσεως. Κυρίαρχο ρόλο στην ευστάθειας τάσης διαδραματίζουν οι ηλεκτρικές διαφορικές εξισώσεις των τυλιγμάτων του δρομέα, και ιδιαίτερα η δυναμική απόκριση του πεδίου διεγέρσεως [KWS00].

#### 2. Αυτόματοι Ρυθμιστές Τάσεως

Ο ρόλος των Αυτόματων Ρυθμιστών Τάσης (APT) είναι να κρατούν σχεδόν σταθερή την τάση στον τερματικό ζυγό της γεννήτριας, επεμβαίνοντας στην τάση διεγέρσεως της μηχανής [Kun94,IWG81]. Η άεργος παραγωγή της γεννήτριας προσαρμόζεται έτσι αυτόματα στη μεταβαλλόμενη ζήτηση.

### 3. Συστήματα Προστασίας Υπερδιεγέρσεως

Το Σύστημα Προστασίας Υπερδιεγέρσεως (ΣΠΥ) προστατεύει το τύλιγμα πεδίου μία σύγχρονης μηχανής από ανεπιθύμητες υπερεντάσεις, παρεμβαίνοντας όταν η ένταση του ρεύματος διέγερσης ξεπεράσει κάποια μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή εμποδίζοντας την περαιτέρω αύξησή του [ITF95,MDV00,VMS99].

Ανάλογα με το μέγεθος της υπερδιέγερσης, το ΣΠΥ μπορεί να δράσει είτε στη βραχυπρόθεσμη είτε στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα (βλ. ενότητα 2.3). Για παράδειγμα, εάν το ρεύμα διεγέρσεως ξεπεράσει αρκετά τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του, το ΣΠΥ περιορίζει αρχικά το ρεύμα αυτό σε μία μέγιστη μεταβατική τιμή με πολύ μικρή χρονική καθυστέρηση (της τάξεως μερικών δεκάτων του δευτερολέπτου), ενώ στη συνέχεια ακολουθεί ένας σαφώς βραδύτερος (της τάξεως μερικών δεκάδων δευτερολέπτων) περιορισμός στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή. Ο περιορισμός του ρεύματος διεγέρσεως έχει σαν αποτέλεσμα ότι η γεννήτρια δεν μπορεί να κρατήσει σταθερή την τερματική της τάση και ούτε να αυξήσει, αν χρειαστεί, την παροχή αέργου ισχύος προς το δίκτυο.

Η έλλειψη ικανότητας της γεννήτριας για προσφορά αέργου ισχύος - μετά την ενεργοποίηση του ΣΠΥ - παίζει σημαντικό ρόλο στην αστάθεια τάσης. Ο μηχανισμός αστάθειας έχει ως εξής: Όταν τα μέσα άεργης αντιστάθμισης στους τοπικούς ζυγούς του δικτύου δεν μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις του φορτίου σε άεργο ισχύ, οι τοπικές γεννήτριες παράγουν την απαιτούμενη άεργο ισχύ. Έτσι, οι γεννήτριες αυτές πρέπει να αυξήσουν τη διέγερσή τους για να διατηρηθεί το επίθυμητό επίπεδο τάσεων στο δίκτυο. Όταν η ζητούμενη άεργος ισχύς είναι μεγάλη, μία γεννήτρια μπορεί να φτάσει το όριό της σε παραγωγή αέργου ισχύος. Αν συμβεί αυτό, η τερματική τάση της γεννήτριας θα μειωθεί με συνολικό αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση των τάσεων του συστήματος. Η διαδικασία αυτή μπορεί να εξαπλωθεί και σε άλλες γεννήτριες του δικτύου προκαλώντας αλυσιδωτά φαινόμενα και να οδηγήσει σε κατάρρευση τάσεως του συστήματος [Kun94,Tay94,PPR02].

#### 4. Σταθεροποιητές Συστήματος Ισχύος

Ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος επιδρά βραχυπρόθεσμα στο σύστημα διέγερσης μίας σύγχρονης γεννήτριας με σκοπό να παρέχει πρόσθετη ροπή απόσβεσης για τον περιορισμό του πλάτους των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων (βλ. ενότητα 2.4) [Nom05].

#### 5. Μηχανές Επαγωγής

Οι μηχανές επαγωγής [KWS00] είναι στη γενική περίπτωση φορτία με γρήγορη επαναφορά (της τάξης του δευτερολέπτου), ενώ παράλληλα αδυνατούν να παράγουν από μόνες τους την απαιτούμενη άεργο ισχύ για την εγκατάσταση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο διάκενό τους (βλ. ενότητα 2.5). Για τους λόγους αυτούς καθώς επίσης και λόγω του διαρκώς αυξανόμενου ποσοστού τους στη σύνθεση των ηλεκτρικών φορτίων, οι ασύγχρονες μηχανές θεωρούνται από τους κυριότερους παράγοντες που επιδρούν στη βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης στα σύγχρονα ΣΗΕ [Tay94,DLT02].

Σήμερα, οι ασύγχρονοι κινητήρες δεν χρησιμοποιούνται μόνο στη βιομηχανία [MM01] αλλά και στον εξοπλισμό ενός νοικοκυριού (κλιματιστικά κτλ), με αποτέλεσμα ένα σημαντικό τμήμα των ηλεκτρικών φορτίων (ακόμα και των οικιακών) να παρουσιάζει έντονη δυναμική συμπεριφορά. Επίσης, πολλά από τα υφιστάμενα αιολικά πάρκα είναι εξοπλισμένα με ανεμογεννήτριες επαγωγής για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Σε ένα ενδεχόμενο πτώσης των τάσεων στους ζυγούς ενός δικτύου, η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης των μηχανών επαγωγής μπορεί να εκδηλωθεί με τις εξής δύο μορφές [VCV98]:

α) Απώλεια του σημείου ισορροπίας μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής και της μηχανικής ροπής (λειτουργία κινητήρα ή γεννήτριας).

β) Απώλεια της περιοχής έλξης του ευσταθούς σημείου ισορροπίας.

Εάν μία ασύγχρονη μηχανή οδηγηθεί σε αστάθεια, ενώ παραμένει συνδεδεμένη με το δίκτυο, είναι δυνατόν να συμπαρασύρει σε αστάθεια και άλλες γειτονικές μηχανές, με αποτέλεσμα τη μερική ή ολική κατάρρευση τάσης του συστήματος [SO90, Tay94,VM98].

#### 6. Γραμμές Συνεχούς Ρεύματος

Οι γραμμές ΣΡ χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια για μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις (λόγω των μικρότερων απωλειών που παρουσιάζουν σε σχέση με τις κλασσικές γραμμές μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος και του γεγονότος ότι η ροή τους ελέγχεται σχετικά εύκολα) και για ασύγχρονες διασυνδέσεις (δηλαδή για διασυνδέσεις μεταξύ συστημάτων με διαφορετική συχνότητα). Οι γραμμές ΣΡ είναι πιθανό να συνεισφέρουν σε ένα σενάριο βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης λόγω των κυκλωμάτων ηλεκτρονικών ισχύος στους τερματικούς σταθμούς στο επίπεδο της Υψηλής Τάσης.

Συγκεκριμένα, τα κυκλώματα αυτά διαθέτουν μεγάλες συστοιχίες εγκάρσιων πυκνωτών (φίλτρων) για χωρητική αντιστάθμιση, οι οποίες μειώνουν ανάλογα με το τετράγωνο της τάσης την άεργο υποστήριξη στο δίκτυο, ενώ σε μία ενδεχόμενη πτώση των τάσεων στους ζυγούς, τα κυκλώματα αντιστροφέων αυξάνουν την άεργο κατανάλωσή τους. Οπότε, δυναμικά ο σταθμός μετατροπής αυξάνει τη ζήτηση αέργου ισχύος, όταν πέφτει η τάση. Τα προβλήματα αυτά εντείνονται ακόμα περισσότερο, όταν οι γραμμές ΣΡ συνδέονται σε ασθενείς ζυγούς του συστήματος [Tay94].

### 7. Υδροηλεκτρικές Μονάδες

Οι υδροστρόβιλοι συναντώνται τόσο σε μεγάλες υδροηλεκτρικές μονάδες όσο και σε μικρά υδροηλεκτρικά εργοστάσια, τα οποία ανήκουν στην κατηγορία της διεσπαρμένης παραγωγής. Η καθυστέρηση στην απόκριση του υδροστροβίλου εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού προσαγωγής (βλ. ενότητα 2.7.2). Επιπλέον, προκειμένου να περιοριστεί το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος, οι ρυθμιστές στροφών των υδροστροβίλων εξοπλίζονται με μία βαθμίδα μεταβατικού στατισμού, η οποία εμφανίζει μεγάλη χρονική σταθερά επαναφοράς (βλ. ενότητα 2.7.3) [MBB97,VD93,VP95,VZ93].

### 8. Ντηζελοηλεκτρικές Μονάδες

Σε ασθενή αυτόνομα δίκτυα (π.χ. νησιωτικά ΣΗΕ), οι ντηζελογεννήτριες χρησιμοποιούνται ευρέως για την υποστήριξη της συμβατικής παραγωγής. Επειδή οι ντηζελομηχανές χαρακτηρίζονται από γρήγορη απόκριση, θεωρείται ότι η μοναδική σημαντική χρονική καθυστέρηση (της τάξεως του δευτερολέπτου) εισάγεται λόγω του ρυθμιστή στροφών [Pap97].

### 9. Στατά Συστήματα Αέργου Αντιστάθμισης

Για την αντιμετώπιση προβλημάτων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης, απαιτείται σε ορισμένες περιπτώσεις η εγκατάσταση στατών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης [Mil82,Tay94]. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από συστοιχίες πηνίων και πυκνωτών με αρμονικά φίλτρα (βλ. ενότητα 2.10.2). Η έναυση των συστοιχιών ελέγχεται από κυκλώματα θυρίστορ, τα οποία εμφανίζουν πολύ μικρές χρονικές καθυστερήσεις έως μερικών εκατοστών του δευτερολέπτου, με αποτέλεσμα τη γρήγορη και ακριβή ρύθμιση των τοπικών τάσεων [Tay03].

### 1.5.2 Διατάξεις στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα

Οι κυριότερες συνιστώσες ενός ΣΗΕ, των οποίων η δυναμική απόκριση ανήκει στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, είναι οι εξής:

### 1. Ατμοηλεκτρικές Μονάδες

Μία ατμοηλεκτρική μονάδα αποτελείται από τον ατμοπαραγωγό, τον ατμοστρόβιλο με τον ρυθμιστή στροφών, καθώς επίσης και από αντίστοιγο τη σύγχρονη γεννήτρια συμπεριλαμβανομένων των διατάξεων ελέγχου και προστασίας αυτής [PV91]. Η απόκριση των μονάδων αυτών κατατάσσεται στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, λόγω της μεγάλης χρονικής καθυστέρησης (της τάξεως μερικών λεπτών) με την οποία μεταβάλλεται η ροή ατμού στο τύμπανο του ατμοπαραγωγού (βλ. ενότητα 2.6.1) [Che90]. Επίσης, σημαντικές χρονικές καθυστερήσεις (της τάξεως λίγων δεκάδων δευτερολέπτων) εισάγονται λόγω του χρόνου καύσης και ατμοποίησης στον ατμοπαραγωγό, καθώς επίσης και λόγω της βαθμίδας αναθέρμανσης του ατμοστροβίλου (βλ. ενότητα 2.6.2) [Kun94, MBB97].

### 2. Συστήματα Αλλαγής Τάσεως Υπό Φορτίο

Τα Συστήματα Αλλαγής Τάσεως Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ), με τα οποία εξοπλίζονται συνήθως οι μετασχηματιστές διανομής ΥΤ/ΜΤ, λειτουργούν με διακριτό τρόπο προσπαθώντας να διατηρήσουν την τάση σε έναν ελεγχόμενο ζυγό (που είναι συνήθως ο ζυγός μέσης τάσης) σε ένα επιθυμητό εύρος τιμών. Ο τρόπος λειτουργίας τους έχει ως εξής [Kun94]: κάθε φορά που η τάση στον ελεγχόμενο ζυγό απομακρύνεται από τα επιθυμητά όρια, το ΣΑΤΥΦ μεταβάλλει το λόγο των σπειρών του μετασχηματιστή, προκειμένου η τάση να επανέλθει στα αποδεκτά όρια (βλ. ενότητα 2.9). Το χρονικό διάστημα επαναφοράς της ελεγχόμενης τάσης εντός των επιθυμητών ορίων κυμαίνεται από μερικές δεκάδες δευτερολέπτων έως λίγα λεπτά.

Η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ, υπό ορισμένες συνθήκες, μπορεί να καταστεί ασταθής, δηλαδή αντί να επαναφέρει την τάση του ελεγχόμενου ζυγού στα επιθυμητά όρια, να την απομακρύνει ολοένα και περισσότερο. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν το σημείο λειτουργίας του συστήματος ξεπεράσει το όριο Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος [Man98]. Η ασταθής αυτή λειτουργία του ΣΑΤΥΦ μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση τάσεως του συστήματος [Tay94,VCV98].

### 3. Αυτόματοι Μηχανισμοί Ζεύξης-Απόζευξης Στατών Πυκνωτών

Οι Αυτόματοι Μηχανισμοί Ζεύξης-Απόζευξης Στατών Πυκνωτών παίζουν σημαντικό ρόλο στη διατήρηση των τάσεων του δικτύου σε ικανοποιητικά επίπεδα, εξαιτίας της ισχυρής εξάρτησης της τάσης από την παροχή αέργου ισχύος (βλ. ενότητα 2.10.1). Η λειτουργία τους έχει ως εξής

[Mil82,Tay94]: όταν η τάση ή ο συντελεστής ισχύος στον ελεγχόμενο ζυγό πέσει κάτω από μία επιθυμητή για ένα χρονικό διάστημα λίγων δεκάδων δευτερολέπτων, συνδέεται στο δίκτυο μία νέα συστοιχία πυκνωτών, ώστε να καλυφθεί η ανεπάρκεια του ζυγού σε άεργο ισχύ. Ωστόσο, τα ευεργετικά αποτελέσματα της αέργου αντιστάθμισης εξασθενούν σημαντικά σε ενδεχόμενη πτώση των τάσεων, διότι η παροχή ισχύος από τις συστοιχίες πυκνωτών μειώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της τάσης [DLT02,Tay03,VCV98].

### 4. Επαναφερόμενα Φορτία

Στην κατηγορία αυτή θεωρείται ότι ανήκουν όλα τα δυναμικά φορτία, τα οποία μετά από μία διαταραχή τείνουν να επαναφέρουν την καταναλισκόμενη ισχύ τους, ακολουθώντας μία εκθετική χαρακτηριστική μονίμου καταστάσεως, όπως είναι π.χ. τα θερμοστατικά φορτία (βλ. ενότητα 2.8.2). Το χρονικό διάστημα επαναφοράς είναι της τάξεως λίγων λεπτών [VCV98].

# 1.6 Επισκόπηση Βιβλιογραφίας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται μία επισκόπηση της βιβλιογραφίας, η οποία σχετίζεται με τις ιδέες και μεθοδολογίες που αναπτύσσονται στην παρούσα διατριβή. Συγκεκριμένα, οι σημαντικότερες ερευνητικές περιοχές στις οποίες αναφέρεται η διατριβή είναι:

- 1. Διεσπαρμένη παραγωγή και διείσδυση αιολικής ενέργειας.
- 2. Μέθοδοι ανάλυσης φαινόμενων αστάθειας ΣΗΕ.
- 3. Ανάπτυξη εκπαιδευτικών εργαλείων προσομοίωσης ΣΗΕ.
- 4. Διερεύνηση προβλημάτων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης και διορθωτικά μέτρα αντιμετώπισης των προβλημάτων αυτών.

### 1.6.1 Διεσπαρμένη παραγωγή και διείσδυση αιολικής ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια, πολλοί ερευνητές και μηχανικοί των ΣΗΕ έχουν ασχοληθεί με την επίδραση της διείσδυσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα προβλήματα ευστάθειας των ΣΗΕ.

Συγκεκριμένα, στην εργασία [DDT96] αναλύεται η επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής στη μεταβατική ευστάθεια και στην ευστάθεια μικρών διαταραχών. Στην αναφορά [BSN99] εξετάζονται διάφορα προβλήματα μεταβατικής ευστάθειας, τα οποία προκαλούνται από τις διασκορπισμένες σύγχρονες γεννήτριες, οι οποίες κατά κύριο λόγο εμφανίζουν σχετικά μικρές σταθερές αδράνειας. Στην εργασία [PH01] εξάγονται ορισμένοι τεχνικοί περιορισμοί για τη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη ενδεχόμενα προβλήματα ποιότητας ισχύος. Στην αναφορά [SK02] διερευνάται η επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής στις μελέτες μεταβατικής ευστάθειας. Επίσης, στην εργασία [MD02] εξετάζεται η συνεισφορά μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής παραγωγής παραγωγής και ασύγχρονες μηχανές στα φαινόμενα ευστάθειας τάσης και μεταβατικής ευστάθειας. Στην αναφορά [WM02] μελετάται η επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής στην ανάλυση της ευστάθειας συχνότητας, καθώς επίσης και οι τροποποιήσεις που πρέπει να γίνουν στους αντίστοιχους μηχανισμούς προστασίας και ελέγχου, οι οποίες οδηγούν στη νησιδοποίηση του συστήματος. Στη δημοσίευση [RSS03] πραγματοποιείται μία διερεύνηση των ορίων διείσδυσης διαφόρων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής από πλευράς μεταβατικής ευστάθειας. Στην αναφορά [SS03] πραγματοποιείται μία διερεύνηση των ορίων διείσδυσης διαφόρων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στη ναιδροση της διεσπαρμένης παραγωγής στην ανάλυση της ευστάθειας τάσης και ελέγχου, οι οποίες οδηγούν στη νησιδοποίηση του συστήματος. Στη δημοσίευση [RSS03] πραγματοποιείται μία διερεύνηση των ορίων διείσδυσης διαφόρων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στην ανάλύεται η επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής στην ανάλυση της ευστάθειας τάσης και ελέγχου, οι οποίες οδηγούν στη νησιδοποίηση του συστήματος. Στη δημοσίευση [RSS03] πραγματοποιείται μία διερεύνηση των ορίων διείσδυσης διαφόρων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής από πλευράς μεταβατικής ευστάθειας. Στην αναφορά [VTD04] αναλύεται η επίδραση της διείσδυσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής από πλευράς μεταβατικής ευστάθειας.

Μία σημαντική κατηγορία μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι οι κυψέλες καυσίμου. Στην εργασία [JVC04] εξετάζεται η επίδραση των κυψελών καυσίμου στην ευστάθεια τάσης και στη μεταβατική ευστάθεια του δικτύου.

Στις αναφορές [HKJ04,KST05] αναπτύσσονται τα κυριότερα μοντέλα συνιστωσών της διεσπαρμένης παραγωγής, όπως είναι για παράδειγμα οι ασύγχρονες ανεμογεννήτριες, οι κυψέλες καυσίμου και τα φωτοβολταϊκά συστήματα, και περιγράφονται οι πλέον διαδεδομένοι τρόποι σύνδεσής τους στο ηλεκτρικό δίκτυο χαμηλής ή μέσης τάσης.

Επίσης, αξιόλογη έρευνα έχει διεξαχθεί τόσο για την επίδραση της αιολικής διείσδυσης στην ευστάθεια του δικτύου, όσο και για την εξαγωγή μοντέλων ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων κατάλληλων για την προσομοίωση των φαινομένων αυτών.

Σε πολλά από τα ήδη εγκατεστημένα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών με απλές μηχανές επαγωγής. Οι απλές γεννήτριες επαγωγής παράγουν ενεργό ισχύ, αλλά, όπως οι κινητήρες, απορροφούν άεργο ισχύ. Στην εργασία [CFJ99] εξάγεται ένα απλοποιημένο ισοδύναμο μοντέλο αιολικού πάρκου με ασύγχρονες ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών. Ένα παρόμοιο ισοδύναμο μοντέλο αιολικού πάρκου αναπτύσσεται στην αναφορά [AK02], δίνοντας ωστόσο ιδιαίτερη έμφαση στην παράσταση του μηχανικού υποσυστήματος.

Από την άλλη πλευρά, στα νέα αιολικά πάρκα η τάση είναι να χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, οι οποίες ελέγχονται μέσω μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος και άρα μπορούν να ρυθμίζουν την άεργο κατανάλωσή τους, ώστε συνήθως να λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών μπορούν να είναι είτε σύγχρονες είτε ασύγχρονες μηχανές [Hei98]. Η ασύγχρονη ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδότησης είναι ένα από τα πλέον διαδεδομένα είδη γεννητριών για το σκοπό αυτό. Στην εργασία [TV05] εξάγεται ένα μοντέλο ασύγχρονης ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης και περιγράφονται ορισμένες τεχνικές ελέγχου ταχύτητας και φόρτισης, προκειμένου να διατηρηθεί η ευστάθεια του συστήματος. Στην αναφορά [SPK01] αναπτύσσεται ένα μοντέλο ασύγχρονης ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης και της γωνίας βήματος.

Στη δημοσίευση [SK03a] εξάγονται ισοδύναμα μοντέλα αιολικών πάρκων με ασύγχρονες ανεμογεννήτριες σταθερών ή μεταβλητών στροφών, τα οποία θεωρούνται κατάλληλα για δυναμικές προσομοιώσεις. Στην εργασία [SHP02] το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ισοδυνάμων απλοποιημένων μοντέλων ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, ενώ στην αναφορά [SHP03] παρουσιάζεται ένα γενικευμένο μοντέλο παράστασης για ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.

Στην εργασία [SHP01] παρουσιάζονται και αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τριών ειδών ανεμογεννητριών: α) της απλής ασύγχρονης, β) της ασύγχρονης με διπλή τροφοδότηση και γ) της σύγχρονης με κύκλωμα μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος.

Οσον αφορά την επίδραση της αιολικής διείσδυσης στις μελέτες ευστάθειας των σύγχρονων ΣΗΕ, σημειώνεται ότι στην εργασία [AKB00] πραγματοποιείται ανάλυση της μεταβατικής ευστάθειας των ασύγχρονων ανεμογεννητριών. Ομοίως, στην εργασία [AKN00] πραγματοποιούνται δυναμικές προσομοιώσεις σε ένα δίκτυο με υψηλό επίπεδο αιολικής διείσδυσης, προκειμένου να μελετηθεί από πλευράς ευστάθειας και ποιότητας ισχύος. Στην εργασία [PTU02] διερευνώνται τα επιτρεπτά όρια αιολικής διείσδυσης σε ένα ασθενές δίκτυο τόσο από πλευράς ευστάθειας τάσης όσο και από πλευράς θερμικής φόρτισης των γραμμών διανομής. Στην αναφορά [RFB02] εξετάζονται οι επιπτώσεις της διείσδυσης ασύγχρονων ανεμογεννητριών σταθερών ή μεταβλητών στροφών στο Ισπανικό ΣΗΕ. Στην εργασία [FJG03] αναλύεται η επίδραση της αιολικής διείσδυσης σε νησιωτικά δίκτυα από πλευράς ευστάθειας του δικτύου. Επιπρόσθετα, στη δημοσίευση [LUR03] παρουσιάζεται η ανάλυση της μεταβατικής ευστάθειας ενός αιολικού πάρκου με ασύγχρονες ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών. Στην εργασία [SK03b] γίνεται σύγκριση της συμμετοχής διαφόρων τύπων ασύγχρονων ανεμογεννητριών στις ταλαντώσεις ενός ΣΗΕ με ανάλυση των ιδιοτιμών του αντίστοιχου γραμμικοποιημένου δικτύου. Τέλος, στην εργασία [ZJA05] μελετάται η επίδραση της αιολικής διείσδυσης σε ασθενή δίκτυα.

### 1.6.2 Μέθοδοι ανάλυσης φαινομένων αστάθειας ΣΗΕ

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η ευστάθεια των ΣΗΕ διακρίνεται ανάλογα με τις επιπτώσεις των εξεταζόμενων διαταραχών στο δίκτυο, σε ευστάθεια μικρών και μεγάλων διαταραχών. Η μελέτη ευστάθειας μεγάλων διαταραχών προϋποθέτει συνήθως την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του δικτύου με ένα πρόγραμμα πλήρους προσομοίωσης. Τα προγράμματα πλήρους προσομοίωσης προσομοιώνουν όλα τα δυναμικά φαινόμενα (τόσο τα γρήγορα όσο και τα αργά) ενός ΣΗΕ [ABB00,EPR92,Mil05,SBD89,Syb04,VPM95,USP97].

Τα πλεονεκτήματα των προγραμμάτων πλήρους προσομοίωσης είναι τα εξής:

- Παριστάνουν με ακρίβεια τη δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος.
- Παρέχουν μία πλήρη εικόνα για την κατάσταση του συστήματος μετά από μία διαταραχή.

Τα μειονεκτήματα των προγραμμάτων πλήρους προσομοίωσης εντοπίζονται στα εξής σημεία:

- Είναι χρονοβόρα στην εκτέλεσή τους, ιδίως όταν μελετάται ένα φαινόμενο το οποίο μπορεί να διαρκέσει από μερικά λεπτά της ώρας έως και παραπάνω από ώρα.
- Απαιτούν μεγάλο όγκο δεδομένων για την εκτέλεσή τους, τα οποία πολλές φορές είναι δύσκολο να μετρηθούν ή να υπολογιστούν, χωρίς απαραίτητα να είναι κρίσιμη η σημασία τους για το εξεταζόμενο φαινόμενο.
- Οι αντίστοιχες βιβλιοθήκες μοντέλων για τις διατάξεις των ΣΗΕ δεν περιέχουν ικανοποιητικό αριθμό από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και ΑΠΕ.

Διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί για την αριθμητική ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη δυναμική συμπεριφορά ενός ΣΗΕ τόσο στη βραχυπρόθεσμη όσο και στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα [VCV98]. Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να υλοποιηθούν είτε με άμεση ολοκλήρωση (όπου το διάνυσμα κατάστασης σε ένα χρονικό βήμα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μόνο τιμές του διανύσματος στα προηγούμενα βήματα) είτε με έμμεση ολοκλήρωση (όπου το διάνυσμα κατάστασης σε ένα χρονικό βήμα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας και την τιμή του διανύσματος στο συγκεκριμένο βήμα). Οι μέθοδοι έμμεσης ολοκλήρωσης είναι ευσταθείς από αριθμητικής πλευράς, ωστόσο απαιτούν αρκετό υπολογιστικό χρόνο για την επίλυση του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων. Αντίθετα, οι μέθοδοι άμεσης ολοκλήρωσης χαρακτηρίζονται σχετικά αποδοτικές, αλλά μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα αριθμητικής ευστάθειας. Στην αναφορά [YA06] παρουσιάζεται μία υβριδική μέθοδος ολοκλήρωσης, η οποία αναπτύχθηκε πρόσφατα με σκοπό να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα των παραπάνω δύο μεθόδων.

Ειδικότερα για την ανάλυση της ευστάθειας τάσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί προγράμματα προσομοίωσης ΣΗΕ τα οποία στηρίζονται στη μέθοδο των Οιονεί Στατικών μεταβολών [Man98,VCJ95,YTY02]. Αυτές οι τεχνικές προσομοίωσης συνίστανται στο διαδοχικό υπολογισμό σημείων ισορροπίας, δηλαδή στην αντικατάσταση των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τα ταχέα μεταβατικά φαινόμενα από τις αντίστοιχες εξισώσεις ισορροπίας (βλ. ενότητα 1.3.3). Οι μέθοδοι υπολογισμού διαδοχικών σημείων ισορροπίας είναι κατάλληλες για εκτεταμένες προσομοιώσεις σε μεγάλη χρονική κλίμακα και για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο [Bih03,Stu02,VCK05].

Τα πλεονεκτήματα των τεχνικών αυτών είναι ότι αφενός αίρουν τις απλουστευτικές παραδοχές που εισάγουν τα προγράμματα ροής φορτίου και αφετέρου εστιάζουν στους μηχανισμούς που κυρίως επιδρούν στη μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσεως. Κατά συνέπεια, επιτρέπουν τη γρήγορη προσομοίωση των φαινομένων που εμπλέκονται στην αστάθεια και κατάρρευση τάσεως και τα οποία συνήθως διαρκούν μερικά λεπτά. Εντούτοις, σαν μειονέκτημα των παραπάνω τεχνικών καταγράφεται ότι αμελείται η δυναμική με την οποία το εξεταζόμενο σύστημα μεταβαίνει από ένα σημείο ισορροπίας στο επόμενο.

Στην αναφορά [LRL01] παρουσιάζεται ένα εργαλείο προσομοίωσης ΣΗΕ, το οποίο συνδυάζει ένα πρόγραμμα πλήρους προσομοίωσης και ένα πρόγραμμα με Οιονεί Στατικές μεταβολές. Συγκεκριμένα, το εργαλείο προσομοίωσης πραγματοποιεί αυτόματα την εναλλαγή από τη ρουτίνα πλήρους προσομοίωσης στην Οιονεί Στατική προσέγγιση, όταν επιτευχθεί αποτελεσματική απόσβεση των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων.

Όσον αφορά την ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών πραγματοποιείται με γραμμικοποίηση του συστήματος πολύ κοντά στην περιοχή του θεωρούμενου σημείου ισορροπίας, η οποία συνοδεύεται από τον υπολογισμό των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων του γραμμικοποιημένου συστήματος. Η ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών επιτρέπει την ανάλυση ευαισθησίας των ιδιοτιμών, από την οποία εξάγονται ποιοτικά συμπεράσματα για το ποιες μεταβλητές κυριαρχούν στη διέγερση ενός συγκεκριμένου ρυθμού και επίσης ποιες παράμετροι του συστήματος συμβάλλουν στην εμφάνιση ενός μηχανισμού αστάθειας.

Εντούτοις, ο ισχυρά μη γραμμικός χαρακτήρας των ΣΗΕ σε συνδυασμό με την ολοένα και αυξανόμενη φόρτιση των σύγχρονων δικτύων μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση μη γραμμικών φαινομένων. Τα μη γραμμικά αυτά φαινόμενα αναλύονται με μεθόδους ποιοτικής ανάλυσης μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων, κάνοντας χρήση της θεωρίας των διακλαδώσεων. Οι βασικές αρχές αυτής της θεωρίας αναλύονται στο βιβλίο [HK92].

Στη διατριβή [Kar05] και στην εργασία [KS00] γίνεται ανάλυση των διακλαδώσεων που συναντά ένα ΣΗΕ. Οι κυριότερες από αυτές είναι η διακλάδωση σαγματικού κόμβου, η διακλάδωση Hopf και η
διακλάδωση λόγω αλγεβρικής ιδιομορφίας. Στην εργασία [Vou94] χρησιμοποιείται η θεωρία διακλαδώσεων για τη διατύπωση μίας πιο συστηματικής προσέγγισης των φαινομένων αστάθειας και κατάρρευσης τάσεως, ενώ επίσης γίνεται προσπάθεια για έναν πιο αυστηρό ορισμό των εννοιών αυτών.

Στην εργασία [VPS96] διερευνάται η εξάρτηση μεταξύ διαφορετικών τύπων διακλαδώσεων στα ΣΗΕ και αναλύεται η επίδραση αυτών στις σύγχρονες μηχανές του δικτύου, είτε οι τελευταίες λειτουργούν με ρύθμιση τάσης είτε όχι. Στην εργασία [BCC96] συγκρίνονται οι μέθοδοι της στατικής και της δυναμικής προσέγγισης για την ανάλυση των φαινομένων ευστάθειας τάσης, λαμβάνοντας υπόψη τη θεωρία των διακλαδώσεων. Στις αναφορές [BDS01,Bil04] γίνεται χρήση της θεωρίας των διακλαδώσεων για την ανάλυση ευστάθειας δικτύων με σύγχρονες μηχανές και στη συνέχεια τα αποτελέσματα της ανάλυσης επιβεβαιώνονται από γρονικές προσομοιώσεις. Στις δημοσιεύσεις [PHH98,VMK99] εξετάζονται οι διάφοροι τύποι διακλαδώσεων που εμφανίζονται στις μηγανές επαγωγής για ορισμένες χαρακτηριστικές μηχανικού φορτίου. Στην αναφορά [ZA02] παρουσιάζεται μία μέθοδος για την ανίχνευση ενδεχόμενων φαινόμενων αστάθειας τάσης και ταλαντωτικής αστάθειας, κάνοντας χρήση της θεωρίας των διακλαδώσεων. Στη διπλωματική εργασία [Sak03] πραγματοποιείται εντοπισμός και ανάλυση τοπικών και υπερτοπικών διακλαδώσεων σε ένα μικρό ΣΗΕ, το οποίο αποτελείται από μία σύγχρονη γεννήτρια που τροφοδοτεί μία ωμική αγωγιμότητα και έναν κινητήρα επαγωγής μέσω ενός μετασγηματιστή εξοπλισμένου με ΣΑΤΥΦ. Στη διατριβή [Nom05] αναλύεται η εμφάνιση ενός οριακού κύκλου σε ένα αυτόνομο σύστημα με σύγγρονες και ασύγγρονες μηχανές.

Η ανάλυση μόνο των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων δεν επαρκεί για την ολοκληρωμένη μελέτη της ευστάθειας. Η εξαγωγή του γραμμικοποιημένου μοντέλου θα πρέπει να συνοδευτεί με τις αντίστοιχες δυναμικές προσομοιώσεις στο πεδίου του χρόνου, ώστε να διερευνηθεί πλήρως η απόκριση του συστήματος στα πιθανά ενδεχόμενα διαταραχών.

Αρκετές υπολογιστικές μέθοδοι έχουν προταθεί για τη γραμμικοποίηση και άρα για τον υπολογισμό είτε του πίνακα κατάστασης ενός ΣΗΕ και των αντίστοιχων ιδιοτιμών του, είτε κρίσιμων ευαισθησιών για την ευστάθεια του συστήματος [Kun94,MBB97,SP98].

Ειδικότερα, στην εργασία [GMK92] γίνεται ανάλυση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων χρησιμοποιώντας τον Ιακωβιανό πίνακα των εξισώσεων ροής φορτίου. Στην εργασία [DRT98], διαχωρίζονται αρχικά τα βραχυπρόθεσμα και τα μακροπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα ενός συστήματος με σύγχρονες γεννήτριες και στη συνέχεια υπολογίζονται ξεχωριστά οι ιδιοτιμές του γρήγορου και του αργού υποσυστήματος. Στη διατριβή [Nom05] αναπτύσσεται ένα γραμμικοποιημένο ΣΗΕ στο οποίο συμπεριλαμβάνονται σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές, ώστε να διερευνηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ των απεριοδικών και ταλαντωτικών τους ρυθμών.

Για τη γραμμικοποίηση των εξισώσεων που περιγράφουν ένα ΣΗΕ, τα ρεύματα του στάτη των μηχανών εκφράζονται ως συναρτήσεις των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος, προκειμένου να απαλειφθούν από τις εξισώσεις των μηχανών. Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία ενός ελαττωμένου πίνακα αγωγιμοτήτων για την παράσταση του δικτύου, στην οποία διατηρούνται μόνο οι ζυγοί όπου είναι συνδεδεμένες σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές. Οι υπόλοιποι ζυγοί απαλείφονται με τη μέθοδο Gauss [SP98]. Σημειώνεται ότι τα στατικά φορτία του δικτύου γραμμικοποιούνται προκειμένου η επίδρασή τους να ληφθεί υπόψη στον ελαττωμένο πίνακα αγωγιμοτήτων [Kun94].

Η επίδραση των αυτόματων ρυθμιστών τάσης και των σταθεροποιητών συστήματος ισχύος των σύγχρονων γεννητριών λαμβάνεται υπόψη κατά την εξαγωγή του γραμμικοποιημένου μοντέλου της σύγχρονης μηχανής, οπότε το σύνολο των γραμμικών αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων συσχετίζει όλες τις μεταβλητές κατάστασης και τις αλγεβρικές μεταβλητές των μηχανών, τόσο μεταξύ τους όσο και με το δίκτυο [NV03].

Στην αναφορά [PSR03] συγκρίνονται τα αποτελέσματα της αναλυτικής και αριθμητικής μεθόδου γραμμικοποίησης που πραγματοποιείται από τα δύο προγράμματα πλήρους προσομοίωσης [ABB00] και [USP97], αντίστοιχα.

Η μέθοδος γραμμικοποίησης κατά την προσομοίωση έχει γίνει για την ανάλυση ευστάθειας τάσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα κατά την Οιονεί στατική προσομοίωση [VJM94,VCV98].

Στη διατριβή [Man98], επεκτείνεται ένα πρόγραμμα προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα το οποίο στηρίζεται στην τεχνική της Οιονεί Στατικής προσέγγισης, προκειμένου να εξεταστεί η περίπτωση της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης μηχανών επαγωγής, κατά την οποία αίρεται η ισχύς

εφαρμογής της παραπάνω τεχνικής. Ειδικότερα, υπολογίζεται η μικρότερη ιδιοτιμή του Ιακωβιανού πίνακα των βραχυπρόθεσμων δυναμικών, οπότε βάσει του υπολογισμού αυτού, διακρίνεται εάν η εμφανιζόμενη βραχυπρόθεσμη αστάθεια που παρουσιάζεται κοντά σε μία μηδενική ιδιοτιμή είναι ένα τοπικό φαινόμενο ή μία γενικευμένη αστάθεια του συστήματος.

Στην εργασία [PB05] πραγματοποιείται γραμμικοποίηση ενός δικτύου μόνο με σύγχρονες μηχανές, προκειμένου να αποσυμπλακούν μεταξύ τους τα φαινόμενα ευστάθειας τάσης και γωνίας.

Στην αναφορά [PB02] παρουσιάζεται μία ολοκληρωμένη ανάλυση ευστάθειας τάσης και γωνίας σε ένα μικρό δίκτυο τριών ζυγών, το οποίο αποτελείται από μία σύγχρονη γεννήτρια, έναν άπειρο ζυγό και μία απλοποιημένη παράσταση στατικού και δυναμικού φορτίου που εξαρτάται τόσο από την τάση όσο και από τη συχνότητα. Η ανάλυση περιλαμβάνει την εξαγωγή του γραμμικοποιημένου μοντέλου του δικτύου, τη μελέτη των διακλαδώσεων που συναντά και τέλος την επαλήθευση των προηγουμένων με χρονικές προσομοιώσεις.

Στην εργασία [OFT04] παρουσιάζεται μία μελέτη ευστάθειας τάσης για το Νοτιοανατολικό Βραζιλιάνικο ΣΗΕ, σύμφωνα με την οποία πραγματοποιούνται αρχικά χρονικές προσομοιώσεις με τη μέθοδο της Οιονεί Στατικής προσέγγισης, ώστε να αξιολογηθούν ορισμένα ενδεχόμενα σενάρια διαταραχών και στη συνέχεια γραμμικοποιείται το εξεταζόμενο δίκτυο προκειμένου να αναλυθούν οι διάφοροι ρυθμοί απόκρισης.

# 1.6.3 Ανάπτυξη εκπαιδευτικών εργαλείων προσομοίωσης ΣΗΕ

Η απελευθέρωση των αγορών Ηλεκτρικής Ενέργειας και οι συνακόλουθες αλλαγές στη δομή και διάρθρωση των σύγχρονων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας έχουν επηρεάσει σημαντικά την τριτοβάθμια βαθμίδα εκπαίδευσης των ενεργειακών ηλεκτρολόγων μηχανικών. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ολοένα και πιο επιτακτική η ανάγκη για ισχυρότερη σύνδεση μεταξύ του θεωρητικού υπόβαθρου του ενεργειακού ηλεκτρολόγου μηχανικού που αποκτάται στην τριτοβάθμια εκπαίδευση και προβλημάτων, τα οποία αναμένεται να αντιμετωπίσει ως διπλωματούχος στο μέλλον κατά την εξάσκηση του επαγγέλματος.

Στην αναφορά [BJ05] παρουσιάζεται μία ανασκόπηση των επαγγελματικών εργαλείων προσομοίωσης ΣΗΕ, τα οποία χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον από εταιρείες ηλεκτρισμού και μεγάλα βιομηχανικά συγκροτήματα. Ωστόσο, σε γενικές γραμμές η ανάπτυξη ξεχωριστών εργαλείων προσομοίωσης ΣΗΕ αποκλειστικά για εκπαιδευτικούς λόγους είναι προτιμότερη από τη χρήση κάποιου έτοιμου επαγγελματικού προγράμματος.

Για το σκοπό αυτό, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετά εκπαιδευτικά εργαλεία από πανεπιστημιακές και ερευνητικές ομάδες, τα οποία χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός μεγάλου εύρους φαινομένων που απορρέουν από τις δραστηριότητες του ενεργειακού ηλεκτρολόγου μηχανικού.

Ενδεικτικά, αναφέρονται τα ακόλουθα εκπαιδευτικά εργαλεία προσομοίωσης ΣΗΕ:

Το [AML00] χρησιμοποιείται για μελέτες ροών ισχύος, εκτίμησης κατάστασης, βέλτιστης ροής φορτίου και μεταβατικής ευστάθειας. Το εργαλείο αυτό επεκτάθηκε βάσει της αναφοράς [XEA04] προκειμένου να υπολογίζει τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ. Το [MRS00] εστιάζει στους μηχανισμούς αποκατάστασης ενός συστήματος το οποίο έχει υποστεί ολική σβέση. Το [LN01] επιλύει το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου. Το [SHF03] χρησιμοποιείται για μελέτες ροών φορτίου, μεταβατικής ευστάθειας και ευστάθειας μικρών διαταραχών. Το [DCY04] προσομοιώνει τη δυναμική απόκριση διαφόρων ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς. Το [Lar04] αποτελεί ένα εργαλείο αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού κατάλληλο για δυναμικές προσομοιώσεις. Το [MC04] χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση, βελτιστοποίηση και αξιολόγηση συστημάτων προστασίας με ψηφιακούς ηλεκτρονόμους.

Ειδικότερα στην περιοχή της επιστήμης των ΣΗΕ, το λογισμικό περιβάλλον MATLAB/SIMULINK έχει κατά το παρελθόν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη των ακόλουθων εκπαιδευτικών εργαλείων προσομοίωσης ΣΗΕ:

Το [CC92] χρησιμοποιείται για την ανάλυση δυναμικών φαινομένων και τη σχεδίαση συστημάτων ελέγχου. Το [RC95] αποσκοπεί στην εξοικείωση με διάφορα δυναμικά φαινόμενα. Τα [HU00,Rog99] εξετάζουν προβλήματα μεταβατικής ευστάθειας. Το [ALW01] χρησιμοποιείται για χρονικές προσομοιώσεις μεγάλων διασυνδεδεμένων ΣΗΕ. Το [SF02] εξετάζει την επίδραση των κυψελών

καυσίμου (ως συνιστώσα της διεσπαρμένης παραγωγής) από πλευράς μεταβατικής ευστάθειας. Το [CBM04] χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση σταθεροποιητών συστήματος ισχύος. Το [KAH04] χρησιμοποιείται για μελέτες ροών φορτίου και εκτίμησης κατάστασης, για δυναμικές προσομοιώσεις μεταβατικών φαινομένων, καθώς επίσης και για σχεδίαση συστημάτων προστασίας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ιδέα χρήσης του προγραμματιστικού περιβάλλοντος MATLAB/ SIMULINK, με σκοπό την ανάπτυξη ενός εκπαιδευτικού εργαλείου για την ανάλυση των δυναμικών φαινομένων των ΣΗΕ, ανήκει αρχικά στο Πανεπιστήμιο της Λιέγης. Η ιδέα αυτή άρχισε να ωριμάζει προοδευτικά και να εφαρμόζεται στην πράξη ύστερα από τη συνεργασία με το Πανεπιστήμιο της Μπολώνια [Vas00]. Στις βασικές αρχές της πρωτότυπης αυτής ιδέας στηρίζεται η δομή του προγράμματος προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Ωστόσο, η συνεχής βελτίωση του θεωρούμενου προγράμματος προς την κατεύθυνση μίας περισσότερο συστηματικής θεώρησης των εξεταζόμενων δικτύων, επιτρέπει την επέκταση της εφαρμογής του πέρα από τα απλά ΣΗΕ λίγων ζυγών που χρησιμοποιούνται για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

### 1.6.4 Διερεύνηση προβλημάτων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης – Μέτρα αντιμετώπισης

Τα τελευταία χρόνια καταγράφονται ολοένα και πιο συχνά φαινόμενα βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης στα σύγχρονα ΣΗΕ. Στο Παράρτημα F του βιβλίου [Tay94] περιγράφεται ένα πλήθος περιστατικών βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης, τα οποία εμφανίστηκαν σε διάφορες περιοχές του πλανήτη την εικοσαετία από το 1970 έως το 1990. Περισσότερο πρόσφατα παρόμοια γεγονότα, τα οποία έκαναν την εμφάνισή τους στην Αμερικάνικη ήπειρο μέσα στη δεκαετία του 1990, καταγράφονται στα [Bul90a,Bul90b,Hea99,Jac93,NAE96,RSR97,SCE00,Sha97,TE97,TH00,WSD92]. Επιπρόσθετα, αρκετοί ειδικοί επιστήμονες ισχυρίζονται ότι μέρος των αιτιών που οδήγησαν στην ολική κατάρρευση του Βόρειου Αμερικάνικου ΣΗΕ το 2003 είναι πολύ πιθανόν να συνδέεται με εκδήλωση φαινομένων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης.

Το πρόβλημα της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης αναμένεται να πάρει ακόμα μεγαλύτερες διαστάσεις στο άμεσο μέλλον λόγω [DLT02]:

- Της αυξημένης χρήσης κινητήρων επαγωγής με μικρή αδράνεια, οι οποίοι εξοπλίζουν ευρέως τα συστήματα ψύξης και κλιματισμού.
- Της αυξημένης διείσδυσης γεννητριών επαγωγής στα αιολικά πάρκα.
- Της διείσδυσης φορτίων, των οποίων η κατανάλωση είναι ανεξάρτητη της τάσης και ελέγχεται με ηλεκτρονικά ισχύος.
- Της εκτεταμένης χρήσης συστημάτων πυκνωτών για αντιστάθμιση αέργου ισχύος.
- Της αυξημένης χρήσης γραμμών ΣΡ στο επίπεδο της Υψηλής Τάσης (HVDC).
- Της εντατικότερης χρήσης των διαθέσιμων δικτύων μεταφοράς.

Ειδικότερα, οι μηχανές επαγωγής διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στα φαινόμενα αστάθειας τάσης στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα για τους εξής κυρίως λόγους [Kun94,VCV98]:

- Είναι φορτία με μικρή αδράνεια και γρήγορη επαναφορά (της τάξεως του δευτερολέπτου).
- Είτε λειτουργούν ως κινητήρες είτε ως γεννήτριες, καταναλώνουν άεργο ισχύ για την εγκατάσταση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο διάκενό τους. Γι' αυτό το λόγο, η εγκατάσταση μηχανών επαγωγής σε ένα δίκτυο συνοδεύεται τις περισσότερες φορές με κατάλληλες διατάξεις αέργου αντιστάθμισης.
- Κινδυνεύουν να παρουσιάσουν αστάθεια με τη μορφή επιβράδυνσης (λειτουργία κινητήρα) ή υπερεπιτάχυνσης (λειτουργία γεννήτριας), όταν η τερματική τους τάση είναι χαμηλή ή η μηχανική τους ροπή αρκετά μεγάλη. Αποτέλεσμα της επιβράδυνσης ή επιτάχυνσης είναι η απορρόφηση πολλαπλάσιας (3-7 φορές) ποσότητας αέργου ισχύος από ότι στην κανονική λειτουργία.

Αρκετά επίπονες για το δίκτυο θεωρούνται οι περιπτώσεις ιδιαίτερα φορτισμένων κινητήρων επαγωγής, οι οποίοι κινούν φορτίο σταθερής μηχανικής ροπής, όπως είναι για παράδειγμα οι κινητήρες των συστημάτων κλιματισμού [Tay94,WSD92,Sha97]. Οι κινητήρες αυτοί μπορούν να δημιουργήσουν σημαντικά προβλήματα ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου, οπότε και η συνεισφορά τους στο φορτίο αιχμής αυξάνει κατά πολύ σε σχέση με τις υπόλοιπες περιόδους του έτους [ICR93]. Συγκεκριμένα, τα συστήματα κλιματισμού θεωρήθηκαν κατά κύριο λόγο υπεύθυνα για τα

προβλήματα βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης που καταγράφτηκαν τον ιδιαίτερα θερμό Ιούλιο του 1987 στο Μισισιπή και στο Τόκιο [Tay94].

Στην εργασία [SC05] παρουσιάζεται μία μεθοδολογία για την μοντελοποίηση των κινητήρων επαγωγής κατά τη διαδικασία επιβράδυνσής του μέχρι την πλήρη ακινησία, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί σε μελέτες βραχυπρόθεσμης αστάθειας. Επίσης, στην αναφορά [GCQ05] εξετάζεται η επίδραση της αδράνειας των κινητήρων επαγωγής στην ευστάθεια μικρών διαταραχών.

Οι ασύγχρονες γεννήτριες παράγουν μεν ενεργό ισχύ, ωστόσο από την άλλη πλευρά, όπως και οι κινητήρες, απορροφούν άεργο ισχύ. Στα καινούρια αιολικά πάρκα εγκαθίστανται κατά κύριο λόγο ανεμογεννήτριες επαγωγής μεταβλητών στροφών [Hei98,TV05], οι οποίες - όπως προαναφέρθηκε - έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίζουν την τερματική τάση και άρα και την καταναλισκόμενη άεργο ισχύ μέσω κατάλληλων κυκλωμάτων ηλεκτρονικών ισχύος. Εντούτοις, σε πολλά από τα υφιστάμενα αιολικά πάρκα και ιδιαίτερα στον ελληνικό χώρο, χρησιμοποιούνται οι απλές, δίχως έλεγχο ασύγχρονες ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών [VMP01]. Από πλευράς ευστάθειας τάσης, οι τελευταίες μηχανές εμφανίζουν την ίδια δυναμική συμπεριφορά με τους κινητήρες επαγωγής, με τη μόνη διαφορά ότι σε περίπτωση απώλειας σημείου ισορροπίας επιταχύνονται αντί να επιβραδύνουν. Οπότε, μολονότι οι γεννήτριες επαγωγής δεν ανήκουν στα φορτία του συστήματος, ωστόσο αποτελούν σημαντικό παράγοντα που συμβάλλει στη διέγερση φαινομένων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης.

Στην εργασία [PAM97b,BPA02] συγκρίνεται η επίδραση διαφόρων μοντέλων κινητήρων επαγωγής στην ευστάθεια τάσης μικρών διαταραχών και τελικά εξάγεται το συμπέρασμα ότι το πλέον αντιπροσωπευτικό μοντέλο παράστασης μηχανών επαγωγής στις μελέτες ευστάθειας τάσης είναι το 3<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο, στο οποίο λαμβάνονται υπόψη τα ηλεκτρικά και τα μηχανικά μεταβατικά φαινόμενα του δρομέα. Το ίδιο αποτέλεσμα προκύπτει από τη σύγκριση μοντέλων μηχανής επαγωγής 3<sup>ης</sup> και 5<sup>ης</sup> τάξης, για την παράσταση των ανεμογεννητριών διπλής τροφοδότησης σε μελέτες ευστάθειας τάσης [EHJ03].

Εάν μία ασύγχρονη μηχανή οδηγηθεί σε αστάθεια ενώ παραμένει συνδεδεμένη με το δίκτυο, είναι δυνατόν να συμπαρασύρει σε αστάθεια και άλλες γειτονικές μηχανές, με αποτέλεσμα τη μερική ή ολική κατάρρευση του συστήματος [Tay94,SO90,VM98].

Επιπρόσθετα, σε μελέτες ευστάθειας δεν θα πρέπει να παραλείπεται η επίδραση των βοηθητικών κινητήρων στους συμβατικούς σταθμούς, καθώς μία ενδεχόμενη επιβράδυνσή τους μπορεί να προκαλέσει την αποσύνδεσή τους από το δίκτυο με συνέπεια τη διακοπή της λειτουργίας ολόκληρου του σταθμού [AM94].

Για την αντιμετώπιση προβλημάτων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης απαιτείται σε ορισμένες περιπτώσεις εγκατάσταση δυναμικών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης [Wan03], όπως είναι για παράδειγμα τα στατά συστήματα αέργου αντιστάθμισης (Static Var Compensators - SVCs) [Mil82, Tay94]. Τα συστήματα αυτά παρέχουν γρήγορη και ακριβή ρύθμιση των τοπικών τάσεων, ενώ παράλληλα αποφεύγονται οι ανεπιθύμητες υπερτάσεις που προκαλούνται κατά τη σύζευξη των μηχανικά ελεγχόμενων συστοιχιών πυκνωτών.

Στην εργασία [HEZ89] μελετάται η συνεισφορά των συστημάτων αυτών στην αντιμετώπιση της αστάθειας που προκαλείται από επιβράδυνση κινητήρων επαγωγής. Παρόμοια, στην εργασία [LMN92] η εγκατάσταση των συστημάτων αυτών συμβάλλει στην ενίσχυση της μεταβατικής ευστάθειας και της ευστάθειας μικρών διαταραχών σε ένα δίκτυο με ιδιαίτερα φορτισμένους κινητήρες επαγωγής.

Στην εργασία [WCZ00] προτείνεται μεθοδολογία για τη σχεδίαση ενός μη γραμμικού ελεγκτή σε στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης, προκειμένου να ενισχυθεί ένα ΣΗΕ από πλευράς ευστάθειας τάσης. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζεται σε ένα απλό δίκτυο με μία σύγχρονη και μία ασύγχρονη μηχανή, για να ακολουθήσει στη συνέχεια ανάλυση του δικτύου αυτού τόσο με θεωρία διακλαδώσεων όσο και με χρονικές προσομοιώσεις.

Στην εργασία [CWH05] αναπτύσσεται μία μεθοδολογία για την συνεργασία μεταξύ των συστημάτων διέγερσης των σύγχρονων γεννητριών και των στατών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης, με σκοπό τη διατήρηση της μεταβατικής ευστάθειας του δικτύου.

Στην αναφορά [AKN03] εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά απλών ασύγχρονων ανεμογεννητριών από πλευράς βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης και προτείνονται σχήματα δυναμικής αντιστάθμισης αέργου ισχύος στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα Στην αναφορά [AMS00] αξιολογείται η εγκατάσταση στατών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης στο βορειοανατολικό Πολωνικό ΣΗΕ, προκειμένου να αντιμετωπιστούν ορισμένα προβλήματα αστάθειας τάσης.

Επιπρόσθετα, στην εργασία [JZX02] πραγματοποιείται ανάλυση ρυθμών στο βορειοδυτικό μέρος του Κινεζικού ΣΗΕ, σύμφωνα με την οποία προκύπτει πρόβλημα αστάθειας τάσης μικρών διαταραχών. Ακολουθεί εντοπισμός των ζυγών, οι οποίοι είναι οι πλέον επιρρεπείς στην προαναφερόμενη αστάθεια και προτείνονται μέτρα αντιμετώπισης με δυναμική άεργο αντιστάθμιση.

Ένα άλλο σημαντικό μέτρο για την αντιμετώπιση προβλημάτων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης είναι η αποσύνδεση των μηχανών επαγωγής. Το μέτρο αυτό θεωρείται το έσχατο μέτρο για την αντιμετώπιση της αστάθειας, διότι αναφέρεται σε απόρριψη φορτίου.

Συγκεκριμένα, οι μεγάλοι βιομηχανικοί κινητήρες (καθώς επίσης και οι μεγάλες ανεμογεννήτριες) έχουν συνήθως συστήματα προστασίας από χαμηλή τάση [Tay94], τα οποία αποσυνδέουν τον κινητήρα (την ανεμογεννήτρια) από το δίκτυο μετά την εμφάνιση χαμηλής τάσης, προκειμένου να αποφευχθεί ενδεχόμενη επιβράδυνση (ή επιτάχυνση) [SC92]. Στην εργασία [WSD92] προτείνονται αντίστοιχα συστήματα προστασίας τα οποία θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε μονοφασικούς κινητήρες επαγωγής, όπως είναι για παράδειγμα τα οικιακά κλιματιστικά μηχανήματα.

Εντούτοις, αξίζει να σημειωθεί ότι περισσότεροι μικροί κυρίως κινητήρες είναι εξοπλισμένοι με θερμικά στοιχεία προστασίας, τα οποία εμφανίζουν βραδείες αποκρίσεις, της τάξης αρκετών δευτερολέπτων [Tay94]. Επομένως, στις περιπτώσεις αυτές το φαινόμενο της βραχυπρόθεσμης αστάθειας μπορεί να εξελιχθεί δυσμενώς πριν τη δράση των διατάξεων προστασίας, οδηγώντας σε αστάθεια και ενδεχομένως σε αποσυγχρονισμό των τοπικών σύγχρονων γεννητριών.

Εκτός από συστήματα προστασίας από χαμηλή τάση, οι ασύγχρονες ανεμογεννήτριες εξοπλίζονται συνήθως με πρόσθετα συστήματα προστασίας από υπερτάχυνση, τα οποία ενεργοποιούνται όταν η ταχύτητα υπερβεί ένα όριο [Hei98].

Στην εργασία [HY03] αναλύεται ένα σενάριο βραχυπρόθεσμης αστάθειας για το ηλεκτρικό δίκτυο της Σαουδικής Αραβίας, το οποίο οφείλεται στην αυξημένη ζήτηση των κλιματιστικών μηχανημάτων κατά την καλοκαιρινή αιχμή. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού, προτείνεται ένας συνδυασμός μέτρων αποτελούμενος από εγκατάσταση στατών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης και κατάλληλων χειρισμών απόρριψης κλιματιστικών φορτίων από προστασία υποτάσεως.

Τέλος, στην εργασία [TPV04] προτείνεται η αντικατάσταση των απλών ασύγχρονων ανεμογεννητριών με αντίστοιχες μηχανές διπλής τροφοδότησης, προκειμένου να αντιμετωπιστούν προβλήματα βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης τα οποία εμφανίζονται σε ένα ΣΗΕ με υψηλό ποσοστό αιολικής διείσδυσης.

# 1.7 Αντικείμενο και Σκοπός της Διατριβής

Στην παρούσα διατριβή, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην ανάλυση ευστάθειας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, όπως αυτή διαμορφώνεται στο νέο αποκεντρωμένο περιβάλλον από πλευράς παραγωγής, λόγω της αυξημένης διείσδυσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Ειδικότερα, η διατριβή εστιάζει στη διερεύνηση των προβλημάτων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης τα οποία οφείλονται σε μηχανές επαγωγής, είτε αυτές λειτουργούν ως φορτία σε οικιακούς, εμπορικούς ή βιομηχανικούς καταναλωτές είτε ως γεννήτριες σε αιολικά πάρκα.

Κυρίαρχο θέμα στη διατριβή αυτή είναι η ανάπτυξη ενός προγράμματος πλήρους προσομοίωσης ΣΗΕ. Το εξεταζόμενο πρόγραμμα ονομάζεται WHSSP (Wind-Hybrid System Simulation Package) και έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον MATLAB/SIMULINK στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Το αρχικό κίνητρο για την ανάπτυξη του λογισμικού πακέτου WHSSP ήταν η δημιουργία ενός εκπαιδευτικού εργαλείου σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο της Λιέγης [VPM04], το οποίο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διδασκαλία Αυτομάτου Ελέγχου και Ευστάθειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας σε τελειόφοιτους και μεταπτυχιακούς φοιτητές της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Η δημιουργία ενός νέου εκπαιδευτικού εργαλείου προτιμήθηκε έναντι της χρήσης ενός έτοιμου επαγγελματικού προγράμματος [BJ05], καθότι τα προγράμματα αυτά δεν προσφέρονται για εκπαιδευτικούς σκοπούς επειδή:

- Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν είναι δυνατή η πρόσβαση των φοιτητών στον κώδικα.
- Η πολυπλοκότητα του λογισμικού αυτών απαιτεί αρκετό χρόνο για εξοικείωση.
- Το μοντέλο κάθε μίας διάταξης θεωρείται ως «μαύρο κουτί» με δεδομένα, εισόδους και εξόδους, χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης της δομής στο εσωτερικό του.
- Προσφέρουν μία περισσότερο επιφανειακή γνώση του εξεταζόμενου συστήματος, χωρίς τη δυνατότητα εμβάθυνσης στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε συνιστώσας.
- Οι αντίστοιχες βιβλιοθήκες μοντέλων για τις διατάξεις των ΣΗΕ δεν περιέχουν ικανοποιητικό αριθμό από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και ΑΠΕ, όπως είναι για παράδειγμα οι ασύγχρονες ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης, οι μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες και οι κυψέλες καυσίμου.

Το πρόγραμμα προσομοίωσης WHSSP έχει αναπτυχθεί στο λογισμικό περιβάλλον MATLAB/SIMULINK, το οποίο είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο στην ευρύτερη περιοχή της επιστήμης των μηχανικών. Στα πλεονεκτήματα του λογισμικού που αναπτύχθηκε, περιλαμβάνονται:

- Η δυνατότητα πρόσβασης όλων των φοιτητών σε αυτό.
- Το φιλικό περιβάλλον προς το χρήστη.
- Η εύκολη εξοικείωση χωρίς την απαίτηση ιδιαίτερων ή πολύπλοκων προγραμματιστικών γνώσεων.
- Η δυνατότητα χρήσης μεγάλης ποικιλίας έτοιμων συναρτήσεων και ρουτινών.

Η συνεχής βελτίωση του προγράμματος προσομοίωσης WHSSP προς την κατεύθυνση μίας περισσότερο συστηματικής θεώρησης των εξεταζόμενων δικτύων, επιτρέπει την επέκταση της εφαρμογής του πέρα από τα απλά ΣΗΕ λίγων ζυγών που χρησιμοποιούνται για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Συνεπώς, το πρόγραμμα προσομοίωσης που αναπτύσσεται στα πλαίσια αυτής της διδακτορικής διατριβής θεωρείται κατάλληλο για δυναμικές προσομοιώσεις και μελέτες ευστάθειας μικρών έως μεσαίων διασυνδεδεμένων ή αυτόνομων δικτύων, στα οποία έχουν διεισδύσει μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και ειδικότερα αιολικά πάρκα.

Στα πλαίσια του προγραμματιστικού πακέτου WHSSP, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να παραστήσει το προς προσομοίωση ΣΗΕ, χρησιμοποιώντας μία βιβλιοθήκη με μοντέλα διαφόρων διατάξεων σε περιβάλλον MATLAB/SIMULINK. Στις διατάξεις αυτές περιλαμβάνονται το δίκτυο μεταφοράς και διανομής, οι σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές (γεννήτριες ή κινητήρες), οι Αυτόματοι Ρυθμιστές Τάσης, τα Συστήματα Προστασίας Υπερδιεγέρσεως και οι Σταθεροποιητές Συστήματος Ισχύος των σύγχρονων γεννητριών, οι ατμοστρόβιλοι, οι υδροστρόβιλοι και οι ντηζελοκινητήρες των συμβατικών μονάδων παραγωγής με τους αντίστοιχους ρυθμιστές στροφών, οι ατμοπαραγωγοί στην περίπτωση ατμοηλεκτρικών μονάδων, διάφορα μοντέλα στατικών και δυναμικών αυτορυθμιζόμενων φορτίων, οι μετασχηματιστές οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με μηχανισμούς Συστήματος Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο, οι Αυτόματοι Μηχανισμοί Ζεύξεως-Αποζεύξεως Στατών Πυκνωτών, καθώς επίσης και τα Στατά Συστήματα Αέργου Αντιστάθμισης.

Ειδικότερα, στην περίπτωση αυτόνομων δικτύων όπου η συχνότητα μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά γύρω από την ονομαστική της τιμή, τόσο το μοντέλο του δικτύου όσο και τα μοντέλα των μηχανών αναπτύσσονται λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της μεταβολής της συχνότητας. Σημειώνεται ότι η προσομοίωση πραγματοποιείται με την παραδοχή ότι το δίκτυο λειτουργεί σε συνθήκες ημιτονοειδούς μόνιμης κατάστασης, δηλαδή δεν λαμβάνονται υπόψη ανώτερες αρμονικές συνιστώσες. Τέλος, δεν εξετάζονται ασύμμετρες φορτίσεις του δικτύου.

Μία από τις πιθανές αρχικές αιτίες ενός φαινομένου βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης είναι ο βραχυπρόθεσμος περιορισμός στο ρεύμα διέγερσης των τοπικών σύγχρονων γεννητριών και η συνακόλουθη αδυναμία στήριξης των τάσεων στους αντίστοιχους ζυγούς. Ο περιορισμός διέγερσης στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα μπορεί να οφείλεται είτε σε μία σχετικά μεγάλη και απότομη αύξηση του ρεύματος διέγερσης (σαν αποτέλεσμα μίας αρκετά σοβαρής διαταραχής) είτε σε μία απαράδεκτα χαμηλή τιμή στο αντίστοιχο μεταβατικό όριο υπερδιέγερσης. Συνεπώς, δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην επέκταση του μοντέλου ΣΠΥ για σύγχρονες μηχανές, το οποίο ανάλογα με το μέγεθος

της υπερδιέγερσης έχει τη δυνατότητα να δράσει τόσο στη μακροπρόθεσμη όσο και στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Το λογισμικό πακέτο WHSSP συγκρίθηκε με το πρόγραμμα EUROSTAG [SBD89,VPM95] κατά την προσομοίωση ενός σεναρίου μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης σε ένα σύστημα 33 ζυγών και υπολόγισε τις ίδιες ακριβώς αποκρίσεις.

Στην παρούσα διατριβή μελετάται, με τη βοήθεια του προγράμματος WHSSP, η συμβολή των φαινομένων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης και ειδικότερα οι μηχανισμοί που μπορεί να οδηγήσουν στην εμφάνιση περαιτέρω καταστροφικών φαινομένων όπως αστάθειας γωνίας των σύγχρονων μηχανών. Σημειώνεται ότι αυτό έχει πέραν της καθαρά ακαδημαϊκής αξίας (ακριβέστερη διάκριση μεταξύ των τύπων αστάθειας και των χρονικών κλιμάκων) και πρακτική χρησιμότητα, αφού από την ανάλυση θα προκύψουν μέτρα αντιμετώπισης της αστάθειας.

Ειδικότερα, διερευνάται η χρονική αλληλουχία μεταξύ των φαινομένων της αστάθειας τάσης και γωνίας στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, η οποία σε αρκετές περιπτώσεις είναι αρκετά δύσκολο να εξακριβωθεί. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκε πρόγραμμα για την παρακολούθηση των ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων του συστήματος κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, η ανάλυση των οποίων μπορεί να υποδείξει τις μεταβλητές κατάστασης και άρα τις διατάξεις του μηχανισμού βραχυπρόθεσμης αστάθειας.

Η παρακολούθηση των ιδιοτιμών του συστήματος πραγματοποιείται στο λογισμικό πακέτο WHSPP με τη βοήθεια μίας διαδικασίας γραμμικοποίησης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, σύμφωνα με την οποία κατασκευάζεται σε κάθε χρονική στιγμή ο Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης του συστήματος.

Ωστόσο, επειδή το σύστημα δεν λειτουργεί απαραίτητα σε σημείο ισορροπίας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ο υπολογιζόμενος Ιακωβιανός πίνακας πρέπει να θεωρηθεί ότι αναφέρεται σε ένα εν δυνάμει σημείο ισορροπίας, το οποίο προκύπτει εάν οι τιμές των μεταβλητών εισόδου τροποποιηθούν κατάλληλα ώστε να επιτευχθεί ισορροπία για τις τρέχουσες τιμές των μεταβλητών κατάστασης. Στην περίπτωση των σύγχρονων γεννητριών, οι μεταβλητές εισόδου αποτελούνται από την τάση αναφοράς του APT, τις οριακές τιμές του ΣΠΥ και τη μηχανική ροπή που προέρχεται από το στρόβιλο της μηχανής. Αναφορικά με τις μηχανές επαγωγής, το διάνυσμα των μεταβλητών εισόδου περιέχει για κάθε μηχανή τη ροπή του μηχανικού φορτίου.

Οι πληροφορίες και τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη διαδικασία της γραμμικοποίησης κατά την προσομοίωση δεν αποτελούν ακριβείς και αυστηρές ενδείξεις της ευστάθειας του συστήματος, αποδεικνύονται ωστόσο ιδιαίτερα χρήσιμες στον χαρακτηρισμό της φύσης ενός φαινομένου αστάθειας.

Τα αποτελέσματα εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου γραμμικοποίησης σε δύο περιπτώσεις δικτύων συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που υπολογίζονται από έτοιμη ρουτίνα γραμμικοποίησης της MATLAB σε σημεία ισορροπίας και προκύπτει απόλυτη ταύτιση μεταξύ τους.

Η μεθοδολογία γραμμικοποίησης που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή, χρησιμοποιείται για την ανάλυση της βραχυπρόθεσμης αστάθειας δύο συστημάτων, στα οποία η βραχυπρόθεσμη αστάθεια παρουσιάζεται μετά τον βραχυπρόθεσμο περιορισμό υπερδιέγερσης των τοπικών σύγχρονων γεννητριών.

Στο πρώτο σύστημα παρατηρείται υψηλό ποσοστό διείσδυσης αιολικών πάρκων τα οποία είναι εξοπλισμένα με απλές ασύγχρονες ανεμογεννήτριες. Στην περίπτωση αυτή, η αστάθεια εκδηλώνεται αρχικά σε μία ομάδα γειτονικών ανεμογεννητριών, οι οποίες παραμένουν συνδεδεμένες στο δίκτυο, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρουν και τις υπόλοιπες σε αστάθεια. Η διαδικασία γραμμικοποίησης του δικτύου κατά την προσομοίωση επιβεβαιώνει ότι η εμφανιζόμενη αστάθεια οφείλεται αποκλειστικά στις ασύγχρονες μηχανές. Στη συνέχεια, η ανάλυση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων επιτρέπει τον εντοπισμό των ανεμογεννητριών στις οποίες εκδηλώθηκε αρχικά η αστάθεια, προκειμένου να προταθούν και να αξιολογηθούν μέτρα για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Τα μέτρα αυτά αφορούν είτε την αποσύνδεση των παραπάνω μηχανών είτε την εγκατάσταση στατών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης.

Στο δεύτερο δίκτυο παρουσιάζονται σημαντικές δυσκολίες στην εξακρίβωση του είδους της βραχυπρόθεσμης αστάθειας, διότι σύμφωνα με τις εξαγόμενες χρονικές προσομοιώσεις εκδηλώνονται σχεδόν ταυτόχρονα τα φαινόμενα της επιβράδυνσης τριών κινητήρων επαγωγής και του αποσυγχρονισμού της τοπικής σύγχρονης γεννήτριας. Στην περίπτωση αυτή, η εφαρμογή της

προτεινόμενης μεθοδολογίας γραμμικοποίησης οδηγεί στην διάκριση της χρονικής αλληλουχίας μεταξύ των φαινομένων της αστάθειας τάσης και γωνίας.

Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση των ρυθμών του συστήματος κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, σχεδιάζονται προληπτικά μέτρα για την αποφυγή εκδήλωσης της βραχυπρόθεσμης αστάθειας, όπως είναι η αποκοπή από το δίκτυο των μηχανών που εμφανίζουν την αστάθεια και η χρήση ταχέων συστημάτων αέργου αντιστάθμισης (SVC).

Τέλος, το πρόγραμμα προσομοίωσης του λογισμικού πακέτου WHSSP χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση - από πλευράς βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης - της συνδεσμολογίας ενός συγκεκριμένου επιπέδου αιολικής παραγωγής σε ένα ασθενές δίκτυο.

# 1.8 Δομή της Διατριβής

Η διατριβή αποτελείται από οκτώ κεφάλαια. Συγκεκριμένα μετά το παρόν εισαγωγικό Κεφάλαιο 1, ακολουθούν:

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται η συμπεριφορά των κυριότερων διατάξεων ενός ΣΗΕ, οι οποίες συμμετέχουν στην εκδήλωση τόσο των βραχυπρόθεσμων και όσο και των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων. Ειδικότερα, περιγράφεται το μοντέλο τέταρτης τάξης της σύγχρονης μηχανής, θεωρώντας ένα τύλιγμα πεδίου στον ευθύ άξονα και ένα τύλιγμα απόσβεσης στον εγκάρσιο άξονα της μηχανής. Επίσης, περιγράφεται η γενική διάταξη των Αυτόματων Ρυθμιστών Τάσης και παρουσιάζονται τα διαγράμματα βαθμίδων των κυριοτέρων μοντέλων τους. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι κυριότερες βαθμίδες ενός Συστήματος Προστασίας Υπερδιεγέρσεως και εξάγεται ένα μοντέλο το οποίο έχει τη δυνατότητα, ανάλογα με το μέγεθος της υπερδιέγερσης, να ενεργοποιηθεί είτε στη βραχυπρόθεσμη ή στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Επιπρόσθετα, αναπτύσσεται ένα μοντέλο σταθεροποιητή συστήματος ισχύος τρίτης τάξεως, το οποίο παρέχει επιπλέον απόσβεση στις ταλαντώσεις μεταξύ των μηχανών του συστήματος.

Οι μηχανές επαγωγής παριστάνονται με ένα μοντέλο τρίτης τάξης, στο οποίο διακρίνονται τα ηλεκτρικά και μηχανικά μεταβατικά φαινόμενα του δρομέα των μηχανών αυτών. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μία συμμετρία αναφορικά με τις δυναμικές του δρομέα των στρεφόμενων μηχανών, ώστε να αποτυπωθεί σαφέστερα η ενδεχόμενη αλληλεπίδρασή τους.

Ακολούθως, περιγράφονται ορισμένα μοντέλα θερμοηλεκτρικών και υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής. Στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, εξάγονται οι αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες παριστάνουν τη δυναμική απόκριση του συνδυασμένου συστήματος που αποτελείται από τον ατμοπαραγωγό, τον ατμοστρόβιλο και τον αντίστοιχο ρυθμιστή στροφών. Αναφορικά με τις υδροηλεκτρικές μονάδες, αναπτύσσεται ένα μη γραμμικό μοντέλο υδροστροβίλου λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες στον αγωγό προσαγωγής. Επιπρόσθετα, περιγράφεται ένα μοντέλο ρυθμιστή στροφών υδροστροβίλου, στο οποίο προστίθεται μία βαθμίδα μεταβατικού στατισμού (εκτός από τη βαθμίδα μονίμου στατισμού), προκειμένου να περιοριστεί το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα σημαντικότερα μοντέλα στατικών και δυναμικών αυτορυθμιζόμενων φορτίων και περιγράφεται η λειτουργία ενός διακριτού μοντέλου για το μηχανισμό του Συστήματος Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο των μετασχηματιστών διανομής. Επίσης, παρουσιάζονται τα μοντέλα των Αυτόματων Μηχανισμών Ζεύξης-Απόζευξης Στατών Πυκνωτών και των Στατών Συστημάτων Αέργου Αντιστάθμισης (SVC), τα οποία χρησιμοποιούνται για την άεργο υποστήριξη του δικτύου στη μακροπρόθεσμη και στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, αντίστοιχα.

Τέλος, περιγράφεται η διαδικασία παράστασης του δικτύου και διατυπώνονται οι αλγεβρικές εξισώσεις σε ένα κοινό σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς για όλες τις στρεφόμενες μηχανές.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται περιγραφή του λογισμικού πακέτου WHSSP, το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Αρχικά, περιγράφεται ένα γενικό μοντέλο των ΣΗΕ διαχωρίζοντας τα δυναμικά φαινόμενα σε ακαριαία και σε αυτά που σχετίζονται με διατάξεις συνεχούς ή διακριτού χρόνου. Στη συνέχεια, αναπτύσσονται οι αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις και οι εξισώσεις διαφορών, οι οποίες παριστάνουν τα προαναφερόμενα φαινόμενα. Ακολούθως, περιγράφεται το πρόγραμμα προσομοίωσης σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες του πακέτου WHSSP, το οποίο επιλύει τις παραπάνω εξισώσεις με σκοπό την προσομοίωση του συστήματος. Επίσης, αναπτύσσεται μεθοδολογία

για την επίλυση του προβλήματος των αρχικών συνθηκών του συστήματος, από την οποία υπολογίζονται οι τιμές των μεταβλητών κατάστασης και των παραμέτρων στο αρχικό σημείο λειτουργίας.

Όσον αφορά τη μέθοδο προσομοίωσης, σημειώνεται ότι αρχικά εξάγονται οι διαφορικές εξισώσεις και οι εξισώσεις διαφορών, οι οποίες παριστάνουν τη δυναμική συμπεριφορά των προαναφερόμενων διατάξεων συνεχούς και διακριτού χρόνου αντίστοιχα. Στη συνέχεια, κατασκευάζεται ο πίνακας αγωγιμοτήτων του δικτύου και καταστρώνεται το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων που συνδέει τα διανύσματα των εγχεόμενων ρευμάτων στο δίκτυο και των τάσεων σε όλους τους ζυγούς.

Εάν θεωρηθεί ότι όλα τα στατικά φορτία του εξεταζόμενο δικτύου είναι γραμμικά (φορτία αγωγιμότητας), ο υπολογισμός του διανύσματος των τάσεων στους ζυγούς σε κάθε χρονική στιγμή προσομοίωσης πραγματοποιείται με λύση ενός γραμμικού συστήματος, η οποία προϋποθέτει την τριγωνική παραγοντοποίηση ενός γενικευμένου πίνακα αγωγιμοτήτων και στη συνέχεια μόνο μία εφαρμογή της μεθόδου της ευθείας και αντίστροφης αντικατάστασης [DS72].

Αντίθετα, στην περίπτωση ύπαρξης μη γραμμικών φορτίων, τα διανύσματα των εγχεόμενων ρευμάτων στο δίκτυο και των τάσεων στους ζυγούς συνδέονται με μία μη γραμμική συνάρτηση μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή, έχουν αναπτυχθεί δύο αλγόριθμοι προσομοίωσης.

Ο πρώτος αλγόριθμος προσομοίωσης αποτελεί ουσιαστικά μία επέκταση του προαναφερόμενου αλγορίθμου. Συγκεκριμένα, τα μη γραμμικά φορτία αντικαθίστανται από γραμμικά φορτία, τα οποία αποκαθιστούν δυναμικά τη συμπεριφορά των μη γραμμικών φορτίων πολύ γρήγορα. Με την αντικατάσταση αυτή, αίρεται η μη γραμμικότητα των αλγεβρικών εξισώσεων του δικτύου και επομένως το διάνυσμα των τάσεων των ζυγών υπολογίζεται όπως παραπάνω σε κάθε βήμα προσομοίωσης. Το μειονέκτημα του αλγορίθμου αυτού εντοπίζεται στην αύξηση του αριθμού των διαφορικών εξισώσεων λόγω της δυναμικής αποκατάστασης των φορτίων.

Σύμφωνα με το δεύτερο αλγόριθμο προσομοίωσης, το μη γραμμικό σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων του δικτύου επιλύεται αριθμητικά με τη χρήση της επαναληπτικής μεθόδου Newton-Raphson. Στην περίπτωση αυτή η προσομοίωση του συστήματος πραγματοποιείται με βραδύτερο ρυθμό, καθώς η σύγκλιση της αριθμητικής μεθόδου σε κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης απαιτεί περισσότερες της μίας τριγωνικές παραγοντοποιήσεις ακολουθούμενες από ισάριθμες ή και περισσότερες εφαρμογές της μεθόδου ευθείας και αντίστροφης αντικατάστασης.

Ακολουθούν δύο παραδείγματα ανάλυσης δικτύων με το λογισμικό πακέτο WHSSP. Στο πρώτο παράδειγμα, ένα αυτόνομο δίκτυο 9 ζυγών εξετάζεται από πλευράς ευστάθειας τάσης και μεταβατικής ευστάθειας. Στη δεύτερη περίπτωση, γίνεται εφαρμογή του προγράμματος προσομοίωσης του WHSSP για την προσομοίωση ενός σεναρίου αστάθειας τάσης σε ένα δίκτυο 33 ζυγών και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του προγράμματος EUROSTAG [SBD89,VPM95].

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται η διαδικασία γραμμικοποίησης ενός ΣΗΕ κατά την προσομοίωση, η οποία είναι ενσωματωμένη στο πακέτο WHSSP. Με τη διαδικασία αυτή, κατασκευάζεται σε κάθε χρονικό βήμα ο Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης και υπολογίζονται οι ιδιοτιμές και τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα του γραμμικοποιημένου συστήματος.

Για τη γραμμικοποίηση των εξισώσεων που περιγράφουν ένα ΣΗΕ, λαμβάνονται υπόψη οι σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές, καθώς επίσης και οι ΑΡΤ, τα ΣΠΥ και οι σταθεροποιητές συστήματος ισχύος που εξοπλίζουν τις σύγχρονες γεννήτριες. Ακολούθως, τα ρεύματα του στάτη των μηχανών εκφράζονται σα συναρτήσεις των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος, προκειμένου να απαλειφθούν από τις εξισώσεις των μηχανών. Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία ενός ελαττωμένου πίνακα αγωγιμοτήτων για την παράσταση του δικτύου, στην οποία διατηρούνται μόνο οι ζυγοί όπου είναι συνδεδεμένες σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές. Οι υπόλοιποι ζυγοί απαλείφονται με τη μέθοδο Gauss. Σημειώνεται ότι τα στατικά φορτία του δικτύου γραμμικοποιούνται προκειμένου η επίδρασή τους να ληφθεί υπόψη στον ελαττωμένο πίνακα αγωγιμοτήτων.

Οι εξισώσεις των αλγεβρικών μεταβλητών και των μεταβλητών κατάστασης που προκύπτουν, αναπτύσσονται σε σειρά Taylor από την οποία διατηρούνται μόνο οι όροι πρώτης τάξης, ενώ αγνοούνται οι παράγωγοι ανωτέρας τάξης. Οπότε, το σύνολο των γραμμικών αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων συσχετίζει όλες τις μεταβλητές κατάστασης και τις αλγεβρικές μεταβλητές των μηχανών, τόσο μεταξύ τους όσο και με το δίκτυο. Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η εγκυρότητα της προτεινόμενης μεθόδου γραμμικοποίησης, συγκρίνονται για δύο περιπτώσεις δικτύων οι ιδιοτιμές που υπολογίζονται από τη μέθοδο αυτή με τις αντίστοιχες ιδιοτιμές που υπολογίζονται σε σημεία ισορροπίας από έτοιμη ρουτίνα γραμμικοποίησης της MATLAB (εντολή linmod).

Η διαδικασία γραμμικοποίησης εφαρμόζεται για την παρακολούθηση των ιδιοτιμών του δικτύου στις εξής δύο περιπτώσεις βραχυπρόθεσμης αστάθειας: α) σενάριο επιβράδυνσης κινητήρα επαγωγής και β) σενάριο αποσυγχρονισμού σύγχρονης γεννήτριας.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται χρήση του προγράμματος προσομοίωσης σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες για την ανάλυση ενός σεναρίου βραχυπρόθεσμης αστάθειας σε ένα σύστημα με υψηλό ποσοστό διείσδυσης αιολικών πάρκων εξοπλισμένα από ασύγχρονες ανεμογεννήτριες. Το εξεταζόμενο σύστημα αποτελεί μία απλοποιημένη μορφή του ηλεκτρικού δικτύου της Νότιας Εύβοιας το έτος 2001. Στην περίπτωση αυτή, η διαδικασία γραμμικοποίησης του δικτύου επιβεβαιώνει ότι η εμφανιζόμενη αστάθεια οφείλεται αποκλειστικά στις ασύγχρονες μηχανές. Ακολούθως, προτείνονται και αξιολογούνται διάφορα προληπτικά μέτρα για την αντιμετώπιση του θεωρούμενου προβλήματος.

Στο **Κεφάλαιο 6** μελετάται από πλευράς βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης η βέλτιστη συνδεσμολογία ενός συγκεκριμένου επιπέδου αιολικής παραγωγής στο ασθενές ηλεκτρικό δίκτυο της Ν. Σαμοθράκης.

Στο **Κεφάλαιο 7** εξετάζεται ένα σενάριο στο οποίο η βραχυπρόθεσμη αστάθεια των μηχανών επαγωγής συμβαίνει σχεδόν ταυτόχρονα με τον αποσυγχρονισμό μίας σύγχρονης γεννήτριας. Στην περίπτωση αυτή, οι χρονικές προσομοιώσεις δεν μπορούν να δώσουν μία σαφή εικόνα της αλληλουχίας μεταξύ των δύο φαινομένων. Η εικόνα αυτή ξεκαθαρίζεται με τη βοήθεια της διαδικασίας γραμμικοποίησης κατά την εξέλιξη του φαινομένου της αστάθειας και τον υπολογισμό των κρίσιμων ιδιοτιμών και των αντίστοιχων ιδιοδιανυσμάτων του συστήματος. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση των ρυθμών του συστήματος κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, σχεδιάζονται προληπτικά μέτρα για την αποφυγή εκδήλωσης της βραχυπρόθεσμης αστάθειας.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 συνοψίζονται τα συμπεράσματα, οι προοπτικές και η συμβολή της διατριβής.

# 2 ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

# 2.1 Σύγχρονες Γεννήτριες

# 2.1.1 Γενικά

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν μία συμμετρική τριφασική σύγχρονη γεννήτρια, καθώς επίσης και οι αναγκαίες παραδοχές και απλοποιήσεις που οδηγούν στο μοντέλο τέταρτης τάξεως, το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή.

Για την εξαγωγή των εξισώσεων του εξεταζόμενου μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές [Kun94]:

- (1) Τα τυλίγματα του στάτη έχουν ημιτονοειδή κατανομή κατά μήκος του διακένου.
- (2) Οι αύλακες του στάτη δεν προκαλούν σημαντική μεταβολή των αυτεπαγωγών και των αλληλεπαγωγών λόγω της θέσης του δρομέα.
- (3) Το φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης αμελείται.
- (4) Η συνεισφορά του μαγνητικού κορεσμού αμελείται.

Οι παραδοχές (1), (2) και (3) εισάγουν αμελητέο σφάλμα όσον αφορά τη λειτουργία της πραγματικής μηχανής, όπως έχει αποδειχθεί από μετρήσεις. Η παραδοχή (4) οδηγεί στην ύπαρξη μόνο γραμμικά συζευγμένων μαγνητικών κυκλωμάτων, γεγονός το οποίο εξυπηρετεί την ευκολία της ανάλυσης.

Στο Σχ. 2.1 παριστάνεται συμβολικά μία τριφασική σύγχρονη μηχανή.



Σχ. 2.1: Κυκλωματική παράσταση σύγχρονης μηχανής

Το κύκλωμα του στάτη αποτελείται από τα τριφασικά τυλίγματα του τυμπάνου με στιγμιαίες τάσεις  $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$  και στιγμιαία ρεύματα  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  αντίστοιχα. Επειδή στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι σύγχρονες μηχανές λειτουργούν ως γεννήτριες, θεωρείται ότι τα ρεύματα του στάτη έχουν θετικό πρόσημο όταν εξέρχονται από τους ακροδέκτες της μηχανής.

Το κύκλωμα του δρομέα περιλαμβάνει το τύλιγμα του πεδίου διέγερσης, καθώς επίσης και τα τυλίγματα αποσβέσεως. Τα τυλίγματα αυτά είναι τοποθετημένα κατά μήκος του ευθέος (d) και του εγκάρσιου μαγνητικού (q) άξονα. Ο ευθύς άξονας συμπίπτει με τον μαγνητικό άξονα του τυλίγματος διεγέρσεως, ενώ ο εγκάρσιος άξονας προπορεύεται κατά 90°. Τα τυλίγματα kd, kq1 και kq2 είναι τυλίγματα αποσβέσεως, τα οποία παριστάνουν την επίδραση των δινορρευμάτων στις μηχανές με

συμπαγή δρομέα. Στο τύλιγμα του πεδίου διεγέρσεως επιβάλλεται συνεχής τάση  $(v_{fd})$ , ενώ τα τυλίγματα αποσβέσεως θεωρούνται βραχυκυκλωμένα.

Η κίνηση του δρομέα χαρακτηρίζεται από την ηλεκτρική γωνία  $\theta_r$  ανάμεσα στον ευθύ άξονα του δρομέα και τον άξονα της φάσης α του στάτη, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.1. Αν το πεδίο του δρομέα της μηχανής περιστρέφεται με ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα  $\omega_r$  (σε ηλεκτρικά rad/s), τότε η γωνία  $\theta_r$  (σε ηλεκτρικά rad) δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_r = \omega_r t + \theta_{r0} \tag{2.1}$$

όπου  $\theta_{r0}$  είναι μία αυθαίρετη αρχική γωνία (σε ηλεκτρικά rad). Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας  $\theta_r$  ισούται με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα  $\omega_r$ , δηλαδή:

$$\dot{\theta}_r = \omega_r \tag{2.2}$$

#### 2.1.2 Περιγραφή σύγχρονης μηχανής με τις εξισώσεις του Park

Ο μετασχηματισμός του Park [KWS00] αποτελεί το μαθηματικό εργαλείο για την ανάλυση των σύγχρονων μηχανών. Ο μετασχηματισμός αυτός συνίσταται στην αντικατάσταση των τριών τυλιγμάτων *a*, *b*, *c* του στάτη από τρία υποθετικά (ισοδύναμα) τυλίγματα *d*, *q*, 0. Τα τυλίγματα *d*, *q* του στάτη περιστρέφονται μαζί με το δρομέα της μηχανής και βρίσκονται στους ίδιους άξονες με τα αντίστοιχα τυλίγματα του δρομέα (τύλιγμα διεγέρσεως και τυλίγματα αποσβέσεως). Το τρίτο τύλιγμα 0 δεν είναι μαγνητικά συζευγμένο με τα άλλα δύο νέα τυλίγματα του στάτη και παίζει ρόλο μόνο σε συνθήκες ασύμμετρης φόρτισης της μηχανής. Επειδή στην παρούσα ανάλυση θα ασχοληθούμε μόνο με συμμετρικές συνθήκες φόρτισης, το τύλιγμα 0 παραλείπεται. Η σχηματική παράσταση των τυλιγμάτων μίας σύγχρονης μηχανής μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού του Park φαίνεται στο Σχ. 2.2.



Σχ. 2.2: Παράσταση τυλιγμάτων σύγχρονης μηχανής μετά το μετασχηματισμό του Park

Το κύριο πλεονέκτημα του μετασχηματισμού του Park είναι η απαλοιφή της χρονικής εξάρτησης των αυτεπαγωγών και των αλληλεπαγωγών από τις εξισώσεις τάσεως της μηχανής [Kun94,KWS00]. Οι εξισώσεις του Park για τα τυλίγματα *d*, *q* του στάτη στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα γράφονται ως εξής:

$$v_d = -r_s i_d - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_q + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_d \tag{2.3}$$

$$v_q = -r_s i_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_d + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_q$$
(2.4)

όπου:

- $-v_d, v_q$  είναι οι τάσεις των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα.
- $-i_d$ ,  $i_q$  είναι τα ρεύματα των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα.
- $-\psi_d, \psi_q$  είναι οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα.
- $\omega_r$  είναι η βασική ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα (σε ηλεκτρικά rad/s) του συστήματος.
- $r_s$  είναι η ωμική αντίσταση του στάτη.

Οι όροι  $(\omega_r/\omega_b)\psi_d$  και  $(\omega_r/\omega_b)\psi_q$  των παραπάνω σχέσεων, οι οποίοι είναι ανάλογοι της γωνιακής ταχύτητας του διανύσματος της τερματικής τάσης, προκύπτουν από το στρεφόμενο πεδίο και γι' αυτό το λόγο ονομάζονται τάσεις ταχύτητας. Οι όροι  $(1/\omega_b)\dot{\psi}_d$  και  $(1/\omega_b)\dot{\psi}_q$ , οι οποίοι είναι ίσοι με το ρυθμό μεταβολής της πεπλεγμένης ροής ανά δευτερόλεπτο, ονομάζονται τάσεις μετασχηματιστού.

Οι εξισώσεις του Park για τα τυλίγματα του δρομέα του Σχ. 2.2 γράφονται ως εξής:

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{fd}$$
(2.5)

$$0 = r_{kd}\dot{i}_{kd} + \frac{1}{\omega_b}\dot{\psi}_{kd}$$
(2.6)

$$0 = r_{kq1}i_{kq1} + \frac{1}{\omega_b}\dot{\psi}_{kq1}$$
(2.7)

$$0 = r_{kq2}i_{kq2} + \frac{1}{\omega_b}\dot{\psi}_{kq2}$$
(2.8)

όπου  $v_{fd}$  είναι η συνεχής τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του τυλίγματος διεγέρσεως,  $r_{fd}$  είναι η αντίστασή του,  $\psi_{fd}$  η πεπλεγμένη ροή ανά δευτερόλεπτο και  $i_{fd}$  το ρεύμα του πεδίου. Οι αντίστοιχοι συμβολισμοί των (2.6), (2.7) και (2.8) αναφέρονται στα υπόλοιπα τυλίγματα του δρομέα.

Σημειώνεται ότι οι (2.3)-(2.8) είναι διατυπωμένες στο ανά μονάδα σύστημα του στάτη, τα βασικά μεγέθη του οποίου είναι η ονομαστική τριφασική ισχύς και η τερματική τάση της μηχανής.

Όσον αφορά τη δυναμική τους συμπεριφορά, οι σύγχρονες μηχανές χαρακτηρίζονται από [Kun94]:

- Τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα των τυλιγμάτων του στάτη, τα οποία σχετίζονται με τις τάσεις μετασχηματιστού. Συγκεκριμένα, μετά από μία διαταραχή οι τάσεις μετασχηματιστού αποσβένονται μέσα σε κλάσματα του δευτερολέπτου, αφήνοντας τις τάσεις ταχύτητας να διαδραματίσουν πρωταρχικό ρόλο στην απόκριση του συστήματος. Για παράδειγμα, μετά από ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα, οι τάσεις μετασχηματιστού είναι υπεύθυνες για την εμφάνιση της συνεχούς συνιστώσας στα ρεύματα του στάτη, η οποία μηδενίζεται σε χρονικό διάστημα μερικών δέκατων του δευτερολέπτου. Το χρονικό αυτό διάστημα θεωρείται πολύ μικρό σε σχέση με το διάστημα ενδιαφέροντος σε μελέτες ευστάθειας. Επομένως, τα εξεταζόμενα φαινόμενα συνήθως αμελούνται σε παρόμοιες μελέτες.
- Τα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα των τυλιγμάτων του δρομέα. Τα φαινόμενα αυτά σχετίζονται με τις παραγώγους των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο ψ<sub>fd</sub>, ψ<sub>kq1</sub> κλπ. των ηλεκτρικών εξισώσεων του δρομέα και μπορούν να διαχωριστούν σε δύο επιμέρους κατηγορίες:
  - Τα υπομεταβατικά, τα οποία σχετίζονται με τα τυλίγματα αποσβέσεως και τα δινορρεύματα.
     Τα φαινόμενα αυτά εξελίσσονται αρκετά γρήγορα.
  - Τα μεταβατικά, η δυναμική των οποίων καθορίζεται από το τύλιγμα του πεδίου διεγέρσεως.
- Τη δυναμική συμπεριφορά της μηχανικής κίνησης του δρομέα.

Αμελώντας τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα του στάτη, οι τάσεις και τα ρεύματα του στάτη περιέχουν μόνο όρους θεμελιώδους συχνότητας και επομένως οι διαφορικές εξισώσεις (2.3) και (2.4) μετατρέπονται σε αλγεβρικές.

Επίσης, τα ταχέα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα του δικτύου λαμβάνουν χώρα στην ίδια χρονική κλίμακα με τα μεταβατικά φαινόμενα του στάτη μίας σύγχρονης μηχανής. Επομένως, επειδή η χρονική κλίμακα των φαινομένων αυτών δεν ενδιαφέρει - όπως προαναφέρθηκε - σε μελέτες ευστάθειας, εξάγεται το συμπέρασμα ότι μπορούν να αμεληθούν και τα ταχέα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα του δικτύου. Η τελευταία παραδοχή επιτρέπει την περιγραφή του δικτύου με μιγαδικές αλγεβρικές εξισώσεις (αντί διαφορικών εξισώσεων), όπως θα αναπτυχθεί εκτενέστερα σε επόμενη ενότητα.

# 2.1.3 Εξισώσεις κίνησης δρομέα

Σε μελέτες ευστάθειας συνηθίζεται να αναφέρεται η θέση του πεδίου του δρομέα ως προς έναν άξονα αναφοράς. Για το λόγο αυτό, ορίζεται η γωνία δ του δρομέα της σύγχρονης μηχανής ως η ηλεκτρική γωνία (σε ηλεκτρικά rad) μεταξύ του εγκάρσιου μαγνητικού άξονα της μηχανής και ενός άξονα αναφοράς, δηλαδή:

$$\delta = \theta_r - \omega_{svs} t + \delta_0 \tag{2.9}$$

όπου  $\delta_0$  είναι η αρχική τιμή της γωνίας  $\delta$ , ενώ  $\omega_{sys}$  είναι η γωνιακή ταχύτητα του άξονα αναφοράς (σε ηλεκτρικά rad/s). Παραγωγίζοντας και τα δύο μέλη της (2.9), προκύπτει η παρακάτω διαφορική σχέση:

$$\dot{\delta} = \dot{\theta}_r - \omega_{sys} \tag{2.10}$$

η οποία λόγω της (2.2), γίνεται:

$$\dot{\delta} = \omega_r - \omega_{_{SVS}} \tag{2.11}$$

Η διαφορική εξίσωση επιταχύνσεως του δρομέα της μηχανής δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$2H\frac{\dot{\omega}_r}{\omega_b} = T_m - T_e - D\left(\frac{\omega_r}{\omega_b} - 1\right)$$
(2.12)

όπου:

- Η είναι η ανηγμένη σταθερά αδράνειας σε MWs/MVA.
- ω<sub>r</sub> είναι η γωνιακή ταχύτητα του πεδίου του δρομέα σε ηλεκτρικά rad/s.
- Τ<sub>m</sub> είναι η ανά μονάδα παραγόμενη από το στρόβιλο μηχανική ροπή.
- Τ<sub>e</sub> είναι η ανά μονάδα ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας.
- D είναι ο ανά μονάδα συντελεστής απόσβεσης.

Οι διαφορικές εξισώσεις (2.11) και (2.12) είναι γνωστές σαν εξισώσεις ταλάντωσης της μηχανής και συνιστούν την απλούστερη παράσταση της σύγχρονης μηχανής.

### 2.1.4 Μοντέλο τέταρτης τάξεως σύγχρονης γεννήτριας

Το μοντέλο τέταρτης τάξεως, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διατριβή, στηρίζεται στις ακόλουθες παραδοχές [Kun94]:

- (α) Οι τάσεις μετασχηματιστού  $(1/\omega_b)\dot{\psi}_d$  και  $(1/\omega_b)\dot{\psi}_q$  αμελούνται για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.
- (β) Στον δρομέα παριστάνονται δύο μόνο τυλίγματα, το τύλιγμα του πεδίου διεγέρσεως και ένα τύλιγμα αποσβέσεως στον εγκάρσιο μαγνητικό άξονα. Τα δύο αυτά τυλίγματα θεωρείται ότι δεν είναι μαγνητικά συζευγμένα μεταξύ τους.
- (γ) Η επίδραση του μαγνητικού κορεσμού αμελείται.
- (δ) Η δυναμική της κίνησης του δρομέα περιγράφεται από τις εξισώσεις ταλάντωσης της μηχανής.

Σύμφωνα με την παραδοχή (α) οι διαφορικές εξισώσεις (2.3) και (2.4) των τυλιγμάτων του στάτη μετατρέπονται στις παρακάτω αλγεβρικές σχέσεις:

$$v_d = -r_s i_d - \lambda_\omega \psi_q \tag{2.13}$$

$$v_q = -r_s i_q + \lambda_\omega \psi_d \tag{2.14}$$

όπου  $\lambda_{\omega}$  είναι ο λόγος των γωνιακών ταχυτήτων  $\omega_r$  προς  $\omega_b$ . Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι επειδή οι σύγχρονες μηχανές λειτουργούν συνήθως πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα (απόκλιση ±1%), ο λόγος  $\lambda_{\omega}$  είναι πρακτικά ίσος με τη μονάδα και για πρακτικούς λόγους αμελείται. Ωστόσο, επειδή στην παρούσα διατριβή θα εξεταστούν αυτόνομα συστήματα, στα οποία η διακύμανση της συχνότητας μπορεί να λάβει σοβαρές τιμές, θα θεωρηθεί ότι τόσο το δίκτυο όσο και τα τυλίγματα του στάτη των μηχανών λειτουργούν σε συχνότητα  $\omega_{sys}$  διαφορετική από την ονομαστική  $\omega_b$ . Συνεπώς, ο λόγος  $\lambda_{\omega}$  δίνεται ως:

$$\lambda_{\omega} = \frac{\omega_{sys}}{\omega_{b}} \tag{2.15}$$

Οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των δύο τυλιγμάτων του στάτη και των δύο τυλιγμάτων του δρομέα στο πλαίσιο αναφοράς dq του δρομέα συνδέονται με τα αντίστοιχα ρεύματα σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις αλληλεπαγωγών:

$$\psi_d = -X_d i_d + X_{md} i_{fd} \tag{2.16}$$

$$\psi_q = -X_q i_q + X_{mq} i_{kq} \tag{2.17}$$

$$\psi_{fd} = -X_{md}i_d + X_{fd}i_{fd}$$
(2.18)

$$\psi_{kq} = -X_{mq}i_q + X_{kq}i_{kq} \tag{2.19}$$

όπου:

- $-X_d, X_q$  είναι οι σύγχρονες αντιδράσεις κατά τον ευθύ d και τον εγκάρσιο άξονα q αντίστοιχα.
- $X_{fd}$  είναι η επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος διεγέρσεως (ανηγμένη στο στάτη).
- Χ<sub>kq</sub> είναι η επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος αποσβέσεως στον εγκάρσιο άξονα του δρομέα (ανηγμένη στο στάτη).
- Χ<sub>md</sub> είναι η αμοιβαία επαγωγική αντίδραση μεταξύ του τυλίγματος διεγέρσεως και του τυλίγματος του άξονα d του στάτη.
- Χ<sub>mq</sub> είναι η αμοιβαία επαγωγική αντίδραση μεταξύ του τυλίγματος αποσβέσεως και του τυλίγματος του άξονα q του στάτη.

Η παραδοχή (β) οδηγεί στις ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν τη δυναμική του ηλεκτρικού κυκλώματος του δρομέα:

$$v_{fd} = r_{fd}\dot{i}_{fd} + \frac{1}{\omega_b}\dot{\psi}_{fd}$$
(2.20)

$$0 = r_{kq}\dot{i}_{kq} + \frac{1}{\omega_b}\dot{\psi}_{kq} \tag{2.21}$$

Προκειμένου να απαλειφθούν οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο  $\psi_d$  και  $\psi_q$  από τις αλγεβρικές εξισώσεις (2.13) και (2.14) του στάτη αντίστοιχα, εκφράζεται καταρχήν το ρεύμα του πεδίου διεγέρσεως  $i_{fd}$  συναρτήσει των όρων  $\psi_{fd}$  και  $i_d$  από την (2.18), δηλαδή:

$$i_{fd} = \frac{1}{X_{fd}} (\psi_{fd} + X_{md} i_d)$$
(2.22)

και ομοίως το ρεύμα του τυλίγματος αποσβέσεως  $i_{kq}$  συναρτήσει των όρων  $\psi_{kq}$  και  $i_q$  από την (2.19), δηλαδή:

$$i_{kq} = \frac{1}{X_{kq}} (\psi_{kq} + X_{mq} i_q)$$
(2.23)

Στη συνέχεια, οι (2.22) και (2.23) αντικαθίστανται στις (2.16) και (2.17) των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο  $\psi_d$  και  $\psi_q$  του στάτη αντίστοιχα, οπότε προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\psi_d = -\left(X_d - \frac{X_{md}^2}{X_d}\right)i_d + \frac{X_{md}}{X_{fd}}\psi_{fd}$$
(2.24)

και

$$\psi_{q} = -\left(X_{q} - \frac{X_{mq}^{2}}{X_{kq}}\right)i_{q} + \frac{X_{mq}}{X_{kq}}\psi_{kq}$$
(2.25)

Στο σημείο αυτό ορίζονται η ΗΕΔ  $E'_a$ :

$$E'_q = \frac{X_{md}}{X_{fd}} \psi_{fd} \tag{2.26}$$

η οποία ονομάζεται μεταβατική ΗΕΔ κατά τον εγκάρσιο άξονα q και η αντίδραση  $X'_d$ :

$$X'_{d} = X_{d} - \frac{X^{2}_{md}}{X_{fd}}$$
(2.27)

η οποία ονομάζεται μεταβατική αντίδραση κατά τον ευθύ άξονα d.

Αντίστοιχα, εισάγονται η ΗΕΔ  $E'_d$  (μεταβατική ΗΕΔ κατά τον ευθύ άξονα):

$$E'_d = -\frac{X_{mq}}{X_{kq}}\psi_{kq} \tag{2.28}$$

και η αντίδραση  $X_q^\prime$  (μεταβατική αντίδραση κατά τον εγκάρ<br/>σιο άξονα):

$$X'_{q} = X_{q} - \frac{X^{2}_{mq}}{X_{kq}}$$
(2.29)

Σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς, οι (2.24) και (2.25) παίρνουν την εξής μορφή:

$$\psi_d = -X'_d i_d + E'_q \tag{2.30}$$

$$\psi_q = -X'_q i_q - E'_d \tag{2.31}$$

Αντικαθιστώντας τις (2.31) και (2.30) στις (2.13) και (2.14) των τάσεων των τυλιγμάτων του στάτη αντίστοιχα, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$v_d = -r_s i_d + \lambda_\omega X'_q i_q + \lambda_\omega E'_d \tag{2.32}$$

$$v_q = -r_s i_q - \lambda_\omega X'_d i_d + \lambda_\omega E'_q \tag{2.33}$$

Ακολούθως, τα ρεύματα των δύο τυλιγμάτων του δρομέα αντικαθίστανται από τις (2.22) και (2.23) στις (2.20) και (2.21) αντίστοιχα, οι οποίες παίρνουν την εξής μορφή:

$$v_{fd} = \frac{r_{fd}}{X_{fd}} \psi_{fd} + \frac{r_{fd} X_{md}}{X_{fd}} \dot{i}_d + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{fd}$$
(2.34)

$$0 = \frac{r_{kq}}{X_{kq}}\psi_{kq} + \frac{r_{kq}X_{mq}}{X_{kq}}\dot{i}_{q} + \frac{1}{\omega_{b}}\dot{\psi}_{kq}$$
(2.35)

Εκτελώντας τις πράξεις στις παραπάνω εξισώσεις, προκύπτει:

$$\left(\frac{X_{fd}}{\omega_b r_{fd}}\right)\left(\frac{X_{md}}{X_{fd}}\dot{\psi}_{fd}\right) = \frac{X_{md}}{r_{fd}}v_{fd} - \frac{X_{md}}{X_{fd}}\psi_{fd} - \frac{X_{md}^2}{X_{fd}}i_d$$
(2.36)

$$\left(\frac{X_{kq}}{\omega_b r_{kq}}\right)\left(\frac{X_{mq}}{X_{kq}}\dot{\psi}_{kq}\right) = -\frac{X_{mq}}{X_{kq}}\psi_{kq} - \frac{X_{mq}^2}{X_{kq}}i_q$$
(2.37)

Ο λόγος για τον οποίο γράφτηκαν οι ηλεκτρικές διαφορικές εξισώσεις του δρομέα στην παραπάνω μορφή, είναι για να οριστούν η ΗΕΔ διεγέρσεως  $E_f$ :

$$E_f = \frac{X_{md}}{r_{fd}} v_{fd} \tag{2.38}$$

η οποία είναι ανάλογη της συνεχούς τάσεως v<sub>fd</sub> του πεδίου, καθώς επίσης και οι χρονικές σταθερές:

$$T'_{d0} = \frac{X_{fd}}{\omega_b r_{fd}} \tag{2.39}$$

και

$$T'_{q0} = \frac{X_{kq}}{\omega_b r_{kq}}$$
(2.40)

οι οποίες ονομάζονται μεταβατικές χρονικές σταθερές ανοιχτού κυκλώματος ευθέος (d) και εγκάρσιου (q) άξονα, αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς, οι διαφορικές εξισώσεις των τυλιγμάτων του δρομέα καταλήγουν στην εξής μορφή:

$$T'_{d0}\dot{E}'_{q} = E_{f} - E'_{q} - (X_{d} - X'_{d})i_{d}$$
(2.41)

$$T'_{q0}\dot{E}'_{d} = -E'_{d} + (X_{q} - X'_{q})i_{q}$$
(2.42)

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή  $T_e$  δίνεται συναρτήσει των ρευμάτων και των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο του στάτη από την παρακάτω σχέση:

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d \tag{2.43}$$

Αντικαθιστώντας τους όρους  $\psi_d$  και  $\psi_q$  σύμφωνα με τις (2.30) και (2.31), προκύπτει ο ακόλουθος τύπος για τον υπολογισμό της ηλεκτρομαγνητικής ροπής  $T_e$ .

$$T_e = E'_d i_d + E'_q i_q + (X'_q - X'_d) i_d i_q$$
(2.44)

Η παραπάνω εξίσωση αντικαθίσταται στη διαφορική εξίσωση (2.12) επιτάχυνσης του δρομέα της μηχανής, η οποία παίρνει τελικά την εξής μορφή:

$$2H\frac{\dot{\omega}_{r}}{\omega_{b}} = T_{m} - E'_{d}i_{d} - E'_{q}i_{q} - (X'_{q} - X'_{d})i_{d}i_{q} - D\left(\frac{\omega_{r}}{\omega_{b}} - 1\right)$$
(2.45)

Αναφορικά με την ενεργό ισχύ εξόδου της γεννήτριας  $P_G$ , υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_G = v_d i_d + v_q i_q \tag{2.46}$$

ενώ η παραγόμενη άεργος ισχύς  $Q_G$  προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_G = v_q i_d - v_d i_q \tag{2.47}$$

#### 2.1.5 Σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς

Οι εξισώσεις του Park, οι οποίες παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, ανάγουν τις τάσεις και τα ρεύματα του στάτη μίας σύγχρονης γεννήτριας σε ένα πλαίσιο αναφοράς dq το οποίο περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της. Όπως γίνεται αντιληπτό, σε ένα σύστημα με πολλές μηχανές θα υπάρχει ένα τέτοιο πλαίσιο για κάθε μία σύγχρονη γεννήτρια, το οποίο θα περιστρέφεται με την ταχύτητα του δρομέα της.

Επομένως στην περίπτωση αυτή, είναι αναγκαίο να οριστεί ένα κοινό ορθογώνιο πλαίσιο αναφοράς, στο οποίο θα αναχθούν τα μεγέθη του στάτη όλων των σύγχρονων γεννητριών. Το κοινό αυτό πλαίσιο θεωρείται ότι περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα του συστήματος ω<sub>sys</sub>. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, το κοινό αυτό πλαίσιο αναφοράς θα αναφέρεται σαν σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς *xy*. Στο Σχ. 2.3 φαίνονται το σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς *xy* του συστήματος, καθώς επίσης και το πλαίσιο αναφοράς αναφοράς *dq* του δρομέα μίας σύγχρονης γεννήτριας.

Ο άξονας x του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς xy του συστήματος θεωρείται ότι αποτελεί τον άξονα αναφοράς όλων των γωνιών, ενώ ο άξονας y προπορεύεται κατά 90°.

Η δυναμική απόκριση της γωνίας δ<br/> μίας σύγχρονης μηχανής περιγράφεται από τη διαφορική σχέση (2.11).



Σχ. 2.3: Ορθογώνια πλαίσια αναφοράς συστήματος και σύγχρονης γεννήτριας

Στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy, κάθε εναλλασσόμενο μέγεθος μπορεί να παρασταθεί σαν μιγαδικός αριθμός με πραγματικό και φανταστικό μέρος την τετμημένη και την τεταγμένη του αντίστοιχα. Για παράδειγμα, το ρεύμα του στάτη  $\hat{I}_s$  μίας σύγχρονης γεννήτριας γράφεται ως:

$$\hat{I}_s = i_x + j i_y \tag{2.48}$$

Ο μετασχηματισμός ενός μεγέθους από το πλαίσιο dq της σύγχρονης γεννήτριας στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy, πραγματοποιείται, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.3, προσθέτοντας στη φάση του γωνία π/2-δ. Στην περίπτωση του ρεύματος στάτη  $\hat{I}_s$ , ο μετασχηματισμός αυτός παριστάνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$$
(2.49)

όπου ο πίνακας **T** ονομάζεται πίνακας μετασχηματισμού και αντιστοιχεί στον στροφέα  $e^{-j\left(\frac{\pi}{2}-\delta\right)}$ . Αντίστοιχη σχέση ισχύει και για τις προβολές  $(v_x, v_y, v_d$  και  $v_d)$  της τάσης του στάτη.

Προκειμένου να εκφραστούν τα μεγέθη του στάτη της γεννήτριας στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος, γράφονται καταρχήν οι αλγεβρικές εξισώσεις (2.32) και (2.33) του στάτη στην εξής μορφή:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} r_s & -\lambda_{\omega} X'_q \\ \lambda_{\omega} X'_d & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \lambda_{\omega} \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix}$$
(2.50)

από την οποία χρησιμοποιώντας τον παραπάνω πίνακα μετασχηματισμού Τ, προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = -\mathbf{T} \begin{bmatrix} r_s & -\lambda_\omega X'_q \\ \lambda_\omega X'_d & r_s \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \lambda_\omega \mathbf{T} \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix}$$
(2.51)

Οι προβολές *i<sub>x</sub>*, *i<sub>y</sub>* του εγχεόμενου ρεύματος της γεννήτριας προς το δίκτυο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς *xy* του συστήματος, δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = -\frac{1}{r_s^2 + \lambda_\omega^2 X_d' X_q'} \mathbf{T} \begin{bmatrix} r_s & \lambda_\omega X_q' \\ -\lambda_\omega X_d' & r_s \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} - \lambda_\omega \mathbf{T} \begin{bmatrix} E_d' \\ E_q' \end{bmatrix} \right\}$$
(2.52)

Σημειώνεται ότι ο αντίστροφος του πίνακα μετασχηματισμού **T**, ο οποίος αντιστοιχεί στο στροφέα  $e^{j\left(\frac{\pi}{2}-\delta\right)}$ , είναι ίσος με τον ανάστροφό του, δηλαδή:

$$\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{T}' = \begin{bmatrix} \sin \delta & -\cos \delta \\ \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix}$$
(2.53)

Η ανά μονάδα τιμή της φαινόμενης ισχύος  $S_G$ , η οποία παράγεται από τη σύγχρονη μηχανή δίνεται από τον τύπο:

$$S_G = P_G + j Q_G = \hat{V}_t \hat{I}_s^*$$
 (2.54)

όπου  $\hat{V}_t$  είναι η τερματική της τάση. Αντικαθιστώντας τα μεγέθη του στάτη με την παράστασή τους στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος, προκύπτει:

$$S_G = (v_x + j v_y)(i_x + j i_y)^* = (v_x i_x + v_y i_y) + j (v_y i_x - v_x i_y)$$
(2.55)

δηλαδή ισοδύναμα:

$$P_G = v_x i_x + v_y i_y \tag{2.56}$$

$$Q_G = v_y i_x - v_x i_y \tag{2.57}$$

# 2.2 Αυτόματη Ρύθμιση Τάσης

#### 2.2.1 Γενικά

Ο Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης (APT) είναι η διάταξη ελέγχου, η οποία κρατάει σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) την τερματική τάση της γεννήτριας. Η γενική διάταξη ενός APT φαίνεται στο Σχ. 2.4, όπου οι διακεκομμένες γραμμές παριστάνουν βαθμίδες οι οποίες χρησιμοποιούνται προαιρετικά, ενώ οι αριθμημένες συνεχείς γραμμές δείχνουν εναλλακτικές μορφές σχεδίασης της διάταξης [VCV98].



Σχ. 2.4: Διάγραμμα βαθμίδων Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης

Σύμφωνα με την παραπάνω διάταξη, το μέτρο  $V_t$  της τερματικής τάσης της γεννήτριας μετράται με τη βοήθεια ενός μετασχηματιστή τάσης (PT) και στη συνέχεια ανορθώνεται ώστε να παραχθεί ένα συνεχές (DC) σήμα, το οποίο είναι ανάλογο με την ενεργό τιμή της εναλλασσόμενης (AC) τερματικής τάσης. Σε μερικές περιπτώσεις, το συνεχές αυτό σήμα μπορεί να είναι ανάλογο μίας τάσης  $V_C$  διάφορης από την τερματική:

$$V_C = \left| \hat{V}_t \pm Z_C \hat{I}_s \right|$$

όπου η  $Z_C$  ονομάζεται σύνθετη αντίσταση αντιστάθμισης, ενώ το εξερχόμενο ρεύμα στάτη  $\hat{I}_s$  της σύγχρονης γεννήτριας μετράται με τη βοήθεια ενός μετασχηματιστή έντασης (CT).

Ακολούθως, το συνεχές σήμα  $V_C$  συγκρίνεται με μία τάση αναφοράς  $V_{ref}$ , η οποία αντιπροσωπεύει το επιθυμητό επίπεδο της τερματικής τάσης. Για τον υπολογισμό της τάσης αναφοράς λαμβάνεται υπόψη η αρχική κατάσταση λειτουργίας της γεννήτριας.

Η διαφορά  $V_{ref}$ - $V_C$  εισάγεται στην κύρια μονάδα του ρυθμιστή, της οποίας ο ρόλος είναι να αυξήσει την τάση διεγέρσεως της γεννήτριας στην περίπτωση κατά την οποία είτε μειωθεί η τερματική της τάση  $V_t$  ή αυξηθεί η τάση αναφοράς  $V_{ref}$  και αντιστρόφως. Συγκεκριμένα, η κύρια μονάδα του ρυθμιστή ενισχύει το παραπάνω σφάλμα και το διαμορφώνει κατάλληλα για να εισαχθεί στο σύστημα διέγερσης. Η διεγέρτρια είναι μία βοηθητική διάταξη η οποία αποδίδει συνεχή τάση στο τύλιγμα του πεδίου της μηχανής. Οι διεγέρτριες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Στρεφόμενες διεγέρτριες, στις οποίες η ισχύς διεγέρσεως προέρχεται από μηχανική ισχύ (συνήθως από τον άξονα της μηχανής) μέσω ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας. Τα στρεφόμενα συστήματα διεγέρσεως μπορούν να αποτελούνται από μηχανές συνεχούς ρεύματος ή από μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνδυασμό με ηλεκτρονικές ανορθωτικές διατάξεις. Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος είναι αυτές που χρησιμοποιήθηκαν πρώτες στα συστήματα διέγερσης, για να αντικατασταθούν μετά τη δεκαετία του 1970 από τις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος. Ωστόσο, σε μερικούς σταθμούς παραγωγής μπορεί κανείς να συναντήσει ακόμα σε λειτουργία συστήματα διέγερσης με μηχανές συνεχούς ρεύματος. Ωστόσο, σε μερικούς σταθμούς παραγωγής μπορεί κανείς να συναντήσει ακόμα σε λειτουργία συστήματα διέγερσης με μηχανές συνεχούς ρεύματος. Οι στρεφόμενες διεγέρτριες μπορεί να είναι είτε αυτοδιεγειρόμενες ή να χρησιμοποιούν μία βοηθητική στρεφόμενου μαχανή για τη διέγερσή τους. Η τελευταία μπορεί να είναι μία γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες συνοδευόμενη από ελεγχόμενη διάταξη ανορθωτών.
- Διεγέρτριες στατικού τύπου, στις οποίες η ισχύς διεγέρσεως προέρχεται είτε από το ζυγό της σύγχρονης μηχανής ή από ένα βοηθητικό ζυγό μέσω ενός μετασχηματιστή. Η μετατροπή του ρεύματος σε συνεχές γίνεται με ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις με θυρίστορ.

Στον αθροιστή του APT μπορεί να προστεθεί σήμα από τον σταθεροποιητή συστήματος ισχύος (Power System Stabilizer), ο οποίος αποτελεί μία διάταξη που ενεργοποιείται σε μεταβατικές καταστάσεις και παρέχει πρόσθετη ροπή αποσβέσεως μέσω του συστήματος διέγερσης. Στη μόνιμη κατάσταση ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος έχει μηδενική έξοδο, αφήνοντας ανεπηρέαστη την τερματική τάση της γεννήτριας. Στην ενότητα 3.4 περιγράφεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η λειτουργία των σταθεροποιητών συστήματος ισχύος, ενώ παράλληλα αναπτύσσεται ένα μοντέλο της διάταξης αυτής, το οποίο θεωρείται κατάλληλο για δυναμικές προσομοιώσεις. Στο Σχ. 2.4 φαίνονται διάφορα σήματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι του εξεταζόμενου σταθεροποιητή.

Επιπρόσθετα, ο ΑΡΤ συνοδεύεται από διάφορα συστήματα περιορισμού, όπως [MDV00]:

- Το Σύστημα Προστασίας Υποδιεγέρσεως (underexcitation limiter), το οποίο εμποδίζει τη μείωση του ρεύματος διέγερσης κάτω από ένα όριο (το οποίο αντιστοιχεί σε συνθήκες απορρόφησης άεργου ισχύος) για λόγους ευστάθειας. Το θεωρούμενο σύστημα δεν φαίνεται στο Σχ. 2.4.
- Τον Περιοριστή Τάσης/Συχνότητας (Volts-per-Hertz limiter), ο οποίος προστατεύει τη γεννήτρια και το μετασχηματιστή ανύψωσης από την πλεονάζουσα μαγνητική ροή, η οποία μπορεί να προκληθεί από υπερτάσεις ή από χαμηλές συχνότητες. Το σύστημα αυτό επίσης δεν φαίνεται στο Σχ. 2.4.
- Το Σύστημα Προστασίας Υπερδιεγέρσεως (overexcitation limiter), το οποίο προστατεύει το τύλιγμα πεδίου από υπερθέρμανση σε περιπτώσεις υψηλού ρεύματος διεγέρσεως. Με το σύστημα αυτό θα ασχοληθούμε εκτενέστερα στην ενότητα 3.3.
- Τον Περιοριστή Ρεύματος Τυμπάνου (armature current limiter), ο οποίος προστατεύει το τύλιγμα του τυμπάνου από υπερεντάσεις.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι APT σε όλον τον κόσμο από διάφορες κατασκευάστριες εταιρείες. Στη βιβλιογραφία [IWG81,Kun94] έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα τόσο στρεφόμενων όσο και στατικών συστημάτων διέγερσης, κατάλληλα για δυναμικές προσομοιώσεις.

Στη συνέχεια, αφού γίνει αρχικά λόγος για το ανά μονάδα σύστημα του συστήματος διέγερσης, περιγράφονται τρία μοντέλα APT, τα οποία έχουν προταθεί από αρμόδιες επιτροπές της IEEE [IWG81].

### 2.2.2 Το ανά μονάδα σύστημα του συστήματος διέγερσης

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί αρκετά ανά μονάδα συστήματα για την επιλογή των βασικών μεγεθών τόσο του στάτη όσο και του δρομέα της σύγχρονης μηχανής. Για την παράσταση των συστημάτων διέγερσης, είναι σύνηθες να επιλέγεται ως βασική τάση  $U_{fB}$  (αντίστοιχα βασικό ρεύμα  $I_{fB}$ ), η τάση (αντίστοιχα το ρεύμα) που παράγει 1.0 αμ τερματική τάση στάτη σε συνθήκες κενού φορτίου [Kun94,VCV98].

Σε συνθήκες κενού φορτίου  $(i_d=i_q=0)$  και ονομαστικής τάσης και συχνότητας  $(\lambda_{\omega}=1)$ , ισχύει λόγω των (2.14) και (2.16) η ακόλουθη σχέση:

$$V_t = v_q = \lambda_\omega X_{md} i_{fd} = 1.0 \quad \alpha \mu \tag{2.58}$$

Από την (2.58), το ρεύμα πεδίου *i<sub>jd</sub>* που απαιτείται για ονομαστική τάση στη γραμμή διακένου είναι ίσο με:

$$i_{fd} = \frac{1}{X_{md}} \quad \alpha \mu \tag{2.59}$$

Η αντίστοιχη τάση πεδίου  $v_{fd}$  στη μόνιμη κατάσταση δίνεται από τη σχέση:

$$v_{fd} = R_{fd} i_{fd} = \frac{R_{fd}}{X_{md}} \, \alpha \mu$$
 (2.60)

Το ρεύμα διέγερσης  $I_{fd}$  στο ανά μονάδα σύστημα της διέγερσης, το οποίο απαιτείται για ονομαστική τάση στη γραμμή διακένου είναι – λόγω ορισμού – 1.0 αμ. Επομένως, από την (2.59) προκύπτει:

$$I_{fd} = X_{md} i_{fd} \tag{2.61}$$

Το ρεύμα διέγερσης  $I_{fd}$  αντιστοιχεί επίσης στην ΗΕΔ κενής λειτουργίας  $E_q$ , η οποία είναι ανάλογη του ρεύματος  $i_{fd}$ :

$$E_q = I_{fd} = E'_q + (X_d - X'_d)i_d$$
(2.62)

Όσον αφορά την τάση διέγερσης  $U_f$  στο ανά μονάδα σύστημα της διέγερσης, ισχύει λόγω της (2.60):

$$U_f = \frac{X_{md}}{R_{fd}} v_{fd}$$
(2.63)

Από την (2.38), η οποία ορίζει την ΗΕΔ  $E_f$  και την (2.63) προκύπτει:

$$E_f = U_f \tag{2.64}$$

Σε συνθήκες ισορροπίας ( $v_{fd} = R_{fd}i_{fd}$ ), διαπιστώνεται από τις (2.60) και (2.61) ότι στο ανά μονάδα σύστημα της διέγερσης, η τιμή του ρεύματος πεδίου  $I_{fd}$  είναι ίση με την τιμή της τάσης  $U_{f}$ , οπότε προκύπτει τελικά η σχέση:

$$E_f = U_f = I_f \tag{2.65}$$

# 2.2.3 Μοντέλο ΑΡΤ με διεγέρτρια Συνεχούς Ρεύματος

Στο Σχ. 2.5 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων του APT με διεγέρτρια συνεχούς ρεύματος, τύπου DC1 κατά IEEE [IWG81].

Στο εξεταζόμενο μοντέλο APT διακρίνεται καταρχήν ένας εσωτερικός βρόχος σταθεροποίησης με διαφορικό κέρδος  $K_F$  και χρονική σταθερά  $T_F$ , ο οποίος παράγει ένα σήμα ανατροφοδότησης  $V_F$ , το οποίο αφαιρείται στον κύριο αθροιστή εισόδου του APT. Στη μόνιμη κατάσταση, το σήμα  $V_F$  είναι μηδενικό, όπως επίσης και τα υπόλοιπα σήματα που προέρχονται από τις πρόσθετες διατάξεις οι οποίες μπορεί να συνοδεύουν έναν APT και αναφέρθηκαν προηγουμένως.



Σχ. 2.5: Διάγραμμα βαθμίδων ΑΡΤ τύπου DC1 κατά ΙΕΕΕ

Στη συνέχεια, το σήμα εξόδου του αθροιστή εισάγεται στη μονάδα ρύθμισης της τάσεως. Η μονάδα αυτή αποτελείται από ένα φίλτρο μεταπορείας ( $T_B > T_C$ ) και το ρυθμιστή τάσης.

Ο ρυθμιστής τάσης προσεγγίζεται από μία συνάρτηση μεταφοράς πρώτου βαθμού με κέρδος  $K_A$  και χρονική σταθερά  $T_A$ . Σημειώνεται ότι η έξοδος  $V_R$  του ρυθμιστή περιορίζεται από μία μέγιστη ( $V_{Rmax}$ ) και μία ελάχιστη ( $V_{Rmin}$ ) τιμή.

Το φίλτρο μεταπορείας (lag-lead filter) αποσκοπεί στη μεταβατική μείωση του συνολικού κέρδους διεγέρσεως στις μέσες συχνότητες, επειδή τα μεγάλα κέρδη διεγέρσεως μπορούν να επηρεάσουν κατά ανεπιθύμητο τρόπο την ευστάθεια του συστήματος. Συγκεκριμένα, ο APT αυτού του τύπου εμφανίζει ένα μεταβατικό κέρδος  $K_T$  στις μέσες συχνότητες, το οποίο είναι ίσο με:

$$K_T = \frac{T_C}{T_R} K_A \tag{2.66}$$

δηλαδή μικρότερο από το κέρδος μονίμου καταστάσεως  $K_A$ , εφόσον ισχύει  $T_B > T_C$ .

Η έξοδος  $V_R$  του ρυθμιστή τροφοδοτεί τη διεγέρτρια της σύγχρονης μηχανής, η οποία παριστάνεται με μία χρονική σταθερά  $T_E$ , μία απλή σταθερά  $K_E$  και μία συνάρτηση κορεσμού  $S_E$ . Η συνάρτηση  $S_E$  εξαρτάται από την τάση διεγέρσεως  $E_f$  και στη γενική της μορφή προσεγγίζεται από τον τύπο:

$$S_{E}(E_{f}) = \frac{A_{E}e^{B_{E}E_{f}}}{E_{f}}$$
(2.67)

όπου  $A_E$  και  $B_E$  είναι δεδομένες σταθερές.

Στο χώρο κατάστασης, το εξεταζόμενο μοντέλο APT παρουσιάζει τις εξής τέσσερις μεταβλητές κατάστασης:

- Τη μεταβλητή x<sub>ll</sub>, η οποία συνδέεται με το φίλτρο μεταπορείας.
- Την έξοδο του ρυθμιστή τάσης  $V_R$ .
- Τη μεταβλητή x<sub>sf</sub>, η οποία συνδέεται με το βρόχο σταθεροποίησης.
- Την τάση διεγέρσεως E<sub>f</sub>, η οποία είναι και η έξοδος του APT.

Απαλείφοντας τις αλγεβρικές μεταβλητές  $V_A$  (έξοδος του φίλτρου μεταπορείας),  $V_F$ , και  $V_{FE}$  (σήμα ανατροφοδότησης της διεγέρτριας) και αμελώντας τον περιοριστή του ρυθμιστή τάσεως, προκύπτουν οι ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις, από τις οποίες περιγράφεται το θεωρούμενο μοντέλο APT. Σημειώνεται ότι η μεταβλητή  $u_{AVR}$  παριστάνει τα σήματα που προστίθενται στο κύριο αθροιστή εισόδου του APT και τα οποία προέρχονται από τις υπόλοιπες διατάξεις ελέγχου και προστασίας που εξοπλίζουν τη σύγχρονη μηχανή.

$$\dot{x}_{ll} = -\frac{1}{T_B} x_{ll} + \frac{T_B - T_C}{T_B^2} \left[ \left( V_{ref} - V_C + u_{AVR} \right) - \frac{K_F}{T_F} \left( E_f - x_{sf} \right) \right]$$
(2.68)

$$\dot{V}_{R} = -\frac{1}{T_{A}}V_{R} + \frac{K_{A}}{T_{A}}x_{ll} + \frac{K_{A}}{T_{A}}\frac{T_{C}}{T_{B}}\left[\left(V_{ref} - V_{C} + u_{AVR}\right) - \frac{K_{F}}{T_{F}}\left(E_{f} - x_{sf}\right)\right]$$
(2.69)

$$\dot{x}_{sf} = -\frac{1}{T_F} x_{sf} + \frac{1}{T_F} E_f$$
(2.70)

$$\dot{E}_{f} = -\frac{S_{E}(E_{f}) + K_{E}}{T_{E}}E_{f} + \frac{1}{T_{E}}V_{R}$$
(2.71)

### 2.2.4 Μοντέλο ΑΡΤ με διεγέρτρια Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Στο Σχ. 2.6 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων του APT τύπου AC4 κατά IEEE [IWG81]. Το σύστημα διεγέρσεως του εξεταζόμενου APT αποτελείται από μία ελεγχόμενη ανορθωτική διάταξη με θυρίστορ σε συνδεσμολογία γέφυρας, η οποία τροφοδοτείται από μία εναλλασσόμενη γεννήτρια. Η χρονική σταθερά  $T_A$  αντιπροσωπεύει την καθυστέρηση της ρύθμισης, καθώς επίσης και τα φίλτρα για τη μέτρηση του σήματος εισόδου. Η σταθερά  $K_A$  παριστάνει το συνολικό κέρδος μονίμου καταστάσεως του APT. Οι δύο περιοριστές χρησιμεύουν στον περιορισμό των σημάτων εισόδου και εξόδου του APT.



Σχ. 2.6: Διάγραμμα βαθμίδων ΑΡΤ τύπου ΑC4 κατά ΙΕΕΕ

Το φίλτρο μεταπορείας ( $T_B > T_C$ ) χρησιμοποιείται για τον ίδιο σκοπό με το προηγούμενο μοντέλο APT τύπου DC1 κατά IEEE.

Στο χώρο κατάστασης, το θεωρούμενο μοντέλο APT αποτελείται από τις εξής δύο μεταβλητές κατάστασης:

- Τη μεταβλητή x<sub>ll</sub>, η οποία συνδέεται με το φίλτρο μεταπορείας.
- Την τάση διεγέρσεως Ε<sub>β</sub> η οποία είναι και η έξοδος του ΑΡΤ.

Αμελώντας τους δύο περιοριστές, το εξεταζόμενο μοντέλο ΑΡΤ περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$\dot{x}_{ll} = -\frac{1}{T_B} x_{ll} + \frac{T_B - T_C}{T_B^2} \left( V_{ref} - V_C + u_{AVR} \right)$$
(2.72)

$$\dot{E}_{f} = -\frac{1}{T_{A}}E_{f} + \frac{K_{A}}{T_{A}}x_{ll} + \frac{K_{A}}{T_{A}}\frac{T_{C}}{T_{B}}\left(V_{ref} - V_{C} + u_{AVR}\right)$$
(2.73)

### 2.2.5 Μοντέλο ΑΡΤ με Διεγέρτρια Στατικού Τύπου

Στο Σχ. 2.7 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων ενός APT με διεγέρτρια στατικού τύπου ST1 κατά IEEE [IWG81].



Σχ. 2.7: Διάγραμμα βαθμίδων ΑΡΤ τύπου ST1 κατά ΙΕΕΕ

Στο θεωρούμενο μοντέλο APT διακρίνονται το φίλτρο μεταπορείας, ο ρυθμιστής τάσης, καθώς επίσης και ένας εσωτερικός βρόχος σταθεροποίησης. Οι διεγέρτριες αυτού του τύπου παρουσιάζουν εγγενώς πολύ μικρές σταθερές χρόνου, οπότε κυριαρχεί η σταθερά χρόνου των φίλτρων μετρήσεως.

Στο χώρο κατάστασης, το εξεταζόμενο μοντέλο APT παρουσιάζει τις εξής τρεις μεταβλητές κατάστασης:

- Τη μεταβλητή x<sub>ll</sub>, η οποία συνδέεται με το φίλτρο μεταπορείας.
- Τη μεταβλητή x<sub>sf</sub>, η οποία συνδέεται με το βρόχο σταθεροποίησης.
- Την τάση διεγέρσεως *E<sub>f</sub>*, η οποία είναι και η έξοδος του APT.

Αμελώντας τον περιοριστή στο σήμα εισόδου του φίλτρου μεταπορείας, η δυναμική απόκριση του ΑΡΤ περιγράφεται από τις παρακάτω τρεις διαφορικές εξισώσεις:

$$\dot{x}_{sf} = -\frac{1}{T_F} x_{sf} + \frac{1}{T_F} E_f$$
(2.74)

$$\dot{x}_{ll} = -\frac{1}{T_B} x_{ll} + \frac{T_B - T_C}{T_B^2} \left[ \left( V_{ref} - V_C + u_{AVR} \right) - \frac{K_F}{T_F} \left( E_f - x_{sf} \right) \right]$$
(2.75)

$$\dot{E}_{f} = -\frac{1}{T_{A}}E_{f} + \frac{K_{A}}{T_{A}}x_{ll} + \frac{K_{A}}{T_{A}}\frac{T_{C}}{T_{B}}\left[\left(V_{ref} - V_{C} + u_{AVR}\right) - \frac{K_{F}}{T_{F}}\left(E_{f} - x_{sf}\right)\right]$$
(2.76)

### 2.3 Συστήματα Προστασίας Υπερδιεγέρσεως

#### 2.3.1 Γενική περιγραφή συστήματος προστασίας υπερδιεγέρσεως

Το Σύστημα Προστασίας Υπερδιεγέρσεως (ΣΠΥ) είναι η διάταξη η οποία προστατεύει το τύλιγμα διεγέρσεως μίας σύγχρονης μηχανής από υπερθέρμανση λόγω παρατεταμένων υπερεντάσεων.

Το τύλιγμα πεδίου της μηχανής είναι σχεδιασμένο, ώστε να λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση σε μία τιμή που αντιστοιχεί σε ονομαστικές συνθήκες φόρτισης. Εντούτοις, για λόγους ευστάθειας επιτρέπεται το ρεύμα πεδίου να ξεπεράσει την τιμή αυτή για ένα χρονικό διάστημα. Μετά από μεγάλες διαταραχές, όπως π.χ. βραχυκυκλώματα, το ρεύμα πεδίου επιτρέπεται να φτάσει - για περιορισμένο χρονικό διάστημα - μία μέγιστη τιμή, η οποία συνήθως είναι πολλαπλάσια του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση.

Η επιτρεπόμενη θερμική ικανότητα υπερφόρτισης σε συνάρτηση με το χρόνο υπερφόρτισης του τυλίγματος πεδίου έχει καθοριστεί από το πρότυπο ANSI C50.13-1977 [ITF95]. Τα θερμικά όρια του τυλίγματος διεγέρσεως παριστάνονται από την καμπύλη του Σχ. 2.8. Επειδή η υπερθέρμανση του τυλίγματος πεδίου είναι ανάλογη με το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος διέγερσης, όσο μικρότερη είναι η υπερφόρτιση του πεδίου, τόσο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα επιτρέπεται αυτή να διαρκέσει. Τα ΣΠΥ, παρόλο που διαφοροποιούνται στην υλοποίησή τους ανάλογα με τον κατασκευαστή, σχεδιάζονται ώστε να ακολουθούν την εξεταζόμενη καμπύλη με κάποιο περιθώριο ασφαλείας.

Το ΣΠΥ εντοπίζει την υπερένταση στο τύλιγμα του πεδίου διέγερσης και ενεργεί μετά από μία χρονική καθυστέρηση, περιορίζοντας το ρεύμα πεδίου σε μία προκαθορισμένη τιμή (μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα πεδίου μονίμου καταστάσεως), η οποία κυμαίνεται συνήθως από 105% έως 110% του ονομαστικού ρεύματος πεδίου πλήρους φορτίου (ονομαστικού).

Η τιμή του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος πεδίου μονίμου καταστάσεως εξαρτάται από το σύστημα ψύξεως της μηχανής. Για παράδειγμα σε μηχανές με ψύξη υδρογόνου, μία αύξηση στην πίεση του υδρογόνου επιτρέπει να αυξηθεί σημαντικά το μέγιστο αυτό ρεύμα.

Η χρονική καθυστέρηση για την ενεργοποίηση των ΣΠΥ μπορεί να είναι [VCV98]:

 Σταθερού χρόνου, δηλαδή το ΣΠΥ ενεργοποιείται μετά από ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, ανεξάρτητο από το μέγεθος της υπερδιέγερσης. 2. Αντιστρόφου χρόνου, όπου το θεωρούμενο χρονικό διάστημα είναι αντιστρόφως ανάλογο της υπερδιέγερσης, δηλαδή ακολουθεί την καμπύλη του Σχ. 2.8 με κάποιο περιθώριο ασφαλείας.

Σημειώνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις τα σημεία ενεργοποίησης του ΣΠΥ πρέπει να βρίσκονται κάτω από την καμπύλη του Σχ. 2.8.



Σχ. 2.8: Θερμικά όρια τυλίγματος διεγέρσεως

Τα συστήματα περιορισμού διέγερσης είναι εξοπλισμένα με έναν πρόσθετο περιοριστή ρεύματος πεδίου. Ο περιοριστής αυτός ενεργεί ακαριαία, μειώνοντας το ρεύμα πεδίου όταν πάρει μεγάλες τιμές περίπου στο 160% της ονομαστικής τιμής του πλήρους φορτίου.

Σε παλαιότερα συστήματα διέγερσης, η προστασία του τυλίγματος πεδίου μπορεί να γίνει με μεταγωγή της μηχανής σε χειροκίνητο έλεγχο διέγερσης, δηλαδή σε λειτουργία με σταθερή τάση διέγερσης.

Χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τεχνικές [ITF95,VCV98] με τις οποίες τα σύγχρονα ΣΠΥ επενεργούν στο σύστημα διέγερσης μίας σύγχρονης γεννήτριας (η αρίθμηση αναφέρεται στις εναλλακτικές μορφές σχεδίασης της διάταξης του Σχ. 2.4):

- Κατά την πρώτη τεχνική, το ΣΠΥ παρακάμπτει τον κανονικό βρόχο ρύθμισης της τάσης. Για το σκοπό αυτό, η διεγέρτρια ελέγχεται από το ελάχιστο μεταξύ των σημάτων εξόδου του ΑΡΤ και του ΣΠΥ, όπως φαίνεται και από την πύλη ελαχίστου του Σχ. 2.4. Τα ΣΠΥ που ακολουθούν την τεχνική αυτή ονομάζονται διακοπτικά (takeover).
- 2. Σύμφωνα με τη δεύτερη τεχνική, το ΣΠΥ παράγει ένα σήμα που προστίθεται στον κύριο αθροιστή του ΑΡΤ με αρνητικό πρόσημο. Το σήμα αυτό είναι μηδενικό σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, ενώ υποχρεώνει δυναμικά το ρεύμα πεδίου να μειωθεί στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του σε συνθήκες υπερφόρτισης, μειώνοντας ουσιαστικά την τάση αναφοράς V<sub>ref</sub> στον κύριο αθροιστή εισόδου του ΑΡΤ. Τα ΣΠΥ που ακολουθούν την παραπάνω τεχνική καλούνται αθροιστικά (summed type).

Στα αθροιστικά ΣΠΥ δεν παρακάμπτεται ο APT και επομένως η προστασία του τυλίγματος πεδίου στηρίζεται στον APT. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται μία βοηθητική διάταξη ΣΠΥ, η οποία αναλαμβάνει να προστατεύσει τη σύγχρονη μηχανή, αν ο APT παρουσιάσει κάποιο πρόβλημα λειτουργίας.

Η ενεργοποίηση του ΣΠΥ μίας σύγχρονης γεννήτριας και ο συνακόλουθος περιορισμός της αέργου παραγωγής της μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα αστάθειας τάσεως τόσο σε τοπικό όσο και σε γενικό επίπεδο. Για το λόγο αυτό, η ακριβής παράσταση των ΣΠΥ διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις μελέτες ευστάθειας τάσεως. Στη συνέχεια, περιγράφεται το μοντέλο ΣΠΥ το οποίο χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής.

### 2.3.2 Μοντέλο συστήματος προστασίας υπερδιεγέρσεως

Σύμφωνα με τα όσα γράφτηκαν στην ενότητα 3.2.2 αναφορικά με το ανά μονάδα σύστημα του πεδίου διεγέρσεως, το ρεύμα διέγερσης  $I_{fd}$  στη βάση του συστήματος διέγερσης είναι ανάλογο του ρεύματος διεγέρσεως  $i_{fd}$ , το οποίο υπολογίζεται από τις μαθηματικές εξισώσεις του μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας. Η σταθερά αναλογίας είναι η αμοιβαία επαγωγική αντίδραση  $X_{md}$  μεταξύ του τυλίγματος διεγέρσεως και του τυλίγματος του άξονα d του στάτη, δηλαδή:

$$I_{fd} = X_{md} i_{fd} \tag{2.77}$$

Το ρεύμα πεδίου i<sub>fd</sub> στο δεξιό μέλος της παραπάνω σχέσης αντικαθίσταται σύμφωνα με την (2.22), οπότε:

$$I_{fd} = \frac{X_{md}}{X_{fd}} (\psi_{fd} + X_{md} i_d)$$
(2.78)

Λαμβάνοντας υπόψη τις (2.26) και (2.27) οι οποίες ορίζουν τη μεταβατική ΗΕΔ  $E'_q$  και τη μεταβατική αντίδραση  $X'_d$  αντίστοιχα, προκύπτει τελικά ότι το ρεύμα πεδίου  $I_{fd}$  στο ανά μονάδα σύστημα που χρησιμοποιείται δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$I_{fd} = E'_q + (X_d - X'_d)i_d$$
(2.79)

Όσον αφορά τη λειτουργία του ΣΠΥ που χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή, διακρίνονται στο Σχ. 2.8 δύο οριακές τιμές στο ρεύμα πεδίου, η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή μονίμου καταστάσεως  $I_{fd}^{\rm lim}$  και η μέγιστη μεταβατική τιμή  $I_{fd}^{\rm max}$ . Το πρώτο όριο παίρνει τιμές κοντά στο 110% της τιμής του ρεύματος πεδίου ονομαστικής λειτουργίας, ενώ το δεύτερο μπορεί να υπερβεί το 150% αυτή της τιμής. Εάν η υπερδιέγερση βρίσκεται μεταξύ των δύο αυτών ορίων, το ρεύμα πεδίου επιτρέπεται να διατηρηθεί στο επίπεδο αυτό για μερικά δευτερόλεπτα, προτού μειωθεί στη μέγιστη μεταβατική τιμή  $I_{fd}^{\rm max}$ , τότε το ΣΠΥ δρα σε δύο χρονικές κλίμακες. Αρχικά, το ρεύμα πεδίου περιορίζεται με πολύ μικρή σταθερή χρονική καθυστέρηση  $T_{en}$  (της τάξης μερικών δεκάτων του δευτερολέπτου) στην τιμή  $I_{fd}^{\rm max}$ , ενώ στη συνέχεια ακολουθεί ο εμφανώς βραδύτερος περιορισμός στην τιμή  $I_{fd}^{\rm lim}$ .

Η γενική διάταξη του θεωρούμενου μοντέλου ΣΠΥ φαίνεται στο Σχ. 2.9 [VCV98].



Σχ. 2.9: Γενική διάταζη ΣΠΥ

Το εξεταζόμενο ΣΠΥ αποτελείται από τέσσερις βαθμίδες:

- 1. Το χρονικό κύκλωμα έναυσης της βαθμίδας μονίμου καταστάσεως.
- 2. Το χρονικό κύκλωμα μείωσης του ρεύματος αναφοράς  $I_{ref.}$
- 3. Τη βαθμίδα μείωσης του ρεύματος πεδίου στη μέγιστη μεταβατική τιμή.
- 4. Τη μονάδα ελέγχου.

Σημειώνεται ότι το θεωρούμενο ΣΠΥ μπορεί να λειτουργήσει είτε σαν διακοπτικό, παρακάμπτοντας τον ΑΡΤ και επιδρώντας απευθείας στη διεγέρτρια, ή σαν αθροιστικό εισάγοντας ένα σήμα με αρνητικό πρόσημο στον κύριο αθροιστή εισόδου του ΑΡΤ.

Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η λειτουργία της κάθε μίας βαθμίδας.

Χρονικό κύκλωμα έναυσης βαθμίδας μονίμου καταστάσεως

Το χρονικό κύκλωμα έναυσης της βαθμίδας μονίμου καταστάσεως εικονίζεται στο Σχ. 2.10 [VCV98].



Σχ. 2.10: Χρονικό κύκλωμα έναυσης βαθμίδας μονίμου καταστάσεως

Η σταθερά ε στην είσοδο της εξεταζόμενης βαθμίδας έχει μικρή τιμή και αποσκοπεί στην αποφυγή διαδοχικών ενεργοποιήσεων και απενεργοποιήσεων του ΣΠΥ, όταν το ρεύμα πεδίου είναι πολύ κοντά στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή μονίμου καταστάσεως  $I_{dd}^{lim}$ .

Αμελώντας την σταθερά αυτή, προκύπτει ότι το χρονικό κύκλωμα έναυσης της βαθμίδας 1 ενεργοποιείται αμέσως μετά την εμφάνιση υπερφόρτισης ( $I_{fd} - I_{fd}^{\lim} > 0$ ) στο τύλιγμα του πεδίου διέγερσης και δίνει σήμα έναυσης στο χρονικό κύκλωμα μείωσης του ρεύματος αναφοράς  $I_{ref}$  μετά από μία χρονική καθυστέρηση  $\Delta t_{OEL}$ . Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, η χρονική καθυστέρηση  $\Delta t_{OEL}$  μπορεί να είναι σταθερή (βαθμίδα 1γ), ανεξάρτητη δηλαδή από το μέγεθος της υπερδιέγερσης, ή αντιστρόφως ανάλογη (βαθμίδα 1α) από το μέγεθος αυτής ( $\Delta t_{OEL} = \frac{k}{I_{el} - I_{fd}^{\lim}}$ , k > 0).

Το χρονικό κύκλωμα έναυσης υλοποιείται με τη βοήθεια του ολοκληρωτή (1β), όπως φαίνεται στο Σχ. 2.10.

Η βαθμίδα (1α) περιγράφεται από την εξής συνάρτηση:

$$x_{2} = \begin{cases} S_{1}x_{1}, & \alpha v \ x_{1} \ge 0 \\ S_{2}x_{1}, & \alpha v \ x_{1} < 0 \end{cases}$$
(2.80)

με  $S_1, S_2 > 0.$ Ο ολοκληρωτής (1β) λειτουργεί ως εξής:

$$\dot{x}_{t} = \begin{cases} 0, & \text{av } \left(x_{t} = K_{2} \text{ kat } \dot{x}_{2} \ge 0\right) \text{ } \acute{\eta} \left(x_{t} = -K_{1} \text{ kat } \dot{x}_{2} < 0\right) \\ x_{2}, & \text{se kabe ally perfection} \end{cases}$$
(2.81)

όπου  $K_1, K_2 > 0$ .

Αρχικά, η έξοδος του ολοκληρωτή (1β) είναι ίση με το κάτω όριό της  $-K_1$ . Σε περίπτωση που το ρεύμα πεδίου  $I_{fd}$  γίνει μεγαλύτερο από το όριο  $I_{fd}^{lim}$ , η έξοδος  $x_t$  του ολοκληρωτή αρχίζει να αυξάνει από την αρνητική τιμή  $-K_1$ . Μόλις η μεταβλητή  $x_t$  γίνει θετική ( $x_t > 0$ ), δίνεται σήμα για την έναυση του χρονικού κυκλώματος μείωσης του ρεύματος αναφοράς. Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί για την έναυση δίνεται, για σταθερή υπερφόρτιση, από τη σχέση:

$$\Delta t_{OEL} = \frac{K_1}{S_1 (I_{fd} - I_{fd}^{\lim})}$$
(2.82)

Αν θεωρηθεί μηδενική η σταθερά K<sub>1</sub>, τότε η πρώτη υποβαθμίδα δίνει το σήμα έναυσης χωρίς χρονική καθυστέρηση.

Το χρονικό κύκλωμα έναυσης σταθερού χρόνου υλοποιείται αν η υποβαθμίδα (1α) του Σχ. 2.10 αντικατασταθεί από την υποβαθμίδα (1γ). Στην περίπτωση αυτή, εάν το ρεύμα πεδίου  $I_{fd}$  γίνει μεγαλύτερο από το όριο  $I_{fd}^{lim}$ , ο ολοκληρωτής (1β) έχει μοναδιαία είσοδο ( $x_2$ =1), με αποτέλεσμα η έξοδός του  $x_t$  να γίνεται θετική μετά από σταθερή χρονική καθυστέρηση (ανεξάρτητη από το μέγεθος της υπερδιέγερσης):

$$\Delta t_{OEL} = K_1 \tag{2.83}$$

#### Χρονικό κύκλωμα μείωσης ρεύματος αναφοράς

Ο ρόλος του χρονικού κυκλώματος μείωσης ρεύματος αναφοράς είναι να μειώσει την τιμή ενός ρεύματος αναφοράς  $I_{ref}$  από τη μέγιστη μεταβατική τιμή  $I_{fd}^{max}$  του ρεύματος πεδίου στη μέγιστη τιμή μονίμου καταστάσεως  $I_{fd}^{lim}$ . Στο Σχ. 2.11 φαίνεται το δομικό διάγραμμα του κυκλώματος αυτού [VCV98], το οποίο ενεργοποιείται τη χρονική στιγμή που η έξοδος  $x_t$  της προηγούμενης βαθμίδας (1) γίνει θετική.



Σχ. 2.11: Χρονικό κύκλωμα μείωσης ρεύματος αναφοράς

Οι δύο σταθερές  $K_d$  και  $K_r$  πριν το διακόπτη (2β) του Σχ. 2.11 είναι θετικές ( $K_d$ ,  $K_r > 0$ ).

Η μείωση του ρεύματος αναφοράς  $I_{\mathit{ref}}$ μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- 1. Με σταθερό ρυθμό (διακόπτης (2α) στη θέση A), δηλαδή  $x_3 = 1$ .
- 2. Με ρυθμό ανάλογο του βαθμού υπερφόρτισης (διακόπτης (2α) στη θέση B), δηλαδή  $x_3 = I_{fd} I_{fd}^{lim}$ .

Η έξοδος  $x_4$  του διακόπτη (2β) δίνεται από την (2.84) συναρτήσει της τιμής εξόδου  $x_t$  της υποβαθμίδας (2α).

$$x_4 = \begin{cases} -K_d x_3, & x_t > 0 \\ K_r, & x_t < 0 \end{cases}$$
(2.84)

Ο ολοκληρωτής (2γ) λειτουργεί σύμφωνα με την ακόλουθη συνάρτηση:

$$\dot{I}_{ref} = \begin{cases} 0, & \text{av } \left( I_{ref} = I_{fd}^{\max} \, \text{kal } \dot{x}_4 \ge 0 \right) \, \acute{\eta} \, \left( x_t = I_{fd}^{\lim} \, \text{kal } \dot{x}_4 < 0 \right) \\ x_4, & \text{se kabe ally perfition} \end{cases}$$
(2.85)

Αρχικά ο ολοκληρωτής (2γ) έχει έξοδο το άνω όριό του  $I_{fd}^{\max}$ . Όταν ο διακόπτης (2α) βρίσκεται στη θέση Α, το σήμα εισόδου του ολοκληρωτή (2γ) είναι σταθερό, με αποτέλεσμα η έξοδός του  $I_{ref}$  να μειώνεται με σταθερό ρυθμό έως την τιμή  $I_{fd}^{\lim}$  σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$I_{ref} = I_{fd}^{\max} - K_d t \tag{2.86}$$

Όταν ο διακόπτης (2α) βρίσκεται στη θέση B, το σήμα εισόδου του ολοκληρωτή (2γ) ισούται με την υπερφόρτιση ( $I_{fd} - I_{fd}^{lim}$ ) του τυλίγματος διέγερσης, με αποτέλεσμα η έξοδός του να μειώνεται με

ρυθμό ανάλογο της υπερφόρτισης αυτής έως τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή μονίμου καταστάσεως  $I_{fd}^{lim}$ , δηλαδή:

$$I_{ref} = I_{fd}^{\max} - K_d (I_{fd} - I_{fd}^{\lim})t$$
(2.87)

Όταν η σταθερά  $K_d$  πάρει μία πολύ μεγάλη θετική τιμή, τότε η μετάβαση του ρεύματος αναφοράς  $I_{ref}$ από την τιμή  $I_{fd}^{max}$  στην τιμή  $I_{fd}^{lim}$  γίνεται πρακτικά ακαριαία. Εντούτοις, σε προγράμματα δυναμικής προσομοίωσης η μείωση του ρεύματος αναφοράς θα πρέπει να γίνεται σε ένα χρονικό διάστημα της τάξεως μερικών δευτερολέπτων, διότι οι ακαριαίες μεταβάσεις του ρεύματος αναφοράς είναι πιθανό να δημιουργήσουν ανεπιθύμητες ταλαντώσεις στη μεταβατική απόκριση του ΣΠΥ.

Η βαθμίδα μείωσης του ρεύματος πεδίου στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή μονίμου καταστάσεως έχει δύο εξόδους, το ρεύμα αναφοράς  $I_{ref}$  και τη μεταβλητή  $z_{OEL}^{ss}$ , οι οποίες χρησιμοποιούνται ως είσοδοι της μονάδας ελέγχου.

Η μεταβλητή  $z_{OEL}^{ss}$  είναι η έξοδος του διακόπτη (2δ) και χρησιμεύει για την έναυση της μονάδας ελέγχου, παίρνοντας διακριτές τιμές 0 ή 1 σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$z_{OEL}^{ss} = \begin{cases} 1, & \text{an } I_{ref} = I_{fd}^{\lim} \\ 0, & \text{se kabe ally perfection} \end{cases}$$
(2.88)

Βαθμίδα μείωσης του ρεύματος πεδίου στη μέγιστη μεταβατική τιμή

Η βαθμίδα μείωσης του ρεύματος πεδίου στη μέγιστη μεταβατική τιμή [ITF95] φαίνεται στο Σχ. 2.12 και ενεργοποιείται ύστερα από σταθερή χρονική καθυστέρηση  $T_{en}$  από τη στιγμή που το ρεύμα πεδίου  $I_{fd}$  ξεπεράσει το μέγιστο μεταβατικό του όριο  $I_{fd}^{max}$ .

Όπως φαίνεται στο Σχ. 2.12, η εξεταζόμενη βαθμίδα αποτελείται από το χρονικό κύκλωμα έναυσης σταθερού χρόνου (συνάρτηση (3α) και ολοκληρωτής (3β)) και τον διακόπτη (3γ), ενώ έξοδός της είναι η διακριτή μεταβλητή  $z_{OEL}^{\mu}$  (τιμές 0 ή 1), η οποία χρησιμοποιείται για την έναυση της μονάδας ελέγχου.



Σχ. 2.12: Βαθμίδα μείωσης ρεύματος πεδίου στη μέγιστη μεταβατική τιμή

Στην είσοδό της, συγκρίνεται η τιμή του ρεύματος πεδίου  $I_{fd}$  με τη μέγιστη μεταβατική επιτρεπόμενη τιμή του  $I_{fd}^{max}$  και η διαφορά τους (σήμα  $x_5$ ) εισάγεται στη συνάρτηση (3α), η οποία περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$x_{6} = \begin{cases} 1, & \text{av } x_{5} \ge 0\\ S_{3}x_{5}, & \text{av } x_{5} < 0 \end{cases}$$
(2.89)

 $\mu \epsilon S_3 > 0.$ 

Ο ολοκληρωτής (3β) λειτουργεί ως εξής:

$$\dot{x}_{en} = \begin{cases} 0, & \text{an } (x_{en} = 1 \text{ kai } \dot{x}_6 \ge 0) \text{ } \acute{\eta} (x_{en} = -T_{en} \text{ kai } \dot{x}_{en} < 0) \\ x_6, & \text{se kabe ally periptiwsg} \end{cases}$$
(2.90)

Στο αρχικό σημείο λειτουργίας, η έξοδος του ολοκληρωτή (3β) είναι ίση με το κάτω όριό της  $-T_{en}$  και η λογική μεταβλητή  $z_{OEL}^{tr}$  είναι μηδενική. Εάν το ρεύμα πεδίου  $I_{fd}$  γίνει μεγαλύτερο από το όριο  $I_{fd}^{max}$ , η

έξοδος  $x_{en}$  του υπόψη ολοκληρωτή αρχίζει να αυξάνει με σταθερό μοναδιαίο ρυθμό από την αρνητική τιμή  $-T_{en}$ . Ύστερα από χρονικό διάστημα  $T_{en}$ , η μεταβλητή  $x_{en}$  γίνεται θετική, οπότε ο διακόπτης (3γ) μεταβαίνει στη θέση που αντιστοιχεί σε μοναδιαία τιμή της μεταβλητής  $z_{OEL}^{tr}$ . Δηλαδή, ο διακόπτης (3γ) περιγράφεται από την εξής συνάρτηση:

$$z_{OEL}^{tr} = \begin{cases} 1, & x_{en} > 0\\ 0, & x_{en} < 0 \end{cases}$$
(2.91)

#### Μονάδα ελέγχου

Η μονάδα ελέγχου του ΣΠΥ δέχεται σαν εισόδους το ρεύμα πεδίου  $I_{fd}$  στην είσοδο του ΣΠΥ, το ρεύμα αναφοράς  $I_{ref}$  και τις λογικές μεταβλητές  $z_{OEL}^{ss}$ ,  $z_{OEL}^{tr}$ , και τροφοδοτεί με το σήμα τάσης  $V_{OEL}$  (με αρνητικό πρόσημο) είτε τον κύριο αθροιστή του ΑΡΤ (αθροιστικό ΣΠΥ) ή τη διεγέρτρια (διακοπτικό ΣΠΥ) της γεννήτριας.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 2.13, μία αναλογική-ολοκληρωτική μονάδα ελέγχου περιγράφεται από τη συνάρτηση μεταφοράς (4α) και το διακόπτη (4β). Οι σταθερές  $K_P$  και  $K_I$  της συνάρτησης μεταφοράς είναι το αναλογικό και το ολοκληρωτικό κέρδος αντίστοιχα.

Για την περιγραφή της μονάδας ελέγχου του Σχ. 2.13 στο χώρο κατάστασης, εισάγεται η μεταβλητή κατάστασης x<sub>OEL</sub>, η οποία αναφέρεται στην ολοκληρωτική βαθμίδα της συνάρτησης μεταφοράς (4α). Η δυναμική απόκριση της μεταβλητής x<sub>OEL</sub> δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\dot{x}_{OEL} = I_{fd} - I_{ref} \tag{2.92}$$

Η αρχική τιμή της μεταβλητής κατάστασης x<sub>OEL</sub> είναι μηδέν.



Σχ. 2.13: Αναλογική-ολοκληρωτική μονάδα ελέγχου ΣΠΥ

Το σήμα εξόδου  $V_{OEL}$  της μονάδας ελέγχου εξαρτάται από την κατάσταση του διακόπτη (4β). Συγκεκριμένα, ο διακόπτης αυτός επιτρέπει στο σήμα τάσης  $V_{OEL}$  του ΣΠΥ να πάρει την τιμή της εξόδου της συνάρτησης μεταφοράς (4α), μόνο εφόσον το λογικό «ή» (OR) των δύο μεταβλητών  $z_{OEL}^{ss}$  και  $z_{OEL}^{tr}$  ισούται με το λογικό 1. Σε διαφορετική περίπτωση, το σήμα εξόδου του ΣΠΥ είναι μηδενικό.

Επομένως, όταν το ρεύμα πεδίου υπερβεί τη μέγιστη μεταβατική τιμή  $I_{fd}^{\max}$  για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του επιτρεπτού  $T_{en}$ , η μεταβλητή  $z_{OEL}^{tr}$  παίρνει τιμή 1 πυροδοτώντας την έξοδο της μονάδας ελέγχου  $V_{OEL}$  για τιμή του ρεύματος αναφοράς  $I_{ref}$  ίση με  $I_{fd}^{\max}$ .

Αντιστοίχως, εάν το ρεύμα διεγέρσεως βρίσκεται μεταξύ των ορίων  $I_{fd}^{\lim}$  και  $I_{fd}^{\max}$  για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του επιτρεπτού  $\Delta t_{OEL}$ , η μεταβλητή  $z_{OEL}^{ss}$  γίνεται ίση με 1, οπότε η έξοδος του ΣΠΥ υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη ότι  $I_{ref} = I_{fd}^{\lim}$ .

Ωστόσο, εάν η τιμή του ρεύματος πεδίου είναι μικρότερη από το όριο μονίμου καταστάσεως  $I_{fd}^{lim}$ , περίπτωση κατά την οποία και οι δύο λογικές μεταβλητές  $z_{OEL}^{ss}$  και  $z_{OEL}^{tr}$  είναι ίσες με το λογικό 0, ο διακόπτης (4β) μεταβαίνει στη θέση που αντιστοιχεί σε μηδενικό σήμα εξόδου  $V_{OEL}$  του ΣΠΥ. Συνοπτικά, η έξοδος της μονάδας ελέγχου περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{OEL} = \begin{cases} K_P (I_{fd} - I_{ref}) + K_I x_{OEL}, & \text{av} (z_{OEL}^{ss} \uparrow z_{OEL}^{tr}) = 1 \\ 0, & \text{av} (z_{OEL}^{ss} \kappa \alpha_I z_{OEL}^{tr}) = 0 \end{cases}$$
(2.93)

Στην περίπτωση που το ΣΠΥ απενεργοποιηθεί ( $I_{fd} < I_{fd}^{\lim}$ ), η έξοδος  $x_t$  του ολοκληρωτή (1β) από το χρονικό κύκλωμα έναυσης της βαθμίδας μονίμου καταστάσεως γίνεται αρνητική ( $x_t < 0$ ). Επομένως, ο διακόπτης (2β) του χρονικού κυκλώματος μείωσης του ρεύματος αναφοράς δίνει έξοδο  $K_r$ , με αποτέλεσμα το ρεύμα αναφοράς  $I_{ref}$  να αυξάνεται από την τιμή  $I_{fd}^{\lim}$  έως την τιμή  $I_{fd}^{\max}$ , σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_{ref} = I_{fd}^{\lim} + K_r t \tag{2.94}$$

Στην περίπτωση αθροιστικού ΣΠΥ, το σήμα  $V_{OEL}$  προστίθεται με αρνητικό πρόσημο στον κύριο αθροιστή εισόδου του ΑΡΤ, δηλαδή:

$$u_{AVR} = -V_{OEL} \tag{2.95}$$

Εάν το ΣΠΥ της σύγχρονης μηχανής είναι διακοπτικού τύπου, τα πράγματα είναι λίγο πιο σύνθετα. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι τη χρονική στιγμή  $t_{SW}$  ο έλεγχος της διεγέρτριας μεταβαίνει από τον ΑΡΤ στο ΣΠΥ. Τη στιγμή αυτή υποθέτουμε ότι η τάση διεγέρσεως έχει την τιμή  $E_f^{SW}$  (με  $E_f^{SW} > I_{fd}^{lim}$  στο ανά μονάδα σύστημα), ενώ το σήμα εισόδου  $K_A(V_{ref} - V_C)$  της διεγέρτριας αντικαθίσταται από το σήμα εξόδου  $V_{OEL}$  του ΣΠΥ. Υπό αυτές τις συνθήκες, η απόκριση του συστήματος διέγερσης περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$E_f = E_f^{SW} + \Delta E_f^{OEL} \tag{2.96}$$

$$T_E \Delta \dot{E}_f^{OEL} = -\Delta E_f^{OEL} - V_{OEL}$$
(2.97)

όπου  $\Delta E_f^{OEL} = 0$  τη χρονική στιγμή  $t_{SW}$  της μεταγωγής. Σημειώνεται ότι στην εξεταζόμενη περίπτωση, το αναλογικό κέρδος  $K_P$  πρέπει για λόγους ευστάθειας να είναι αρκετά μεγαλύτερο του ολοκληρωτικού  $K_I$ .

# 2.4 Σταθεροποιητές Συστήματος Ισχύος

Ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος (Power System Stabilizer) είναι μία διάταξη η οποία επιδρά στο σύστημα διέγερσης μίας σύγχρονης γεννήτριας με σκοπό να παρέχει πρόσθετη ροπή απόσβεσης στις ταλαντώσεις του δρομέα της σε ένα επιθυμητό εύρος συχνοτήτων [MBB97]. Για το σκοπό αυτό, ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος παράγει στην έξοδό του μία συνιστώσα της ηλεκτρικής ροπής, η οποία είναι εν φάση με την απόκλιση της ταχύτητας του δρομέα της γεννήτριας. Ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος λειτουργεί σταθεροποιητικά για τη γεννήτρια στη μεταβατική κατάσταση, αφήνοντας ανεπηρέαστη την τερματική της τάση στη μόνιμη κατάσταση.

Σαν είσοδοι του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σήματα ανάλογα είτε της ταχύτητας του δρομέα, είτε της συχνότητας εξόδου ή ακόμα της ενεργού παραγωγής της γεννήτριας.

Στο Σχ. 2.14 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων του μοντέλου του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος, το οποίο υιοθετείται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής [Nom05].



Σχ. 2.14: Διάγραμμα βαθμίδων σταθεροποιητή συστήματος ισχύος

Το εξεταζόμενο μοντέλο έχει σαν είσοδο την ανά μονάδα απόκλιση της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα, και αποτελείται από ένα υψιπερατό φίλτρο, δύο διατάξεις αντιστάθμισης φάσης και μία βαθμίδα κέρδους. Το σήμα εξόδου V<sub>PSS</sub> του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος προστίθεται στον κύριο αθροιστή εισόδου του APT της γεννήτριας.

Το υψιπερατό φίλτρο διαθέτει αρκετά μεγάλη σταθερά χρόνου  $T_W$  ώστε να επιτρέπει στα σήματα που σχετίζονται με τις ταλαντώσεις της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα να το διαπερνούν αναλλοίωτα. Αν δεν υπήρχε το φίλτρο αυτό, η τερματική τάση της γεννήτριας θα επηρεαζόταν από σταθερές μεταβολές της ταχύτητας του δρομέα της. Επομένως, η παρουσία του εξασφαλίζει ότι ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος ενεργοποιείται μόνο σε μεταβολές (ταλαντώσεις) της ταχύτητας της μηχανής.

Ακολούθως, κάθε μία διάταξη αντιστάθμισης φάσης παρέχει την επιθυμητή γωνία προπορείας  $(T_1>T_2)$  και  $T_3>T_4$ ) ώστε να αντισταθμιστεί η διαφορά φάσης μεταξύ της εισόδου της διεγέρτριας και της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Στο θεωρούμενο μοντέλο χρησιμοποιούνται δύο βαθμίδες αντιστάθμισης φάσης, ωστόσο σε άλλα μοντέλα συναντώνται ακόμα περισσότερες βαθμίδες.

Συνήθως, η συχνότητα των προς απόσβεση ταλαντώσεων κυμαίνεται από 0.1 έως 2 Hz και επομένως η συνολική διάταξη της αντιστάθμισης φάσης σχεδιάζεται ώστε να αποκρίνεται στο παραπάνω εύρος. Σημειώνεται πάντως ότι σε γενικές γραμμές η διαφορά φάσης δεν αντισταθμίζεται πλήρως, με αποτέλεσμα ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος εκτός της ροπής αποσβέσεως να μεταβάλλει και τη ροπή συγχρονισμού.

Τέλος, η βαθμίδα κέρδους καθορίζει το μέγεθος της απόσβεσης που εισάγεται από τη διάταξη του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του κέρδους K<sub>PSS</sub>, τόσο μεγαλύτερη ροπή απόσβεσης εισάγει η διάταξη αυτή. Ωστόσο, για λόγους ευστάθειας και λόγω του περιοριστή το παραπάνω κέρδος δεν μπορεί να ξεπεράσει μία μέγιστη τιμή.

Στο χώρο κατάστασης, το εξεταζόμενο μοντέλο σταθεροποιητή συστήματος ισχύος παρουσιάζει τις εξής τρεις μεταβλητές κατάστασης:

- Τη μεταβλητή  $x_W^{PSS}$ , η οποία συνδέεται με το υψιπερατό φίλτρο στην είσοδο.
- Tic μεταβλητές  $x_1^{PSS}$  και  $x_2^{PSS}$ , οι οποίες συνδέονται με τic δύο βαθμίδες αντιστάθμισης φάσης.

Η δυναμική απόκριση των μεταβλητών αυτών περιγράφεται από το ακόλουθο σύνολο διαφορικών εξισώσεων:

$$\dot{x}_{W}^{PSS} = -\frac{1}{T_{W}} x_{W}^{PSS} + \frac{1}{T_{W}} \frac{\omega_{r} - \omega_{sys}}{\omega_{b}}$$
(2.98)

$$\dot{x}_{1}^{PSS} = -\frac{1}{T_{2}} x_{1}^{PSS} + \frac{K_{PSS}}{T_{2}} \left( 1 - \frac{T_{1}}{T_{2}} \right) \left[ \frac{\omega_{r} - \omega_{sys}}{\omega_{b}} - x_{W}^{PSS} \right]$$
(2.99)

$$\dot{x}_{2}^{PSS} = -\frac{1}{T_{4}} x_{2}^{PSS} + \frac{1}{T_{4}} \left( 1 - \frac{T_{3}}{T_{4}} \right) \left[ x_{1}^{PSS} + K_{PSS} \frac{T_{1}}{T_{2}} \left( \frac{\omega_{r} - \omega_{sys}}{\omega_{b}} - x_{W}^{PSS} \right) \right]$$
(2.100)

Το σήμα εξόδου  $V_{PSS}$  του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος υπολογίζεται από την (2.101):

$$V_{PSS} = x_2^{PSS} + \frac{T_3}{T_4} \left[ x_1^{PSS} + K_{PSS} \frac{T_1}{T_2} \left( \frac{\omega_r - \omega_{sys}}{\omega_b} - x_W^{PSS} \right) \right]$$
(2.101)

Όπως φαίνεται στο Σχ. 2.14, το σήμα αυτό φράσσεται από μία ελάχιστη ( $V_{PSS}^{\min}$ ) και μία μέγιστη ( $V_{PSS}^{\max}$ ) επιτρεπόμενη τιμή, πριν οδηγηθεί στον κύριο αθροιστή εισόδου του APT, δηλαδή:

$$u_{AVR} = V_{PSS} \quad \mu \epsilon \quad V_{PSS}^{\min} \le V_{PSS} \le V_{PSS}^{\max}$$
(2.102)

# 2.5 Μηχανές Επαγωγής

Οι μηχανές επαγωγής χρησιμοποιούνται ευρέως στις μέρες μας κυρίως ως κινητήρες αλλά και ως γεννήτριες. Οι κινητήρες επαγωγής αποτελούν ένα σημαντικό ποσοστό των βιομηχανικών φορτίων,

ενώ τα τελευταία χρόνια αυξάνεται συνεχώς η συμμετοχή τους και στα οικιακά φορτία κυρίως λόγω της ραγδαίας εξάπλωσης των κλιματιστικών μηχανημάτων. Η κύρια χρήση των μηχανών επαγωγής για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συναντάται στα αιολικά πάρκα (ανεμογεννήτριες).

Οι μηχανές επαγωγής παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στα δυναμικά φαινόμενα των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας για τους ακόλουθους λόγους:

- Έχουν γρήγορη επαναφορά ηλεκτρικής ισχύος (της τάξεως του δευτερολέπτου).
- Έχουν χαμηλό συντελεστή ισχύος και άρα μεγάλη κατανάλωση άεργου ισχύος (λειτουργία γεννήτριας ή κινητήρα).
- Οι κινητήρες (γεννήτριες) επαγωγής κινδυνεύουν να επιβραδυνθούν (επιταχυνθούν) με αποτέλεσμα να σταματήσουν ή να υπερταχυνθούν, όταν η τερματική τους τάση γίνει χαμηλή. Αποτέλεσμα της επιβράδυνσής (επιτάχυνσής) τους είναι η κατανάλωση άεργου ισχύος να αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με την κανονική λειτουργία (3-7 φορές παραπάνω).

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μηχανών επαγωγής. Στις μελέτες Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας θεωρούμε ισοδύναμα συγκεντρωτικά μοντέλα. Σε αυτά τα μοντέλα, μία μηχανή επαγωγής παριστάνει έναν αριθμό παρόμοιων μηχανών, οι οποίες είναι συνδεδεμένες στον ίδιο υποσταθμό μέσω γραμμών διανομής.

Η κύρια διαφορά των μηχανών επαγωγής έναντι των σύγχρονων εντοπίζεται στο γεγονός ότι δεν διαθέτουν τύλιγμα διεγέρσεως και επομένως δεν έχουν την ικανότητα να παράγουν την απαιτούμενη άεργο ισχύ για την εγκατάσταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο διάκενό τους. Στην περίπτωση αυτή, η απαιτούμενη άεργος ισχύς παρέχεται είτε από τις σύγχρονες γεννήτριες του συστήματος είτε από συστοιχίες πυκνωτών, οι οποίες συνδέονται στους ακροδέκτες της μηχανής.

Στο Σχ. 2.15 παριστάνεται συμβολικά μία τριφασική μηχανή επαγωγής.



Σχ. 2.15: Κυκλωματική παράσταση μηχανής επαγωγής

Ο στάτης της τριφασικής ασύγχρονης μηχανής αποτελείται από τρία όμοια τυλίγματα as, bus, cuss (δηλαδή ένα για κάθε φάση), τοποθετημένα σε απόσταση 120 ηλεκτρικών μοιρών το ένα από το άλλο κατά μήκος της περιφέρειας του διακένου. Όταν τα τυλίγματα αυτά τροφοδοτούνται από ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα ρευμάτων, παράγεται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής [KWS00].

Όσον αφορά το κύκλωμα του δρομέα, οι ασύγχρονες μηχανές διαθέτουν ένα τριφασικό κύκλωμα όμοιο με το τύλιγμα του στάτη, του οποίου οι αντίστοιχες φάσεις συμβολίζονται με *ar*, *br*, *cr* ή ισοδύναμο τύλιγμα κλωβού. Στην περίπτωση που τα τυλίγματα του δρομέα είναι βραχυκυκλωμένα, η αρχή λειτουργίας της μηχανής επαγωγής είναι η ακόλουθη:

Τα ρεύματα του στάτη παράγουν ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο, το οποίο περιστρέφεται με ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα. Ο δρομέας περιστρέφεται με ηλεκτρική ταχύτητα, όπου  $\omega_r = \dot{\theta}_r$  η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα. Υποθέτοντας ότι  $\omega_r \neq \omega_s$ , το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσει ρεύματα εξ επαγωγής στη συχνότητα που αντιστοιχεί στη διαφορά  $\omega_s$ - $\omega_r$ . Ακολούθως, τα εξ επαγωγής ρεύματα του δρομέα παράγουν ένα νέο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο, το οποίο περιστρέφεται με ταχύτητα  $\omega_s$ - $\omega_r$  ως προς το δρομέα. Επομένως, τα δύο στρεφόμενα μαγνητικά πεδία στο διάκενο περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα  $\omega_s$  ως προς το στάτη, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ηλεκτρομαγνητικής ροπής, η οποία τείνει να ευθυγραμμίσει τα δύο αυτά πεδία. Όταν το κύμα ΜΕΔ του δρομέα ακολουθεί το κύμα ΜΕΔ του στάτη, η αναπτυσσόμενη ροπή είναι επιταχύνουσα (λειτουργία κινητήρα). Προφανώς, όταν η ταχύτητα του πεδίου του δρομέα είναι ίση με  $\omega_s$ , δεν αναπτύσσονται επαγόμενα ρεύματα στο δρομέα, οπότε δεν υπάρχει κύμα ΜΕΔ δρομέα και επομένως δεν αναπτύσσεται ηλεκτρομαγνητική ροπή στο διάκενο. Η ολίσθηση ορίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \tag{2.103}$$

Σύμφωνα με την Εξ. (2.103), η γωνιακή ταχύτητα  $\omega_s$ - $\omega_r$  των επαγόμενων ρευμάτων δρομέα είναι ίση με  $s\omega_b$ , μέγεθος το οποίο είναι γνωστό σαν συχνότητα ολίσθησης.

Σημειώνεται ότι επειδή οι ασύγχρονες μηχανές λειτουργούν τις περισσότερες φορές σαν κινητήρες, θεωρούμε ότι τα ρεύματα των τριών φάσεων *as*, *bs*, *cs* του στάτη είναι θετικά, όταν εισέρχονται στη μηχανή.

#### 2.5.1 Περιγραφή μοντέλου μηχανής επαγωγής με τις εξισώσεις του Park

5

Οι εξισώσεις του Park αποτελούν το μαθηματικό εργαλείο για την περιγραφή και των μηχανών επαγωγής [KWS00]. Τόσο το τριφασικό τύλιγμα *as*, *bs*, *cs* του στάτη όσο και το αντίστοιχο *ar*, *br*, *cr* του δρομέα αντικαθίστανται από *d*, *q*, 0 τυλίγματα, τα οποία περιστρέφονται με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα  $\omega_s$  της τάσεως τροφοδοσίας του στάτη. Τα δύο τυλίγματα *d* και *q* είναι ορθογώνια μεταξύ τους και ορίζουν το πλαίσιο αναφοράς *dq* της μηχανής επαγωγής. Ο άξονας του τυλίγματος *d* μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ταυτίζεται με τον άξονα της φάσης *as* του στάτη, ενώ ο άξονας *q* προπορεύεται κατά 90°. Το τύλιγμα 0, όπως και στην περίπτωση των σύγχρονων μηχανών, δεν είναι μαγνητικά συζευγμένο με τα άλλα δύο νέα τυλίγματα και παίζει ρόλο μόνο σε ασύμμετρες συνθήκες φόρτισης. Επειδή στην παρούσα διατριβή θα ασχοληθούμε μόνο με συμμετρικές καταστάσεις, το τύλιγμα 0 παραλείπεται.

Για λόγους απλοποίησης των εξισώσεων της μηχανής κάνουμε τις εξής παραδοχές:

(α) Το φαινόμενο του μαγνητικού κορεσμού αμελείται.

(β) Η ωμική αντίσταση του δρομέα θεωρείται σταθερή (ανεξάρτητη της συχνότητας ολίσθησης).

Επίσης, σημειώνονται οι εξής παρατηρήσεις αναφορικά με τους συμβολισμούς των μεγεθών:

- Ολα τα μεγέθη αναφέρονται στο πλαίσιο αναφοράς dq στάτη της μηχανής.
- Οι δείκτες s ή r συμβολίζουν τύλιγμα του στάτη ή του δρομέα αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις του Park για τις τάσεις στάτη και δρομέα στο πλαίσιο αναφοράς dq της μηχανής γράφονται ως εξής [KWS00]:

$$v_{ds} = r_s \dot{i}_{ds} - \frac{\omega_s}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{ds}$$
(2.104)

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega_s}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{qs}$$
(2.105)

$$v_{dr} = r_r i_{dr} - \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \psi_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{dr}$$
(2.106)

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \psi_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{qr}$$
(2.107)

όπου:

- $-v_{ds}(v_{dr})$  και  $v_{qs}(v_{qr})$  είναι οι ανά μονάδα τάσεις των τυλιγμάτων στάτη (δρομέα) στους δύο άξονες d και q αντίστοιχα.
- $-i_{ds}$   $(i_{dr})$  και  $i_{qs}$   $(i_{qr})$  είναι τα ανά μονάδα ρεύματα στάτη (δρομέα) στους δύο άξονες d και q αντίστοιχα.
- $\psi_{ds}$  ( $\psi_{dr}$ ) και  $\psi_{qs}$  ( $\psi_{qr}$ ) είναι οι ανά μονάδα πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο στάτη (δρομέα) στους δύο άξονες d και q αντίστοιχα.
- ω<sub>s</sub> και ω<sub>r</sub> είναι η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα του πλαισίου αναφοράς dq και του δρομέα αντίστοιχα σε ηλεκτρικά rad/s.
- $-\omega_b$ είναι η βασική (ονομαστική) ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα του συστήματος σε ηλεκτρικά rad/s.
- r<sub>s</sub> (r<sub>r</sub>) είναι η ανά μονάδα ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων στάτη (δρομέα).

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις, η δυναμική συμπεριφορά των μηχανών επαγωγής χαρακτηρίζεται από:

- Τα ηλεκτρομαγνητικά μεταβατικά φαινόμενα του τυλίγματος του στάτη (2.104) και (2.105). Τα φαινόμενα αυτά είναι, όπως και στην περίπτωση των σύγχρονων μηχανών, της τάξεως των κλασμάτων του δευτερολέπτου και συνήθως αμελούνται σε μελέτες ευστάθειας.
- Τα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα του τυλίγματος του δρομέα (2.106) και (2.107), τα οποία είναι της ίδιας χρονικής κλίμακας με τα υπομεταβατικά φαινόμενα των σύγχρονων μηχανών.
- Την εξίσωση επιταχύνσεως του δρομέα, η οποία για σύμβαση κινητήρα περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$2H\frac{\dot{\omega}_r}{\omega_b} = T_e - T_m \tag{2.108}$$

όπου:

- Η είναι η ανηγμένη σταθερά αδράνειας της μηχανής (σε s).
- $T_e$  και  $T_m$  είναι αντίστοιχα η μηχανική και η ηλεκτρομαγνητική ροπή σε ανά μονάδα τιμή.

### 2.5.2 Μοντέλο τρίτης τάξεως μηχανής επαγωγής

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται το μοντέλο τρίτης τάξεως τριφασικής μηχανής επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα, το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή.

Για την εξαγωγή του θεωρούμενου μοντέλου, γίνεται καταρχήν η παραδοχή ότι δεν παρεμβάλλεται κύκλωμα μετατροπέα συχνότητας μεταξύ της μηχανής και του δικτύου. Επομένως, η γωνιακή συχνότητα ω<sub>s</sub> των ρευμάτων τροφοδοσίας του στάτη ταυτίζεται με τη γωνιακή συχνότητα ω<sub>sys</sub> του δικτύου.

Επίσης, όπως και στην περίπτωση των σύγχρονων μηχανών, αμελούνται τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα του στάτη, οπότε οι αντίστοιχες διαφορικές εξισώσεις (2.104) και (2.105) μετατρέπονται στις παρακάτω αλγεβρικές:

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega_{sys}}{\omega_b} \psi_{qs}$$
(2.109)

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega_{sys}}{\omega_b} \psi_{ds}$$
(2.110)

Οι ανά μονάδα τιμές όλων των μεγεθών θεωρούνται ανηγμένες στα βασικά μεγέθη του στάτη.

Επειδή ο δρομέας του εξεταζόμενου μοντέλου μηχανής επαγωγής θεωρείται βραχυκυκλωμένος, μηδενίζονται οι τάσεις τροφοδοσίας του  $v_{dr}$  και  $v_{qr}$  στις αντίστοιχες διαφορικές εξισώσεις (2.106) και (2.107), δηλαδή:

$$0 = r_r i_{dr} - \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \psi_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{dr}$$
(2.111)

$$0 = r_r i_{qr} + \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \psi_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{qr}$$
(2.112)

Οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των δύο τυλιγμάτων του στάτη και των δύο τυλιγμάτων του δρομέα στο πλαίσιο αναφοράς dq του στάτη συνδέονται με τα αντίστοιχα ρεύματα σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\psi_{ds} = X_{ss}i_{ds} + X_M i_{dr} \tag{2.113}$$

$$\psi_{qs} = X_{ss}i_{qs} + X_M i_{qr} \tag{2.114}$$

$$\psi_{dr} = X_M i_{ds} + X_{rr} i_{dr} \tag{2.115}$$

$$\psi_{qr} = X_{M} i_{qs} + X_{rr} i_{qr} \tag{2.116}$$

όπου

- $X_M$  είναι η αντίδραση μαγνητίσεως της μηχανής.
- $X_{ss}$  είναι η σύγχρονη αντίδραση του στάτη.
- Χ<sub>rr</sub> είναι η σύγχρονη αντίδραση του δρομέα.

Για τις σύγχρονες αντιδράσεις, προφανώς ισχύει:

$$X_{ss} = X_{M} + X_{ls} (2.117)$$

$$X_{rr} = X_M + X_{lr} (2.118)$$

Προκειμένου να απαλειφθούν οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο  $\psi_{ds}$  και  $\psi_{qs}$  από τις αλγεβρικές εξισώσεις (2.110) και (2.109) του στάτη, εκφράζεται το ρεύμα  $i_{dr}$  (αντίστοιχα  $i_{qr}$ ) από την (2.115) (αντίστοιχα (2.116)) συναρτήσει των όρων  $\psi_{dr}$  και  $i_{ds}$  (αντίστοιχα  $\psi_{qr}$  και  $i_{qs}$ ), δηλαδή:

$$i_{dr} = \frac{1}{X_{rr}} (\psi_{dr} - X_M \dot{i}_{ds})$$
(2.119)

$$i_{qr} = \frac{1}{X_{rr}} (\psi_{qr} - X_M i_{qs})$$
(2.120)

Ακολούθως, τα ρεύματα δρομέα  $i_{dr}$  και  $i_{qr}$  από τις (2.119) και (2.120) αντικαθίστανται αντίστοιχα στις (2.113) και (2.114) των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο του στάτη  $\psi_{ds}$  και  $\psi_{qs}$ , οπότε:

$$\psi_{ds} = \left(X_{ss} - \frac{X_M^2}{X_{rr}}\right) i_{ds} + \frac{X_M}{X_{rr}} \psi_{dr}$$
(2.121)

$$\psi_{qs} = \left(X_{ss} - \frac{X_M^2}{X_{rr}}\right) i_{qs} + \frac{X_M}{X_{rr}} \psi_{qr}$$
(2.122)

Στο σημείο αυτό ορίζονται οι εξής δύο HEΔ, οι οποίες είναι ανάλογες των πεπλεγμένων ροών για τα τυλίγματα του δρομέα:

$$E'_q = \frac{X_M}{X_{rr}} \psi_{dr} \tag{2.123}$$

$$E'_d = -\frac{X_M}{X_{rr}} \psi_{qr} \tag{2.124}$$

οι οποίες ονομάζονται μεταβατικές ΗΕΔ της μηχανής κατά τον εγκάρσιο (q) και τον ευθύ (d) άξονα αντίστοιχα. Επίσης, ορίζεται η μεταβατική αντίδραση  $X'_s$  της μηχανής:

$$X'_{s} = X_{ss} - \frac{X^{2}_{M}}{X_{rr}}$$
(2.125)

Αντικαθιστώντας τις (2.123), (2.124) και (2.125) στις (2.121) και (2.122), προκύπτει ότι οι ροές  $\psi_{ds}$  και  $\psi_{qs}$  δίνονται ισοδύναμα από τις παρακάτω σχέσεις:
$$\psi_{ds} = X'_s i_{ds} + E'_q \tag{2.126}$$

$$\psi_{qs} = X'_{s}i_{qs} - E'_{d} \tag{2.127}$$

Στη συνέχεια, οι (2.127) και (2.126) αντικαθίστανται αντίστοιχα στις (2.109) και (2.110) των τάσεων των τυλιγμάτων του στάτη, οπότε προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \lambda_\omega X'_s i_{qs} + \lambda_\omega E'_d \tag{2.128}$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \lambda_{\omega} X'_s i_{ds} + \lambda_{\omega} E'_q \tag{2.129}$$

όπου  $\lambda_{\omega}$  είναι ο λόγος των κυκλικών συχνοτήτων  $\omega_{sys}$  προς  $\omega_b$  (2.15).

Ακολούθως, τα ρεύματα δρομέα  $i_{dr}$  και  $i_{qr}$  από τις (2.119) και (2.120) αντικαθίστανται αντίστοιχα στις διαφορικές εξισώσεις (2.111) και (2.112) του δρομέα, οπότε προκύπτει ότι:

$$\left(\frac{X_{rr}}{\omega_b r_r}\right)\left(\frac{X_M}{X_{rr}}\dot{\psi}_{dr}\right) = -\frac{X_M}{X_{rr}}\psi_{dr} + \frac{X_M^2}{X_{rr}}\dot{i}_{ds} + \left(\omega_{sys} - \omega_r\right)\left(\frac{X_{rr}}{\omega_b r_r}\right)\left(\frac{X_M}{X_{rr}}\psi_{qr}\right)$$
(2.130)

$$\left(\frac{X_{rr}}{\omega_b r_r}\right)\left(-\frac{X_M}{X_{rr}}\dot{\psi}_{qr}\right) = \frac{X_M}{X_{rr}}\psi_{qr} - \frac{X_M^2}{X_{rr}}\dot{i}_{qs} + \left(\omega_{sys} - \omega_r\right)\left(\frac{X_{rr}}{\omega_b r_r}\right)\left(\frac{X_M}{X_{rr}}\psi_{dr}\right)$$
(2.131)

Εάν οριστεί η μεταβατική χρονική σταθερά  $T'_r$  των τυλιγμάτων του δρομέα σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$T_r' = \frac{X_{rr}}{\omega_b r_r} \tag{2.132}$$

και ληφθούν υπόψη οι ορισμοί των μεταβατικών μεγεθών από τις (2.123), (2.124) και (2.125), καταλήγουμε ότι οι διαφορικές εξισώσεις (2.130) και (2.131) παίρνουν την εξής μορφή:

$$T'_{r} \dot{E}'_{q} = -E'_{q} + (X_{ss} - X'_{s})i_{ds} - (\omega_{sys} - \omega_{r})T'_{r}E'_{d}$$
(2.133)

$$T'_{r}E'_{d} = -E'_{d} - (X_{ss} - X'_{s})i_{qs} + (\omega_{sys} - \omega_{r})T'_{r}E'_{q}$$
(2.134)

Η ανά μονάδα ηλεκτρομαγνητική ροπή Τ<sub>e</sub> δίνεται συναρτήσει των μεγεθών του δρομέα από τη σχέση:

$$\Gamma_e = \psi_{qr} i_{dr} - \psi_{dr} i_{qr} \tag{2.135}$$

στην οποία αν αντικατασταθούν τα ρεύματα του δρομέα σύμφωνα με τις Εξ. (2.119) και (2.120), προκύπτει τελικά ότι:

$$T_e = E'_d i_{ds} + E'_q i_{qs} (2.136)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή  $T_e$  αντικαθίσταται στη διαφορική εξίσωση (2.108) επιταχύνσεως του δρομέα της μηχανής επαγωγής, δηλαδή:

$$2H\frac{\omega_r}{\omega_b} = E'_d i_{ds} + E'_q i_{qs} - T_m \tag{2.137}$$

#### 2.5.3 Σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς

Σύμφωνα με την προηγούμενη ενότητα, η εφαρμογή του μετασχηματισμού του Park σε μία ασύγχρονη μηχανή ανάγει τα ρεύματα και τις τάσεις τόσο του στάτη όσο και του δρομέα σε ένα ορθογώνιο πλαίσιο αναφοράς dq, το οποίο περιστρέφεται με τη γωνιακή συχνότητα  $\omega_{sys}$  της τάσεως τροφοδοσίας του στάτη. Επομένως, σε ένα σύστημα με πολλές ασύγχρονες μηχανές δεν χρειάζεται να οριστεί ξεχωριστό πλαίσιο αναφοράς για το στάτη κάθε μίας, αλλά εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός του Park σε όλες τις μηχανές θεωρώντας ως κοινό πλαίσιο αναφοράς dq το σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος (βλ. Σχ. 2.3).

Οι συνιστώσες  $v_x$  και  $v_y$  της τάσεως του στάτη μίας μηχανής επαγωγής στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος είναι ίσες με:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix}$$
(2.138)

ενώ οι αντίστοιχες συνιστώσες του εγχεόμενου στο δίκτυο ρεύματος στάτη  $(i_x \text{ και } i_y)$  υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix}$$
(2.139)

Το πρόσημο μείον στην (2.139) οφείλεται στο γεγονός ότι στο εξεταζόμενο μοντέλο μηχανής επαγωγής, τα ρεύματα του στάτη θεωρούνται θετικά εάν εισέρχονται στη μηχανή.

Οι αλγεβρικές εξισώσεις (2.128) και (2.129) του στάτη εκφράζονται σε μορφή πινάκων ως εξής:

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & -\lambda_{\omega} X'_s \\ \lambda_{\omega} X'_s & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \lambda_{\omega} \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix}$$
(2.140)

Αντικαθιστώντας τις (2.138) και (2.139), στη σχέση (2.140) προκύπτει ότι:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} r_s & -\lambda_\omega X'_s \\ \lambda_\omega X'_s & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \lambda_\omega \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix}$$
(2.141)

Στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy, το διάνυσμα του εγχεόμενου ρεύματος μηχανής επαγωγής στο δίκτυο ισούται με:

$$\begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = -\frac{1}{r_s^2 + \lambda_\omega^2 X_s'^2} \begin{bmatrix} r_s & \lambda_\omega X_s' \\ -\lambda_\omega X_s' & r_s \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} - \lambda_\omega \begin{bmatrix} E_d' \\ E_q' \end{bmatrix} \right\}$$
(2.142)

#### 2.5.4 Μηχανικό φορτίο

Η μηχανική ροπή του φορτίου ενός κινητήρα επαγωγής είναι, στη γενική περίπτωση, συνάρτηση των στροφών του κινητήρα. Μία γενική παράσταση του μηχανικού φορτίου δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$T_m(s) = T_{m0} \left[ (1 - \alpha_m) + \alpha_m \left( \frac{\omega_r}{\omega_b} \right)^m \right]$$
(2.143)

όπου T<sub>m0</sub> είναι η μηχανική ροπή του φορτίου στις σύγχρονες στροφές, α<sub>m</sub> το ποσοστό του φορτίου που είναι εκθετικής μορφής και m ο εκθέτης του εκθετικού τμήματος του φορτίου. Ειδικές περιπτώσεις μηχανικού φορτίου έχουμε όταν:

- α<sub>m</sub>=0, οπότε η μηχανική ροπή του φορτίου είναι ανεξάρτητη των στροφών του κινητήρα (φορτίο σταθερής ροπής).
- α<sub>m</sub>=1 και m=2, οπότε η μηχανική ροπή του φορτίου είναι ανάλογη με το τετράγωνο των στροφών του κινητήρα (τετραγωνικό φορτίο).

Στην περίπτωση που η μηχανή επαγωγής λειτουργεί ως γεννήτρια, η μηχανική ροπή έχει αρνητικό πρόσημο.

### 2.6 Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί

Οι ηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας μετατρέπουν τη θερμική ενέργεια που περικλείεται σε μία ποσότητα ορυκτού καυσίμου (λιγνίτης, πετρέλαιο ή φυσικό αέριο) σε ηλεκτρική, με την οποία τροφοδοτούνται στη συνέχεια οι διάφοροι καταναλωτές. Οι σταθμοί αυτοί χωρίζονται σε ατμοηλεκτρικούς και μηχανές εσωτερικής καύσεως.

Κύρια τμήματα μίας ατμοηλεκτρικής μονάδας είναι ο ατμοπαραγωγός, ο ατμοστρόβιλος με τον αντίστοιχο ρυθμιστή στροφών, καθώς επίσης και η σύγχρονη γεννήτρια με τις διατάξεις ελέγχου και προστασίας [Kun94,PV91].

Στον ατμοπαραγωγό πραγματοποιείται η καύση του ορυκτού καυσίμου και η εκλυόμενη θερμική ενέργεια θερμαίνει νερό για την παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας. Ο ατμός αυτός διοχετεύεται στο στρόβιλο όπου εκτονώνεται με αποτέλεσμα την απόδοση μηχανικής ισχύος στον άξονα ατμού. Ο άξονας κινεί τη σύγχρονη γεννήτρια, η οποία τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια το δίκτυο, στο οποίο είναι συνδεδεμένη. Ο ρυθμιστής στροφών είναι η κύρια διάταξη η οποία ελέγχει και ρυθμίζει την ενεργό ηλεκτρική ισχύ εξόδου της γεννήτριας.

Στη συνέχεια, περιγράφεται αναλυτικά η λειτουργία του ατμοπαραγωγού, του ατμοστρόβιλου και του ρυθμιστή στροφών, ενώ παράλληλα αναπτύσσονται μοντέλα για την παράσταση των διατάξεων αυτών.

Σημειώνεται ότι οι τιμές των μεγεθών που περιγράφονται στη συνέχεια είναι ανηγμένες στο ανά μονάδα σύστημα, του οποίου η βασική ισχύς ισούται με την ονομαστική ισχύ *P<sub>nom</sub>* του στροβίλου (σε MW). Η ισχύς αυτή θεωρούμε ότι αποδίδεται στον άξονα της γεννήτριας σε συνθήκες ονομαστικής πίεσης στη δικλείδα ατμού στην είσοδο του στροβίλου, όταν η δικλείδα είναι πλήρως ανοικτή.

# 2.6.1 Μοντέλο ατμοπαραγωγού

Στους ατμοπαραγωγούς των ατμοηλεκτρικών σταθμών πραγματοποιείται η καύση υγρού πετρελαίου ή άνθρακα σε μορφή στερεοποιημένης μάζας ή φυσικού αερίου, για τη θέρμανση νερού, με σκοπό την παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας.

Κύρια τμήματα του ατμοπαραγωγού είναι το σύστημα ατμοποίησης, ο προθερμαντήρας νερού ή οικονομητήρας, ο υπερθερμαντήρας, ο προθερμαντήρας του αέρα καύσης και ο αναθερμαντήρας.

Η διαδικασία της καύσης γίνεται στο χώρο της εστίας, όπου το καύσιμο οδηγείται σε κονιορτοποιημένη μορφή, αν είναι στερεό, μέσω ειδικής διάταξης ελέγχου. Στην εστία οδηγείται και ο απαραίτητος για την καύση αέρας μέσω ανεμιστήρων, οι οποίοι ρυθμίζουν τη ροή του. Στη συνέχεια, τα παραγόμενα θερμά καυσαέρια μεταδίδουν μέρος της θερμότητάς τους στους σωλήνες (αυλούς) ανόδου. Εκεί έχει οδηγηθεί το εργαζόμενο μέσο (νερό) από το τύμπανο, μέσω των σωλήνων καθόδου (ατμοπαραγωγοί φυσικής κυκλοφορίας) ή μέσω αντλίας κυκλοφορίας (ατμοπαραγωγοί τεχνητής κυκλοφορίας). Στους σωλήνες ανόδου, μέρος του εργαζόμενου μέσου ατμοποιείται. Οι σωλήνες ανόδου καταλήγουν στο τύμπανο, όπου το μίγμα κορεσμένου νερού-ατμού διαχωρίζεται και ο ατμός προχωράει προς τον υπερθερμαντήρα. Στον υπερθερμαντήρα ο κορεσμένος ατμός μετατρέπεται σε υπέρθερμο, ενώ στη συνέχεια ρυθμίζεται η θερμοκρασία του με ψεκασμό τροφοδοτικού νερού. Ακολούθως, ο ατμός υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας διοχετεύεται στο στρόβιλο, ώστε να εκτονωθεί αποδίδοντας μηχανική ροπή στον άξονα εξόδου του.

Στα βοηθητικά τμήματα του ατμοπαραγωγού περιλαμβάνονται πλήθος τροφοδοτικών αντλιών (καυσίμου, τροφοδοτικού νερού, κτλ.) και ανεμιστήρων για την κατάθλιψη του αέρα καύσης ή την προσαγωγή του στον προθερμαντήρα, καθώς επίσης και για την απόπλυση της εστίας πριν την εκκίνηση του ατμοπαραγωγού ή τη δημιουργία ελκυσμού στην καπνοδόχο [PV91].

Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο εξασφαλίζεται η ροή του εργαζόμενου μέσου, οι ατμοπαραγωγοί διακρίνονται σε φυσικής, τεχνητής και εξαναγκασμένης κυκλοφορίας.

Στον ατμοπαραγωγό φυσικής κυκλοφορίας, η ροή του εργαζόμενου μέσου στηρίζεται στη διαφορά πυκνότητας που έχει το νερό στους σωλήνες ανόδου και καθόδου.

Στον ατμοπαραγωγό τεχνητής κυκλοφορίας, η παραπάνω ροή εξασφαλίζεται με τη βοήθεια αντλίας κυκλοφορίας.

Τέλος, στον ατμοπαραγωγό εξαναγκασμένης κυκλοφορίας χρησιμοποιούνται αντλίες μεταξύ του διαχωριστή νερού-ατμού (δεν υπάρχει τύμπανο όπως στα δύο άλλα είδη ατμοπαραγωγών) και του συστήματος ατμοποίησης.

Η διατήρηση της ομαλής λειτουργίας του ατμοπαραγωγού εξασφαλίζεται με διάφορες διατάξεις ελέγχου, οι οποίες έχουν κύριο σκοπό:

 Τον έλεγχο της καύσης στην εστία, ώστε αφενός να διατηρείται κατά το δυνατόν σταθερή η πίεση του ατμού που εξέρχεται προς το στρόβιλο και αφετέρου να υπάρχουν πάντα βέλτιστες συνθήκες καύσης ρυθμίζοντας κατάλληλα την αναλογία αέρα και καυσίμου. Ο έλεγχος της πίεσης του ατμού βοηθάει στην προσαρμογή του λέβητα στις συνεχώς μεταβαλλόμενες απαιτήσεις του φορτίου. Επίσης, η βέλτιστη αναλογία αέρα και καυσίμου αποτρέπει τη δημιουργία εκρηκτικών ή δηλητηριωδών αερίων, τα οποία προκαλούνται από την περίσσεια καυσίμου. Εκτός αυτού, και η περίσσεια του αέρα είναι ανεπιθύμητη, επειδή διαφεύγοντας από την καπνοδόχο, απάγει ένα σημαντικό ποσό θερμότητας από την εστία, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του ατμοπαραγωγού.

- 2. Τον έλεγχο της ροής του νερού τροφοδοσίας στο τύμπανο, αφού η πιθανή υπερχείλισή του μπορεί να προκαλέσει διαφυγή σταγονιδίων νερού προς το στρόβιλο, με αποτέλεσμα τη διάβρωση των πτερυγίων του και επομένως επιβάρυνση της μηχανικής φθοράς του. Στην αντίθετη περίπτωση, εάν δηλαδή η στάθμη χαμηλώσει αρκετά, προκαλείται ανεπιθύμητη υπερθέρμανση στις σωληνώσεις.
- 3. Τον έλεγχο της θερμοκρασίας του υπέρθερμου ατμού, ώστε να διατηρείται σταθερή και κατά συνέπεια να αποφεύγεται η θερμική καταπόνηση των μετάλλων του στροβίλου. Διαταραχές στη θερμοκρασία του ατμού μπορούν να προκληθούν από μεταβολή της ποσότητας του αέρα καύσης, από ανομοιογένειες του καυσίμου (ιδιαίτερα στο λιγνίτη), καθώς επίσης και από μεταβολές ροής του νερού τροφοδοσίας.

Οι διατάξεις ελέγχου είναι αρκετά εξειδικευμένες και μπορούν να υλοποιηθούν με ηλεκτρικά, υδραυλικά ή πνευματικά (πεπιεσμένου αέρα) σήματα. Ο έλεγχος μπορεί να ασκείται είτε αναλογικά, όπως είναι οι παραδοσιακές διατάξεις ελέγχου, ή ψηφιακά με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Στην εργασία [Che90] αναπτύσσεται αναλυτικά το γραμμικοποιημένο μοντέλο ατμοπαραγωγού τεχνητής κυκλοφορίας, τρίτης τάξης. Στην παρούσα διατριβή αναπτύσσεται ένα μη γραμμικό μοντέλο ατμοπαραγωγού δεύτερης τάξης, στο οποίο η είσοδος καυσίμου ελέγχεται από μία αναλογικήολοκληρωτική μονάδα ελέγχου, ώστε να διατηρείται σταθερή η πίεση  $P_r$  στη δικλείδα ατμού. Το διάγραμμα βαθμίδων του εξεταζόμενου μοντέλου φαίνεται στο Σχ. 2.16:



Σχ. 2.16: Διάγραμμα βαθμίδων ατμοπαραγωγού

όπου:

- g είναι το άνοιγμα της δικλείδας ελέγχου ροής του υπέρθερμου ατμού προς το στρόβιλο.
- w<sub>s</sub> είναι η ροή ατμού προς το στρόβιλο.
- *w<sub>B</sub>* είναι ρυθμός καύσης του καυσίμου.
- $w_D$  είναι η παροχή ατμού από το τύμπανο.
- $P_d$  είναι η πίεση τυμπάνου.
- $P_{SH}$ είναι η πτώση πίεσης στον υπερθερμαντήρα.
- *P<sub>r</sub>* είναι η πίεση στη δικλείδα ατμού στην είσοδο του στροβίλου.
- $T_{FD}$  είναι μία σταθερά χρόνου (σε s) που αντιστοιχεί στο χρόνο καύσης και στο χρόνο ατμοποίησης.

- $C_B$  είναι η σταθερά χωρητικότητας του τυμπάνου (σε s).
- $K_{SH}$ είναι ο συντελεστής πτώσης πίεσης στον υπερθερμαντήρα.
- $-P_r^{ref}$ είναι η πίεση αναφοράς της δικλείδας ατμού στην είσοδο του στροβίλου.
- K<sub>P</sub> και K<sub>I</sub> είναι αντίστοιχα το αναλογικό και το ολοκληρωτικό κέρδος του αναλογικούολοκληρωτικού ελεγκτή καυσίμου.

Στο χώρο κατάστασης, το θεωρούμενο μοντέλο ατμοπαραγωγού παρουσιάζει τις εξής τρεις μεταβλητές κατάστασης:

- Την ατμοπαραγωγή  $w_D$ .
- Την πίεση του τυμπάνου  $P_d$ .
- Τη μεταβλητή x<sup>SU</sup><sub>PI</sub>, η οποία συνδέεται με την ολοκληρωτική βαθμίδα του ελεγκτή καυσίμου.

Το εξεταζόμενο μοντέλο περιγράφεται από το ακόλουθο σύστημα διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων:

$$\dot{w}_D = -\frac{1}{T_{FD}} w_D + \frac{1}{T_{FD}} w_B \tag{2.144}$$

$$\dot{P}_{d} = \frac{1}{C_{B}} w_{D} - \frac{1}{C_{B}} w_{S}$$
(2.145)

$$\dot{x}_{PI}^{SU} = K_I P_r^{ref} - K_I P_r \tag{2.146}$$

$$w_s = gP_r \tag{2.147}$$

$$P_r = P_d - K_{SH} w_S^2$$
 (2.148)

$$w_{B} = K_{P}(P_{r}^{ref} - P_{r}) + x_{PI}^{SU}$$
(2.149)

Σημειώνεται ότι όλα τα μεγέθη είναι κανονικοποιημένα ως ποσοστά των τιμών κανονικής λειτουργίας (πλήρους φορτίου).

Προκειμένου να απαλειφθούν οι αλγεβρικές εξισώσεις (2.147), (2.148) και (2.149), αντικαθιστάμε τη ροή ατμού  $w_s$  προς το στρόβιλο από την (2.147) στην (2.148) και επομένως καταλήγουμε στην ακόλουθη δευτεροβάθμια εξίσωση ως προς την πίεση  $P_r$  στη δικλείδα ατμού.

$$K_{SH}g^2P_r^2 + P_r - P_d = 0 (2.150)$$

Από τις δύο ετερόσημες λύσεις της (2.150), αποδεκτή είναι μόνο η θετική λύση για την πίεση  $P_r$  και άρα:

$$P_r = \frac{1}{2K_{SH}} \frac{\sqrt{1 + 4K_{SH}g^2 P_d} - 1}{g^2}$$
(2.151)

Η ροή ατμού  $w_s$  προς το στρόβιλο και ο ρυθμός καύσης  $w_b$  του καυσίμου προκύπτουν με αντικατάσταση της πίεσης  $P_r$  από την (2.151) στις (2.147) και (2.149) αντίστοιχα, δηλαδή:

$$w_{S} = \frac{1}{2K_{SH}} \frac{\sqrt{1 + 4K_{SH}g^{2}P_{d} - 1}}{g}$$
(2.152)

και:

$$w_{B} = K_{P}P_{r}^{ref} - \frac{K_{P}}{2K_{SH}} \frac{\sqrt{1 + 4K_{SH}g^{2}P_{d} - 1}}{g^{2}} + x_{PI}^{SU}$$
(2.153)

Βάσει των (2.151), (2.152) και (2.153), οι αλγεβρικές μεταβλητές  $w_B$ ,  $w_S$  και  $P_r$  απαλείφονται από τις διαφορικές εξισώσεις (2.144), (2.145) και (2.146), οπότε οι εξισώσεις κατάστασης του εξεταζόμενου μοντέλου ατμοπαραγωγού δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\dot{w}_{D} = -\frac{1}{T_{FD}} w_{D} + \frac{K_{P}}{T_{D}} P_{r}^{ref} - \frac{K_{P}}{2K_{SH}T_{FD}} \frac{\sqrt{1 + 4K_{SH}g^{2}P_{d} - 1}}{g^{2}} + \frac{1}{T_{FD}} x_{PI}^{SU}$$
(2.154)

$$\dot{P}_{d} = \frac{1}{C_{B}} w_{D} - \frac{1}{2K_{SH}C_{B}} \frac{\sqrt{1 + 4K_{SH}g^{2}P_{d} - 1}}{g}$$
(2.155)

$$\dot{x}_{PI}^{SU} = K_I P_r^{ref} - \frac{K_I}{2K_{SH}} \frac{\sqrt{1 + 4K_{SH}g^2 P_d} - 1}{g^2}$$
(2.156)

#### 2.6.2 Μοντέλο ατμοστροβίλου

Όπως προαναφέρθηκε, οι ατμοστρόβιλοι μετατρέπουν την αποθηκευμένη ενέργεια που περιέχεται σε μία ποσότητα ατμού υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας σε κινητική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια κινεί μία σύγχρονη γεννήτρια παράγοντας ηλεκτρική ισχύ.

Μία τυπική διάταξη ατμοστροβίλου αποτελείται συνήθως από τρεις ή περισσότερες βαθμίδες, οι οποίες συνδέονται εν σειρά σε έναν κοινό άξονα. Η ύπαρξη πολλών βαθμίδων επιτρέπει την αναθέρμανση του ατμού στα ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ των βαθμίδων, ώστε να αυξηθεί η ενθαλπία του και επομένως να βελτιωθεί η συνολική απόδοση του θερμοδυναμικού κύκλου. Στο σημείο αυτό αναφέρουμε χαρακτηριστικά ότι η συνολική απόδοση σύγχρονων ατμοηλεκτρικών σταθμών φτάνει το 45%. Εντούτοις, συναντώνται ατμοστρόβιλοι μικρής κυρίως ισχύος (κάτω των 100 MW), οι οποίοι έχουν μόνο μία βαθμίδα εκτόνωσης του ατμού, ενώ δεν διαθέτουν βαθμίδα αναθέρμανσης.

Η πλέον διαδεδομένη διάταξη ατμοστροβίλου [Kun94] φαίνεται στο Σχ. 2.17. Στη διάταξη αυτή διακρίνονται τρεις βαθμίδες εκτόνωσης του ατμού, η βαθμίδα υψηλής πίεσης (ΥΠ), η βαθμίδα μέσης πίεσης (ΜΠ) και η βαθμίδα χαμηλής πίεσης (ΧΠ).



Σχ. 2.17: Ατμοηλεκτρική μονάδα ατμοστροβίλου τριών βαθμίδων

Ο προερχόμενος από το λέβητα υπέρθερμος ατμός διοχετεύεται στη βαθμίδα υψηλής πίεσης μέσω της κύριας δικλείδας διακοπής εκτάκτου ανάγκης (ΚΔΔΕΑ) και της δικλείδας ελέγχου του ρυθμιστή στροφών (ΔΡΣ). Στη βαθμίδα υψηλής πίεσης ο ατμός εκτονώνεται μερικώς και στη συνέχεια οδηγείται εκ νέου στο λέβητα μέσω της βαθμίδας αναθέρμανσης, ώστε να αυξηθεί η ενθαλπία του. Ακολούθως, ο ατμός εισέρχεται στη βαθμίδα μέσης πίεσης αφού πρώτα διαπεράσει τη δικλείδα διακοπής αναθέρμανσης εκτάκτου ανάγκης (ΔΔΑΕΑ). Στη βαθμίδα μέσης πίεσης αφού πρώτα διαπεράσει τη δικλείδα διακοπής αναθέρμανσης εκτάκτου ανάγκης (ΔΔΑΕΑ). Στη βαθμίδα αυτή έχουμε νέα εκτόνωση του ατμού και άρα πρόσθετη απόδοση ενέργειας στον άξονα του στροβίλου. Καθώς αναχωρεί από τη βαθμίδα μέσης πίεσης, ο ατμός ρέει στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης για την τελική του εκτόνωση. Στη συνέχεια, ο ατμός συμπυκνώνεται σε πίεση μικρότερης της ατμοσφαιρικής, ώστε να διοχετευθεί εκ νέου στο λέβητα για να επαναλάβει το θερμοδυναμικό κύκλο.

Η συνολική ισχύς εξόδου του στροβίλου προέρχεται από το άθροισμα της αποδιδόμενης ισχύος κατά την εκτόνωση του ατμού σε κάθε μία από τις τρεις βαθμίδες. Τυπικές τιμές για τη συμμετοχή της κάθε βαθμίδας στη συνολική ισχύ εξόδου είναι 30% για τη βαθμίδα υψηλής πίεσης, 40% για τη βαθμίδα μέσης πίεσης και 30% για τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης. Σημειώνεται επίσης ότι η δικλείδα που ελέγχεται από τον ρυθμιστή στροφών αναφέρεται συχνά και ως κύρια δικλείδα ελέγχου ή δικλείδα ελέγχου της βαθμίδας υψηλής πίεσης, ενώ οι ενδιάμεσες δικλείδες είναι γνωστές και σαν ενδιάμεσες δικλείδες μέσης πίεσης ή απλά δικλείδες ελέγχου μέσης πίεσης.

Η ροή ατμού στο στρόβιλο ελέγχεται από το ρυθμιστή στροφών. Σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας της ατμοηλεκτρικής μονάδας, οι δικλείδες διακοπής εκτάκτου ανάγκης διατηρούνται πλήρως ανοιχτές και επομένως η ταχύτητα και η ισχύς του στροβίλου ρυθμίζονται με τον έλεγχο της δικλείδας του ρυθμιστή στροφών και των ενδιάμεσων δικλείδων ελέγχου. Η είσοδος του ρυθμιστή στροφών είναι ένα σήμα σφάλματος ταχύτητας, το οποίο προσδιορίζεται από μία συσκευή μέτρησης της ταχύτητας (ΣΜΤ), όπως φαίνεται στο Σχ. 2.17. Η κύρια βαθμίδα ενίσχυσης του ρυθμιστή στροφών και η διάταξη κίνησης της δικλείδας είναι ένας σερβομηχανισμός ελαίου, ο οποίος ελέγχεται από μία δικλείδα οδηγό. Όταν η γεννήτρια είναι συγχρονισμένη στο δίκτυο, ο ρόλος των δικλείδων διακοπής εκτάκτου ανάγκης είναι να προστατεύσουν τη γεννήτρια σε έκτακτες καταστάσεις, όπως π.χ. η υπερτάχυνση η οποία προκαλείται από την μερική ή ολική απώλεια του ηλεκτρικού της φορτίου.

Στη συνέχεια, εξάγονται οι αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν τον στρόβιλο του Σχ. 2.17, καθώς και μία τυπική διάταξη μηχανικού-υδραυλικού ρυθμιστή στροφών για ατμοηλεκτρικές μονάδες.

Η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου παράστασης του εξεταζόμενου στροβίλου βασίζεται στην παράσταση της ροής μίας ποσότητας ατμού σε ένα χώρο πεπερασμένων διαστάσεων και η οποία περιγράφεται αναλυτικά στα βιβλία [Kun94,MBB97].

Στο Σχ. 2.18 φαίνονται το σχηματικό διάγραμμα και το διάγραμμα βαθμίδων του εξεταζόμενου ατμοστροβίλου.



(β) Διάγραμμα βαθμίδων **Σχ. 2.18:** Μοντέλο ατμοστροβίλου τριών βαθμίδων

Η απόκριση της ροής ατμού σε μία μεταβολή του ανοίγματος της δικλείδας ελέγχου του ρυθμιστή στροφών παρουσιάζει μία χρονική καθυστέρηση  $T_{CH}$  λόγω των διαστάσεων των σωληνώσεων [MBB97]. Η καθυστέρηση αυτή είναι της τάξεως των 0.2 έως 0.3 δευτερολέπτων.

Η ενδιάμεση δικλείδα χρησιμοποιείται συνήθως όταν απαιτείται γρήγορος έλεγχος της μηχανικής ισχύος εξόδου του στροβίλου, όπως π.χ. σε μία υπερεπιτάχυνση της σύγχρονης γεννήτριας. Η ενεργοποίηση της δικλείδας αυτής αποκόπτει τις βαθμίδες μέσης και χαμηλής πίεσης, οι οποίες συνεισφέρουν περίπου το 70% της συνολικής μηχανικής ισχύος. Σημειώνεται ότι η ροή του ατμού στις βαθμίδες μέσης και χαμηλής πίεσης μεταβάλλεται μόνο με την μεταβολή της πίεσης στην ποσότητα του ατμού που διοχετεύεται στη βαθμίδα αναθέρμανσης. Η βαθμίδα αναθέρμανσης εισάγει μία χρονική καθυστέρηση  $T_{RH}$  στη συνολική απόκριση του στροβίλου, η οποία κυμαίνεται μεταξύ των 5 και 10 δευτερολέπτων.

Στη συνέχεια, ο ατμός εισέρχεται στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης μέσω μίας σταυροειδούς σωληνώσεως, η οποία επιφέρει μία πρόσθετη χρονική καθυστέρηση  $T_{CO}$  στο σύστημα, η τιμή της οποίας βρίσκεται κοντά στα 0.5 δευτερόλεπτα.

Από τις τάξεις μεγεθών των παραπάνω σταθερών χρόνου, συμπεραίνουμε ότι η μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση στην απόκριση του στροβίλου σχετίζεται με τη βαθμίδα αναθέρμανσης. Επομένως, από τη μία πλευρά η ύπαρξη βαθμίδας αναθέρμανσης αυξάνει τη συνολική απόδοση του ατμοστροβίλου, από την άλλη όμως καθυστερεί σημαντικά τη μεταβατική απόκρισή του.

Από το διάγραμμα βαθμίδων του εξεταζόμενου ατμοστροβίλου, παρατηρούμε ότι κάθε βαθμίδα παριστάνεται με ένα κέρδος  $f_{HP}$  (για τη βαθμίδα υψηλής πίεσης),  $f_{MP}$  (για τη βαθμίδα μέσης πίεσης) και  $f_{LP}$  (για τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης), που αντιστοιχεί στο ποσοστό συμμετοχής της στη συνολική ισχύ εξόδου του στροβίλου. Η σχέση που διέπει τις τρεις αυτές σταθερές εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$f_{HP} + f_{MP} + f_{LP} = 1 \tag{2.157}$$

ενώ όσον αφορά τις τυπικές τους τιμές ισχύουν, όπως προαναφέρθηκε,  $f_{HP} \approx 0.3$ ,  $f_{MP} \approx 0.4$  και  $f_{LP} \approx 0.3$ .

Η ροή ατμού  $w_s$ , η οποία προέρχεται από τον ατμοπαραγωγό, αποτελεί την είσοδο του ατμοστροβίλου, ενώ έξοδος θεωρείται η μηχανική ροπή στον άξονα  $T_m$ , η οποία ανάγεται στη βάση ισχύος  $S_b$  του συστήματος.

Στο χώρο κατάστασης ο εξεταζόμενος ατμοστρόβιλος παρουσιάζει τις εξής τρεις μεταβλητές κατάστασης:

- Τη ροή ατμού *w*<sub>CH</sub> στις σωληνώσεις εισόδου.
- Τη ροή ατμού *w<sub>RH</sub>* στη έξοδο της βαθμίδας αναθέρμανσης.
- Τη ροή ατμού *w*<sub>CO</sub> στη σταυροειδή σωλήνωση που συνδέει τις βαθμίδες μέσης και χαμηλής πίεσης.

Το θεωρούμενο μοντέλο περιγράφεται από το ακόλουθο σύνολο διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων:

$$\dot{w}_{CH} = -\frac{1}{T_{CH}} w_{CH} + \frac{1}{T_{CH}} w_S$$
(2.158)

$$\dot{w}_{RH} = -\frac{1}{T_{RH}} w_{RH} + \frac{1}{T_{RH}} w_{CH}$$
(2.159)

$$\dot{w}_{CO} = -\frac{1}{T_{CO}} w_{CO} + \frac{1}{T_{CO}} w_{RH}$$
(2.160)

$$T_{m} = \frac{P_{nom}}{S_{b}} \left( f_{HP} w_{CH} + f_{IP} w_{RH} + f_{LP} w_{CO} \right)$$
(2.161)

όπου  $P_{nom}$  είναι η ονομαστική ισχύς του στροβίλου σε MW,  $S_b$  είναι η βασική ισχύς του συστήματος σε MVA.

# 2.6.3 Μοντέλο ρυθμιστή στροφών

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται το μοντέλο ενός μηχανικού-υδραυλικού ρυθμιστή στροφών, το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μηχανικής ισχύος εξόδου ενός ατμοστροβίλου. Η αρχή λειτουργίας ενός τέτοιου ρυθμιστή στροφών είναι η ίδια με την αντίστοιχη του γνωστού ρυθμιστή Watt [PV91]. Συγκεκριμένα, η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής μετατρέπεται με τη βοήθεια των κλασσικών περιστρεφόμενων σφαιρών (ή με άλλη μέθοδο) σε μηχανική μετατόπιση, η οποία μέσω ενός συστήματος μοχλών και ενός ή περισσότερων σταδίων ενίσχυσης (υδραυλικής ή άλλης) καταλήγει στο άνοιγμα ή κλείσιμο της δικλείδας ατμού του ατμοστροβίλου.

Στο Σχ. 2.19 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του μηχανικού-υδραυλικού ρυθμιστή στροφών, ο οποίος χρησιμοποιείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας [MBB97].



(β) Διάγραμμα βαθμίδων Σχ. 2.19: Μηγανικός-υδραυλικός ρυθμιστής στροφών ατμοστροβίλου

Τα βασικά στοιχεία της παραπάνω διάταξης είναι ο ρυθμιστής, ο υδραυλικός σερβομηχανισμός δικλείδας και η ελεγχόμενη δικλείδα. Όπως έχει προαναφερθεί, εκτός της κύριας δικλείδας εισαγωγής του ατμοστροβίλου, ο ρυθμιστής στροφών έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζει και το άνοιγμα των ενδιάμεσων δικλείδων ελέγχου. Εντούτοις, στη συνέχεια της ανάλυσης θεωρείται ότι ο ρυθμιστής στροφών καθορίζει το άνοιγμα μόνο της κύριας δικλείδας εισαγωγής του ατμού, ενώ ο έλεγχος της ενδιάμεσης δικλείδας (δηλαδή της μεταβλητής  $z_{IV}$ ) πραγματοποιείται χειροκίνητα.

Στο Σχ. 2.19-(β) εικονίζεται το διάγραμμα βαθμίδων του θεωρούμενου μοντέλου ρυθμιστή στροφών. Ο ρυθμιστής παριστάνεται με ένα κέρδος 1/R, όπου R είναι ο μόνιμος στατισμός της ατμοηλεκτρικής μονάδας σε ποσοστό % ανηγμένο στη βάση ισχύος του στροβίλου και με μία συνάρτηση μεταφοράς πρώτου βαθμού με μοναδιαίο κέρδος και χρονική σταθερά  $T_{SR}$ . Ακολούθως, υπάρχει ένας αθροιστής στον οποίο αθροίζονται το σήμα εξόδου του ηλεκτρονόμου και μία ισχύ αναφοράς  $P_0$ . Η ισχύς αυτή είναι η αρχική φόρτιση του στροβίλου στο ανά μονάδα σύστημα του στροβίλου. Ο υδραυλικός σερβομηχανισμός, ο οποίος μεταβάλλει το άνοιγμα της ελεγχόμενης δικλείδας, παριστάνεται με έναν ολοκληρωτή με ευθεία ανατροφοδότηση του ανοίγματος της δικλείδας και δύο περιοριστές. Ο σερβομηχανισμός αυτός εισάγει στην απόκριση του ρυθμιστή στροφών μία χρονική καθυστέρηση  $T_{SM}$ , η τιμή της οποίας είναι της τάξεως του δευτερολέπτου.

Όσον αφορά τους περιοριστές, ο πρώτος έχει ρόλο να αποφεύγονται οι απότομες μεταβολές του ανοίγματος της δικλείδας του ατμού. Ο δεύτερος περιοριστής περιορίζει το άνοιγμα της δικλείδας αυτής μεταξύ του πλήρους ανοίγματος ( $g_{max}$ =1.0) και του πλήρους κλεισίματος ( $g_{min}$ =0.0), ή εντός άλλων προκαθορισμένων ορίων ανάλογα με τη δυνατότητα φόρτισης του στροβίλου.

Στο χώρο κατάστασης το θεωρούμενο μοντέλο ρυθμιστή στροφών ατμοστροβίλου παρουσιάζει δύο μεταβλητές κατάστασης, τη μεταβλητή  $x_{sr}^{su}$  η οποία σχετίζεται με τον ρυθμιστή και το άνοιγμα g της κύριας δικλείδας ελέγχου του ατμού, το οποίο είναι ταυτόχρονα και έξοδος της διάταξης. Είσοδοι της διάταξης θεωρούνται το σφάλμα της ταχύτητας  $\omega_r - \omega_r^{ref}$  του στροβίλου (σε ηλεκτρικά rad/s) και η φόρτιση αναφοράς  $P_0$ .

Αμελώντας τους δύο περιοριστές, ο ρυθμιστής στροφών περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\dot{x}_{SR}^{SU} = -\frac{1}{T_{SR}} x_{SR}^{SU} + \frac{1}{T_{SR}} \frac{1}{R} \frac{\omega_r - \omega_r^{ref}}{\omega_b}$$
(2.162)

$$\dot{g} = -\frac{1}{T_{SM}}g - \frac{1}{T_{SM}}x_{SR}^{SU} + \frac{1}{T_{SM}}P_0$$
(2.163)

#### 2.6.4 Ντηζελοηλεκτρικοί σταθμοί

Σε αυτόνομα δίκτυα (π.χ. νησιωτικά ΣΗΕ), οι ντηζελογεννήτριες χρησιμοποιούνται ευρέως για την υποστήριξη της τοπικής συμβατικής παραγωγής. Επειδή οι ντηζελομηχανές χαρακτηρίζονται από γρήγορη απόκριση ισχύος, θεωρείται ότι η μοναδική σημαντική χρονική καθυστέρηση στη μεταβατική τους απόκριση εισάγεται λόγω του ρυθμιστή στροφών.

Στο Σχ. 2.20 εικονίζεται το διάγραμμα βαθμίδων του μοντέλου ντηζελομηχανής [Pap97], το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.



Σχ. 2.20: Διάγραμμα βαθμίδων ντηζελοηλεκτρικού σταθμού

Στο παραπάνω σχήμα διακρίνεται ο στατισμός R της μονάδας σε ποσοστό % ανηγμένο στη βάση ισχύος ( $P_{nom}$ ) του στροβίλου και η χρονική καθυστέρηση T του ρυθμιστή στροφών. Σημειώνεται ότι τόσο η ισχύς αναφοράς  $P_0$  στην είσοδο του στροβίλου όσο και η μηχανική ισχύς εξόδου  $P_m$  αναφέρονται σε ανά μονάδα τιμές ανηγμένες στη βάση ισχύος του στροβίλου. Η μεταβατική απόκριση της ισχύος εξόδου του ντηζελοηλεκτρικού σταθμού περιγράφεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$\dot{P}_m = \frac{R}{T} \left[ -P_m - \frac{1}{R} \frac{\omega_r - \omega_r^{ref}}{\omega_b} + P_0 \right]$$
(2.164)

Η μηχανική ροπή σε ανά μονάδα τιμή ανηγμένη στη βάση ισχύος του συστήματος δίνεται από τη σχέση:

$$T_m = P_m \frac{P_{nom}}{S_b} \frac{\omega_b}{\omega_r}$$
(2.165)

#### 2.7 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί

#### 2.7.1 Γενική περιγραφή υδροηλεκτρικών σταθμών

Η εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του νερού από τον άνθρωπο για παραγωγή ωφέλιμου έργου χρονολογείται από αρχαιοτάτων χρόνων. Οι υδροστρόβιλοι μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια του νερού που πέφτει από μία υψηλότερη σε μία χαμηλότερη δεξαμενή σε ωφέλιμη κινητική ενέργεια, η οποία αποδίδει μηχανική ροπή για την περιστροφή του δρομέα μίας σύγχρονης γεννήτριας.

Οι υδροστρόβιλοι διαχωρίζονται σε δύο βασικούς τύπους [PV91], τους υδροστρόβιλους δράσεως και αντιδράσεως. Οι υδροστρόβιλοι δράσεως είναι γνωστοί ως τύπου Pelton και οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως ως τύπου Francis. Στους τελευταίους υπάγονται και οι υδροστρόβιλοι προώσεως ή τύπου Kaplan.

Η συμπεριφορά ενός υδροστροβίλου καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της υδάτινης στήλης, με την οποία τροφοδοτείται. Στα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνονται η αδράνεια

και η συμπιεστότητα του νερού, καθώς επίσης και η ελαστικότητα των τοιχωμάτων στον αγωγό τροφοδοσίας του υδροστροβίλου.

Η αδράνεια της υδάτινης στήλης δημιουργεί το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος (ή φαινόμενο του κριού), σύμφωνα με το οποίο η μεταβατική απόκριση του υδροστροβίλου σε μία απότομη μεταβολή του ανοίγματος των ρυθμιστικών υδατοθυρίδων είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση από την επιθυμητή. Με άλλα λόγια, αν οι υδατοθυρίδες κλείσουν απότομα με σκοπό να μειωθεί η ισχύς εξόδου του στροβίλου, η ισχύς αυτή αρχικά θα αυξηθεί και στη συνέχεια θα αρχίσει να μειώνεται. Αντίθετα, αν ανοίξουν απότομα οι υδατοθυρίδες, η ισχύς του στροβίλου θα μειωθεί πριν αρχίσει να αυξάνει.

Για να περιοριστεί το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος, το οποίο είναι ανεπιθύμητο για την κανονική λειτουργία του συστήματος, οι μηχανισμοί που κινούν τις υδατοθυρίδες περιορίζονται στην κίνησή τους, ώστε να πραγματοποιούν μόνο βαθμιαίες και όχι απότομες μεταβολές. Επίσης, οι ρυθμιστές στροφών των υδροηλεκτρικών μονάδων σχεδιάζονται με μία πρόσθετη βαθμίδα μεταβατικού στατισμού, ο ρόλος της οποίας θα περιγραφεί αναλυτικά στην ενότητα 3.7.3. Επιπλέον, σε μερικές περιπτώσεις κατασκευάζεται κοντά στον υδροστρόβιλο ένας πύργος ηρεμήσεως ή αναπάλσεως [PV91,VP95]. Η κατασκευή του πύργου αναπάλσεως βοηθάει στην απορρόφηση των υπερπιέσεων και των υποπιέσεων που προκαλούνται από τις απότομες μετακινήσεις των υδατοθυρίδων, με αποτέλεσμα την εξασθένηση του υδραυλικού πλήγματος.

Εάν η υδάτινη στήλη στον αγωγό προσαγωγής θεωρηθεί σαν μέσο μετάδοσης κυμάτων πιέσεως (συμπιεστότητα υδάτινης στήλης) και όχι σαν στερεό, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα κυματικά φαινόμενα που δημιουργούνται στον αγωγό προσαγωγής. Η φύση των φαινομένων αυτών εξηγείται αναλυτικά στις αναφορές [PV91,VZ93]. Στην παρούσα διατριβή, γίνεται η παραδοχή της «στερεάς» υδάτινης στήλης, οπότε τα προαναφερόμενα κυματικά φαινόμενα αμελούνται.

Στη συνέχεια, περιγράφεται αρχικά το μοντέλο του υδροστροβίλου, το οποίο υιοθετείται στην παρούσα διατριβή. Ιδιαίτερο βάρος δίνεται στις παραδοχές βάσει των οποίων εξάγεται το εξεταζόμενο μοντέλο. Ακολούθως, αναλύεται η σχεδίαση ενός ρυθμιστή στροφών για υδροηλεκτρική μονάδα και εξηγείται αναλυτικά το διάγραμμα βαθμίδων του.

# 2.7.2 Περιγραφή μοντέλου υδροστροβίλου

Στο Σχ. 2.21 φαίνεται η διάταξη μίας τυπικής υδροηλεκτρικής μονάδας παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας χωρίς πύργο αναπάλσεως.



Σχ. 2.21: Διάγραμμα υδροηλεκτρικής μονάδας

Η εικονιζόμενη εγκατάσταση αποτελείται από:

- Μία δεξαμενή νερού της οποίας η χωρητικότητα θεωρείται άπειρη (πρακτικά είναι πολύ μεγάλη).
   Το καθαρό υδραυλικό ύψος της δεξαμενής συμβολίζεται με H<sub>R</sub> και μετράται σε m.
- Έναν αγωγό προσαγωγής μέσου μήκους L και μέσης διατομής A, μέσω του οποίου το νερό ρέει από τη δεξαμενή προς τον υδροστρόβιλο.

- Ρυθμιστικές υδατοθυρίδες το άνοιγμα των οποίων καθορίζει την διατομή ροής προς το στρόβιλο και επομένως και τη μηχανική ισχύ εξόδου του.
- Έναν υδροστρόβιλο ο οποίος μετατρέπει τη δυναμική ενέργεια του νερού σε κινητική, η οποία στη συνέχεια κινεί τη γεννήτρια του σταθμού.

Για την εξαγωγή του μοντέλου του υδροστροβίλου, λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθες παραδοχές [Kun94]:

- 1. Οι σωλήνες του αγωγού προσαγωγής είναι ανελαστικές και το νερό είναι εντελώς ασυμπίεστο.
- Η μηχανική ισχύς εξόδου του στροβίλου είναι ανάλογη του γινομένου του καθαρού υδραυλικού ύψους H<sub>T</sub> (σε m) επί την παροχή νερού προς το στρόβιλο Q (σε m<sup>3</sup>/s) (παραδοχή σταθερού βαθμού απόδοσης).
- 3. Οι υδραυλικές απώλειες της υδάτινης στήλης θεωρούνται ανάλογες του τετραγώνου της παροχής νερού *Q* προς το στρόβιλο, με ένα συντελεστή αναλογίας *F*.
- 4. Το καθαρό υδραυλικό ύψος *H*<sub>R</sub> της δεξαμενής νερού παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια των υδραυλικών μεταβατικών φαινομένων.
- 5. Η ταχύτητα του νερού είναι ανάλογη με το άνοιγμα των υδατοθυρίδων και με την τετραγωνική ρίζα του καθαρού μετώπου στο στρόβιλο.

Σύμφωνα με την παραδοχή (2), η μηχανική ισχύς  $P_M$  (σε W) η οποία παράγεται από τον υδροστρόβιλο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_M = n\gamma Q H_T \tag{2.166}$$

όπου n είναι η απόδοση του στροβίλου και γ το ειδικό βάρος του νερού σε Nt/m<sup>3</sup>.

Σύμφωνα με την παραδοχή της ασυμπίεστης υδάτινης στήλης, η εξίσωση επιταχύνσεως της στήλης στον αγωγό προσαγωγής περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\dot{Q} = \frac{1}{R_v} (H_R - H_T - FQ^2), \quad Q \ge 0$$
(2.167)

όπου με  $R_v$  συμβολίζεται η υδραυλική αντίσταση του αγωγού προσαγωγής, η οποία δίνεται από:

$$R_v = \frac{L}{g_r A} \tag{2.168}$$

στην οποία  $g_r$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/s<sup>2</sup>. Σημειώνεται ότι εάν η υδροηλεκτρική εγκατάσταση αποτελείται από δύο ή περισσότερους διαφορετικούς αγωγούς προσαγωγής εν σειρά, τότε η συνολική υδραυλική αντίσταση ισούται με το άθροισμα των επιμέρους υδραυλικών αντιστάσεων για κάθε ένα αγωγό.

Σύμφωνα με την παραδοχή (3), ο όρος  $FQ^2$  αντιπροσωπεύει τις υδραυλικές απώλειες της υδάτινης στήλης, όπου F είναι ο συντελεστής τριβής. Ο συντελεστής F είναι δυνατόν να υπολογιστεί - εάν δεν είναι δεδομένος - από το ονομαστικό σημείο λειτουργίας, στο οποίο θεωρούνται δεδομένα:

- Η ισχύς εξόδου ( $P_{Mnom}$ ) και η απόδοση ( $n_{nom}$ ) του υδροστροβίλου.
- Η παροχή νερού προς το στρόβιλο ( $Q_{nom}$ ).
- Το άνοιγμα της υδατοθυρίδας ( $G_{nom}$ ), το οποίο είναι ίσο με τη μονάδα.

Καταρχήν, προσδιορίζεται η ονομαστική τιμή του καθαρού υδραυλικού ύψους  $H_{Tnom}$  με τη βοήθεια της σχέσης (2.166), δηλαδή:

$$H_{T_{nom}} = \frac{P_{M_{nom}}}{n_{nom}\gamma Q_{nom}}$$
(2.169)

Επειδή το σημείο κανονικής λειτουργίας είναι σημείο μονίμου καταστάσεως, ο διαφορικός όρος της (2.167) μηδενίζεται, με αποτέλεσμα τη μετατροπή της σε αλγεβρική:

$$H_{R} - H_{Tnom} - FQ_{nom}^{2} = 0 (2.170)$$

Από την επίλυση της Εξ. (2.170) ως προς Γ προκύπτει τελικά:

$$F = \frac{H_R - H_{Tnom}}{Q_{nom}^2} \tag{2.171}$$

Το πρόσημο του όρου των υδραυλικών απωλειών  $(FQ^2)$  στην (2.167) αντιστοιχεί σε κανονική λειτουργία, κατά την οποία η παροχή Q είναι θετική. Εντούτοις, κατά τη διάρκεια μεγάλων διαταραχών, όπως για παράδειγμα ένα ξαφνικό κλείσιμο της υδατοθυρίδας, η φορά της παροχής είναι πιθανόν να αλλάξει. Σε μία τέτοια περίπτωση, το πρόσημο του όρου των υδραυλικών απωλειών θα πρέπει να αλλάξει και επομένως η εξίσωση επιταχύνσεως της υδάτινης στήλης παίρνει την εξής μορφή:

$$\dot{Q} = \frac{1}{R_{\nu}} \left( H_R - H_T + F Q^2 \right), \quad Q < 0$$
(2.172)

Συμπερασματικά, η εξίσωση επιτάχυνσης της υδάτινης στήλης στον αγωγό προσαγωγής συνοψίζεται στην εξής μορφή:

$$\dot{Q} = \begin{cases} \frac{1}{R_{v}} (H_{R} - H_{T} - FQ^{2}), & Q \ge 0\\ \frac{1}{R_{v}} (H_{R} - H_{T} + FQ^{2}), & Q < 0 \end{cases}$$
(2.173)

Η παροχή του νερού στο στρόβιλο είναι ανάλογη του ανοίγματος της υδατοθυρίδας G και της τετραγωνικής ρίζας του καθαρού υδραυλικού ύψους  $H_T$ , δηλαδή:

$$Q = \kappa G \sqrt{2g_r H_T} \tag{2.174}$$

όπου κ είναι μία σταθερά αναλογίας.

Τέλος, η μηχανική ροπή σε ανά μονάδα τιμή ανηγμένη στη βάση ισχύος του συστήματος δίνεται από τη σχέση:

$$T_m = \frac{P_M}{S_b} \frac{\omega_b}{\omega_r}$$
(2.175)

### 2.7.3 Περιγραφή ρυθμιστή στροφών υδροστροβίλου

Η ιδιόμορφη απόκριση του υδροστροβίλου σε απότομες μεταβολές του ανοίγματος της υδατοθυρίδας (φαινόμενο υδραυλικού πλήγματος) επιβάλλει κατάλληλη αντιστάθμιση κατά τη σχεδίαση των αντίστοιχων ρυθμιστών στροφών. Η αντιστάθμιση αυτή πραγματοποιείται με τη βαθμίδα του μεταβατικού στατισμού. Συγκεκριμένα, σε μία απότομη μεταβολή του ανοίγματος της υδατοθυρίδας ο μεταβατικός στατισμός  $\delta_{tr}$ , ο οποίος είναι αρκετά μεγαλύτερος από το μόνιμο στατισμό σ, κυριαρχεί και μειώνει σημαντικά το συνολικό κέρδος του ρυθμιστή στροφών περιορίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την κίνηση της υδατοθυρίδας και το συνακόλουθο υδραυλικό πλήγμα.

Στο Σχ. 2.22 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων ενός τυπικού μηχανικού-υδραυλικού ρυθμιστή στροφών υδροστροβίλου [MBB97].



Σχ. 2.22: Διάγραμμα βαθμίδων μηχανικού-υδραυλικού ρυθμιστή στροφών υδροστροβίλου

Ο εξεταζόμενος ρυθμιστής στροφών έχει σαν εισόδους το σφάλμα  $\omega_r - \omega_r^{ref}$  της ταχύτητας του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας (σε ηλεκτρικά rad/s) και το αρχικό άνοιγμα  $G_0$  της υδατοθυρίδας. Έξοδός του είναι το άνοιγμα G της υδατοθυρίδας.

Στη βαθμίδα του μεταβατικού στατισμού διακρίνεται εκτός του κέρδους  $\delta_{tr}$  και η χρονική σταθερά  $T_R$ , η οποία αποτελεί τη χρονική σταθερά επαναφοράς της βαθμίδας αυτής.

Ο κύριος σερβομηχανισμός παριστάνεται από έναν ολοκληρωτή με σταθερά χρόνου  $T_g$  και δύο περιοριστές. Η σταθερά χρόνου  $T_g$  αντιπροσωπεύει την καθυστέρηση στη μεταβολή του ανοίγματος της υδατοθυρίδας από τη στιγμή που δοθεί η αντίστοιχη εντολή. Ο δεξιός περιοριστής επιτρέπει στο άνοιγμα της υδατοθυρίδας να κυμαίνεται από το πλήρες κλείσιμο ( $G_{\min}=0.0$ ) μέχρι το πλήρες άνοιγμα ( $G_{\max}=1.0$ ). Ο δεύτερος περιοριστής θέτει άνω ( $\dot{G}_{\max}$ ) και κάτω όριο ( $\dot{G}_{\min}$ ) στο ρυθμό με τον οποίο μπορεί να μεταβληθεί το άνοιγμα της υδατοθυρίδας. Ο τελευταίος περιοριστής έχει δύο ρόλους: κατά πρώτον περιορίζει το υδραυλικό πλήγμα και κατά δεύτερον αποτρέπει την ανάπτυξη υπερπιέσεων σε μεταβατικές καταστάσεις (όπως π.χ. ένα απότομο κλείσιμο ή άνοιγμα της υδατοθυρίδας).

Η σχεδίαση του ρυθμιστή στροφών υδροστροβίλου αποσκοπεί στον υπολογισμό βέλτιστων - σύμφωνα με κάποιο κριτήριο - τιμών του μεταβατικού στατισμού  $\delta_{tr}$  και της χρονικής σταθεράς επαναφοράς του  $T_R$ . Από πλευράς ευστάθειας συχνότητας και ευστάθειας μικρών διαταραχών, με το θέμα αυτό έχουν ασχοληθεί κατά καιρούς οι δημοσιεύσεις [VD93,VP95].

Στο μοντέλο του ρυθμιστή στροφών υδροστροβίλου του Σχ. 2.22 διακρίνονται δύο μεταβλητές κατάστασης, το άνοιγμα των υδατοθυρίδων (G), καθώς επίσης και η μεταβλητή  $x_{tr}^{HU}$  η οποία σχετίζεται με τη βαθμίδα του μεταβατικού στατισμού. Αμελώντας τους δύο περιοριστές του Σχ. 2.22, το εξεταζόμενο μοντέλο περιγράφεται στο χώρο κατάστασης από τις δύο ακόλουθες εξισώσεις:

$$\dot{x}_{ur}^{HU} = -\frac{1}{T_R} x_{ur}^{HU} + \frac{\delta_{ur}}{T_R} G$$
(2.176)

$$\dot{G} = \frac{\sigma}{T_g} G_0 - \frac{1}{T_g} \frac{\omega_r - \omega_r^{ref}}{\omega_b} + \frac{1}{T_g} x_{tr}^{HU} - \frac{\sigma + \delta_{tr}}{T_g} G$$
(2.177)

### 2.8 Μοντέλα φορτίου

### 2.8.1 Στατικά φορτία

#### Εκθετικά φορτία

Μια συνηθισμένη χαρακτηριστική στατικού φορτίου είναι αυτή του εκθετικού φορτίου, η οποία στη γενική της μορφή ορίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις [VCV98]:

$$P_{L}(V_{L}) = z_{L} P_{L0} \left( \frac{V_{L}}{V_{L0}} \right)^{\alpha_{L}}$$
(2.178)

$$Q_{L}(V_{L}) = z_{L} Q_{L0} \left( \frac{V_{L}}{V_{L0}} \right)^{\beta_{L}}$$
(2.179)

όπου  $z_L$  είναι μία αδιάστατη μεταβλητή ζήτησης και  $V_{L0}$  είναι μία τάση αναφοράς. Οι εκθέτες  $a_L$  και  $\beta_L$  εξαρτώνται από τον τύπο του φορτίου (κινητήρες, θέρμανση, φωτισμός κλπ), ενώ τα  $P_{L0}$  και  $Q_{L0}$  παριστάνουν την καταναλισκόμενη ισχύ στην τάση αναφοράς  $V_{L0}$ .

Τρεις βασικές κατηγορίες εκθετικών φορτίων είναι οι ακόλουθες:

- $\alpha_L = \beta_L = 2$ : Φορτίο σταθερής αγωγιμότητας.
- $\alpha_L = \beta_L = 1$ : Φορτίο σταθερού ρεύματος.
- $\alpha_L = \beta_L = 0$ : Portío staberής iscúrc.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί όταν χρησιμοποιείται το εκθετικό μοντέλο φορτίου σε χαμηλές τιμές της τάσης  $V_L$  και αυτό γιατί όταν η τάση πέσει κάτω από μία οριακή τιμή (π.χ.  $V_L \leq 0.7$ ), πολλά φορτία μπορεί να αποκοπούν από το σύστημα ή οι χαρακτηριστικές τους να αλλάξουν δραστικά.

### Πολυωνυμικά φορτία

Μία εναλλακτική παράσταση στατικού φορτίου βασίζεται στο πολυωνυμικό μοντέλο, όπου το φορτίο παριστάνεται ως μία πολυωνυμική συνάρτηση της τάσης  $V_L$  του ζυγού.

Μία περίπτωση σύνθετου φορτίου είναι ο συνδυασμός εκθετικού φορτίου, φορτίου σταθερής ισχύος και φορτίου σταθερού ρεύματος. Η ενεργός και η άεργος κατανάλωση αυτού του φορτίου δίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις [VCV98]:

$$P_{L}(V_{L}) = z_{L}P_{L0}\left[a_{P}\left(\frac{V_{L}}{V_{L0}}\right)^{\alpha_{L}} + b_{P}\frac{V_{L}}{V_{L0}} + c_{P}\right]$$
(2.180)

$$Q_{L}(V_{L}) = z_{L}Q_{L0} \left[ a_{Q} \left( \frac{V_{L}}{V_{L0}} \right)^{\beta_{L}} + b_{Q} \frac{V_{L}}{V_{L0}} + c_{Q} \right]$$
(2.181)

όπου  $a_P+b_P+c_P=a_Q+b_Q+c_Q=1$ , ενώ  $P_{L0}$  και  $Q_{L0}$  είναι αντίστοιχα το ενεργό και το άεργο φορτίο στην τάση αναφοράς  $V_{L0}$  για ονομαστική ζήτηση φορτίου ( $z_L=1$ ).

Οι τιμές των παραμέτρων των σχέσεων (2.180) και (2.181) συνήθως καθορίζονται από μετρήσεις στους ζυγούς φορτίου.

#### Υπολογισμός έγχυσης στατικών φορτίων στο δίκτυο

Στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy, το διάνυσμα  $\hat{I}_L$  του εγχεόμενου ρεύματος στο δίκτυο λόγω ενός στατικού φορτίου δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\hat{I}_{L} = i_{Lx} + j i_{Ly} = -\left(\frac{P_{L}(V_{L}) + j Q_{L}(V_{L})}{v_{Lx} + j v_{Ly}}\right)^{*}$$
(2.182)

όπου οι τιμές της ενεργού ( $P_L$ ) και αέργου ( $Q_L$ ) ισχύος θεωρούνται θετικές για κατανάλωση ισχύος και αρνητικές για παραγωγή. Εκτελώντας τις πράξεις στην παραπάνω εξίσωση, υπολογίζονται οι δύο προβολές του εγχεόμενου ρεύματος  $\hat{I}_L$  στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος ως εξής:

$$i_{Lx} = -\frac{P_L(V_L)v_{Lx} + Q_L(V_L)v_{Ly}}{v_{Lx}^2 + v_{Ly}^2}$$
(2.183)

$$i_{Ly} = -\frac{P_L(V_L)v_{Ly} - Q_L(V_L)v_{Lx}}{v_{Lx}^2 + v_{Ly}^2}$$
(2.184)

όπου το μέτρο  $V_L$  της τάσης του ζυγού του φορτίου είναι ίσο με:

$$V_L = \sqrt{v_{Lx}^2 + v_{Ly}^2}$$
(2.185)

### 2.8.2 Δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία

Τα δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία αποτελούν μία τυπική κατηγορία φορτίων, τα οποία τείνουν να ανακτήσουν δυναμικά την καταναλισκόμενη ισχύ τους ύστερα από μία μεταβολή της τάσης του δικτύου. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ένα πρώτης τάξεως μοντέλο για την περιγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς αυτού του είδους των φορτίων [VCV98]. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, τα δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία παριστάνονται ως μεταβαλλόμενες αγωγιμότητες G<sub>RL</sub> και B<sub>RL</sub>:

$$T_P \dot{G}_{RL} = P_{L0} \left( \frac{V_L}{V_{L0}} \right)^{a_L} - G_{RL} V_L^2$$
(2.186)

$$T_{Q}\dot{B}_{RL} = Q_{L0} \left(\frac{V_{L}}{V_{L0}}\right)^{\beta_{L}} - B_{RL}V_{L}^{2}$$
(2.187)

όπου:

- α<sub>L</sub> και β<sub>L</sub> είναι οι εκθέτες οι οποίοι ορίζουν τις χαρακτηριστικές μονίμου καταστάσεως του ενεργού και του αέργου φορτίου αντίστοιχα.
- $T_P$  και  $T_Q$  είναι οι χρονικές σταθερές επαναφοράς της ενεργού και της αέργου συνιστώσας του φορτίου αντίστοιχα, οι οποίες κυμαίνονται από μερικές δεκάδες δευτερολέπτων έως λίγα λεπτά.

Τα θερμοστατικά φορτία (συσκευές θέρμανσης και ψύξης διαφόρων τύπων) [Kun94,VCV98] αποτελούν μία τυπική κατηγορία δυναμικών αυτορυθμιζόμενων φορτίων.

### 2.9 Μετασχηματιστές

#### 2.9.1 Γενικά για μετασχηματιστές και συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο

Ο κύριος λόγος ύπαρξης ενός μετασχηματιστή ισχύος είναι ο μετασχηματισμός της τάσεως μεταξύ των υποσυστημάτων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής. Ωστόσο, πολλοί μετασχηματιστές και αυτομετασχηματιστές είναι εφοδιασμένοι με σύστημα πολλαπλών λήψεων για την αλλαγή της σχέσης μετασχηματισμού, γεγονός το οποίο παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου της τάσης του δευτερεύοντος, με το οποίο συνδέονται οι καταναλωτές μέσω των υποσταθμών διανομής. Στο Σχ. 2.23 φαίνεται το τυπικό μονογραμμικό διάγραμμα ενός ακτινικού συστήματος διανομής. Βασική απαίτηση της κατανάλωσης είναι η διατήρηση της τάσης κοντά στην ονομαστική της τιμή.



Σχ. 2.23: Μονογραμμικό διάγραμμα τυπικού μετασχηματιστή διανομής

Στους μικρούς μετασχηματιστές διανομής, η αλλαγή της λήψης πρέπει να γίνεται πάντα με το μετασχηματιστή εκτός τάσης. Στους μεγαλύτερους μετασχηματιστές ΥΤ/ΜΤ του δικτύου, ο έλεγχος της τάσης πραγματοποιείται με τα λεγόμενα Συστήματα Αλλαγής Τάσεως υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η διατήρηση σχεδόν σταθερής τάσης στους μετασχηματιστές των υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ του δικτύου. Για παράδειγμα, μία πτώση της τάσης στο δευτερεύον ενός μετασχηματιστή, ο οποίος είναι εφοδιασμένος με ΣΑΤΥΦ, μπορεί να αντισταθμιστεί με αντίστοιχη μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού.

Η περιοχή μεταβολής της τάσεως στους μικρούς μετασχηματιστές διανομής είναι συνήθως  $\pm 5\%$ , ενώ στους μεγαλύτερους, οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με ΣΑΤΥΦ, είναι της τάξης του  $\pm 10\%$ , φτάνοντας σε ορισμένες περιπτώσεις μέχρι και  $\pm 15\%$  της ονομαστικής τάσης.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η μεταβλητή λήψη βρίσκεται στην πλευρά ΥΤ. Αυτό συμβαίνει για τους εξής κυρίως λόγους:

- 1. Το ρεύμα στην πλευρά ΥΤ είναι μικρότερο, με αποτέλεσμα η μεταγωγή να γίνεται ευκολότερα και με μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης ηλεκτρικού σπινθήρα.
- Συνήθως στην πλευρά ΥΤ υπάρχουν περισσότερες σπείρες και άρα η ρύθμιση τάσης πραγματοποιείται με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Ωστόσο, σε μερικές περιπτώσεις αυτομετασχηματιστών η μεταβλητή λήψη βρίσκεται προς την πλευρά της χαμηλότερης τάσης.

Το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί με ηλεκτροκινητήρες, ο χειρισμός των οποίων γίνεται εξ αποστάσεως και πολλές φορές αυτόματα. Στην τελευταία περίπτωση, το σύστημα παίρνει εντολές από έναν κατάλληλο ηλεκτρονόμο τάσης, οπότε ο έλεγχος της τάσης του δευτερεύοντος γίνεται με κλειστό βρόχο. Ο ηλεκτρονόμος τάσης συγκρίνει την τάση εξόδου του μετασχηματιστή με μία καθορισμένη τάση αναφοράς και, αν διαπιστώσει διαφορά, δίνει εντολή ανύψωσης ή μείωσης του λόγου μετασχηματισμού στο σύστημα αλλαγής.

# 2.9.2 Παράσταση μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές παριστάνονται με ισοδύναμα κυκλώματα των οποίων οι παράμετροι εξαρτώνται από τη λειτουργία την οποία επιτελούν. Οι μετασχηματιστές με ονομαστική λήψη μπορούν να παρασταθούν από ισοδύναμα-π κυκλώματα, όμοια με αυτά των γραμμών μεταφοράς.

Το μοντέλο του μετασχηματιστή μη ονομαστικής λήψης [Kun94], το οποίο υιοθετείται στην παρούσα διατριβή, φαίνεται στο Σχ. 2.24, όπου  $Y_L$  είναι η αγωγιμότητα σειράς του μετασχηματιστή,  $Y_S$  η εγκάρσια αγωγιμότητα και 1:r είναι ο λόγος μετασχηματισμού του ιδανικού μετασχηματιστή.



Σχ. 2.24: Παράσταση μετασχηματιστή μη ονομαστικής λήψης

Οι εξισώσεις κόμβων του μετασχηματιστή του Σχ. 2.24 γράφονται στην ακόλουθη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_{ij} \\ \hat{I}_{ji} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_L + Y_S/2 & -Y_L/r \\ -Y_L/r & (Y_L + Y_S/2)/r^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_i \\ \hat{V}_j \end{bmatrix}$$
(2.188)

Από την (2.188) προκύπτει το ισοδύναμο-π του Σχ. 2.25 για την παράσταση μετασχηματιστών μη ονομαστικής λήψης. Ο ζυγός i από τη μεριά του οποίου βρίσκεται η αγωγιμότητα σειράς  $Y_L$  του μετασχηματιστή ονομάζεται ζυγός αγωγιμότητας, ενώ ο ζυγός j από τη μεριά του οποίου βρίσκεται η μεταβλητή λήψη του ιδανικού μετασχηματιστή καλείται ζυγός μεταβλητής λήψης.



Σχ. 2.25: Ισοδύναμο-π κύκλωμα μετασχηματιστή μη ονομαστικής λήψης

# 2.9.3 Μηχανισμός συστήματος αλλαγής τάσης υπό φορτίο

Οι μετασχηματιστές οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με μηχανισμό ΣΑΤΥΦ αποτελούν ένα σημαντικό μέσο ρύθμισης των τάσεων ενός συστήματος σε όλες τις βαθμίδες. Η αλλαγή της λήψης μπορεί να γίνει είτε αυτόματα ή χειροκίνητα. Κάθε δίκτυο που συνδέει συστήματα μεταφοράς διαφορετικών βαθμίδων, διαθέτει έναν αρκετά μεγάλο αριθμό τέτοιων μετασχηματιστών, ώστε να υπάρχει δυνατότητα ικανοποιητικής ρύθμισης της ροής αέργου ισχύος μεταξύ των υποσυστημάτων. Το γεγονός αυτό συμβάλλει με τη σειρά του στη ρύθμιση των επιπέδων τάσης και στην ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού και αέργου ισχύος.

Στην παράγραφο αυτή θα επιχειρήσουμε μία αναλυτική περιγραφή του γενικού μοντέλου του ΣΑΤΥΦ [Kun94], το διάγραμμα βαθμίδων του οποίου φαίνεται στο Σχ. 2.26 και αποτελείται από τις εξής βασικές βαθμίδες:

- 1. Αντιστάθμιση πτώσης τάσης στη γραμμή.
- Ρυθμιστής τάσης αποτελούμενος από ένα στοιχείο ελέγχου τάσης και ένα στοιχείο χρονικής καθυστέρησης.
- 3. Μηχανοκίνητη μονάδα αλλαγής της λήψης.



Σχ. 2.26: Διάγραμμα βαθμίδων ΣΑΤΥΦ

Ο ρόλος της βαθμίδας της αντιστάθμισης πτώσης τάσης είναι η διατήρηση της επιθυμητής τάσης σε ένα απομακρυσμένο σημείο του δικτύου, όπως είναι για παράδειγμα το τέρμα μίας γραμμής διανομής με ρύθμιση της τάσεως στην αρχή της. Λαμβάνεται δηλαδή υπόψη η πτώση τάσης στη γραμμή διανομής που αναχωρεί από το μετασχηματιστή. Όταν διαπιστώνεται αύξηση της πτώσης τάσης κατά μήκος της γραμμής, λόγω αύξησης του φορτίου, γίνεται ανύψωση της τάσης του δευτερεύοντος και αντιστρόφως. Το μέτρο της ρυθμιζόμενης τάσης δίνεται από τη σχέση:

$$\hat{V}_{C} = \left| \hat{V}_{i} + Z_{C} \hat{I}_{i} \right|$$
(2.189)

όπου  $\hat{V}_t$  και  $\hat{I}_t$  είναι τα διανύσματα της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, ενώ  $Z_c$  είναι η σύνθετη αντίσταση της γραμμής.

Το στοιχείο ελέγχου του ρυθμιστή τάσης αποτελείται από μία νεκρή ζώνη ορισμένου εύρους, εντός της οποίας πρέπει να βρίσκεται η ελεγχόμενη τάση. Ο ρυθμιστής λαμβάνει σαν είσοδο την απόκλιση της τάσης από μία τάση αναφοράς:

$$V_{err} = V_{ref} - V_t$$

και έχει σαν έξοδο τη διακριτή μεταβλητή  $V_m$ , η οποία παίρνει τιμές 0, 1 ή –1 σύμφωνα με την ακόλουθη συνάρτηση:

$$V_{m} = \begin{cases} 0, & av - d \leq V_{err} \leq +d \\ 0, & av + d < V_{err} \leq d + \varepsilon \text{ kal } V_{err} \text{ meidvetal} \\ 0, & av - d - \varepsilon \leq V_{err} < -d \text{ kal } V_{err} \text{ av}\xi \text{ dvetal} \\ +1, & av V_{err} > d + \varepsilon \\ +1, & av + d < V_{err} \leq d + \varepsilon \text{ kal } V_{err} \text{ av}\xi \text{ dvetal} \\ -1, & av V_{err} < -d - \varepsilon \\ -1, & av - d - \varepsilon \leq V_{err} < -d \text{ kal } V_{err} \text{ meidvetal} \end{cases}$$
(2.190)

όπου d είναι το εύρος της νεκρής ζώνης του στοιχείου ελέγχου και ε είναι το εύρος ζώνης του στοιχείου υστέρησης. Η μεταβλητή ε αποσκοπεί στην αποφυγή ανεπιθύμητης λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ, όταν η ελεγχόμενη τάση είναι πολύ κοντά στη μέγιστη ή ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή της.

To στοιχείο χρονικής καθυστέρησης εισάγει την απαραίτητη χρονική καθυστέρηση πριν από κάθε αλλαγή λήψης, αποτρέποντας κατ' αυτόν τον τρόπο ανεπιθύμητη ή άσκοπη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ που μπορεί να προκληθεί από μεταβατικές διακυμάνσεις της τάσης. Η χρονική μονάδα μέτρησης προσδιορίζει το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το σφάλμα της τάσης  $V_{err}$  παραμένει εκτός της επιθυμητής ζώνης τιμών. Η λειτουργία της εξεταζόμενης βαθμίδας αρχίζει όταν η απόκλιση της τάσης  $V_{err}$  βρεθεί εκτός της νεκρής ζώνης τιμών και σταματάει όταν α) η  $V_{err}$  επανέλθει εντός της επιθυμητής ζώνης τιμών, ή β) υπάρξει αλλαγή λήψης, ή γ) η  $V_{err}$  ταλαντώνεται διαρκώς πάνω και κάτω από τη νεκρή ζώνη. Όσο διαρκεί η διαδικασία της μέτρησης, η έξοδος του στοιχείου χρονικής καθυστέρησης είναι μηδέν. Μόλις ο μετρούμενος χρόνος T υπερβεί μία τιμή  $T_D$ , η έξοδος του στοιχείου χρονικής καθυστέρησης γίνεται ίση με τη  $V_m$  (1 ή -1), στέλνοντας σήμα στη μονάδα αλλαγής λήψης να μεταβάλλει το λόγο μετασχηματισμού. Η χρονική καθυστέρηση  $T_D$  θεωρείται ίση με  $T_{D0}$  για την πρώτη αλλαγή λήψης. Σε μερικές περιπτώσεις ΣΑΤΥΦ, η χρονική καθυστέρηση  $T_D$  είναι αντιστρόφως ανάλογη του σφάλματος της τάσης, δηλαδή:

$$T_{D} = \frac{T_{D0}}{V_{err}} d$$
(2.191)

Αναφορικά με τη δεύτερη και τις υπόλοιπες αλλαγές λήψης, η καθυστέρηση  $T_D$  είναι ίση με  $T_{D1}$ , ώστε να προστίθεται - αν είναι επιθυμητό - σκόπιμη χρονική καθυστέρηση μεταξύ δύο διαδοχικών αλλαγών λήψης.

Η μονάδα κίνησης και ο μηχανισμός αλλαγής λήψης περιλαμβάνουν μία απλή χρονική καθυστέρηση, η οποία εξαρτάται από τον εξοπλισμό του ΣΑΤΥΦ. Η έξοδος  $V_n$  της βαθμίδας αντιπροσωπεύει μία μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού και παίρνει διακριτές τιμές 0, +1 και –1.

Μία αλλαγή λήψης επιδρά στο μοντέλο του μετασχηματιστή του Σχ. 2.25 σαν μία μεταβολή του ανά μονάδα λόγου μετασχηματισμού. Ο λόγος μετασχηματισμού *r* μετά την *i*-οστή λειτουργία του ΣΑΤΥΦ είναι ίσος με:

$$r_i = r_{i-1} + \Delta r V_n \tag{2.192}$$

όπου  $\Delta r$  το βήμα του λόγου μετασχηματισμού που αντιστοιχεί σε ένα βήμα ρύθμισης.

Η σχέση (2.192) ισχύει στην περίπτωση κατά την οποία ο ρυθμιζόμενος ζυγός βρίσκεται από τη μεριά του ζυγού μεταβλητής λήψης του μετασχηματιστή (ζυγός *j* από Σχ. 2.24). Εάν ο ρυθμιζόμενος ζυγός βρίσκεται από τη μεριά του ζυγού αγωγιμότητας (ζυγός *i* από Σχ. 2.24), η παραπάνω σχέση παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$r_i = r_{i-1} - \Delta r V_n \tag{2.193}$$

Ο λόγος μετασχηματισμού περιορίζεται από μία μέγιστη ( $r_{max}$ ) και μία ελάχιστη ( $r_{min}$ ) επιτρεπόμενη τιμή. Εφόσον τα όρια αυτά ξεπεραστούν, η λειτουργία της αυτόματης ρύθμισης σταματά.

# 2.10 Συσκευές Παράλληλης Αντιστάθμισης Αέργου Ισχύος

### 2.10.1 Αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών

Η εγκατάσταση των αυτόματων μηχανισμών ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών αποσκοπεί στην τοπική υποστήριξη του δικτύου με άεργο ισχύ. Οι μηχανισμοί αυτοί συναντώνται ευρέως στους τερματικούς ζυγούς μηχανών επαγωγής, είτε οι τελευταίες χρησιμοποιούνται ως κινητήρες (κυρίως σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις) ή ως γεννήτριες (αιολικά πάρκα), λόγω της αδυναμίας των ασύγχρονων μηχανών να παράγουν από μόνες τους την απαιτούμενη άεργο ισχύ για την εγκατάσταση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο διάκενό τους.

Η άεργος υποστήριξη του δικτύου μέσω των αυτόματων μηχανισμών ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών πραγματοποιείται είτε με έλεγχο της τάσης ή με ρύθμιση του συντελεστή ισχύος σε ένα ζυγό. Ο έλεγχος της τάσης στηρίζεται στην ισχυρή εξάρτησή της με την άεργο ισχύ. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι η εγκατάσταση τέτοιων μηχανισμών έχει σκοπό τη ρύθμιση του συντελεστή ισχύος (cosφ) στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του δικτύου.

Σε γενικές γραμμές, η λειτουργία αυτών των μηχανισμών έχει ως εξής: όταν ο συντελεστής ισχύος στον εξεταζόμενο ζυγό γίνει μικρότερος από μία ελάχιστη επιθυμητή τιμή, τότε συνδέονται στο ζυγό πυκνωτές μέχρι ο συντελεστής ισχύος να γίνει μεγαλύτερος από την τιμή αυτή. Αντίστοιχα, αν ο συντελεστής ισχύος ξεπεράσει ένα άνω όριο, τότε αποσυνδέονται πυκνωτές, μέχρι ο συντελεστής ισχύος να γίνει μεγαλύτερος από την τιμή αυτή. Αντίστοιχα, αν ο συντελεστής ισχύος ξεπεράσει ένα άνω όριο, τότε αποσυνδέονται πυκνωτές, μέχρι ο συντελεστής ισχύος να επανέλθει εντός του επιθυμητού εύρους τιμών του. Η διαδικασία ζεύξης και απόζευξης των πυκνωτών γίνεται με κάποια χρονική καθυστέρηση (συνήθως της τάξης μερικών δευτερολέπτων), από τη στιγμή που θα διαπιστωθεί ανεπιθύμητος συντελεστής ισχύος. Σκοπός της καθυστέρησης αυτής είναι η αποφυγή άσκοπης ενεργοποίησης των μηχανισμών αυτών, η οποία μπορεί να συμβεί κυρίως σε μεταβατικές μεταβολές της τάσης ή του φορτίου του ζυγού.

Στο Σχ. 2.27 φαίνεται ένας τυπικός ζυγός φορτίου σε ένα ΣΗΕ, στον οποίο εγκαθίσταται ένας αυτόματος μηχανισμός ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών, με σκοπό τη ρύθμιση του συντελεστή ισχύος (cosφ) στη μόνιμη κατάσταση εντός ενός προκαθορισμένου εύρους επιθυμητών τιμών, δηλαδή:

$$\cos \varphi_{\min} \le \cos \varphi \le \cos \varphi_{\max}$$

Το ενεργό (P) και άεργο (Q) φορτίο του ζυγού θεωρούνται θετικά για κατανάλωση ισχύος και αρνητικά για παραγωγή. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που το φορτίο αντιπροσωπεύει ένα σύνολο κινητήρων επαγωγής θα έχουμε P>0 και Q>0, ενώ αν στο ζυγό υπάρχει αιολικό πάρκο εξοπλισμένο με ασύγχρονες ανεμογεννήτριες τότε θα ισχύει P<0 και Q>0.



Σχ. 2.27: Τυπικός ζυγός φορτίου με αυτόματο μηχανισμό ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών

Για λόγους απλοποίησης, υποθέτουμε ότι ο συντελεστής ισχύος  $(\cos \varphi)$  του ζυγού, ο οποίος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\cos\varphi = \frac{|P|}{\sqrt{P^2 + [Q - B_C(k)V^2]^2}}$$
(2.195)

παραμένει συνεχώς επαγωγικός, δηλαδή:

$$Q - B_C(k)V^2 > 0 (2.196)$$

όπου V είναι το μέτρο της τάσης του ζυγού και  $B_C$  είναι η συνολική χωρητική αγωγιμότητα της συστοιχίας των πυκνωτών.

Σύμφωνα με την παραδοχή αυτή, η λειτουργία του αυτόματου μηχανισμού ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση διαφορών:

$$B_{C}(k+1) = \begin{cases} B_{C}(k) + \Delta B_{C} & \text{an } \cos\varphi < \cos\varphi_{\min} - \varepsilon \text{ kal } B_{C}(k) + \Delta B_{C} \le B_{C}^{\max} \\ B_{C}(k) - \Delta B_{C}, & \text{an } \cos\varphi > \cos\varphi_{\max} + \varepsilon \text{ kal } B_{C}(k) - \Delta B_{C} \ge B_{C}^{\min} \\ B_{C}(k), & \sigma\varepsilon \text{ kabe all } \pi\varepsilon\rho\pi\omega\sigma\eta \end{cases}$$
(2.197)

όπου  $\Delta B_C$  είναι η αγωγιμότητα κάθε ομάδας πυκνωτών που συνδέονται ή αποσυνδέονται κάθε φορά, ενώ  $B_C^{max}$  και  $B_C^{min}$  είναι αντίστοιχα το άνω και κάτω όριο της συνολικής αγωγιμότητας της συστοιχίας. Η μικρή θετική σταθερά ε χρησιμεύει ώστε να αποφεύγεται η διαδοχική σύνδεση και αποσύνδεση ομάδας πυκνωτών, όταν η τιμή του συντελεστής ισχύος είναι πολύ κοντά στο άνω ή κάτω επιθυμητό όριό της. Σημειώνεται ότι η σύνδεση ή αποσύνδεση των πυκνωτών πραγματοποιείται σε διακριτές χρονικές στιγμές:

$$t_k = k \Delta T$$

όπου  $\Delta T$ είναι η χρονική καθυστέρηση για τη σύνδεση ή την αποσύνδεση μίας συστοιχίας πυκνωτών.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των μηχανισμών στατών πυκνωτών είναι ότι η άεργος υποστήριξη που προσφέρουν στο δίκτυο είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσεως του ζυγού και επομένως σε μία πτώση τάσης η υποστήριξη αυτή θα μειωθεί. Το μειονέκτημα αυτό αναιρείται εάν η τάση του ζυγού ρυθμίζεται (π.χ. από ΣΑΤΥΦ).

Επίσης, οι μηχανισμοί αυτοί αδυνατούν να αποτρέψουν περιπτώσεις φαινομένων αστάθειας στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, κατά τις οποίες απαιτείται ταχεία αντιστάθμιση άεργου ισχύος εντός μερικών δεκάτων του δευτερολέπτου. Τέτοιες περιπτώσεις είναι για παράδειγμα η επιβράδυνση ενός κινητήρα επαγωγής ή ο σχεδόν ακαριαίος περιορισμός του ρεύματος πεδίου μίας σύγχρονης γεννήτριας στη μέγιστη μεταβατική του τιμή.

Τέλος, κατά τη ζεύξη συστοιχίας πυκνωτών προκαλούνται υπερτάσεις στο τοπικό δίκτυο, οι οποίες πρέπει να ελέγχονται ώστε να μην αποβούν επιζήμιες για κάποιες ευαίσθητες ηλεκτρολογικές διατάξεις.

### 2.10.2 Στατά συστήματα αέργου αντιστάθμισης

Τα στατά συστήματα αέργου αντιστάθμισης (Static Var Compensators ή SVCs) ξεπερνούν τα προαναφερόμενα μειονεκτήματα των μηχανισμών στατών πυκνωτών, ωστόσο αποτελούν σαφώς πιο δαπανηρές επενδύσεις. Ιδιαίτερα όμως σε περιπτώσεις κατά τις οποίες απαιτείται δυναμική και γρήγορη άεργος αντιστάθμιση, η εγκατάστασή τους κρίνεται επιβεβλημένη.

Τα στατά συστήματα αέργου αντιστάθμισης αποτελούνται από συστοιχίες πηνίων και πυκνωτών, η έναυση των οποίων ελέγχεται από κυκλώματα θυρίστορ, και αρμονικά φίλτρα [Mil82,Tay94]. Η ρύθμιση της ελεγχόμενης τάσης πραγματοποιείται με συνεχή μεταβολή της παράλληλης συνδεδεμένης χωρητικής αγωγιμότητας. Στην περιοχή ελέγχου, η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος των συστημάτων αυτών είναι γραμμική με μικρή σχετικά κλίση (1 έως 5%, αντιστοιχεί σε κέρδος μονίμου καταστάσεως 20 έως 100 αμ), προκειμένου να αποφευχθούν ανεπιθύμητες υπερβάσεις στον έλεγχο και να εξασφαλιστεί η σωστή συνεργασία με άλλες διατάξεις ελέγχου. Στο άνω όριο (παραγωγή αέργου ισχύος), το στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης μετατρέπεται σε εγκάρσιο πυκνωτή, ενώ στο κάτω όριο (κατανάλωση αέργου ισχύος) το σύστημα αυτό ισοδυναμεί με εγκάρσιο πηνίο. Η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος φαίνεται στο Σχ. 2.28.



Σχ. 2.28: Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος στατού συστήματος αέργου αντιστάθμισης (SVC)

Στα πλεονεκτήματα των στατών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης περιλαμβάνονται μεταξύ άλλων, η ταχεία και ακριβής ρύθμιση της ελεγχόμενης τάσης, καθώς επίσης και η εξάλειψη υπερτάσεων κατά τη ζεύξη συστοιχιών πυκνωτών.

Στην παρούσα εργασία, θεωρείται ότι ένα στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης παριστάνεται από μία μεταβαλλόμενη αγωγιμότητα  $B_{SVC}$ , η δυναμική συμπεριφορά της οποίας προσεγγίζεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$T_{SVC}\dot{B}_{SVC} = -B_{SVC} + K_{SVC}(V_{ref} - V)$$
(2.198)

όπου  $K_{SVC}$  είναι το αναλογικό κέρδος του συστήματος,  $T_{SVC}$  μία μικρή χρονική σταθερά (της τάξεως μερικών δεκάτων του δευτερολέπτου), V το μέτρο της ελεγχόμενης τάσης και  $V_{ref}$  μία τάση αναφοράς για την οποία δεν απαιτείται άεργος αντιστάθμιση ( $B_{SVC}$ =0). Το διάστημα τιμών της αγωγιμότητας  $B_{SVC}$  περιορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$B_{SVC}^{\min} \le B_{SVC} \le B_{SVC}^{\max} \tag{2.199}$$

όπου το κάτω όριο  $B_{SVC}^{\min}$  είναι αρνητικό και αντιστοιχεί σε εγκάρσιο πηνίο.

# 2.11 Παράσταση Δικτύου

### 2.11.1 Μοντέλο δικτύου σε διανυσματική μορφή

Η παράσταση του δικτύου βασίζεται κατά πρώτον στην παραδοχή της οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης. Σύμφωνα με την παραδοχή αυτή, ασύμμετρες φορτίσεις του δικτύου ή ανώτερες αρμονικές συνιστώσες δεν λαμβάνονται υπόψη. Συνεπώς, οι τάσεις και τα εγχεόμενα ρεύματα στους ζυγούς παίρνουν τη μορφή χρονομεταβλητών παραστατικών μιγαδικών αριθμών, ενώ τα στοιχεία του δικτύου είναι σύνθετες αντιστάσεις και αγωγιμότητες.

Επίσης, ορίζεται ένα ορθογώνιο σύστημα αξόνων x και y, το οποίο καλείται σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy και το οποίο αποτελεί το κοινό πλαίσιο αναφοράς όλων των παραστατικών μιγαδικών

αριθμών. Το πλαίσιο αυτό έχει ήδη οριστεί στην ενότητα 2.1.5. Η ταχύτητα περιστροφής του θεωρούμενου πλαισίου ταυτίζεται με την γωνιακή συχνότητα ω<sub>sys</sub> του συστήματος.

Εάν το εξεταζόμενο δίκτυο είναι διασυνδεδεμένο με ένα ή περισσότερα σχετικά μεγαλύτερα δίκτυα, η γωνιακή συχνότητα ω<sub>sys</sub>. Αυτό συμβαίνει διότι τα εξωτερικά συστήματα αναλαμβάνουν σε κάθε χρονική στιγμή να ικανοποιήσουν οποιαδήποτε περίσσεια ή έλλειψη ενεργού ισχύος στο συνολικό ισοζύγιο του τοπικού δικτύου.

Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση αυτόνομου δικτύου, η γωνιακή συχνότητα ω<sub>sys</sub> του συστήματος δεν παραμένει κατ' ανάγκη σταθερή στην ονομαστική της τιμή (ακόμα και στη μόνιμη κατάσταση), αλλά μεταβάλλεται συνεχώς. Στην παρούσα διατριβή θεωρείται ότι η γωνιακή συχνότητα περιστροφής ω<sub>sys</sub> του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς xy ενός αυτόνομου δικτύου (σε ηλεκτρικά rad/s) καθορίζεται από τις γωνιακές ταχύτητες των δρομέων όλων των σύγχρονων γεννητριών του δικτύου, σύμφωνα με το θεώρημα του κέντρου της αδράνειας [Kun94], το οποίο εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\omega_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^{NG} H_i \omega_{r_i}}{\sum_{i=1}^{NG} H_i}$$
(2.200)

όπου NG είναι το πλήθος των σύγχρονων γεννητριών, ενώ  $H_i$  και  $\omega_{r_i}$  είναι αντίστοιχα η αδράνεια (σε s στη βάση του συστήματος) και η ταχύτητα του δρομέα (σε ηλεκτρικά rad/s) της *i* σύγχρονης γεννήτριας.

Επομένως, στα αυτόνομα δίκτυα η μεταβολή της συχνότητας του συστήματος λαμβάνεται υπόψη πολλαπλασιάζονται όλες τις επαγωγικές αντιδράσεις και τις χωρητικές αγωγιμότητες των στοιχείων του δικτύου με το λόγο  $\omega_{sys}/\omega_b$ . Η βασική γωνιακή συχνότητα  $\omega_b$  ορίζει τη συχνότητα στην οποία έχουν υπολογιστεί ο επαγωγικές αντιδράσεις και οι χωρητικές αγωγιμότητες.

Σύμφωνα με τις προαναφερόμενες παραδοχές, οι σχέσεις τάσεων και εγχεόμενων ρευμάτων για ένα σύστημα N ζυγών μπορούν να γραφούν σε διανυσματική μορφή ως εξής:

$$\hat{\mathbf{I}}(\hat{\mathbf{V}}) - \mathbf{Y}\,\hat{\mathbf{V}} = \mathbf{0} \tag{2.201}$$

όπου:

- Î είναι το  $N \times 1$  διάνυσμα των παραστατικών μιγαδικών αριθμών των εγχεόμενων στο δίκτυο ρευμάτων.
- $\hat{\mathbf{V}}$  είναι το N×1 διάνυσμα των παραστατικών μιγαδικών αριθμών των τάσεων στους ζυγούς του δικτύου.
- Υ είναι ο  $N \times N$  μιγαδικός πίνακας αγωγιμοτήτων του δικτύου.

Στη γενική περίπτωση, η μιγαδική σχέση (2.201) είναι μη γραμμική, καθώς τα εγχεόμενα ρεύματα εξαρτώνται με μη γραμμικές σχέσεις από τις τάσεις των ζυγών, καθώς επίσης και από τα διανύσματα των μεταβλητών κατάστασης συνεχούς και διακριτού χρόνου των δυναμικών συνιστωσών του συστήματος.

Στις περιπτώσεις διασυνδεδεμένων συστημάτων και με δεδομένο τη σταθερή τοπολογία του δικτύου, ο πίνακας αγωγιμοτήτων Y αποτελείται από δύο μέρη, ένα σταθερό και ένα μεταβαλλόμενο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το σταθερό μέρος αφορά τις γραμμές μεταφοράς και διανομής, τους μετασχηματιστές με σταθερό λόγο μετασχηματισμού, καθώς επίσης και τα στατικά φορτία σταθερής αγωγιμότητας (συμπεριλαμβανομένων και των πυκνωτών). Από την άλλη πλευρά, το μεταβαλλόμενο κομμάτι περιλαμβάνει τα δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία, τους μετασχηματιστές που είναι εξοπλισμένοι με ΣΑΤΥΦ, τους αυτόματους μηχανισμούς ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών και τα στατά συστήματα αέργου αντιστάθμισης.

Αντίθετα, στις περιπτώσεις αυτόνομων δικτύων ολόκληρος ο μιγαδικός πίνακας αγωγιμοτήτων μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης λόγω της μεταβολής της γωνιακής συχνότητας του συστήματος ω<sub>sys</sub>.

#### 2.11.2 Διατύπωση αλγεβρικών εξισώσεων δικτύου

Εάν το εξεταζόμενο σύστημα αποτελείται από N ζυγούς και με S(i) συμβολίσουμε το σύνολο των ζυγών που συνδέονται απευθείας με το ζυγό i (i = 1, ..., N), τότε σύμφωνα με το Σχ. 2.29, ο νόμος ρευμάτων του Kirchoff στο ζυγό i γράφεται στην εξής μορφή:

$$\hat{I}_{i} - Y_{si}\hat{V}_{i} - \sum_{j \in S(i)} \hat{I}_{jj} = 0$$
(2.202)

όπου:

- Y<sub>si</sub> είναι η συνολική αγωγιμότητα όλων των εγκάρσιων στοιχείων στο ζυγό i, στα οποία περιλαμβάνονται τα γραμμικά φορτία (φορτία σταθερής αγωγιμότητας), τα δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία, τα εγκάρσια πηνία, οι στατοί πυκνωτές, οι αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξηςαπόζευξης στατών πυκνωτών και τα στατά συστήματα αέργου αντιστάθμισης.



Σχ. 2.29: Ορισμός μεγεθών κόμβων

Παριστάνοντας τα στοιχεία του δικτύου με τη μορφή ισοδυνάμων δίθυρων, η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$\hat{I}_{i} - Y_{si}\hat{V}_{i} - \sum_{j \in S(i)} Y_{sij}\hat{V}_{i} - \sum_{j \in S(i)} Y_{ij}(\hat{V}_{i} - \hat{V}_{j}) = 0$$
(2.203)

Στην περίπτωση ενός δικτύου N ζυγών, η Εξ. (2.203) ορίζει ένα σύνολο από N μιγαδικές εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν τη ροή των ρευμάτων ανάμεσα στους ζυγούς. Σύμφωνα με το Σχ. 2.30, εάν οι τάσεις και τα εγχεόμενα ρεύματα όλων των ζυγών προβληθούν πάνω στους άξονες του σύγχρονου xy πλαισίου αναφοράς του συστήματος, προκύπτει ότι:

$$\hat{V}_{i} = v_{x_{i}} + jv_{y_{i}} \tag{2.204}$$

$$\hat{I}_{i} = i_{x_{i}} + j i_{y_{i}} \tag{2.205}$$

Επίσης, από το Σχ. 2.29 ορίζονται οι εξής αγωγιμότητες:

$$Y_{si} = G_{si} + j B_{si}$$
(2.206)

$$Y_{sij} = G_{sij} + j B_{sij}$$
(2.207)

$$Y_{ij} = G_{ij} + j B_{ij}$$
(2.208)

Με αντικατάσταση των Εξ. (2.204) έως (2.208) στην Εξ. (2.203) προκύπτει:

$$i_{x_{i}} + ji_{y_{i}} - (G_{si} + jB_{si})(v_{x_{i}} + jv_{y_{i}}) - \sum_{j \in S(i)} (G_{sij} + jB_{sij})(v_{x_{i}} + jv_{y_{i}}) - \sum_{j \in S(i)} (G_{ij} + jB_{ij})(v_{x_{i}} + jv_{y_{i}} - v_{x_{j}} - jv_{y_{j}}) = 0$$
(2.209)



Σχ. 2.30: Ορθογώνιο πλαίσιο αναφοράς δικτύου

Χωρίζοντας το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της παραπάνω μιγαδικής σχέσης, έχουμε:

$$i_{x_{i}} - (G_{si}v_{x_{i}} - B_{si}v_{y_{i}}) - \sum_{j \in S(i)} (G_{sij}v_{x_{i}} - B_{sij}v_{y_{i}}) - \sum_{j \in S(i)} [G_{ij}(v_{x_{i}} - v_{x_{j}}) - B_{ij}(v_{y_{i}} - v_{y_{j}})] = 0$$

$$i_{y_{i}} - (G_{si}v_{y_{i}} + B_{si}v_{x_{i}}) - \sum_{j \in S(i)} (G_{sij}v_{y_{i}} + B_{sij}v_{x_{i}}) - \sum_{j \in S(i)} [G_{ij}(v_{y_{i}} - v_{y_{j}}) + B_{ij}(v_{x_{i}} - v_{x_{j}})] = 0$$
(2.210)
$$(2.210)$$

Αναδιατάσσοντας τις Εξ. (2.210) και (2.211), προκύπτει:

$$i_{x_i} = \left[G_{si} + \sum_{j \in S(i)} (G_{sij} + G_{ij})\right] v_{x_i} - \left[B_{si} + \sum_{j \in S(i)} (B_{sij} + B_{ij})\right] v_{y_i} - \sum_{j \in S(i)} G_{ij} v_{x_j} + \sum_{j \in S(i)} B_{ij} v_{y_j}$$
(2.212)

$$i_{y_i} = \left[ B_{si} + \sum_{j \in S(i)} (B_{sij} + B_{ij}) \right] v_{x_i} + \left[ G_{si} + \sum_{j \in S(i)} (G_{sij} + G_{ij}) \right] v_{y_i} - \sum_{j \in S(i)} G_{ij} v_{y_j} - \sum_{j \in S(i)} B_{ij} v_{x_j}$$
(2.213)

Οι σχέσεις (2.212) και (2.213) γράφονται στη μορφή:

$$i_{x_i} = \sum_{j=1}^{N} g_{ij} v_{x_j} - \sum_{j=1}^{N} b_{ij} v_{y_j}$$
(2.214)

$$i_{y_i} = \sum_{j=1}^{N} b_{ij} v_{x_j} + \sum_{j=1}^{N} g_{ij} v_{y_j}$$
(2.215)

όπου οι αγωγιμότητες  $g_{ij}$  και  $b_{ij}$  ορίζονται από τις ακόλουθες συναρτήσεις:

$$g_{ij} = \begin{cases} G_{si} + \sum_{j \in S(i)} (G_{sij} + G_{ij}), & i = j \\ -G_{ij}, & i \neq j \text{ kal } j \in S(i) \\ 0, & i \neq j \text{ kal } j \notin S(i) \end{cases}$$
(2.216)

$$b_{ij} = \begin{cases} B_{si} + \sum_{j \in S(i)} (B_{sij} + B_{ij}), & i = j \\ -B_{ij}, & i \neq j \text{ kan } j \in S(i) \\ 0, & i \neq j \text{ kan } j \notin S(i) \end{cases}$$
(2.217)

Σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς, το σύνολο των Εξ. (2.214) και (2.215) για το πλήθος των N ζυγών του εξεταζόμενου δικτύου γράφεται σε διανυσματική μορφή ως εξής:

Η Εξ. (2.218) ορίζει τον πραγματικό πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου διαστάσεων  $2N \times 2N$ , η οποία περιγράφει τη σχέση μεταξύ των προβολών των τάσεων και των εγχεόμενων ρευμάτων στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy για όλους τους N ζυγούς του δικτύου. Σημειώνεται ότι ο πραγματικός και ο μιγαδικός πίνακας αγωγιμοτήτων είναι ισοδύναμοι μεταξύ τους. Όπως φαίνεται στην Εξ. (2.218), ο πραγματικός πίνακας αγωγιμοτήτων αποτελείται από N υποπίνακες  $y_{ij}$  διαστάσεων 2×2, οι οποίοι έχουν την εξής μορφή:

$$\mathbf{y}_{ij} = \begin{bmatrix} g_{ij} & -b_{ij} \\ b_{ij} & g_{ij} \end{bmatrix}$$
(2.219)

Ο 2N×2N πραγματικός πίνακας αγωγιμοτήτων χαρακτηρίζεται από μεγάλη αραιότητα, καθώς ο κάθε ζυγός συνδέεται απευθείας με ένα μικρό αριθμό άλλων ζυγών. Επίσης, τα εγχεόμενα ρεύματα σε ένα ζυγό του δικτύου εξαρτώνται κυρίως από τις μεταβλητές κατάστασης των δυναμικών διατάξεων που συνδέονται απευθείας σε αυτόν.

# **3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ WHSSP**

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αρχικά μία εισαγωγή στο λογισμικό περιβάλλον του πακέτου WHSSP, δίνοντας έμφαση στις προγραμματιστικές δυνατότητές του. Επίσης, περιγράφεται σε γενικές γραμμές η δομή του προγραμματιστικού πακέτου και αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο συνεργάζονται οι επιμέρους ρουτίνες μεταξύ τους.

Ακολούθως, περιγράφεται το γενικό μοντέλο για την παράσταση ενός ΣΗΕ σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες, στο οποίο στηρίζεται η αντίστοιχη ρουτίνα προσομοίωσης του πακέτου WHSSP. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει ένα σύνολο διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων και εξισώσεων διαφορών, οι οποίες προκύπτουν από τα μαθηματικά μοντέλα για την παράσταση διαφόρων διατάξεων των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας τόσο στη μακροπρόθεσμη όσο και στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, τα οποία αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Επίσης, περιγράφεται η ρουτίνα αρχικοποίησης, από την οποία προκύπτουν αρχικές τιμές για τις αλγεβρικές μεταβλητές και τις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος.

Ο τρόπος με τον οποίο παριστάνεται ένα ΣΗΕ στο πακέτο WHSSP περιγράφεται χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα ένα απλό δίκτυο 9 ζυγών. Ταυτόχρονα, εξετάζονται οι πολύπλευρες δυνατότητες ανάλυσης ενός ΣΗΕ, τις οποίες προσφέρει το θεωρούμενο πακέτο.

Το προγραμματιστικό πακέτο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ενός ΣΗΕ 33 ζυγών και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του προγράμματος πλήρους προσομοίωσης EUROSTAG [SBD89,VPM95].

Τέλος, η ρουτίνα γραμμικοποίησης ΣΗΕ κατά την προσομοίωση του λογισμικού πακέτου WHSSP θα περιγραφεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

# 3.1 Εισαγωγή στο Λογισμικό Περιβάλλον του WHSSP

Η γενική δομή του πακέτου WHSSP φαίνεται στο Σχ. 3.1, στο οποίο διακρίνονται:

- Τα αρχεία εισόδου και εξόδου.
- Το μοντέλο παράστασης του συστήματος σε SIMULINK.
- Τα προγράμματα αρχικοποίησης, επίλυσης δικτύου, γραμμικοποίησης και επεξεργασίας αποτελεσμάτων σε MATLAB (μορφή m-file).

Το περιβάλλον SIMULINK αποτελεί ένα υποσύνολο του ευρύτερου λογισμικού MATLAB, το οποίο προσφέρεται για ανάπτυξη μοντέλων, προσομοίωση και ανάλυση γραμμικών και μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων, τόσο σε συνεχή όσο και σε διακριτό χρόνο. Όσον αφορά την παράσταση του συστήματος, το περιβάλλον προσομοίωσης SIMULINK παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα για την ανάπτυξη των επιθυμητών μοντέλων με τη μορφή διαγραμμάτων βαθμίδων σε ένα γραφικό παράθυρο επικοινωνίας (Graphical User Interface). Για το σκοπό αυτό ο χρήστης μπορεί να ανατρέξει στις έτοιμες βιβλιοθήκες βαθμίδων του SIMULINK, οι οποίες καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος δομικών στοιχείων, όπως είναι για παράδειγμα οι βαθμίδες διατάξεων συνεχούς και διακριτού χρόνου, μαθηματικών συναρτήσεων, διαφόρων γραμμικών και μη γραμμικών συνιστωσών, διατάξεων γραφικής απεικόνισης αποτελεσμάτων, παράστασης πηγών κτλ.

Αναφορικά με τις προσομοιώσεις των συστημάτων, το περιβάλλον SIMULINK περιέχει ένα σημαντικό πλήθος από έτοιμες μεθόδους αριθμητικής ολοκλήρωσης σταθερού ή μεταβλητού χρονικού βήματος. Τα γραφικά ή αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων μπορούν είτε να φαίνονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης είτε να εξάγονται για περαιτέρω επεξεργασία στο περιβάλλον MATLAB με τη μορφή κατάλληλων αρχείων. Επίσης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει όπως επιθυμεί τις παραμέτρους του δικτύου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ώστε να παρατηρεί άμεσα το αντίκτυπο των μεταβολών αυτών στο σύστημα.

Η επικοινωνία και η ανταλλαγή δεδομένων και αποτελεσμάτων μεταξύ του λογισμικού MATLAB και του περιβάλλοντος SIMULINK πραγματοποιείται με τη βοήθεια του περιβάλλοντος εργασίας της MATLAB (Workspace).

Στα πλαίσια του προγραμματιστικού πακέτου WHSSP, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να παραστήσει το προς προσομοίωση ΣΗΕ στο περιβάλλον SIMULINK, χρησιμοποιώντας μία βιβλιοθήκη με μοντέλα διαφόρων διατάξεων ΣΗΕ, όπως αυτά έχουν αναπτυχθεί στο Κεφάλαιο 2.



Σχ. 3.1: Γενική δομή WHSSP

Τα αρχεία εισόδου αποτελούνται από πέντε αρχεία κειμένου, τα οποία περιέχουν τα δεδομένα των ζυγών, των σύγχρονων γεννητριών, των μηχανών επαγωγής, των γραμμών μεταφοράς και διανομής, καθώς επίσης και των μετασχηματιστών. Εκτός των αρχείων εισόδου, υπάρχει δυνατότητα απευθείας ορισμού τιμών στο μοντέλο του SIMULINK για ορισμένες παραμέτρους κάποιων διατάξεων.

Το πρόγραμμα αρχικοποίησης σε MATLAB (μορφή m-file) εκτελεί τις ακόλουθες διαδικασίες:

- Μεταφέρει μέσω του περιβάλλοντος εργασίας τις τιμές των δεδομένων από τα αρχεία εισόδου στο μοντέλο του συστήματος σε SIMULINK.
- Επιλύει το πρόβλημα ροής φορτίου στο αρχικό σημείο λειτουργίας.
- Καθορίζει το επιθυμητό σενάριο διαταραχών.

Επιπρόσθετα, στις περιπτώσεις διασυνδεδεμένων δικτύων κατά τις οποίες η συχνότητα του συστήματος παραμένει σταθερή στην ονομαστική της τιμή, το πρόγραμμα αρχικοποίησης υπολογίζει το σταθερό μέρος του πίνακα αγωγιμοτήτων, στην κατασκευή του οποίου συμμετέχουν οι γραμμές μεταφοράς και διανομής, οι μετασχηματιστές με σταθερό λόγο μετασχηματισμού, καθώς επίσης και τα στατικά φορτία σταθερής αγωγιμότητας (συμπεριλαμβανομένων των στατών πυκνωτών).

Το πρόγραμμα επίλυσης δικτύου αποτελεί μία τυποποιημένη συνάρτηση σε MATLAB με συγκεκριμένη διαμόρφωση (S-function), η οποία υπολογίζει σε κάθε χρονική στιγμή προσομοίωσης τη λύση του συνόλου των αλγεβρικών εξισώσεων του δικτύου, από την οποία προκύπτουν οι προβολές των τάσεων όλων των ζυγών στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος, με δεδομένα τα ρεύματα κάθε συνιστώσας του συστήματος. Η δομή του προγράμματος αυτού περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 3.3.3.

Το πρόγραμμα γραμμικοποίησης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του Ιακωβιανού Πίνακα Κατάστασης και των εξαγόμενων από αυτόν ιδιοτιμών και

ιδιοδιανυσμάτων σε οποιαδήποτε επιθυμητή χρονική στιγμή. Το Κεφάλαιο 4 είναι ολοκληρωτικά αφιερωμένο στο πρόγραμμα αυτό.

Το πρόγραμμα επεξεργασίας αποτελεσμάτων στο περιβάλλον MATLAB επεξεργάζεται τις μεταβλητές που εξάγονται από το μοντέλο του εξεταζόμενου δικτύου σε SIMULINK στο περιβάλλον εργασίας και δημιουργεί τα αντίστοιχα αρχεία εξόδου.

Τα αρχεία εξόδου μπορούν να είναι είτε αρχεία κειμένου είτε αρχεία αποθήκευσης αποτελεσμάτων ή γραφικές παραστάσεις. Τα αρχεία κειμένου δημιουργούνται από το πρόγραμμα αρχικοποίησης και περιέχουν: α) διάφορες ποσοτικές και ποιοτικές πληροφορίες για το εξεταζόμενο δίκτυο και β) τα αποτελέσματα της επίλυσης του αρχικού προβλήματος ροής φορτίου. Οι γραφικές παραστάσεις και τα αρχεία αποθήκευσης αποτελεσμάτων προκύπτουν από την εκτέλεση είτε του προγράμματος επεξεργασίας αποτελεσμάτων ή του προγράμματος γραμμικοποίησης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Επειδή, όπως προαναφέρθηκε, το αρχικό κίνητρο για την ανάπτυξη του πακέτου WHSSP ήταν η δημιουργία ενός εκπαιδευτικού εργαλείου, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στα ακόλουθα σημεία:

Ευελιζία στην ανάπτυζη και στην επέκταση

Τα μοντέλα των διατάξεων δομούνται σύμφωνα με μία ξεκάθαρη ιεραρχία. Για παράδειγμα, ένα ΣΗΕ θεωρείται ότι αποτελείται από μονάδες παραγωγής, φορτία, συστήματα αντιστάθμισης και διάφορες άλλες βαθμίδες, οι οποίες διασυνδέονται μέσω του δικτύου. Ακολούθως, κάθε μονάδα παραγωγής είναι με τη σειρά της ένα υποσύστημα, το οποίο περιλαμβάνει μία σύγχρονη γεννήτρια, ένα σύστημα διέγερσης, ένα στρόβιλο με τον αντίστοιχο ρυθμιστή στροφών και κάποιες διατάξεις ελέγχου (σταθεροποιητής συστήματος ισχύος, κλπ.) και προστασίας (ΣΠΥ, κλπ.) της γεννήτριας. Ομοίως, κάθε φορτίο μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από ένα ποσοστό στατικών και δυναμικών (κινητήρες επαγωγής ή δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία) συνιστωσών.

Απλότητα στην χρήση

Κάθε βαθμίδα που παριστάνει ένα σύνολο διατάξεων ΣΗΕ έχει ένα φιλικό προς το χρήστη πρωτόκολλο επικοινωνίας για την ανάθεση τιμών στα δεδομένα και τις παραμέτρους της. Επίσης, οι αρχικές τιμές των μεταβλητών κατάστασης και των σημάτων αναφοράς κάθε βαθμίδας υπολογίζονται με τη βοήθεια μίας εσωτερικής ρουτίνας αρχικοποίησης, η οποία λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα του προγράμματος αρχικοποίησης.

• Διαφάνεια

Η γραφική αναπαράσταση κάθε συνιστώσας ταιριάζει απόλυτα με το θεωρητικό μοντέλο, ενώ και οι μεταβλητές που συνδέουν μεταξύ τους τις διάφορες βαθμίδες εξυπηρετούν κάποιους συγκεκριμένους σκοπούς. Οι πολύπλοκες προγραμματιστικές τεχνικές και οι συναφείς συντομεύσεις αποφεύγονται σε μεγάλο βαθμό, μολονότι σε αρκετές περιπτώσεις αυτό συνεπάγεται κόστος σε υπολογιστική απόδοση.

Λόγω της ευελιξίας του στην ανάπτυξη και στην επέκταση, το πακέτο WHSSP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση ενός μεγάλου εύρους φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στα ΣΗΕ, όπως για παράδειγμα:

- Ευστάθεια γωνίας: ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών (απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ρυθμών) και μεταβατικής ευστάθειας (απόκριση σε βραχυκυκλώματα)
- Ελεγχος και ευστάθεια συχνότητας: Ρύθμιση φορτίου-συχνότητας, μελέτη επίδρασης φαινομένου υδραυλικού πλήγματος στους υδροστροβίλους, νησιδοποίηση και απομονωμένη λειτουργία μετά από διαχωρισμό δικτύου.
- Ευστάθεια τάσης: ανάλυση στη βραχυπρόθεσμη (μηχανές επαγωγής, στατά συστήματα αέργου αντιστάθμισης) ή στη μακροπρόθεσμη (αποκατάσταση δυναμικών αυτορυθμιζόμενων φορτίων, ΣΑΤΥΦ, αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών) χρονική κλίμακα.

# 3.2 Γενικό Μοντέλο Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας περιγράφεται στη γενική του μορφή από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων και εξισώσεων διαφορών, οι οποίες υπόκεινται σε αλγεβρικούς περιορισμούς.

Οι διαφορικές εξισώσεις περιγράφουν τη συμπεριφορά των δυναμικών διατάξεων τόσο στη βραχυπρόθεσμη όσο και στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Στις διατάξεις αυτές περιλαμβάνονται:

- Οι σύγχρονες γεννήτριες συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων ελέγχου και προστασίας, όπως είναι οι Αυτόματοι Ρυθμιστές Τάσης (APT), τα Συστήματα Προστασίας Υπερδιεγέρσεως (ΣΠΥ) και οι σταθεροποιητές συστήματος ισχύος.
- Οι στρόβιλοι με τους αντίστοιχους ρυθμιστές στροφών.
- Οι ατμοπαραγωγοί στην περίπτωση ατμοηλεκτρικών μονάδων.
- Οι μηχανές επαγωγής.
- Τα δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία.
- Τα στατά συστήματα αέργου αντιστάθμισης.

Οι εξισώσεις διαφορών περιγράφουν τις διατάξεις ενός ΣΗΕ, οι οποίες ενεργοποιούνται σε διακριτές χρονικές στιγμές κυρίως στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Τέτοιες διατάξεις είναι τα Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) των μετασχηματιστών διανομής και οι αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών.

Οι αλγεβρικοί περιορισμοί στο ηλεκτρικό δίκτυο εκφράζονται από τους νόμους του Kirchoff.

Ορίζονται στη συνέχεια οι μεταβλητές κατάστασης και οι αλγεβρικές μεταβλητές του συστήματος διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων που περιγράφει ένα ΣΗΕ:

- **x**(*t*) είναι το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης συνεχούς χρόνου διάστασης *n<sub>x</sub>*.
- y(t) είναι το διάνυσμα των αλγεβρικών μεταβλητών διάστασης n<sub>y</sub>.
- **z**<sub>k</sub>(t<sub>k</sub>) είναι το διάνυσμα των διακριτών μεταβλητών κατάστασης διάστασης n<sub>z</sub> κατά τη χρονική στιγμή t<sub>k</sub>.
- w(t) είναι το διάνυσμα των μεταβλητών εισόδου και των παραμέτρων του συστήματος διάστασης
   n<sub>w</sub> και περιλαμβάνει ένα σενάριο διαταραχών και επιλογών των χειριστών του συστήματος.

Για απλοποίηση του συμβολισμού στη συνέχεια, δεν θα σημειώνεται η εξάρτηση των παραπάνω διανυσμάτων από το χρόνο t.

# 3.2.1 Δυναμική συμπεριφορά διατάξεων συνεχούς χρόνου

Η δυναμική συμπεριφορά των διατάξεων συνεχούς χρόνου ενός ΣΗΕ περιγράφεται από ένα σύνολο n<sub>x</sub> διαφορικών εξισώσεων της μορφής:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_k, \mathbf{w}) \tag{3.1}$$

Συγκεκριμένα:

- Η δυναμική συμπεριφορά του μοντέλου σύγχρονης γεννήτριας τέταρτης τάξεως περιγράφεται από τις δύο διαφορικές εξισώσεις ταλάντωσης (2.11) και (2.45), καθώς επίσης και από τις ηλεκτρικές διαφορικές εξισώσεις του πεδίου διέγερσης (2.41) και του τυλίγματος απόσβεσης (2.42).
- Σύμφωνα με ομάδες εργασίας της ΙΕΕΕ, τρία ενδεικτικά μοντέλα για ΑΡΤ παριστάνονται από τα σύνολα των διαφορικών εξισώσεων (2.68)-(2.71), (2.72)-(2.73) και (2.74)-(2.76).
- Η μεταβατική απόκριση ενός ΣΠΥ αθροιστικού τύπου περιγράφεται από τις διαφορικές εξισώσεις (2.81), (2.85), (2.90) και (2.92). Στην περίπτωση διακοπτικού ΣΠΥ, προστίθεται στις παραπάνω διαφορικές εξισώσεις και η (2.97).
- Επίσης, εάν η γεννήτρια διαθέτει σταθεροποιητή συστήματος ισχύος, εισάγεται στο σύστημα (3.1) το σύνολο των διαφορικών εξισώσεων (2.98)-(2.100).
- Στην περίπτωση ατμοηλεκτρικών μονάδων, η δυναμική απόκριση του ατμοπαραγωγού, του ατμοστροβίλου και του αντίστοιχου ρυθμιστή στροφών περιγράφεται από τις διαφορικές εξισώσεις (2.154)-(2.156), (2.158)-(2.160) και (2.162)-(2.163), αντίστοιχα.

- Εάν μία σύγχρονη γεννήτρια κινείται από κινητήρα Ντήζελ, η μεταβατική της συμπεριφορά παριστάνεται από τη διαφορική εξίσωση (2.164).
- Εάν υπάρχει υδροηλεκτρικός σταθμός στο εξεταζόμενο ΣΗΕ, η δυναμική του συμπεριφορά περιγράφεται από τη διαφορική εξίσωση (2.173) για τον υδροστρόβιλο και με τις διαφορικές εξισώσεις (2.176)-(2.177) για το ρυθμιστή στροφών.
- Αναφορικά με τις μηχανές επαγωγής, η δυναμική τους απόκριση περιλαμβάνει τόσο ηλεκτρικά όσο και μηχανικά μεταβατικά φαινόμενα. Τα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα του δρομέα περιγράφονται από τις διαφορικές εξισώσεις (2.133) και (2.134), ενώ τα μηχανικά φαινόμενα από τη διαφορική εξίσωση (2.137) επιτάχυνσης του δρομέα.
- Η δυναμική των δυναμικών αυτορυθμιζόμενων φορτίων (ενεργός και άεργος κατανάλωση) προσεγγίζεται από τις διαφορικές εξισώσεις (2.186) και (2.187).
- Τέλος, τα δυναμικά φαινόμενα των στατών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης παριστάνονται από τη διαφορική εξίσωση (2.198).

Τόσο οι συνιστώσες του διανύσματος κατάστασης όσο και οι προαναφερόμενες διαφορικές εξισώσεις θα περιγραφούν αναλυτικά σε επόμενη ενότητα.

# 3.2.2 Δυναμική συμπεριφορά διατάξεων διακριτού χρόνου

Οι διατάξεις διακριτού χρόνου περιγράφονται από το ακόλουθο σύνολο n<sub>z</sub> εξισώσεων διαφορών:

$$\mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_k, \mathbf{w}) \tag{3.2}$$

Τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών διανομής και οι αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών είναι τυπικές διατάξεις, οι οποίες παρουσιάζουν διακριτή συμπεριφορά και η λειτουργία τους περιγράφεται από εξισώσεις διαφορών της μορφής (3.2). Στην περίπτωση των ΣΑΤΥΦ, η διακριτή μεταβλητή κατάστασης είναι ο λόγος μετασχηματισμού r του ιδανικού μετασχηματιστή, ενώ στην περίπτωση των αυτομάτων μηχανισμών ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών η συνολική εγκάρσια αγωγιμότητα  $B_C$  της συστοιχίας.

# 3.2.3 Ακαριαία απόκριση: αλγεβρικές εξισώσεις

Η απόκριση του δικτύου θεωρείται ακαριαία για το χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος σε μελέτες ευστάθειας του συστήματος. Στην ακαριαία απόκριση του δικτύου συμπεριλαμβάνεται η απόκριση του στάτη των σύγχρονων γεννητριών και των μηχανών επαγωγής, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2. Συνεπώς, το δίκτυο περιγράφεται από ένα σύνολο n<sub>v</sub> αλγεβρικών εξισώσεων της μορφής:

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_k, \mathbf{w}) \tag{3.3}$$

οι οποίες εκφράζουν το ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος σε όλους τους ζυγούς.

Οι εξισώσεις (3.3) αναφέρονται σε συνθήκες ισορροπίας των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων τόσο του δικτύου όσο και των μηχανών (παραδοχή οιονεί ημιτονοειδούς μονίμου καταστάσεως).

Το διάνυσμα των αλγεβρικών μεταβλητών y αποτελείται από το διάνυσμα των προβολών των τάσεων των ζυγών στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος, καθώς επίσης και από τη γωνιακή συχνότητα ω<sub>sys</sub> του συστήματος. Οι εξισώσεις αυτές θα διατυπωθούν αναλυτικά σε ακόλουθη ενότητα.

# 3.3 Παράσταση Συστήματος

Στην ενότητα αυτή θα διατυπωθεί το πλήρες σύστημα διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων που περιγράφει ένα ΣΗΕ σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες.

# 3.3.1 Μεταβλητές κατάστασης συνεχούς χρόνου - Διαφορικές εξισώσεις

Το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης συνεχούς χρόνου αποτελείται από:

 Το διάνυσμα x<sub>SM</sub> των μεταβλητών κατάστασης των σύγχρονων γεννητριών. Στην περίπτωση της i γεννήτριας, το εξεταζόμενο διάνυσμα περιέχει τις εξής μεταβλητές (βλ. ενότητα 2.1.3 και 2.1.4):

- Η γωνία  $\delta_i$  μεταξύ του άξονα  $q_i$  του πλαισίου αναφοράς  $d_i q_i$  του δρομέα της γεννήτριας και του άξονα x του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς xy του συστήματος.
- Η γωνιακή ταχύτητα  $\omega_{r_i}$  του δρομέα της μηχανής.
- Οι μεταβατικές ΗΕΔ  $E'_{d_i}$  και  $E'_{q_i}$  κατά τον ευθύ  $d_i$  και τον εγκάρσιο  $q_i$  μαγνητικό άξονα της μηχανής αντίστοιχα.
- Το διάνυσμα x<sub>AVR</sub> των μεταβλητών κατάστασης των συστημάτων διέγερσης και ρύθμισης τάσεως με τα οποία είναι εξοπλισμένες οι σύγχρονες γεννήτριες. Στην περίπτωση της *i* σύγχρονης γεννήτριας, το διάνυσμα x<sub>AVR</sub> περιλαμβάνει την ΗΕΔ διέγερσης E<sub>fi</sub>, ενώ ανάλογα με το μοντέλο

ΑΡΤ στο θεωρούμενο διάνυσμα προστίθενται οι εξής μεταβλητές κατάστασης:

- Στην περίπτωση APT τύπου DC1 κατά IEEE (βλ. ενότητα 2.2.3), η μεταβλητή  $x_{II_i}$  του φίλτρου μεταπορείας, η έξοδος  $V_{R_i}$  του ρυθμιστή τάσης και η μεταβλητή  $x_{sf_i}$  του βρόχου σταθεροποίησης.
- Στην περίπτωση ΑΡΤ τύπου ΑC4 κατά ΙΕΕΕ (βλ. ενότητα 2.2.4), η μεταβλητή x<sub>lli</sub> του φίλτρου μεταπορείας.
- Στην περίπτωση ΑΡΤ τύπου ST1 κατά ΙΕΕΕ (βλ. ενότητα 2.2.5), η μεταβλητή x<sub>lli</sub> του φίλτρου μεταπορείας και η μεταβλητή x<sub>sfi</sub> του βρόχου σταθεροποίησης.
- Το διάνυσμα x<sub>EL</sub> των μεταβλητών κατάστασης των ΣΠΥ που διαθέτουν οι σύγχρονες γεννήτριες. Εάν η *i* γεννήτρια είναι εξοπλισμένη με ΣΠΥ αθροιστικού τύπου, στο διάνυσμα x<sub>EL</sub> ανήκουν οι εξής μεταβλητές (βλ. ενότητα 2.3.2):
  - Η μεταβλητή  $x_{t_i}$  του χρονικού κυκλώματος έναυσης της βαθμίδας μονίμου καταστάσεως.
  - Το ρεύμα αναφοράς  $I_{ref_i}$ .
  - Η μεταβλητή x<sub>en</sub>, της βαθμίδας μείωσης του ρεύματος πεδίου στη μέγιστη μεταβατική τιμή.
  - Η μεταβλητή κατάστασης x<sub>OEL</sub>, η οποία αντιστοιχεί στην ολοκληρωτική βαθμίδα της μονάδας ελέγχου.

Εάν το εξεταζόμενο ΣΠΥ είναι διακοπτικού τύπου, στο διάνυσμα κατάστασης  $\mathbf{x}_{EL}$  προστίθεται η μεταβλητή  $\Delta E_{f_i}^{OEL}$ , η οποία υποδηλώνει ότι ο έλεγχος της διεγέρτριας μεταβαίνει απευθείας στο ΣΠΥ παρακάμπτοντας τον ΑΡΤ.

- Το διάνυσμα x<sub>PSS</sub> των μεταβλητών κατάστασης των σταθεροποιητών συστήματος ισχύος των σύγχρονων γεννητριών. Συγκεκριμένα, εάν η *i* σύγχρονη γεννήτρια είναι εξοπλισμένη με το μοντέλο σταθεροποιητή συστήματος ισχύος που αναπτύχθηκε στην ενότητα 2.4, τότε το διάνυσμα x<sub>PSS</sub> περιέχει τις εξής μεταβλητές κατάστασης:
  - Τη μεταβλητή  $x_{W_i}^{PSS}$  του υψιπερατού φίλτρου εισόδου.
  - Τις μεταβλητές  $x_1^{PSS}$  και  $x_2^{PSS}$  των δύο βαθμίδων αντιστάθμισης.
- Το διάνυσμα κατάστασης x<sub>SU</sub> των ατμοηλεκτρικών μονάδων, το οποίο περιλαμβάνει τις μεταβλητές κατάστασης του ατμοπαραγωγού, του ατμοστροβίλου και του αντίστοιχου ρυθμιστή στροφών. Συγκεκριμένα, εάν η *i* γεννήτρια ανήκει σε ατμοηλεκτρικό σταθμό, τότε στον ατμοπαραγωγό διακρίνονται οι εξής μεταβλητές κατάστασης (βλ. ενότητα 2.6.1):
  - Η ατμοπαραγωγή  $w_{D_i}$ .
  - Η πίεση τυμπάνου  $P_{d_i}$ .
  - Η μεταβλητή x<sup>SU</sup><sub>PIi</sub> της ολοκληρωτική βαθμίδας του ελεγκτή καυσίμου.

Αντίστοιχα, στον ατμοστρόβιλο διακρίνονται (βλ. ενότητα 2.6.2):

- Η ροή ατμού w<sub>CH</sub>, στις σωληνώσεις εισόδου.
- Η ροή ατμού w<sub>RH</sub> στην έξοδο της βαθμίδας αναθέρμανσης.
- Η ροή ατμού w<sub>co<sub>i</sub></sub> στη σταυροειδή σωλήνωση που συνδέει τις βαθμίδες μέσης και χαμηλής πίεσης.

Τέλος, στο μηχανικό-υδραυλικό ρυθμιστή στροφών που αναπτύχθηκε στην ενότητα 2.6.3 περιλαμβάνονται:

- Η μεταβλητή  $x_{SR}^{SU}$  του ηλεκτρονόμου ταχύτητας.
- Το άνοιγμα g<sub>i</sub> της κύριας δικλείδας ελέγχου του ατμού.
- Τη μηχανική ισχύ εξόδου P<sub>mi</sub> του ντηζελοκινητήρα, όταν η *i* σύγχρονη γεννήτρια του συστήματος ανήκει σε ντηζελοηλεκτρικό σταθμό (βλ. ενότητα 2.6.4).
- Το διάνυσμα κατάστασης x<sub>HU</sub> των υδροηλεκτρικών μονάδων, στο οποίο περιλαμβάνονται οι μεταβλητές κατάστασης του υδροστροβίλου και του αντίστοιχου ρυθμιστή στροφών. Στην περίπτωση κατά την οποία η *i* γεννήτρια του εξεταζόμενου δικτύου κινείται από υδροστρόβιλο, τότε στο διάνυσμα x<sub>HU</sub> διακρίνονται οι εξής μεταβλητές κατάστασης (βλ. ενότητα 2.7.2 και 2.7.3):
  - Η παροχή νερού Q<sub>i</sub> προς τον υδροστρόβιλο.
  - Η μεταβλητή x<sup>SU</sup><sub>tr</sub>, της βαθμίδας του μεταβατικού στατισμού του ρυθμιστή στροφών.
  - Το άνοιγμα  $G_i$  των υδατοθυρίδων.
- Το διάνυσμα κατάστασης x<sub>IM</sub> των μηχανών επαγωγής, το οποίο στην περίπτωση της i μηχανής επαγωγής αποτελείται από (βλ. ενότητα 2.5.2):
  - Τη γωνιακή ταχύτητα  $\omega_{r_i}$  του δρομέα της μηχανής.
  - Τις μεταβατικές ΗΕΔ  $E'_{d_i}$  και  $E'_{q_i}$  κατά τον ευθύ  $d_i$  και τον εγκάρσιο  $q_i$  μαγνητικό άξονα της μηχανής αντίστοιχα.
- Τα διανύσματα G<sub>RL</sub> και B<sub>RL</sub> των μεταβαλλόμενων αγωγιμοτήτων με τις οποίες προσεγγίζεται η δυναμική αποκατάσταση της ενεργού και της αέργου κατανάλωσης αντίστοιχα των δυναμικών αυτορυθμιζόμενων φορτίων (βλ. ενότητα 2.8.2).
- Το διάνυσμα **B**<sub>SVC</sub> των ισοδυνάμων χωρητικών αγωγιμοτήτων των στατών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης (βλ. ενότητα 2.10.2).

Το σύνολο των διαφορικών εξισώσεων για την παράσταση του συστήματος στις πολλαπλές χρονικές κλίμακες αποτελείται από τις:

Διαφορικές εξισώσεις των σύγχρονων γεννητριών

Στην περίπτωση της *i* σύγχρονης γεννήτριας διακρίνονται οι:

Εξισώσεις ταλάντωσης της μηχανής:

$$\dot{\delta}_i = \omega_{r_i} - \omega_{sys} \tag{3.4}$$

$$2H_{i}\frac{\dot{\omega}_{r_{i}}}{\omega_{b}} = T_{m_{i}} - E_{d_{i}}'i_{d_{i}} - E_{q_{i}}'i_{q_{i}} - (X_{q_{i}}' - X_{d_{i}}')i_{d_{i}}i_{q_{i}} - D_{i}\left(\frac{\omega_{r}}{\omega_{b}} - 1\right)$$
(3.5)

όπου η μηχανική ροπή εισόδου  $T_{m_i}$  δίνεται είτε από τη σχέση (2.161) στην περίπτωση ατμοηλεκτρικού σταθμού είτε από την (2.165) στην περίπτωση μονάδας Ντήζελ ή από τη σχέση (2.175) στην περίπτωση υδροηλεκτρικής μονάδας.

Ηλεκτρικές διαφορικές εξισώσεις του πεδίου διέγερσης και του τυλίγματος απόσβεσης του δρομέα στο πλαίσιο αναφοράς d<sub>i</sub>q<sub>i</sub>:

$$T'_{d0_i}\dot{E}'_{q_i} = E_{f_i} - E'_{q_i} - (X_{d_i} - X'_{d_i})i_{d_i}$$
(3.6)

$$T'_{q0_i}\dot{E}'_{d_i} = -E'_{d_i} + (X_{q_i} - X'_{q_i})i_{q_i}$$
(3.7)

Τα ρεύματα στάτη  $i_{d_i}$  και  $i_{q_i}$  στο πλαίσιο αναφοράς  $d_i q_i$  της i γεννήτριας αντικαθίστανται συναρτήσει των προβολών  $v_{x_i}$  και  $v_{y_i}$  της τερματικής τάσης της γεννήτριας στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος και των μεταβλητών κατάστασης αυτής, μέσω του μετασχηματισμού  $\mathbf{T}_i(\delta_i)$  και των σχέσεων (2.49) και (2.52).

- Διαφορικές εξισώσεις των ΑΡΤ των σύγχρονων γεννητριών
  - Ανάλογα με το μοντέλο ΑΡΤ, διακρίνονται οι ακόλουθες σχέσεις:
    - ΑΡΤ τύπου DC1 κατά ΙΕΕΕ:

$$\dot{x}_{ll_i} = -\frac{1}{T_{B_i}} x_{ll_i} + \frac{T_{B_i} - T_{C_i}}{T_{B_i}^2} \left[ \left( V_{ref_i} - V_{C_i} + V_{PSS_i} - V_{OEL_i} \right) - \frac{K_{F_i}}{T_{F_i}} \left( E_{f_i} - x_{sf_i} \right) \right]$$
(3.8)

$$\dot{V}_{R_{i}} = -\frac{1}{T_{A_{i}}}V_{R_{i}} + \frac{K_{A_{i}}}{T_{A_{i}}}x_{ll_{i}} + \frac{K_{A_{i}}}{T_{A_{i}}}\frac{T_{C_{i}}}{T_{B_{i}}}\left[\left(V_{ref_{i}} - V_{C_{i}} + V_{PSS_{i}} - V_{OEL_{i}}\right) - \frac{K_{F_{i}}}{T_{F_{i}}}\left(E_{f_{i}} - x_{sf_{i}}\right)\right]$$
(3.9)

$$\dot{x}_{sf_i} = -\frac{1}{T_{F_i}} x_{sf_i} + \frac{1}{T_{F_i}} E_{f_i}$$
(3.10)

$$\dot{E}_{f_i} = -\frac{S_{E_i}(E_{f_i}) + K_{E_i}}{T_{E_i}} E_{f_i} + \frac{1}{T_{E_i}} V_{R_i}$$
(3.11)

ΑΡΤ τύπου ΑC4 κατά ΙΕΕΕ:

$$\dot{x}_{ll_i} = -\frac{1}{T_{B_i}} x_{ll_i} + \frac{T_{B_i} - T_{C_i}}{T_{B_i}^2} \left( V_{ref_i} - V_{C_i} + V_{PSS_i} - V_{OEL_i} \right)$$
(3.12)

$$\dot{E}_{f_i} = -\frac{1}{T_{A_i}} E_{f_i} + \frac{K_{A_i}}{T_{A_i}} x_{ll_i} + \frac{K_{A_i}}{T_{A_i}} \frac{T_{C_i}}{T_{B_i}} \left( V_{ref_i} - V_{C_i} + V_{PSS_i} - V_{OEL_i} \right)$$
(3.13)

- ΑΡΤ τύπου ST1 κατά ΙΕΕΕ:

$$\dot{x}_{sf_i} = -\frac{1}{T_{F_i}} x_{sf_i} + \frac{1}{T_{F_i}} E_{f_i}$$
(3.14)

$$\dot{x}_{ll_i} = -\frac{1}{T_{B_i}} x_{ll_i} + \frac{T_{B_i} - T_{C_i}}{T_{B_i}^2} \left[ \left( V_{ref_i} - V_{C_i} + V_{PSS_i} - V_{OEL_i} \right) - \frac{K_{F_i}}{T_{F_i}} \left( E_{f_i} - x_{sf_i} \right) \right]$$
(3.15)

$$\dot{E}_{f_i} = -\frac{1}{T_{A_i}} E_{f_i} + \frac{K_{A_i}}{T_{A_i}} x_{ll_i} + \frac{K_{A_i}}{T_{A_i}} \frac{T_{C_i}}{T_{B_i}} \left[ \left( V_{ref_i} - V_{C_i} + V_{PSS_i} - V_{OEL_i} \right) - \frac{K_{F_i}}{T_{F_i}} \left( E_{f_i} - x_{sf_i} \right) \right]$$
(3.16)

Τα σήματα εξόδου του ΣΠΥ  $V_{OEL_i}$  και του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος  $V_{PSS_i}$  της i σύγχρονης γεννήτριας, τα οποία εισέρχονται στο κύριο αθροιστή εισόδου του ΑΡΤ δίνονται αντίστοιχα από τις (2.93) και (2.101).

Διαφορικές εξισώσεις των ΣΠΥ των σύγχρονων γεννητριών

Εάν το ΣΠΥ της *i* σύγχρονης γεννήτριας είναι αθροιστικού τύπου, η δυναμική του απόκριση περιγράφεται από:

Τη διαφορική εξίσωση του χρονικού κυκλώματος έναυσης της βαθμίδας μονίμου καταστάσεως:

$$\dot{x}_{t_i} = \begin{cases} 0, & \text{an } \left( x_{t_i} = K_{2_i} \, \text{kan } \dot{x}_{2_i} \ge 0 \right) \, \acute{\eta} \, \left( x_{t_i} = -K_{1_i} \, \text{kan } \dot{x}_{2_i} < 0 \right) \\ x_{2_i}, & \text{se kabe ally perfection} \end{cases}$$
(3.17)

όπου η μεταβλητή  $x_{2_i}$  δίνεται από τη συνάρτηση (2.80).

Τη διαφορική εξίσωση μείωσης του ρεύματος αναφοράς:

$$\dot{I}_{ref_i} = \begin{cases} 0, & \text{av } \left( I_{ref_i} = I_{fd_i}^{\max} \, \text{kal } \dot{x}_{4_i} \ge 0 \right) \, \acute{\eta} \, \left( x_{t_i} = I_{fd_i}^{\lim} \, \text{kal } \dot{x}_{4_i} < 0 \right) \\ x_{4_i}, & \text{se kabe ally perfectors} \end{cases}$$
(3.18)

όπου η μεταβλητή  $x_{4_i}$  δίνεται από τη συνάρτηση (2.84).

 Τη διαφορική εξίσωση της βαθμίδας μείωσης του ρεύματος πεδίου στη μέγιστη μεταβατική τιμή:

όπου η μεταβλητή  $x_{6}$  δίνεται από τη σχέση (2.89).

Τη διαφορική εξίσωση της ολοκληρωτικής βαθμίδας της μονάδας ελέγχου:

$$\dot{x}_{OEL_i} = I_{fd_i} - I_{ref_i} \tag{3.20}$$

όπου το ρεύμα διέγερσης  $I_{id}$ , στην είσοδο του ΣΠΥ δίνεται από τη σχέση (2.79).

Στην περίπτωση κατά την οποία το εξεταζόμενο ΣΠΥ είναι διακοπτικού τύπου, τότε με την ενεργοποίηση του, ο έλεγχος της διεγέρτριας μεταβαίνει απευθείας σε αυτό, παρακάμπτοντας τον ΑΡΤ. Επομένως, καταργούνται οι δυναμικές εξισώσεις του μοντέλου του ΑΡΤ, ενώ στις παραπάνω εξισώσεις του ΣΠΥ προστίθεται επιπλέον η διαφορική εξίσωση της μεταβολής της τάσης διέγερσης της γεννήτριας:

$$T_{E_i}\Delta \dot{E}_{f_i}^{OEL} = -\Delta E_{f_i}^{OEL} - V_{OEL_i}$$
(3.21)

με αρχική τιμή  $\Delta E_{f_i}^{OEL} = 0$  τη χρονική στιγμή  $t_{SW}$  της μεταγωγής..

 Διαφορικές εξισώσεις των σταθεροποιητών συστήματος ισχύος των σύγχρονων γεννητριών
 Η δυναμική απόκριση του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος της *i* σύγχρονης γεννήτριας περιγράφεται από τις ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις:

$$\dot{x}_{W_i}^{PSS} = -\frac{1}{T_{W_i}} x_{W_i}^{PSS} + \frac{1}{T_{W_i}} \frac{\omega_{r_i} - \omega_{sys}}{\omega_b}$$
(3.22)

$$\dot{x}_{1_{i}}^{PSS} = -\frac{1}{T_{2_{i}}} x_{1_{i}}^{PSS} + \frac{K_{PSS_{i}}}{T_{2_{i}}} \left( 1 - \frac{T_{1_{i}}}{T_{2_{i}}} \right) \left[ \frac{\omega_{r_{i}} - \omega_{sys}}{\omega_{b}} - x_{W_{i}}^{PSS} \right]$$
(3.23)

$$\dot{x}_{2_{i}}^{PSS} = -\frac{1}{T_{4_{i}}} x_{2_{i}}^{PSS} + \frac{1}{T_{4_{i}}} \left( 1 - \frac{T_{3_{i}}}{T_{4_{i}}} \right) \left[ x_{1_{i}}^{PSS} + K_{PSS_{i}} \frac{T_{1_{i}}}{T_{2_{i}}} \left( \frac{\omega_{r_{i}} - \omega_{sys}}{\omega_{b}} - x_{W_{i}}^{PSS} \right) \right]$$
(3.24)

Διαφορικές εξισώσεις των ατμοηλεκτρικών σταθμών

Εάν η *i* σύγχρονη γεννήτρια ανήκει σε ατμοηλεκτρικό σταθμό, το σύνολο των διαφορικών εξισώσεων που μοντελοποιούν τη δυναμική συμπεριφορά του υπόψη σταθμού αποτελείται από τις:

Διαφορικές εξισώσεις του ατμοπαραγωγού:

$$\dot{w}_{D_i} = -\frac{1}{T_{FD_i}} w_{D_i} + \frac{K_{P_i}}{T_{D_i}} P_{r_i}^{ref} - \frac{K_{P_i}}{2K_{SH_i}T_{FD_i}} \frac{\sqrt{1 + 4K_{SH_i}g^2 P_{d_i} - 1}}{g^2} + \frac{1}{T_{FD_i}} x_{PI_i}^{SU}$$
(3.25)

$$\dot{P}_{d_i} = \frac{1}{C_{B_i}} w_{D_i} - \frac{1}{2K_{SH_i}C_{B_i}} \frac{\sqrt{1 + 4K_{SH_i}g^2 P_{d_i} - 1}}{g}$$
(3.26)

$$\dot{x}_{PI_i}^{SU} = K_{I_i} P_{r_i}^{ref} - \frac{K_{I_i}}{2K_{SH_i}} \frac{\sqrt{1 + 4K_{SH_i}g^2 P_{d_i}} - 1}{g^2}$$
(3.27)

Διαφορικές εξισώσεις του ατμοστροβίλου:

$$\dot{w}_{CH_i} = -\frac{1}{T_{CH_i}} w_{CH_i} + \frac{1}{T_{CH_i}} w_{S_i}$$
(3.28)

$$\dot{w}_{RH_i} = -\frac{1}{T_{RH_i}} w_{RH_i} + \frac{1}{T_{RH_i}} w_{CH_i}$$
(3.29)

$$\dot{w}_{CO_i} = -\frac{1}{T_{CO_i}} w_{CO_i} + \frac{1}{T_{CO_i}} w_{RH_i}$$
(3.30)

όπου η ροή ατμού  $w_{S_i}$  προς το στρόβιλο δίνεται από την (2.152).

Διαφορικές εξισώσεις του ρυθμιστή στροφών:

$$\dot{x}_{SR_{i}}^{SU} = -\frac{1}{T_{SR_{i}}} x_{SR_{i}}^{SU} + \frac{1}{T_{SR_{i}}} \frac{1}{R_{i}} \frac{\omega_{r_{i}} - \omega_{r_{i}}^{ref}}{\omega_{b}}$$
(3.31)

$$\dot{g}_{i} = -\frac{1}{T_{SM_{i}}}g_{i} - \frac{1}{T_{SM_{i}}}x_{SR_{i}}^{SU} + \frac{1}{T_{SM_{i}}}P_{0_{i}}$$
(3.32)

Διαφορικές εξισώσεις των μονάδων Ντήζελ

Η μεταβατική συμπεριφοράς της μονάδας Ντήζελ, η οποία κινεί την *i* γεννήτρια του δικτύου, παριστάνεται από την ακόλουθη διαφορική σχέση:

$$\dot{P}_{m_i} = \frac{R_i}{T_i} \left[ -P_{m_i} - \frac{1}{R_i} \frac{\omega_{r_i} - \omega_{r_i}^{ref}}{\omega_b} + P_{0_i} \right]$$
(3.33)

- Διαφορικές εξισώσεις των υδροηλεκτρικών μονάδων
   Εάν η *i* σύγχρονη γεννήτρια κινείται από υδροστρόβιλο, η δυναμική απόκριση της υδροηλεκτρικής μονάδας περιγράφεται από:
  - Τη διαφορική εξίσωση επιτάχυνσης της υδάτινης στήλης στον αγωγό προσαγωγής του υδροστροβίλου:

$$\dot{Q}_{i} = \begin{cases} \frac{1}{R_{\nu_{i}}} (H_{R_{i}} - H_{T_{i}} - F_{i}Q_{i}^{2}), & Q_{i} \ge 0\\ \frac{1}{R_{\nu_{i}}} (H_{R_{i}} - H_{T_{i}} + F_{i}Q_{i}^{2}), & Q_{i} < 0 \end{cases}$$
(3.34)

Τις διαφορικές εξισώσεις του ρυθμιστή στροφών του υδροστροβίλου:

$$\dot{x}_{\nu_{i}}^{HU} = -\frac{1}{T_{R_{i}}} x_{\nu_{i}}^{HU} + \frac{\delta_{\nu_{i}}}{T_{R_{i}}} G_{i}$$
(3.35)

$$\dot{G}_{i} = \frac{\sigma_{i}}{T_{g_{i}}}G_{0_{i}} - \frac{1}{T_{g_{i}}}\frac{\omega_{r_{i}} - \omega_{r_{i}}^{ref}}{\omega_{b}} + \frac{1}{T_{g_{i}}}x_{u_{i}}^{HU} - \frac{\sigma_{i} + \delta_{u_{i}}}{T_{g_{i}}}G_{i}$$
(3.36)

Διαφορικές εξισώσεις των μηχανών επαγωγής
 Η μεταβατική συμπεριφορά της *i* μηχανής επαγωγής περιγράφεται από:

Τη διαφορική εξίσωση επιτάχυνσης του δρομέα:

$$2H_i \frac{\omega_{r_i}}{\omega_b} = E'_{d_i} i_{ds_i} + E'_{q_i} i_{qs_i} - T_{m_i}$$
(3.37)

όπου η ροπή  $T_{m_i}$  του μηχανικού φορτίου μπορεί να αντικατασταθεί βάσει της γενικής παράστασης που δίνεται από τη σχέση (2.143).

Τις ηλεκτρικές διαφορικές εξισώσεις των μεταβατικών ΗΕΔ κατά τον ευθύ d<sub>i</sub> και τον εγκάρσιο q<sub>i</sub> άζονα του πλαισίου αναφοράς d<sub>i</sub>q<sub>i</sub> της μηχανής:
$$T'_{r_i} \dot{E}'_{q_i} = -E'_{q_i} + (X_{ss_i} - X'_{s_i})i_{ds_i} - (\omega_{sys} - \omega_{r_i})T'_{r_i} E'_{d_i}$$
(3.38)

$$T'_{r_i}\dot{E}'_{d_i} = -E'_{d_i} - (X_{ss_i} - X'_{s_i})i_{qs_i} + (\omega_{sys} - \omega_{r_i})T'_{r_i}E'_{q_i}$$
(3.39)

Τα ρεύματα του στάτη  $i_{ds_i}$  και  $i_{qs_i}$  στις παραπάνω σχέσεις θα πρέπει να αντικατασταθούν συναρτήσει των συνιστωσών  $v_{x_i}$  και  $v_{y_i}$  της τερματικής τάσης της εξεταζόμενης μηχανής επαγωγής στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος και των μεταβλητών κατάστασης αυτής, συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.139) και (2.142) (μοντέλο μηχανής επαγωγής με σύμβαση κινητήρα).

Διαφορικές εξισώσεις των δυναμικών αυτορυθμιζόμενων φορτίων
 Η απόκριση του δυναμικού αυτορυθμιζόμενου φορτίου (ενεργός και άεργος κατανάλωση) στον *i* ζυγό του δικτύου περιγράφεται από τις παρακάτω διαφορικές εξισώσεις:

$$T_{P_i} \dot{G}_{RL_i} = P_{L0_i} \left( \frac{V_i}{V_{0_i}} \right)^{\alpha_{L_i}} - G_{RL_i} V_i^2$$
(3.40)

$$T_{Q_i} \dot{B}_{RL_i} = Q_{L0_i} \left( \frac{V_i}{V_{0_i}} \right)^{\beta_{L_i}} - B_{RL_i} V_i^2$$
(3.41)

όπου  $V_i$  το μέτρο της τάσεως του θεωρούμενου ζυγού.

- Διαφορικές εξισώσεις των στατών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης
  - Η ισοδύναμη αγωγιμότητα  $B_{SVC_i}$  της συστοιχίας του στατού συστήματος αέργου αντιστάθμισης στον *i* ζυγό του δικτύου μεταβάλλεται σύμφωνα με την ακόλουθη διαφορική σχέση:

$$\Gamma_{SVC_i} \dot{B}_{SVC_i} = -B_{SVC_i} + K_{SVC_i} (V_{ref_i} - V_i)$$
 (3.42)

όπου  $V_{ref_i}$  και  $V_i$  είναι αντίστοιχα η τάση αναφοράς (για την οποία ισχύει  $B_{SVC_i} = 0$ ) και η μετρούμενη τάση του ελεγχόμενου ζυγού *i*.

#### 3.3.2 Μεταβλητές κατάστασης διακριτού χρόνου - Εξισώσεις διαφορών

Το διάνυσμα  $\mathbf{z}_k$  των μεταβλητών κατάστασης διακριτού χρόνου αποτελείται από:

- Το διάνυσμα r των λόγων μετασχηματισμού των μετασχηματιστών διανομής, οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με μηχανισμό ΣΑΤΥΦ.
- Το διάνυσμα **B**<sub>C</sub> των συνολικών χωρητικών αγωγιμοτήτων κάθε συστοιχίας αυτομάτων μηχανισμών ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών.

Ακολούθως, περιγράφονται περιληπτικά τα μοντέλα των δύο παραπάνω διατάξεων διακριτού χρόνου, τα οποία χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

#### Μοντέλο Συστήματος Αλλαγής Τάσεως Υπό Φορτίο

Το μοντέλο του ΣΑΤΥΦ φαίνεται στον Πίνακα 3.1. Το κύκλωμα έναυσης μετρητή χρόνου του ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται τη στιγμή που η τάση V στον ελεγχόμενο ζυγό βρίσκεται εκτός ενός (προκαθορισμένου) επιθυμητού διαστήματος τιμών [ $V_{\min}$ , $V_{\max}$ ], όπου  $V_{\min}$  και  $V_{\max}$  είναι αντίστοιχα η ελάχιστη και η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της ελεγχόμενης τάσης V. Το χρονικό κύκλωμα έναυσης περιλαμβάνει δύο χρονικές καθυστερήσεις, μία αρχική  $T_{D0}$  και μία επόμενη  $T_{D1}$ . Η χρονική καθυστέρηση που μεσολαβεί για την πρώτη αλλαγή λήψης του μετασχηματιστή είναι ίση με  $T_{D0}+T_{D1}$ , ενώ η χρονική καθυστέρηση για τις επόμενες αλλαγές είναι ίση με  $T_{D1}$ . Οι δύο παραπάνω χρονικές καθυστερήσεις θεωρούνται σταθερές και ανεξάρτητες από το μέγεθος της απόκλισης της τάσης του ελεγχόμενου ζυγού.

Ο μηχανισμός αλλαγής του λόγου μετασχηματισμού φαίνεται στον Πίνακα 3.1 τόσο στην περίπτωση που ο ελεγχόμενος ζυγός είναι ο ζυγός μεταβλητής λήψης, όσο και στην περίπτωση που ο ελεγχόμενος ζυγός ταυτίζεται με το ζυγό αγωγιμότητας, όπως είδαμε στην ενότητα 2.9.3.

Το ΣΑΤΥΦ δεν προκαλεί αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού  $r(r_{k+1}=r_k)$  στις εξής δύο περιπτώσεις:

• Η ελεγχόμενη τάση V αποκατασταθεί εντός του επιθυμητού διαστήματος τιμών  $[V_{\min}, V_{\max}]$ .

• Ο λόγος μετασχηματισμού συναντήσει το κάτω  $(r_{\min})$  ή το άνω  $(r_{\max})$  όριό του.

Σημειώνεται ότι ο μετρητής kμηδενίζεται κάθε φορά που η ελεγχόμενη τάση Vεπανέρχεται εντός των επιθυμητών ορίων της.

Συνθήκες (Σ1,Σ2) έναυσης μετρητή ΣΑΤΥΦ τη χρονική στιγμή t <sub>0</sub> (k=0)	$\Sigma1: V_{\min} \le V(t_0^-) \le V_{\max}$ $\Sigma2: V(t_0^+) < V_{\min} \ \text{\acute{\eta}} \ V(t_0^+) > V_{\max}$
Χρονική στιγμή t <sub>k+1</sub> αλλαγής του λόγου Μ/Σ	$\begin{aligned} t_{k+1} = t_k + \Delta T_k & \text{εφόσον } \forall t \in [t_k, t_k+1] \text{ η } \Sigma2 & \text{είναι } a \lambda \eta \theta \eta \varsigma, \\ \text{όπου: } \Delta T_k = \begin{cases} T_{D0} + T_{D1}, & k = 0 \\ T_{D1}, & k = 1, 2, \dots \end{cases} \end{aligned}$
Μηχανισμός αλλαγής λόγου $M/\Sigma r_{k+1}$ όταν ελεγχόμενος ζυγός είναι ο ζυγός αγωγιμότητας	$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r, & \text{an } V > V_{\max} \text{ kai } r_k + \Delta r \le r_{\max} \\ r_k - \Delta r, & \text{an } V < V_{\min} \text{ kai } r_k - \Delta r \ge r_{\min} \\ r_k, & \text{se kabe ally perfections} \end{cases}$
	Δr: βημα αλλαγης λογου Μ/Σ
Μηχανισμός αλλαγής λόγου Μ/Σ r <sub>k+1</sub> όταν ελεγχόμενος ζυγός είναι ο ζυγός μεταβλητής λήψης	$r_{k+1} = \begin{cases} r_k - \Delta r, & \text{an } V > V_{\max} \text{ kat } r_k - \Delta r \ge r_{\min} \\ r_k + \Delta r, & \text{an } V < V_{\min} \text{ kat } r_k + \Delta r \le r_{\max} \\ r_k, & \text{se kabe ally periation} \end{cases}$ $\Delta r: \beta \text{hma allaghes loss} \lambda \text{ loss on } M/\Sigma$

Πίνακας 3.1: Μοντέλο Συστήματος Αλλαγής Τάσεως Υπό Φορτίο

### Αυτόματος Μηχανισμός Ζεύξης-Απόζευξης Στατών Πυκνωτών

Το μοντέλο του Αυτόματου Μηχανισμού Ζεύξης-Απόζευξης Στατών Πυκνωτών φαίνεται στον Πίνακα 3.2. Ο εξεταζόμενος μηχανισμός περιλαμβάνει ένα χρονικό κύκλωμα έναυσης, το οποίο ενεργοποιείται μόλις ο συντελεστής ισχύος (cosφ) του ελεγχόμενου ζυγού βρεθεί έξω από ένα επιθυμητό εύρος τιμών [cosφ<sub>min</sub>,cosφ<sub>max</sub>].

Η μεταβολή της αγωγιμότητας της συστοιχίας των πυκνωτών πραγματοποιείται με χρονική καθυστέρηση  $T_D^{MSC}$  από την έναυση του χρονικού κυκλώματος. Η καθυστέρηση αυτή θεωρείται σταθερή, ανεξάρτητη δηλαδή από την απόκλιση του συντελεστή ισχύος στον ελεγχόμενο ζυγό.

Ο θεωρούμενος μηχανισμός δεν προκαλεί μεταβολή της αγωγιμότητας της συστοιχίας των πυκνωτών είτε όταν ο ρυθμιζόμενος συντελεστής ισχύος αποκατασταθεί εντός της «νεκρής» ζώνης τιμών του ή όταν η συνολική αγωγιμότητα της συστοιχίας φτάσει το κάτω  $(B_c^{\min})$  ή το άνω  $(B_c^{\max})$  όριό της.

Για την εξεταζόμενη διάταξη διακριτού χρόνου, σημειώνεται ότι ο μετρητής k μηδενίζεται μετά από κάθε ενεργοποίηση του μηχανισμού.

Πίνακας 3.2: Μοντέλο Αυτόματου Μηχανισμού Ζεύξης-Απόζευξης Στατών Πυκνωτών

Χρονική στιγμή έναυσης συστοιχίας πυκνωτών: $t_{k+1} = t_k + T_D^{MSC}$ , $k = 0, 1, 2,$								
Μηχανισμός μεταβολής αγωγιμότητας συστοιχίας B <sub>C</sub> (k+1)	$B_{C}(k+1) = \begin{cases} B_{C}(k) + \Delta B_{C} \\ B_{C}(k) - \Delta B_{C}, \\ B_{C}(k), \end{cases}$ ΔB <sub>C</sub> : βήμα μεταβολής αγωγιμ	$\begin{aligned} & \text{an } \cos \varphi < \cos \varphi_{\min} - \varepsilon \text{ kat } B_C(k) + \Delta B_C \leq B_C^{\max} \\ & \text{an } \cos \varphi > \cos \varphi_{\max} + \varepsilon \text{ kat } B_C(k) - \Delta B_C \geq B_C^{\min} \\ & \text{se kabe all perfections} \\ \end{aligned}$						

Η σταθερά ε παίρνει μικρές θετικές τιμές και χρησιμεύει για την αποφυγή διαδοχικών ενεργοποιήσεων και απενεργοποιήσεων του χρονικού κυκλώματος έναυσης στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η τιμή του ρυθμιζόμενου συντελεστή ισχύος είναι πολύ κοντά στα όριά της.

### 3.3.3 Αλγεβρικές μεταβλητές και εξισώσεις δικτύου

Στην ενότητα αυτή θα διατυπωθεί το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων που περιγράφουν ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Αρχικά, θα εξεταστεί η περίπτωση ενός διασυνδεδεμένου ΣΗΕ (και στη συνέχεια η περίπτωση αυτόνομου ΣΗΕ). Το σύστημα αποτελείται από:

- Ν ζυγούς.
- NG σύγχρονες γεννήτριες.
- ΝΜ μηχανές επαγωγής.

Οι διασυνδέσεις με εξωτερικά συστήματα υποθέτουμε ότι παριστάνονται με τη βοήθεια NI ζυγών διασύνδεσης, το πλήθος των οποίων δεν συμπεριλαμβάνονται στον αριθμό των N ζυγών του δικτύου. Οι ζυγοί διασύνδεσης αντιμετωπίζονται σαν ζυγοί σταθερής τάσης κατά μέτρο και γωνία (άπειροι ζυγοί).

Στο σημείο αυτό κάνουμε την ακόλουθη σύμβαση αρίθμησης:

- Οι ζυγοί 1 έως N είναι οι N ζυγοί του δικτύου.
- Οι ζυγοί N+1 έως N+NI είναι οι NI ζυγοί διασύνδεσης.

Το διάνυσμα y των αλγεβρικών μεταβλητών αποτελείται από  $n_y=2N+1$  μεταβλητές:

 Το 2N×1 διάνυσμα υ<sub>N</sub> των προβολών των τάσεων των N ζυγών του δικτύου (δηλαδή εκτός των ζυγών διασύνδεσης) στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος:

$$\boldsymbol{v}_{N} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{x_{1}} & v_{y_{1}} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} v_{x_{N}} & v_{y_{N}} \end{bmatrix} \end{bmatrix}^{T}$$
(3.43)

• Τη γωνιακή συχνότητα ω<sub>sys</sub> του συστήματος.

Στην περίπτωση διασυνδεδεμένου δικτύου, η γωνιακή συχνότητα ω<sub>sys</sub> παραμένει σταθερή στην ονομαστική της τιμή, εφόσον σε κάθε χρονική στιγμή προσομοίωσης οι ζυγοί διασύνδεσης αναλαμβάνουν να ικανοποιήσουν οποιαδήποτε περίσσεια ή έλλειψη ενεργού ισχύος στο συνολικό ισοζύγιο του δικτύου.

Οι αλγεβρικοί περιορισμοί στο δίκτυο αναδιατάσσονται στην ακόλουθη σχέση:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_{N} \\ \mathbf{i}_{I} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{N} & \mathbf{Y}_{NI} \\ \mathbf{Y}_{IN} & \mathbf{Y}_{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{N} \\ \mathbf{v}_{I} \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{2(N+NI)\times 1}$$
(3.44)

όπου:

i<sub>N</sub> είναι το 2N×1 διάνυσμα των προβολών των εγχεόμενων ρευμάτων των N ζυγών του δικτύου στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος:

$$\mathbf{i}_{N} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{x_{1}} & i_{y_{1}} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} i_{x_{N}} & i_{y_{N}} \end{bmatrix} \end{bmatrix}^{T}$$
(3.45)

 i<sub>I</sub> είναι το 2NI×1 διάνυσμα των συνιστωσών των εγχεόμενων ρευμάτων λόγω των ζυγών διασύνδεσης στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος:

$$\mathbf{i}_{I} = \begin{bmatrix} i_{x_{N+1}} & i_{y_{N+1}} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} i_{x_{N+NI}} & i_{y_{N+NI}} \end{bmatrix}^{T}$$
(3.46)

 υ<sub>1</sub> είναι το 2NI×1 διάνυσμα των προβολών των τάσεων των ζυγών διασύνδεσης στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος:

$$\mathbf{v}_{I} = \begin{bmatrix} v_{x_{N+1}} & v_{y_{N+1}} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} v_{x_{N+NI}} & v_{y_{N+NI}} \end{bmatrix}^{T}$$
(3.47)

- $\mathbf{Y}_N$ ,  $\mathbf{Y}_{NI}$ ,  $\mathbf{Y}_{IN}$  kai  $\mathbf{Y}_I$  eívai πραγματικοί πίνακες αγωγιμοτήτων διαστάσεων 2N×2N, 2N×2NI, 2NI×2N kai 2NI×2NI αντίστοιχα.
- $\mathbf{0}_{2(N+NI)\times 1}$  είναι το μηδενικό διάνυσμα διάστασης  $2(N+NI)\times 1$ .

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.11.1, ο πίνακας αγωγιμοτήτων στην περίπτωση διασυνδεδεμένου δικτύου με σταθερή τοπολογία αποτελείται από ένα σταθερό και ένα μεταβαλλόμενο κομμάτι. Το σταθερό κομμάτι, το οποίο υπολογίζεται από το πρόγραμμα αρχικοποίησης, περιλαμβάνει την επίδραση στο δίκτυο α) των γραμμών μεταφοράς και διανομής, β) των μετασχηματιστών με σταθερό

(ονομαστικό ή μη) λόγο μετασχηματισμού, γ) των φορτίων σταθερής αγωγιμότητας και δ) των στατών πυκνωτών. Από την άλλη πλευρά, το μεταβαλλόμενο μέρος του πίνακα αγωγιμοτήτων κατασκευάζεται σε κάθε χρονική στιγμή προσομοίωσης από το πρόγραμμα επίλυσης δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη α) τα δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία, β) τους μετασχηματιστές που είναι εξοπλισμένοι με ΣΑΤΥΦ, γ) τους αυτόματους μηχανισμούς ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών και δ) τα στατά συστήματα αέργου αντιστάθμισης.

Επειδή το διάνυσμα  $\mathbf{v}_I$  των τάσεων στους ζυγούς διασύνδεσης θεωρείται γνωστό, διατηρούνται οι πρώτες 2N εξισώσεις της σχέσης (3.44). Οπότε, το άγνωστο 2N×1 διάνυσμα  $\mathbf{v}_N$  των N τάσεων του δικτύου θα προκύψει από την επίλυση του συστήματος:

$$\mathbf{g}_N = \mathbf{i}_N - \mathbf{Y}_N \mathbf{v}_N - \mathbf{Y}_{NI} \mathbf{v}_I = \mathbf{0}_{2N \times 1}$$
(3.48)

Προκειμένου να επιλυθεί το σύστημα (3.48), θα πρέπει το διάνυσμα  $\mathbf{i}_N$  των προβολών των εγχεόμενων ρευμάτων να εκφραστεί συναρτήσει του αγνώστου διανύσματος  $\mathbf{v}_N$  των τάσεων.

Στη γενική περίπτωση, η έγχυση ρεύματος σε ένα ζυγό μπορεί να προκύψει από την ταυτόχρονη παρουσία μίας σύγχρονης γεννήτριας, μίας μηχανής επαγωγής και ενός στατικού μη γραμμικού φορτίου, το οποίο δεν περιλαμβάνεται στο συνολικό πίνακα αγωγιμοτήτων. Επομένως, το διάνυσμα  $\mathbf{i}_N$  προκύπτει από το παρακάτω άθροισμα:

$$\mathbf{i}_N = \mathbf{i}_{SG} + \mathbf{i}_{IM} + \mathbf{i}_{NL} \tag{3.49}$$

όπου  $\mathbf{i}_{SG}$ ,  $\mathbf{i}_{IM}$  και  $\mathbf{i}_{NL}$  είναι τα  $2N \times 1$  διανύσματα των προβολών (στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος) των εγχεόμενων ρευμάτων στο δίκτυο λόγω αντίστοιχα των σύγχρονων γεννητριών, των μηχανών επαγωγής και των λοιπών στατικών μη γραμμικών φορτίων (που δεν περιλαμβάνονται στο συνολικό πίνακα αγωγιμοτήτων).

Το διάνυσμα  $i_{SG}$  των εγχεόμενων ρευμάτων στο δίκτυο εξαιτίας των σύγχρονων γεννητριών δίνεται από την ακόλουθη σχέση, λαμβάνοντας υπόψη την (2.52).

$$\mathbf{i}_{SG} = \mathbf{Y}_{SG} \mathbf{v}_N + \mathbf{b}_{SG} \tag{3.50}$$

Πριν υπολογιστούν τα επιμέρους μεγέθη της παραπάνω σχέσης, ορίζεται ο τελεστής  $\left| \operatorname{diag}_{i=1}^{N} (\boldsymbol{a}_{i}) \right|$ , ο

οποίος δημιουργεί έναν πίνακα (όχι απαραίτητα τετραγωνικό), στον οποίο τα μόνα μη μηδενικά στοιχεία είναι τα στοιχεία της κυρίας διαγωνίου και συγκεκριμένα το στοιχείο (*i*,*i*) είναι ίσο με **a**<sub>i</sub>, δηλαδή:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}_{1}^{N} & \mathbf{0} \\ \mathbf{a}_{2} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{a}_{2} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$
(3.51)

Το στοιχείο  $\mathbf{a}_i$  μπορεί να είναι είτε βαθμωτό μέγεθος είτε διάνυσμα ή πίνακας. Εάν οι διαστάσεις του  $\mathbf{a}_i$  είναι  $M_1 \times M_2$ , ο πίνακας που ορίζεται από τον παραπάνω τελεστή θα είναι διαστάσεων  $NM_1 \times NM_2$ .

Επανερχόμενοι στην (3.50), ο πίνακας  $\mathbf{Y}_{SG}$  διαστάσεων 2N×2N είναι ίση με:

$$\mathbf{Y}_{SG} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N} (\mathbf{Y}_{SG,i}) \end{bmatrix}$$
(3.52)

όπου κάθε υποπίνακας  $\mathbf{Y}_{SG,i}$  διαστάσεων 2×2 δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{Y}_{SG,i} = -\frac{z_{SG_i}}{r_{s_i}^2 + \lambda_{\omega}^2 X'_{d_i} X'_{q_i}} \mathbf{T}_i \begin{bmatrix} r_{s_i} & \lambda_{\omega} X'_{q_i} \\ -\lambda_{\omega} X'_{d_i} & r_{s_i} \end{bmatrix} \mathbf{T}_i^{-1}$$
(3.53)

Ο πίνακας μετασχηματισμού  $\mathbf{T}_i$  δίνεται από την (2.49), ενώ η μεταβλητή  $z_{sG_i}$  παίρνει διακριτές τιμές 1 ή 0, ανάλογα με το εάν υπάρχει ή όχι αντίστοιχα σύγχρονη γεννήτρια στο ζυγό *i*.

Ομοίως, το 2*N*×1 διάνυσμα **b**<sub>SG</sub> προκύπτει από την εξίσωση:

$$\mathbf{b}_{SG} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{SG,1}^T & \cdots & \mathbf{b}_{SG,N}^T \end{bmatrix}^T$$
(3.54)

όπου κάθε  $2 \times 1$  υποδιάνυσμα  $\mathbf{b}_{SG,i}$  εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους και τις μεταβλητές κατάστασης της σύγχρονης γεννήτριας που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό *i* και δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{b}_{SG,i} = \frac{\lambda_{\omega} z_{SG_i}}{r_{s_i}^2 + \lambda_{\omega}^2 X'_{d_i} X'_{q_i}} \mathbf{T}_i \begin{bmatrix} r_{s_i} & \lambda_{\omega} X'_{q_i} \\ -\lambda_{\omega} X'_{d_i} & r_{s_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_{d_i} \\ E'_{q_i} \end{bmatrix}$$
(3.55)

Σημειώνεται ότι στο εξεταζόμενο δίκτυο των NG σύγχρονων γεννητριών, τόσο ο πίνακας  $\mathbf{Y}_{SG}$  όσο και το διάνυσμα  $\mathbf{b}_{SG}$  αποτελούνται αντίστοιχα από NG μη μηδενικούς υποπίνακες  $\mathbf{Y}_{SG,i}$  και NG μη μηδενικά υποδιανύσματα  $\mathbf{b}_{SG,i}$ .

Σε αντιστοιχία με τις σύγχρονες γεννήτριες, το διάνυσμα  $i_{IM}$  των προβολών (στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος) των εγχεόμενων ρευμάτων στο δίκτυο λόγω των μηχανών επαγωγής προκύπτει από τη σχέση:

$$\mathbf{i}_{IM} = \mathbf{Y}_{IM} \mathbf{v}_N + \mathbf{b}_{IM} \tag{3.56}$$

Ο πίνακας  $\mathbf{Y}_{I\!M}$ διαστάσεων 2N×2N είναι ίση με:

$$\mathbf{Y}_{IM} = \begin{bmatrix} \prod_{i=1}^{N} (\mathbf{Y}_{IM,i}) \end{bmatrix}$$
(3.57)

όπου κάθε υποπίνακας  $\mathbf{Y}_{IM,i}$  διαστάσεων 2×2 δίνεται από την (3.58).

$$\mathbf{Y}_{IM,i} = -\frac{z_{IM_i}}{r_{s_i}^2 + \lambda_{\omega}^2 X_{s_i}'^2} \begin{bmatrix} r_{s_i} & \lambda_{\omega} X_{s_i}' \\ -\lambda_{\omega} X_{s_i}' & r_{s_i} \end{bmatrix}$$
(3.58)

Η διακριτή μεταβλητή  $z_{IM_i}$  δηλώνει ένα στο ζυγό *i* είναι συνδεδεμένη ( $z_{IM_i} = 1$ ) ή όχι ( $z_{IM_i} = 0$ ) μηχανής επαγωγής.

Ομοίως, το  $2N \times 1$  διάνυσμα  $\mathbf{b}_{IM}$  δίνεται από τη :

$$\mathbf{b}_{IM} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{IM,1}^T & \cdots & \mathbf{b}_{IM,N}^T \end{bmatrix}^T$$
(3.59)

όπου κάθε  $2 \times 1$  υποδιάνυσμα  $\mathbf{b}_{IM,i}$  εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους και τις μεταβλητές κατάστασης της μηχανής επαγωγής που είναι συνδεδεμένη στον *i* ζυγό και δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{b}_{IM,i} = \frac{\lambda_{\omega} z_{IM_i}}{r_{s_i}^2 + \lambda_{\omega}^2 X_{s_i}'^2} \begin{bmatrix} r_{s_i} & \lambda_{\omega} X_{s_i}'^2 \\ -\lambda_{\omega} X_{s_i}'^2 & r_{s_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_{d_i} \\ E'_{q_i} \end{bmatrix}$$
(3.60)

Επειδή το πλήθος των μηχανών επαγωγής στο εξεταζόμενο ΣΗΕ είναι ίσο με NM, τόσο ο πίνακας  $\mathbf{Y}_{IM}$  όσο και το διάνυσμα  $\mathbf{b}_{IM}$  αποτελούνται αντίστοιχα από NM μη μηδενικούς υποπίνακες  $\mathbf{Y}_{IM,i}$  και NM μη μηδενικά υποδιανύσματα  $\mathbf{b}_{IM,i}$ .

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (3.50), (3.53) και (3.55) των σύγχρονων γεννητριών και τις αντίστοιχες (3.56), (3.58) και (3.60) των μηχανών επαγωγής, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το διάνυσμα των εγχεόμενων ρευμάτων στο δίκτυο λόγω των μηχανών είναι γραμμική συνάρτηση του διανύσματος των προβολών των τερματικών τους τάσεων στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος. Αυτό συμβαίνει διότι έχει αμεληθεί το φαινόμενο του κορεσμού των μαγνητικών κυκλωμάτων, τα οποία έχουν θεωρηθεί γραμμικά.

Το διάνυσμα  $i_{NL}$  των εγχεόμενων ρευμάτων των στατικών μη γραμμικών φορτίων, τα οποία δεν συμπεριλαμβάνονται στον πίνακα αγωγιμοτήτων, έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\mathbf{i}_{NL}(\mathbf{v}_{N}) = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{NL,1}^{T}(v_{x_{1}}, v_{y_{1}}) & \cdots & \mathbf{i}_{NL,N}^{T}(v_{x_{N}}, v_{y_{N}}) \end{bmatrix}^{T}$$
(3.61)

όπου κάθε  $2 \times 1$  υποδιάνυσμα  $\mathbf{i}_{NL,i}$  προκύπτει από την (3.62).

$$\mathbf{i}_{NL,i}(v_{x_{1}}, v_{y_{1}}) = -z_{NL_{i}} \begin{bmatrix} \frac{P_{L_{i}}(V_{i})v_{x_{i}} + Q_{L_{i}}(V_{i})v_{y_{i}}}{v_{x_{i}}^{2} + v_{y_{i}}^{2}}\\ \frac{P_{L_{i}}(V_{i})v_{y_{i}} - Q_{L_{i}}(V_{i})v_{x_{i}}}{v_{x_{i}}^{2} + v_{y_{i}}^{2}} \end{bmatrix}$$
(3.62)

Η μεταβλητή  $z_{NL_i}$  παίρνει διακριτές τιμές 1 ή 0, ανάλογα με το εάν υπάρχει ή όχι αντίστοιχα μη γραμμικό φορτίο στο ζυγό *i*, ενώ στη γενική περίπτωση η ενεργός ( $P_{L_i}$ ) και η άεργος ( $Q_{L_i}$ ) κατανάλωση του φορτίου είναι μη γραμμική συνάρτηση του μέτρου της τάσης ( $V_i$ ) στο θεωρούμενο ζυγό.

Αντικαθιστώντας την (3.49) στην (3.48) και λαμβάνοντας υπόψη ότι τα διανύσματα των εγχεόμενων ρευμάτων **i**<sub>SG</sub> και **i**<sub>IM</sub> των μηχανών δίνονται από τις (3.50) και (3.56) αντίστοιχα, προκύπτει ότι:

$$\mathbf{g}_{N} = \mathbf{Y}_{SG}\mathbf{v}_{N} + \mathbf{b}_{SG} + \mathbf{Y}_{IM}\mathbf{v}_{N} + \mathbf{b}_{IM} + \mathbf{i}_{NL}(\mathbf{v}_{N}) - \mathbf{Y}_{N}\mathbf{v}_{N} - \mathbf{Y}_{NI}\mathbf{v}_{I} = \mathbf{0}_{2N\times 1}$$
(3.63)

Στη γενική περίπτωση το σύστημα (3.63) είναι μη γραμμικό λόγω της ύπαρξης του διανύσματος  $i_{NL}$ . Η επίλυση του συστήματος αυτού πραγματοποιείται με την αριθμητική μέθοδο Newton-Raphson. Συγκεκριμένα, ένα σημείο ισορροπίας του συστήματος  $g_N$  προκύπτει επιλύνοντας επαναληπτικά μία ακολουθία γραμμικών συστημάτων της μορφής:

$$\mathbf{J}_{N}^{(j)} \left[ \mathbf{v}_{N}^{(j+1)} - \mathbf{v}_{N}^{(j)} \right] = -\mathbf{g}_{N}^{(j)} \quad j = 0, 1, 2, \dots$$
(3.64)

όπου  $J_N$  είναι ο Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος διαστάσεων  $2N \times 2N$ , ενώ με εκθέτη j συμβολίζονται οι τιμές των μεταβλητών και των συναρτήσεων στην j-ανακύκλωση. Το διάνυσμα στο αριστερό μέλος της (3.64) ονομάζεται διάνυσμα διόρθωσης, ενώ το διάνυσμα στο δεξιό μέλος είναι γνωστό σαν διάνυσμα σφάλματος. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αναλυτικά ο αλγόριθμος για την επίλυση της σχέσης (3.64).

Εφόσον τα διανύσματα  $\mathbf{b}_{SG}$  και  $\mathbf{b}_{IM}$  των σύγχρονων και των ασύγχρονων μηχανών αντίστοιχα δεν εξαρτώνται από το διάνυσμα  $\mathbf{v}_N$  των τάσεων στους ζυγούς του δικτύου, ο Ιακωβιανός πίνακας  $\mathbf{J}_N$  δίνεται από την εξίσωση:

$$\mathbf{J}_{N} = \left[\frac{\partial \mathbf{g}_{N}}{\partial \mathbf{v}_{N}}\right] = \mathbf{Y}_{SG} + \mathbf{Y}_{IM} + \left[\frac{\partial \mathbf{i}_{NL}}{\partial \mathbf{v}_{N}}\right] - \mathbf{Y}_{N}$$
(3.65)

Οπότε, η κατασκευή του Ιακωβιανού πίνακα  $\mathbf{J}_N$  προϋποθέτει τον υπολογισμό του πίνακα των μερικών παραγώγων  $\begin{bmatrix} \partial \mathbf{i}_{NL} \end{bmatrix}$  των στατικών μη γραμμικών φροτίων διαστάσεων 2N×2N

παραγώγων  $\left\lfloor \frac{\partial \mathbf{i}_{NL}}{\partial \mathbf{v}_N} \right\rfloor$  των στατικών μη γραμμικών φορτίων, διαστάσεων 2N×2N.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι στην παράγραφο 2.8.1 διαχωρίστηκαν τα στατικά φορτία που εξαρτώνται από την τάση σε εκθετικά και πολυωνυμικά. Σύμφωνα με τις (2.180) και (2.181), τα πολυωνυμικά φορτία αποτελούν ουσιαστικά άθροισμα διαφόρων εκθετικών φορτίων με κατάλληλους συντελεστές βαρύτητας. Επομένως, χωρίς βλάβη της γενικότητας και για λόγους απλοποίησης των παραστάσεων των εξαγόμενων σχέσεων, θεωρείται ότι τα μόνα στατικά μη γραμμικά φορτία του εξεταζόμενου δικτύου είναι τα εκθετικά φορτία. Ωστόσο, όπως θα αποδειχθεί στη συνέχεια, η προτεινόμενη μεθοδολογία προσομοίωσης μπορεί εύκολα να γενικευτεί ώστε να συμπεριληφθούν και τα πολυωνυμικά φορτία.

Υπενθυμίζεται ότι η ενεργός και η άεργος κατανάλωση του εκθετικού φορτίου στον *i* ζυγό του συστήματος δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P_{L_{i}}(V_{i}) = P_{L0_{i}} \left(\frac{V_{i}}{V_{0_{i}}}\right)^{\alpha_{L_{i}}}$$
(3.66)

$$Q_{L_{i}}(V_{i}) = Q_{L_{0_{i}}} \left(\frac{V_{i}}{V_{0_{i}}}\right)^{\beta_{L_{i}}}$$
(3.67)

όπου το μέτρο της τάσης του ζυγού *i* είναι ίσο με:

$$V_i = \sqrt{v_{x_i}^2 + v_{y_i}^2} \tag{3.68}$$

Αντικαθιστώντας τις εκφράσεις των  $P_{L_i}$  και  $Q_{L_i}$  από τις (3.66) και (3.67) αντίστοιχα στην (3.62), προκύπτει η ακόλουθη σχέση για τον πίνακα  $\left[\frac{\partial \mathbf{i}_{NL}}{\partial \mathbf{v}_N}\right]$ .

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{i}_{NL}}{\partial \mathbf{v}_{N}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{n} \\ \mathbf{v}_{n} \\ \mathbf{v}_{i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{i}_{NL,i}}{\partial \mathbf{v}_{i}} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad \hat{\mathbf{o}} \pi \mathbf{o} \mathbf{v} \quad \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{i}_{NL,i}}{\partial \mathbf{v}_{i}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial i_{x_{NL}}}{\partial \mathbf{v}_{x}} \\ \frac{\partial i_{y_{NL}}}{\partial \mathbf{v}_{x}} \\ \frac{\partial i_{y_{NL}}}{\partial \mathbf{v}_{x}} \end{bmatrix}_{i} \quad \frac{\partial i_{y_{NL}}}{\partial \mathbf{v}_{y}} \end{bmatrix}$$
(3.69)

Τα στοιχεία κάθε 2×2 υποπίνακα  $\left[\frac{\partial \mathbf{i}_{NL,i}}{\partial \mathbf{v}_i}\right]$  αναφορικά με το μη γραμμικό εκθετικό φορτίο στον *i* ζυγό του δικτύου, δίνονται από το παρακάτω σύνολο εξισώσεων:

$$\frac{\partial i_{x_{NL}}}{\partial v_{x}}\Big|_{i} = z_{NL_{i}} \left[ -P_{L0_{i}} \left( \frac{V_{i}}{V_{0_{i}}} \right)^{\alpha_{L_{i}}} \frac{V_{i}^{2} + (\alpha_{L_{i}} - 2)v_{x_{i}}^{2}}{V_{i}^{4}} - Q_{L0_{i}} \left( \frac{V_{i}}{V_{0_{i}}} \right)^{\beta_{L_{i}}} \frac{(\beta_{L_{i}} - 2)v_{x_{i}}v_{y_{i}}}{V_{i}^{4}} \right]$$
(3.70)

$$\frac{\partial i_{x_{NL}}}{\partial v_{y}}\Big|_{i} = z_{NL_{i}}\left[-P_{L0_{i}}\left(\frac{V_{i}}{V_{0_{i}}}\right)^{\alpha_{L_{i}}}\frac{(\alpha_{L_{i}}-2)v_{x_{i}}v_{y_{i}}}{V_{i}^{4}} - Q_{L0_{i}}\left(\frac{V_{i}}{V_{0_{i}}}\right)^{\beta_{L_{i}}}\frac{V_{i}^{2} + (\beta_{L_{i}}-2)v_{y_{i}}^{2}}{V_{i}^{4}}\right]$$
(3.71)

$$\frac{\partial i_{y_{NL}}}{\partial v_{x}}\Big|_{i} = z_{NL_{i}} \left[ -P_{L0_{i}} \left( \frac{V_{i}}{V_{0_{i}}} \right)^{\alpha_{L_{i}}} \frac{(\alpha_{L_{i}} - 2)v_{x_{i}}v_{y_{i}}}{V_{i}^{4}} + Q_{L0_{i}} \left( \frac{V_{i}}{V_{0_{i}}} \right)^{\beta_{L_{i}}} \frac{V_{i}^{2} + (\beta_{L_{i}} - 2)v_{x_{i}}^{2}}{V_{i}^{4}} \right]$$
(3.72)

$$\frac{\partial i_{y_{NL}}}{\partial v_{y}}\Big|_{i} = z_{NL_{i}}\left[-P_{L0_{i}}\left(\frac{V_{i}}{V_{0_{i}}}\right)^{\alpha_{L_{i}}}\frac{V_{i}^{2} + (\alpha_{L_{i}} - 2)v_{y_{i}}^{2}}{V_{i}^{4}} + Q_{L0_{i}}\left(\frac{V_{i}}{V_{0_{i}}}\right)^{\beta_{L_{i}}}\frac{(\beta_{L_{i}} - 2)v_{x_{i}}v_{y_{i}}}{V_{i}^{4}}\right]$$
(3.73)

Στην περίπτωση προσομοίωσης δικτύου με πολυωνυμικά φορτία, αρκεί να αντικατασταθούν η ενεργός  $P_{L_i}$  και η άεργος  $Q_{L_i}$  κατανάλωση συναρτήσει του μέτρου της τάσεως  $V_i$  του ζυγού i από τις (2.180) και (2.181) αντίστοιχα στην (3.62) και στη συνέχεια να υπολογιστούν εκ νέου οι μερικές παράγωγοι του πίνακα  $\left[\frac{\partial \mathbf{i}_{NL}}{\partial \mathbf{v}_N}\right]$ .

Επομένως, το γραμμικό σύστημα (3.64) καταλήγει στην εξής μορφή:

$$\mathbf{J}_{N}^{(j)} \left[ \mathbf{v}_{N}^{(j+1)} - \mathbf{v}_{N}^{(j)} \right] = -\mathbf{g}_{N}^{(j)} \quad j = 0, 1, 2, \dots$$
(3.74)

όπου:

$$\mathbf{J}_{N}^{(j)} = \mathbf{Y}_{SG} + \mathbf{Y}_{IM} + \left[\frac{\partial \mathbf{i}_{NL}}{\partial \mathbf{v}_{N}}\right]^{(j)} - \mathbf{Y}_{N}$$
(3.75)

$$\mathbf{g}_{N}^{(j)} = \left(\mathbf{Y}_{SG} + \mathbf{Y}_{IM} - \mathbf{Y}_{N}\right)\mathbf{v}_{N}^{(j)} + \mathbf{b}_{SG} + \mathbf{b}_{IM} + \mathbf{i}_{NL}(\mathbf{v}_{N}^{(j)}) - \mathbf{Y}_{NI}\mathbf{v}_{I}$$
(3.76)

Το παραπάνω γραμμικό σύστημα καταστρώνεται και επιλύεται σε κάθε χρονική στιγμή προσομοίωσης στο πρόγραμμα επίλυσης δικτύου. Ο αλγόριθμος προσομοίωσης στην περίπτωση διασυνδεδεμένων ΣΗΕ φαίνεται στο Σχ. 3.2.

Όσον αφορά την κατάστρωση του συστήματος (3.74)-(3.76), το πρόγραμμα επίλυσης των εξισώσεων του δικτύου εκτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

• Υπολογίζει τους πίνακες  $\mathbf{Y}_{SG}$ ,  $\mathbf{Y}_{IM}$  και τα διανύσματα  $\mathbf{b}_{SG}$ ,  $\mathbf{b}_{IM}$  σύμφωνα με τις επιμέρους εξόδους  $\mathbf{Y}_{SG,i}$ ,  $\mathbf{b}_{SG,i}$ ,  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{Y}_{IM,i}$ ,  $\mathbf{b}_{IM,i}$  της σύγχρονης ή ασύγχρονης μηχανής αντίστοιχα στον *i* ζυγό.

• Υπολογίζει τον πίνακα  $\left\lfloor \frac{\partial \mathbf{i}_{NL}}{\partial \mathbf{v}_N} \right\rfloor$  και το διάνυσμα  $\mathbf{i}_{NL}(\mathbf{v}_N^{(j)})$  αναφορικά με την έγχυση ρεύματος των

στατικών μη γραμμικών φορτίων.

 Κατασκευάζει το συνολικό πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου, ενημερώνοντας το μεταβαλλόμενο μέρος του σε συνδυασμό με το σταθερό μέρος, το οποίο έχει ήδη υπολογιστεί από το πρόγραμμα αρχικοποίησης.



Σχ. 3.2: Αλγόριθμος προσομοίωσης διασυνδεδεμένων δικτύων

Ακολούθως, το γραμμικό σύστημα (3.74) επιλύεται με τη μέθοδο της ευθείας και της αντιστρόφου αντικαταστάσεως [CH99], η οποία απαιτεί την τριγωνική παραγοντοποίηση του Ιακωβιανού πίνακα  $J_N$ . Σύμφωνα με τη θεωρία της τριγωνικής παραγοντοποίησης, κάθε αντιστρέψιμος πίνακας μπορεί να γραφεί σαν γινόμενο δύο τριγωνικών πινάκων L και U, όπου ο L είναι κάτω τριγωνικός πίνακας και ο U άνω τριγωνικός πίνακας. Σημειώνεται ότι η τριγωνική παραγοντοποίηση πραγματοποιείται με έτοιμη εντολή της MATLAB. Επίσης, σε κάθε χρονικό βήμα προσομοίωσης, η αρχική τιμή του διανύσματος των τάσεων  $\mathbf{v}_N^{(0)}$  για την έναρξη της επαναληπτικής αριθμητικής μεθόδου παραμένει σταθερή στην τιμή

του αρχικού σημείου ισορροπίας. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι σαν αρχική τιμή  $\mathbf{v}_N^{(0)}$  θα μπορούσε να επιλέγεται κάθε φορά η λύση του αμέσως προηγούμενου χρονικού βήματος. Εντούτοις, για τη συγκεκριμένη περίπτωση και από πλευράς προγραμματισμού, η υλοποίηση της επιλογής αυτής θα απαιτούσε τη χρήση πολύπλοκων προγραμματιστικών τεχνασμάτων, τα οποία προτιμήθηκε να αποφευχθούν.

Οι ανακυκλώσεις της αριθμητικής μεθόδου Newton-Raphson σταματάνε όταν:

- Το μεγαλύτερο κατ' απόλυτη τιμή στοιχείο του διανύσματος σφάλματος είναι μικρότερο από ένα όριο ανοχής, δηλαδή έχει επιτευχθεί ικανοποιητική σύγκλιση. Το όριο ανοχής καθορίζεται από το χρήστη.
- Ο αριθμός των ανακυκλώσεων ξεπεράσει ένα μέγιστο αριθμό, τον οποίο επίσης καθορίζει ο χρήστης. Στην περίπτωση αυτή, θεωρείται ότι οι αλγεβρικές εξισώσεις του δικτύου δεν συγκλίνουν και η προσομοίωση τερματίζεται πρόωρα.

Σύμφωνα με τη μέθοδο επίλυσης του γραμμικού συστήματος (3.74) (μέθοδος ευθείας και αντιστρόφου αντικαταστάσεως), ο Ιακωβιανός πίνακας  $J_N$  ανανεώνεται και άρα πρέπει να παραγοντοποιείται σε κάθε ανακύκλωση της επαναληπτικής μεθόδου Newton-Raphson. Ωστόσο, η τριγωνική παραγοντοποίηση του  $J_N$  είναι μία ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία. Οπότε, προκειμένου να εξοικονομηθεί υπολογιστικός χρόνος, ο Ιακωβιανός πίνακας ανανεώνεται κάθε φορά που θα συμπληρωθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός ανακυκλώσεων, ο οποίος καθορίζεται από το χρήστη.

Εάν το σύστημα που προσομοιώνεται δεν έχει μη γραμμικά φορτία, αλλά μόνο μηχανές επαγωγής και φορτία αγωγιμότητας (στατικά ή επαναφερόμενα), ο αλγόριθμος προσομοίωσης απλοποιείται αρκετά. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση αυτή το διάνυσμα  $\mathbf{i}_{NL}$  των εγχεόμενων ρευμάτων στο δίκτυο λόγω των μη γραμμικών φορτίων ισούται με το αντίστοιχο μηδενικό διάνυσμα ( $\mathbf{i}_{NL}=\mathbf{0}_{2N\times 1}$ ) και άρα το σύνολο (3.48) των 2N αλγεβρικών εξισώσεων του δικτύου δίνεται από τη σχέση (3.77), η οποία είναι γραμμική ως προς το άγνωστο διάνυσμα  $\mathbf{v}_N$  των τάσεων στους N ζυγούς του δικτύου.

$$\mathbf{g}_{N} = \mathbf{Y}_{SG} \mathbf{v}_{N} + \mathbf{b}_{SG} + \mathbf{Y}_{IM} \mathbf{v}_{N} + \mathbf{b}_{IM} - \mathbf{Y}_{N} \mathbf{v}_{N} - \mathbf{Y}_{NI} \mathbf{v}_{I} = \mathbf{0}_{2N \times 1}$$
(3.77)

Προκειμένου να επιλυθεί το σύστημα (3.77), γράφεται στην ακόλουθη μορφή:

$$(\mathbf{Y}_{SG} + \mathbf{Y}_{IM} - \mathbf{Y}_{N})\mathbf{v}_{N} = \mathbf{Y}_{NI}\mathbf{v}_{I} - \mathbf{b}_{SG} - \mathbf{b}_{IM}$$
(3.78)

Το σύστημα (3.78) επιλύεται αναλυτικά με τριγωνική παραγοντοποίηση του αθροίσματος  $\mathbf{Y}_{SG}+\mathbf{Y}_{IM}-\mathbf{Y}_N$ και στη συνέχεια εφαρμογή της ευθείας και αντιστρόφου αντικαταστάσεως. Σημειώνεται ότι η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται μόνο μία φορά σε κάθε χρονική στιγμή, με αποτέλεσμα τη σημαντική επιτάχυνση της προσομοίωσης συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση αριθμητικής επίλυσης των αλγεβρικών εξισώσεων.

Στην περίπτωση προσομοίωσης αυτόνομου δικτύου, η απουσία ζυγών διασύνδεσης (NI=0) έχει σαν αποτέλεσμα την απαλοιφή του όρου  $\mathbf{Y}_{NI}$ υ<sub>I</sub> από το πλήθος των αλγεβρικών περιορισμών του δικτύου, σύμφωνα με τον οποίο υπολογίζεται η επίδραση των εγχύσεων των ζυγών διασύνδεσης.

Επίσης, επειδή η συχνότητα του αυτόνομου συστήματος ω<sub>sys</sub> δεν παραμένει κατ' ανάγκη σταθερή στην ονομαστική της τιμή, μεταβάλλονται ευθέως ανάλογα με τη συχνότητα αυτή όλες οι επαγωγικές αντιδράσεις και οι χωρητικές αγωγιμότητες των επιμέρους διατάξεων. Επομένως, ο συνολικός πίνακας αγωγιμοτήτων θα πρέπει να υπολογίζεται εξ ολοκλήρου από το πρόγραμμα επίλυσης δικτύου σε κάθε χρονικό βήμα προσομοίωσης.

Στην εξεταζόμενη περίπτωση, ο αλγόριθμος προσομοίωσης εικονίζεται συνοπτικά στο Σχ. 3.3.



Σχ. 3.3: Αλγόριθμος προσομοίωσης αυτόνομων δικτύων

### 3.3.4 Εναλλακτική μέθοδος προσομοίωσης μη γραμμικών φορτίων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται μία εναλλακτική μέθοδος προσομοίωσης ενός δικτύου, το οποίο περιλαμβάνει μη γραμμικά εκθετικά φορτία. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, οι αλγεβρικοί περιορισμοί του δικτύου επιλύονται αναλυτικά και όχι αριθμητικά, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της συνολικής διαδικασίας προσομοίωσης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα όσα έχουν αναφερθεί έως τώρα, το μη γραμμικό σύστημα (3.63) των αλγεβρικών εξισώσεων ενός δικτύου με μη γραμμικά εκθετικά φορτία επιλύεται αριθμητικά με τη χρήση της επαναληπτικής μεθόδου Newton-Raphson. Σε περιπτώσεις μεσαίων ή μεγάλων δικτύων, καθώς επίσης και σε περιπτώσεις άστοχης επιλογής της αρχικής τιμής του διανύσματος των τάσεων  $\mathbf{v}_N^{(0)}$ , η προσομοίωση πραγματοποιείται με αρκετά βραδύ ρυθμό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η σύγκλιση της αριθμητικής μεθόδου σε κάθε χρονικό βήμα απαιτεί περισσότερες της μίας τριγωνικές παραγοντοποιήσεις ακολουθούμενες από ισάριθμες ή περισσότερες εφαρμογές της μεθόδου ευθείας και αντιστρόφου αντικαταστάσεως.

Μία εναλλακτική μέθοδος προσομοίωσης στηρίζεται στην αντικατάσταση των μη γραμμικών εκθετικών φορτίων από δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία, τα οποία επαναφέρουν την καταναλισκόμενη ισχύ τους στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Συγκεκριμένα, το εκθετικό φορτίο του ζυγού i (ενεργό και άεργο) αντικαθίσταται από ένα δυναμικό αυτορυθμιζόμενο φορτίο μεταβαλλόμενων αγωγιμοτήτων  $G_{RL_i}$  και  $B_{RL_i}$ , όμοιο με αυτό που έχει περιγραφεί στην ενότητα 2.8.2, δηλαδή:

$$T_{P_i} \dot{G}_{RL_i} = P_{L0_i} \left( \frac{V_i}{V_{0_i}} \right)^{a_{L_i}} - G_{RL_i} V_i^2$$
(3.79)

$$T_{Q_i} \dot{B}_{RL_i} = Q_{L0_i} \left(\frac{V_i}{V_{0_i}}\right)^{\beta_{L_i}} - B_{RL_i} V_i^2$$
(3.80)

Με την παραπάνω αντικατάσταση, αίρεται η μη γραμμικότητα των αλγεβρικών περιορισμών (3.63) και άρα η επίλυσή τους πραγματοποιείται με μία απλή αντιστροφή. Επομένως, σε κάθε χρονικό βήμα απαιτείται ο υπολογισμός μόνο μίας LU τριγωνικής παραγοντοποίησης και η εφαρμογή για μία μόνο φορά της μεθόδου της ευθείας και αντιστρόφου αντικαταστάσεως, με αποτέλεσμα τη σημαντική επιτάχυνση της προσομοίωσης.

Ωστόσο, στα μειονεκτήματα της προτεινόμενης εναλλακτικής μεθόδου προσομοίωσης θα πρέπει να αναφερθούν τα εξής:

- Η αύξηση του συνόλου των διαφορικών εξισώσεων λόγω των πρόσθετων δυναμικών αυτορυθμιζόμενων φορτίων.
- Η ανάγκη ενημέρωσης περισσότερων στοιχείων του συνολικού πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου σε κάθε χρονική στιγμή.
- Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευστάθειας μικρών διαταραχών στο εναλλακτικό σύστημα δεν μπορούν να γενικευθούν στο πραγματικό, καθώς μεταβάλλεται η τάξη του τελευταίου, λόγω των πρόσθετων υποθετικών μεταβλητών κατάστασης.

### 3.4 Επίλυση Προβλήματος Αρχικών Συνθηκών

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού των αρχικών τιμών για τις αλγεβρικές μεταβλητές και τις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται οι αρχικές τιμές για:

- Το διάνυσμα των προβολών των τάσεων των Ν ζυγών του δικτύου στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος.
- Τις μεταβλητές κατάστασης:
  - Των σύγχρονων γεννητριών συμπεριλαμβανομένων των διατάξεων ελέγχου και προστασίας τους, όπως ΑΡΤ, ΣΠΥ και σταθεροποιητές συστήματος ισχύος.
  - Των μηχανών επαγωγής.
  - Των στροβίλων και των αντίστοιχων ρυθμιστών στροφών.
  - Των ατμοπαραγωγών στις περιπτώσεις ατμοηλεκτρικών μονάδων.
- Τις τάσεις αναφοράς των ΑΡΤ των σύγχρονων γεννητριών.
- Τις ταχύτητες και τα φορτία αναφοράς των ρυθμιστών στροφών των στροβίλων.
- Τις μηχανικές ροπές στη σύγχρονη ταχύτητα των μηχανών επαγωγής.

Η γωνιακή συχνότητας  $ω_{sys}$  του συστήματος στο αρχικό σημείο λειτουργίας θεωρείται ίση με την ονομαστική της τιμή, δηλαδή:

$$\lambda_{\omega} = 1 \tag{3.81}$$

#### 3.4.1 Αρχική ροή φορτίου

Η διαδικασία εύρεσης αρχικών τιμών ξεκινάει με την επίλυση ενός προβλήματος ροής φορτίου. Κατά την επίλυση του αρχικού προβλήματος ροής ισχύος, το συνολικό ενεργό  $P_{L_i}$  και άεργο  $Q_{L_i}$  φορτίο κάθε ζυγού *i* θεωρείται ότι είναι σταθερό και ανεξάρτητο της τάσης. Παραδεχόμαστε δηλαδή ότι στο αρχικό σημείο λειτουργίας γνωρίζουμε ακριβώς την καταναλισκόμενη ισχύ κάθε ζυγού. Επίσης, εάν στον *i* ζυγό του δικτύου είναι συνδεδεμένη και σύγχρονη γεννήτρια (εκτός δηλαδή κάποιου στατικού ή δυναμικού φορτίου), τότε θεωρούνται επιπλέον γνωστά η ενεργός παραγωγή  $P_{G_i}$  της γεννήτριας και το

μέτρο της τάσεως V<sub>i</sub> του υπόψη ζυγού.

Στις περιπτώσεις διασυνδεδεμένων συστημάτων, το διάνυσμα των προβολών των τάσεων των ζυγών διασύνδεσης στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος είναι προκαθορισμένο και σταθερό σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Αντίθετα, στην περίπτωση αρχικοποίησης αυτόνομου δικτύου επιλέγεται ένας ζυγός με σύγχρονη γεννήτρια προκειμένου να μετατραπεί σε ζυγό ταλάντωσης μόνο κατά το στάδιο κατάστρωσης των εξισώσεων του αρχικού προβλήματος ροής φορτίου. Στο ζυγό αυτό θεωρούνται γνωστά το μέτρο και η γωνία της τάσης, ενώ η ενεργός παραγωγή της γεννήτριας μετατρέπεται σε άγνωστο μέγεθος, το οποίο θα προκύψει από την επίλυση του θεωρούμενου προβλήματος.

Στη γενική περίπτωση, το συνολικό φορτίο του ζυγού *i* αποτελείται από μία μηχανή επαγωγής, ένα στατικό εκθετικό φορτίο και ένα δυναμικό αυτορυθμιζόμενο φορτίο. Αναφορικά με τις καταναλώσεις των φορτίων του συστήματος στο αρχικό λειτουργικό σημείο, τα δεδομένα εισόδου είναι:

- Η ενεργός ισχύς P<sub>M</sub>, που απορροφά η μηχανή επαγωγής (σύμβαση κινητήρα).
- Η ενεργός  $P_{NL_i}$  και η άεργος  $Q_{NL_i}$  ισχύς που καταναλώνει το στατικό εκθετικό φορτίο.

Η ενεργός  $P_{RL_i}$  και η άεργος  $Q_{RL_i}$  κατανάλωση του δυναμικού αυτορυθμιζόμενου φορτίου υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$P_{RL_i} = P_{L_i} - P_{IM_i} - P_{NL_i}$$
(3.82)

$$Q_{RL_i} = Q_{L_i} - Q_{IM_i} - Q_{NL_i}$$
(3.83)

όπου η άεργος ισχύς  $Q_{M_i}$  που απορροφά η μηχανή επαγωγής στο αρχικό σημείο λειτουργίας θα υπολογιστεί στη συνέχεια.

Μετά την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου, είναι γνωστές οι προβολές των τάσεων  $v_{x_i}$ ,  $v_{y_i}$ όλων των ζυγών του δικτύου στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy.

#### 3.4.2 Αρχικοποίηση μηχανών επαγωγής

Εάν υπάρχει μηχανή επαγωγής στο ζυγό *i*, η αρχική τιμή της ολίσθησης *s<sub>i</sub>* υπολογίζεται αναλυτικά από την επίλυση της ακόλουθης δευτεροβάθμιας εξίσωσης [RVO02]:

$$\alpha_{IM_i} (r_{r_i} / s_i)^2 + \beta_{IM_i} (r_{r_i} / s_i) + \gamma_{IM_i} = 0$$
(3.84)

της οποίας οι συντελεστές δίνονται από τις σχέσεις:

$$\alpha_{IM_{i}} = P_{IM_{i}} \left[ r_{s_{i}}^{2} + (X_{IM_{i}} + X_{Is_{i}})^{2} \right] - r_{s_{i}} V_{i}^{2}$$
(3.85)

$$\beta_{IM_i} = 2r_{s_i} X_{M_i}^2 P_{IM_i} - X_{M_i}^2 V_i^2$$
(3.86)

$$\gamma_{IM_{i}} = P_{IM_{i}} \left[ r_{s_{i}}^{2} (X_{M_{i}} + X_{lr_{i}})^{2} + \delta_{IM_{i}}^{2} \right] - r_{s_{i}} (X_{M_{i}} + X_{lr_{i}})^{2} V_{i}^{2}$$
(3.87)

$$\delta_{IM_{i}} = X_{Is_{i}} X_{M_{i}} + X_{M_{i}} X_{Ir_{i}} + X_{Ir_{i}} X_{Is_{i}}$$
(3.88)

Από τις δύο λύσεις του τριωνύμου (3.84), αποδεκτή είναι αυτή η οποία αντιστοιχεί στη μικρότερη κατ' απόλυτο τιμή ολίσθηση s<sub>i</sub>.

$$s_i = \frac{\omega_{s_i} - \omega_{r_i}}{\omega_b} \tag{3.89}$$

Στο αρχικό σημείο λειτουργίας, οι αλγεβρικές εξισώσεις (2.109)-(2.110) του στάτη και οι διαφορικές εξισώσεις (2.111)-(2.112) του δρομέα της *i* μηχανής επαγωγής παίρνουν τη μορφή των ακόλουθων σχέσεων:

$$v_{ds_i} = r_{s_i} i_{ds_i} - \psi_{qs_i} \tag{3.90}$$

$$v_{qs_i} = r_{s_i} i_{qs_i} + \psi_{ds_i} \tag{3.91}$$

$$0 = r_{r_i} i_{dr_i} - s_i \psi_{qr_i}$$
(3.92)

$$0 = r_{r_i} i_{qr_i} + s_i \psi_{dr_i}$$
(3.93)

Ακολούθως, οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο του στάτη και του δρομέα αντικαθίστανται βάσει των (2.113)-(2.116) στις σχέσεις (3.90)-(3.93), οπότε προκύπτει το παρακάτω σύνολο εξισώσεων:

$$r_{s_i}i_{ds_i} - X_{ss_i}i_{qs_i} - X_{M_i}i_{qr_i} = v_{ds_i}$$
(3.94)

$$r_{s_i}i_{qs_i} + X_{ss_i}i_{ds_i} + X_{M_i}i_{dr_i} = v_{qs_i}$$
(3.95)

$$r_{r_i}i_{dr_i} - s_i X_{M_i}i_{qs_i} - s_i X_{rr_i}i_{qr_i} = 0 aga{3.96}$$

$$r_{r_i}i_{qr_i} + s_i X_{M_i}i_{ds_i} + s_i X_{rr_i}i_{dr_i} = 0$$
(3.97)

Οι προβολές των ρευμάτων του στάτη και του δρομέα στο πλαίσιο αναφοράς *d<sub>i</sub>q<sub>i</sub>* της ασύγχρονης μηχανής υπολογίζονται τελικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} i_{ds_i} \\ i_{qs_i} \\ i_{dr_i} \\ i_{qr_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{s_i} & -X_{ss_i} & 0 & -X_{M_i} \\ X_{ss_i} & r_{s_i} & X_{M_i} & 0 \\ 0 & -s_i X_{M_i} & r_{r_i} & -s_i X_{rr_i} \\ s_i X_{M_i} & 0 & s_i X_{rr_i} & r_{r_i} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_{ds_i} \\ v_{qs_i} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$
(3.98)

Οι αρχικές τιμές των μεταβατικών ΗΕΔ κατά τον ευθύ και τον εγκάρσιο μαγνητικό άξονα της μηχανής προκύπτουν από την:

$$\begin{bmatrix} E'_{d_i} \\ E'_{q_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ds_i} \\ v_{qs_i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{s_i} & -X'_{s_i} \\ X'_{s_i} & r_{s_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds_i} \\ i_{qs_i} \end{bmatrix}$$
(3.99)

Η αρχική ηλεκτρομαγνητική ροπή  $T_{e_i}$  της μηχανής επαγωγής στο ζυγό *i* δίνεται από την (2.136). Επειδή στη μόνιμη κατάσταση, η ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι ίση με τη ροπή  $T_{m_i}$  του μηχανικού φορτίου, η μηχανική ροπή  $T_{m_0}$  στις σύγχρονες στροφές ισούται βάσει της (2.143) με:

$$T_{m0_{i}} = \frac{T_{e_{i}}}{\left[\left(1 - \alpha_{m_{i}}\right) + \alpha_{m_{i}}\left(\omega_{r_{i}}/\omega_{b}\right)^{m_{i}}\right]}$$
(3.100)

Η άεργος ισχύς που απορροφά η μηχανή επαγωγής του *i* ζυγού στο αρχικό σημείο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{IM_i} = v_{ds_i} i_{ds_i} - v_{qs_i} i_{qs_i}$$
(3.101)

Έχοντας γνωστή την τιμή της αέργου απορρόφησης  $Q_{IM_i}$ , υπολογίζεται από την (3.83) η αρχική κατανάλωση  $Q_{RL_i}$  της αέργου συνιστώσας του δυναμικού αυτορυθμιζόμενου φορτίου του ζυγού *i*.

#### 3.4.3 Αρχικοποίηση δυναμικών αυτορυθμιζόμενων φορτίων

Οι αρχικές τιμές των αγωγιμοτήτων  $G_{RL_i}$  και  $B_{RL_i}$  του δυναμικού αυτορυθμιζόμενου φορτίου στο ζυγό *i*, υπολογίζονται από τη συνθήκη ισορροπίας των διαφορικών εξισώσεων (2.186) και (2.187) αντίστοιχα, δηλαδή:

$$G_{RL_i} = P_{RL_i} / V_i^2$$
 (3.102)

$$B_{RL_i} = -Q_{RL_i} / V_i^2$$
 (3.103)

#### 3.4.4 Αρχικοποίηση σύγχρονων γεννητριών

Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού αρχικών τιμών για τις μεταβλητές κατάστασης και τις μεταβλητές εισόδου των σύγχρονων γεννητριών, συμπεριλαμβανομένων των διατάξεων ελέγχου και προστασίας, καθώς επίσης και των αντιστοίχων στροβίλων.

Εάν στο ζυγό *i* του δικτύου είναι συνδεδεμένη σύγχρονη γεννήτρια, τότε από την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου στο αρχικό σημείο λειτουργίας υπολογίζονται, εκτός του διανύσματος της τερματικής της τάσης ( $V_i = v_{x_i} + j v_{y_i}$ ), η ενεργός  $P_{G_i}$  και η άεργος  $Q_{G_i}$  παραγωγή της.

Καταρχήν, θεωρείται ότι η αρχική ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας είναι ίση με την ονομαστική της τιμή, δηλαδή:

$$\omega_{r_i} = \omega_b \tag{3.104}$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις (2.56) και (2.57), οι αρχικές προβολές του εξερχόμενου ρεύματος στάτη της εξεταζόμενης γεννήτριας στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$i_{x_i} = \frac{P_{G_i} v_{x_i} + Q_{G_i} v_{y_i}}{V_i^2}$$
(3.105)

$$i_{y_i} = \frac{P_{G_i} v_{y_i} - Q_{G_i} v_{x_i}}{V_i^2}$$
(3.106)

Στο θεωρούμενο σημείο λειτουργίας, η αλγεβρική εξίσωση (2.13) στο τύλιγμα d του στάτη έχει την εξής μορφή (δεδομένου ότι  $\lambda_{\omega}=1$ ):

$$v_{d_i} = -r_{s_i} i_{d_i} - \psi_{q_i} \tag{3.107}$$

Επειδή στη μόνιμη κατάσταση, το τύλιγμα απόσβεσης στον εγκάρσιο μαγνητικό άξονα  $q_i$  δεν διαρρέεται από ρεύμα ( $i_{kq_i} = 0$ ), η αρχική πεπλεγμένη ροή ανά δευτερόλεπτο  $\psi_{q_i}$  του τυλίγματος  $\underline{q_i}$  του στάτη ισούται βάσει της (2.17) με:

$$\psi_{q_i} = -X_{q_i} i_{q_i} \tag{3.108}$$

Αντικαθιστώντας την (3.108) στην (3.107), προκύπτει:

$$p_{d_i} = -r_{s_i} i_{d_i} + X_{q_i} i_{q_i}$$
(3.109)

Ακολούθως, τα μεγέθη της (3.109) ανάγονται στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy χρησιμοποιώντας τον πίνακα μετασχηματισμού  $\mathbf{T}_i$ , ο οποίος ορίζεται συναρτήσει της γωνίας  $\delta_i$  από την (2.49), οπότε:

$$v_{x_i}\sin\delta_i - v_{y_i}\cos\delta_i = -r_{s_i}(i_{x_i}\sin\delta_i - i_{y_i}\cos\delta_i) + X_{q_i}(i_{x_i}\cos\delta_i + i_{y_i}\sin\delta_i)$$
(3.110)

Από την επίλυση της παραπάνω τριγωνομετρικής εξίσωσης ως προς την αρχική τιμή της γωνίας δ<sub>i</sub> προκύπτει τελικά:

$$\delta_{i} = \tan^{-1} \left( \frac{v_{y_{i}} + r_{s_{i}} i_{y_{i}} + X_{q_{i}} i_{x_{i}}}{v_{x_{i}} + r_{s_{i}} i_{x_{i}} - X_{q_{i}} i_{y_{i}}} \right)$$
(3.111)

όπου  $-\pi < \delta_i < \pi$ . Σημειώνεται ότι εάν ο παρανομαστής της (3.111) είναι αρνητικός, προστίθεται ή αφαιρείται γωνία  $\pi$  rad κατά τον υπολογισμό της  $\delta_i$ .

Έχοντας γνωστές τις αρχικές τιμές της γωνίας  $\delta_i$  και των προβολών της τερματικής τάσεως  $(v_{x_i}, v_{y_i})$  και του εξερχόμενου ρεύματος στάτη  $(i_{x_i}, i_{y_i})$  στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy, υπολογίζονται οι αρχικές προβολές των αντιστοίχων μεγεθών  $(v_{d_i}, v_{q_i}, i_{d_i}$  και  $i_{q_i})$  στο πλαίσιο αναφοράς  $d_iq_i$ , με τη βοήθεια του πίνακα μετασχηματισμού  $\mathbf{T}_i$  (βλ. ενότητα 2.1.5).

Οι αρχικές τιμές των μεταβατικών ΗΕΔ κατά τον ευθύ  $d_i$  και τον εγκάρσιο  $q_i$  άξονα υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη τις αλγεβρικές εξισώσεις (2.32) και (2.33) του στάτη, δηλαδή:

$$E'_{d_i} = v_{d_i} + r_{s_i} i_{d_i} - X'_{q_i} i_{q_i}$$
(3.112)

$$E'_{q_i} = v_{q_i} + r_{s_i} i_{q_i} + X'_{d_i} i_{d_i}$$
(3.113)

Η τάση διεγέρσεως  $E_{f_i}$  της σύγχρονης γεννήτριας υπολογίζεται από τη συνθήκη ισορροπίας της διαφορικής εξίσωσης (2.41) του τυλίγματος διέγερσης, οπότε:

$$E_{f_i} = E'_{q_i} + (X_{d_i} - X'_{d_i})i_{d_i}$$
(3.114)

Στο αρχικό σημείο μονίμου καταστάσεως, η μηχανική ροπή εισόδου  $T_{m_i}$  της γεννήτριας ισούται με την ηλεκτρομαγνητική ροπή  $T_{e_i}$ , ή ισοδύναμα:

$$T_{m_i} = E'_{d_i}i_{d_i} + E'_{q_i}i_{q_i} + (X'_{q_i} - X'_{d_i})i_{d_i}i_{q_i}$$
(3.115)

#### 3.4.5 Αρχικοποίηση αυτόματων ρυθμιστών τάσης

Στον Πίνακα 3.3 φαίνονται οι αρχικές τιμές της τάσης αναφοράς  $V_{ref_i}$  και των μεταβλητών κατάστασης για κάθε μοντέλο APT που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 2. Η αρχική τάση διέγερσης  $E_{f_i}$  έχει ήδη υπολογιστεί κατά τη διαδικασία αρχικοποίησης της σύγχρονης γεννήτριας του ζυγού *i*. Η αρχικοποίηση κάθε μοντέλου APT προκύπτει από τις συνθήκες ισορροπίας των αντίστοιχων διαφορικών εξισώσεων, λαμβάνοντας υπόψη ότι στο αρχικό σημείο λειτουργίας τα πρόσθετα σήματα στον κύριο αθροιστή εισόδου του APT είναι μηδενικά ( $u_{AVR_i} = 0$ ).

Υπενθυμίζεται επίσης ότι το σήμα τάσης  $V_{C_i}$  προκύπτει από το μέτρο της τερματικής τάσης  $V_i$  της γεννήτριας στο αρχικό λειτουργικό σημείο.

•	
Τύπος ΑΡΤ	Αρχικές Τιμές Μεγεθών
DC1-IEEE	$V_{ref_i} = V_{C_i} + \frac{S_{E_i}(E_{f_i}) + K_{E_i}}{K_{A_i}}E_{f_i} \qquad x_{ll_i} = \frac{T_{B_i} - T_{C_i}}{T_{B_i}}\frac{S_{E_i}(E_{f_i}) + K_{E_i}}{K_{A_i}}E_{f_i}$
	$V_{R_i} = [S_{E_i}(E_{f_i}) + K_{E_i}]E_{f_i}  x_{sf_i} = E_{f_i}$
AC4-IEEE	$V_{ref_i} = V_{C_i} + \frac{E_{f_i}}{K_{A_i}}$ $x_{ll_i} = \frac{T_{B_i} - T_{C_i}}{T_{B_i}} \frac{E_{f_i}}{K_{A_i}}$
ST1-IEEE	$V_{ref_{i}} = V_{C_{i}} + \frac{E_{f_{i}}}{K_{A_{i}}} \qquad x_{ll_{i}} = \frac{T_{B_{i}} - T_{C_{i}}}{T_{B_{i}}} \frac{E_{f_{i}}}{K_{A_{i}}} \qquad x_{sf_{i}} = E_{f_{i}}$

Πίνακας 3.3: Αρχικοποίηση μεγεθών ΑΡΤ

#### 3.4.6 Αρχικοποίηση λοιπών διατάξεων σύγχρονων γεννητριών

Εάν η σύγχρονη γεννήτρια που συνδέεται στο ζυγό *i* είναι εξοπλισμένη με ΣΠΥ αθροιστικού τύπου, τότε στο αρχικό λειτουργικό σημείο οι μεταβλητές κατάστασης αυτού θα έχουν τις εξής τιμές:

$$x_{t_i} = -K_{1_i} \tag{3.116}$$

$$x_{en_i} = -T_{en_i} \tag{3.117}$$

$$I_{ref_i} = I_{fd_i}^{\max}$$
(3.118)

$$x_{OEL_i} = 0 \tag{3.119}$$

Εάν το εξεταζόμενο ΣΠΥ είναι διακοπτικού τύπου, η αρχική τιμή της πρόσθετης μεταβλητής κατάστασης είναι μηδενική, δηλαδή:

$$\Delta E_{f_i}^{OEL} = 0 \tag{3.120}$$

Στην περίπτωση κατά την οποία η θεωρούμενη γεννήτρια διαθέτει σταθεροποιητή συστήματος ισχύος, τότε βάσει του μοντέλου που αναπτύχθηκε στην ενότητα 2.4, και οι τρεις μεταβλητές κατάστασης της διάταξης αυτής παίρνουν μηδενικές τιμές στο αρχικό σημείο λειτουργίας, δηλαδή:

$$x_{W_i}^{PSS} = x_{1_i}^{PSS} = x_{2_i}^{PSS} = 0$$
(3.121)

Οι τιμές αυτές υπολογίζονται από τις συνθήκες ισορροπίας των διαφορικών εξισώσεων (2.98)-(2.100), λαμβάνοντας υπόψη ότι στο αρχικό σημείο λειτουργίας η γωνιακή ταχύτητα  $\omega_{r_i}$  της γεννήτριας του ζυγού *i* ισούται με την ταχύτητα αναφοράς  $\omega_{sys}$ , δηλαδή:

$$\omega_{r_i} = \omega_{sys} = \omega_b \tag{3.122}$$

#### 3.4.7 Αρχικοποίηση κινητήριων μηχανών και ρυθμιστών στροφών

Εάν η σύγχρονη γεννήτρια του *i* ζυγού κινείται από ατμοστρόβιλο, έχει ήδη υπολογιστεί από την αρχικοποίηση της μηχανής η αρχική ανά μονάδα τιμή της μηχανικής ροπής  $T_{m_i}$  εξόδου του ατμοστροβίλου ανηγμένη στη βάση του συστήματος. Από τις συνθήκες ισορροπίας των διαφορικών εξισώσεων (2.158)-(2.160) του ατμοστροβίλου, προκύπτει ότι οι αρχικές τιμές της εισόδου ( $w_{S_i}$ ) και των μεταβλητών κατάστασης ( $w_{CH_i}$ ,  $w_{RH_i}$  και  $w_{CO_i}$ ) είναι ίσες μεταξύ τους, δηλαδή:

$$w_{S_i} = w_{CH_i} = w_{RH_i} = w_{CO_i} \tag{3.123}$$

Στη συνέχεια, αντικαθιστώντας την (3.123) στην (2.161) προκύπτει ότι:

$$w_{S_i} = w_{CH_i} = w_{RH_i} = w_{CO_i} = T_{m_i} \frac{S_b}{P_{nom_i}}$$
(3.124)

Αναφορικά με τον υπολογισμό αρχικών συνθηκών για το ρυθμιστή στροφών του ατμοστροβίλου, χρησιμοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας των διαφορικών εξισώσεων (2.162) και (2.163), ενώ ταυτόχρονα λαμβάνεται υπόψη η σχέση (3.122) για τη γωνιακή ταχύτητα  $\omega_{r_i}$  της γεννήτριας. Επομένως, οι αρχικές τιμές των μεταβλητών κατάστασης του εξεταζόμενου ρυθμιστή στροφών υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$x_{SR}^{SU} = 0$$
 (3.125)

$$g_i = P_{0_i} \tag{3.126}$$

Το αρχικό φορτίο αναφοράς  $P_{0_i}$  του ρυθμιστή στροφών είναι ίσο με την αρχική ανά μονάδα μηχανική ισχύ εξόδου του ατμοστροβίλου, ανηγμένη στην ονομαστική του ισχύ, δηλαδή:

$$P_{0_{i}} = T_{m_{i}} \frac{S_{b}}{P_{nom_{i}}}$$
(3.127)

Εάν συμπεριληφθεί και ο ατμοπαραγωγός στην παράσταση του ατμοηλεκτρικού σταθμού, τότε η αρχικοποίησή του προϋποθέτει τον υπολογισμό αρχικών τιμών για τις μεταβλητές κατάστασης αυτού, καθώς επίσης και για την πίεση αναφοράς  $P_{r_i}^{ref}$  της δικλείδας ατμού στην είσοδο του στροβίλου. Στην περίπτωση αυτή, ο υπολογισμός αρχικών συνθηκών πραγματοποιείται με τη βοήθεια του συνόλου των διαφορικών και αλγεβρικών σχέσεων (2.144)-(2.149). Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες ισορροπίας των διαφορικών εξισώσεων (2.144)-(2.146), όλες οι εξισώσεις του τελευταίου συνόλου μετατρέπονται σε αλγεβρικές, στις οποίες εκτελώντας τις πράξεις, προκύπτουν οι ακόλουθες αρχικές τιμές:

$$w_{D_i} = T_{m_i} \frac{S_b}{P_{nom_i}}$$
(3.128)

$$x_{PI_{i}}^{SU} = T_{m_{i}} \frac{S_{b}}{P_{nom_{i}}}$$
(3.129)

$$P_{d_i} = 1 + K_{SH_i} \left( T_{m_i} \frac{S_b}{P_{nom_i}} \right)^2$$
(3.130)

$$P_{r_i}^{ref} = 1$$
 (3.131)

Επίσης, εάν η γεννήτρια του ζυγού *i* κινείται από ντηζελομηχανή, η αρχική ανά μονάδα ισχύς αναφοράς  $P_{0_i}$  στην είσοδό του προκύπτει, βάσει των (2.164), (2.165) και (3.122), ίση με την αρχική μηχανική ροπή στον άξονα της γεννήτριας ανηγμένη στη βάση της μηχανής, δηλαδή:

$$P_{0_i} = T_{m_i} \frac{S_b}{P_{nom_i}}$$
(3.132)

Στην περίπτωση κατά την οποία η σύγχρονη γεννήτρια του ζυγού *i* ανήκει σε υδροηλεκτρική μονάδα, το πρόβλημα αρχικοποίησης συνίσταται στον υπολογισμό αρχικών τιμών για την παροχή νερού  $Q_i$  προς το στρόβιλο, για το άνοιγμα  $G_i$  της υδατοθυρίδας, καθώς επίσης και για τη μεταβλητή κατάστασης  $x_{ir}^{HU}$  που σχετίζεται με τη βαθμίδα μεταβατικού στατισμού του ρυθμιστή στροφών της μονάδας.

Επειδή στο αρχικό σημείο λειτουργίας, η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας είναι ίση με την ονομαστική της τιμή, υπολογίζεται η αρχική μηχανική ισχύς εξόδου  $P_{M_i}$  του υδροστροβίλου σε MW από τη σχέση:

$$P_{M_i} = T_{m_i} S_b \tag{3.133}$$

Εξισώνοντας τα δεξιά μέλη των σχέσεων (2.166) και (3.133) και κάνοντας την παραδοχή ότι η αρχική παροχή νερού  $Q_i$  προς το στρόβιλο είναι διάφορη του μηδενός ( $Q_i \neq 0$ ), προκύπτει η αρχική τιμή του καθαρού υδραυλικού ύψους  $H_T$  (σε m):

$$H_{T_i} = \frac{T_{m_i} S_b}{n_i \gamma Q_i}$$
(3.134)

Λαμβάνοντας υπόψη τη συνθήκη ισορροπίας της διαφορικής εξίσωσης (2.167) επιταχύνσεως της υδάτινης στήλης στον αγωγό προσαγωγής και αντικαθιστώντας το καθαρό υδραυλικό ύψος  $H_{T_i}$  από την (3.134), προκύπτει η ακόλουθη τριτοβάθμια εξίσωση με άγνωστο την αρχική παροχή  $Q_i$ :

$$Q_{i}^{3} - \frac{H_{R_{i}}}{F_{i}}Q_{i} + \frac{T_{m_{i}}S_{b}}{n_{i}\gamma F_{i}} = 0$$
(3.135)

Για τη λύση της (3.135) χρησιμοποιείται η αριθμητική μέθοδος Newton-Raphson. Αρχική τιμή για την έναρξη της επαναληπτικής διαδικασίας επιλέγεται η ονομαστική παροχή  $Q_{nom_i}$ .

Για τον υπολογισμό του αρχικού ανοίγματος  $G_{0i}$  της υδατοθυρίδας, διαιρούνται κατά μέλη οι δύο σχέσεις που εξάγονται από την (2.174) και αναφέρονται στο αρχικό και στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας, ώστε να εξαλειφθεί η σταθερά αναλογίας  $\kappa_i$ , οπότε προκύπτει:

$$G_{0i} = \frac{Q_i}{Q_{nom_i}} \sqrt{\frac{H_{T_{nom_i}}}{H_{T_i}}} G_{nom_i}$$
(3.136)

Τέλος, η αρχική τιμή της μεταβλητής κατάστασης  $x_{\mu_i}^{HU}$  που σχετίζεται με τη βαθμίδα μεταβατικού στατισμού του ρυθμιστή στροφών του υδροστροβίλου είναι ίση με:

$$x_{tr_i}^{HU} = \delta_{tr_i} G_{0i}$$
 (3.137)

# 3.5 Παράδειγμα Παράστασης ΣΗΕ στο WHSSP

Στην ενότητα αυτή χρησιμοποιείται ένα μικρό αυτόνομο δίκτυο εννέα ζυγών ως παράδειγμα για τον τρόπο παράστασης ενός ΣΗΕ στο λογισμικό πακέτο WHSSP. Το συνολικό φορτίο του δικτύου αυτού ικανοποιείται από συμβατικές μονάδες παραγωγής, καθώς επίσης και από ένα αιολικό πάρκο.

### 3.5.1 Περιγραφή αυτόνομου δικτύου 9 ζυγών

Στο Σχ. 3.4 φαίνεται το ισοδύναμο μονογραμμικό διάγραμμα του εξεταζόμενου αυτόνομου δικτύου.



Σχ. 3.4: Αυτόνομο δίκτυο 9 ζυγών

Σύμφωνα με το Σχ. 3.4, διακρίνονται δύο συμβατικές μονάδες παραγωγής, μία μονάδα Ντήζελ στο ζυγό 1 ονομαστικής ισχύος 4 MVA και μία υδροηλεκτρική μονάδα στο ζυγό 2 ονομαστικής ισχύος 1.25 MVA. Οι δύο μονάδες είναι εξοπλισμένες με σύγχρονες γεννήτριες, οι οποίες παριστάνονται από το μοντέλο τέταρτης τάξης, ενώ τα δεδομένα τους φαίνονται στο Πίνακα 3.4.

Γεννήτρια	S <sub>nom</sub> (MVA)	<b>R</b> <sub>s</sub> (αμ)	$X_{ls}$ ( $\alpha\mu$ )	$X_d$ ( $\alpha\mu$ )	$X_q$ $(\alpha\mu)$	$\dot{X_d}$ $(\alpha\mu)$	$\dot{X_q}$ $(\alpha\mu)$	$T_{d0}$ (s)	$T_{q0}$ (S)	<i>H</i> (s)	D
Μονάδα Ντήζελ	4.00	0.002	0.10	1.40	1.30	0.55	0.70	7.0	0.50	6.0	4.0
Υδροηλεκτρική Μονάδα	1.25	0.005	0.10	1.10	0.70	0.67	0.62	5.0	0.25	6.4	8.0

Πίνακας 3.4: Δεδομένα σύγχρονων γεννητριών

Η τερματική τάση κάθε γεννήτριας ελέγχεται από APT τύπου AC4 κατά IEEE. Για την προστασία του τυλίγματος διέγερσης, οι γεννήτριες είναι εξοπλισμένες με αθροιστικού τύπου ΣΠΥ, τα οποία ενεργοποιούνται με σταθερή χρονική καθυστέρηση, ενώ διαθέτουν αναλογική μονάδα ελέγχου. Τα δεδομένα των APT και των ΣΠΥ φαίνονται στον Πίνακα 3.5.

		AP	Т		ΣΠΥ			
Γεννήτρια	K <sub>AVR</sub>	$T_{AVR}$ (s)	<i>T<sub>C</sub></i> (s)	<b>T</b> <sub>B</sub> (s)	<i>I<sub>lim</sub></i> (αμ)	T <sub>OEL</sub> (s)	K <sub>P</sub>	
Μονάδα Ντήζελ	250	0.1	1.0	12.0	2.12	10.0	10.0	
Υδροηλεκτρική Μονάδα	250	0.0	1.0	12.0	1.95	10.0	10.0	

Πίνακας 3.5: Δεδομένα ΑΡΤ και ΣΠΥ σύγχρονων γεννητριών

Οι δύο μονάδες συνδέονται στο τοπικό φορτίο μέσω μετασχηματιστών ανύψωσης, διπλών γραμμών διανομής, και ενός μετασχηματιστή διανομής. Οι μετασχηματιστές ανύψωσης των γεννητριών έχουν σταθερές μη ονομαστικές λήψεις, σε αντίθεση με το μετασχηματιστή διανομής, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με μηχανισμό ΣΑΤΥΦ, του οποίου τα δεδομένα φαίνονται στον Πίνακα 3.6.

Το τοπικό φορτίο θεωρείται συγκεντρωμένο στο ζυγό 4 και χωρισμένο σε δύο ίσες συνιστώσες, μία στατική και μία δυναμική. Η στατική συνιστώσα είναι ένα φορτίο σταθερής αγωγιμότητας, το οποίο

καταναλώνει 2.25 MW υπό ονομαστική τάση. Το δυναμικό φορτίο είναι ένας βιομηχανικός κινητήρας επαγωγής ονομαστικής ισχύος 3 MVA, ο οποίος κινεί ένα μηχανικό φορτίο σταθερής ροπής. Στο αρχικό σημείο λειτουργίας, ο κινητήρας απορροφά ενεργό ισχύ ίση με 2.25 MW.

Ζυγός μεταβλητής λήψης	Ζυγός αγωγιμότητας	Ρυθμιζόμενος ζυγός	$V_{max}$ ( $\alpha\mu$ )	$V_{\min}$ ( $\alpha\mu$ )	<i>r</i> <sub>max</sub>	<b>r</b> <sub>min</sub>	Δr	<i>T</i> <sub>D0</sub> (s)	<b>T</b> <sub>D1</sub> (s)	
8	4	4	1.02	0.98	1.075	0.875	0.00625	30	10	

Πίνακας 3.6: Δεδομένα μηχανισμού ΣΑΤΥΦ

Εκτός από τους συμβατικούς σταθμούς, το τοπικό φορτίο τροφοδοτείται και από ένα αιολικό πάρκο, μέσω δύο παράλληλων γραμμών διανομής και ενός μετασχηματιστή ανύψωσης με σταθερό μη ονομαστικό λόγο μετασχηματισμού. Το αιολικό πάρκο παριστάνεται από μία ισοδύναμη ασύγχρονη γεννήτρια ονομαστικής ισχύος 2 MVA. Στον τερματικό ζυγό του αιολικού πάρκου (ζυγός 3) έχει εγκατασταθεί ένα σύστημα αυτόματου μηχανισμού ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών, με σκοπό τη διατήρηση του συντελεστή ισχύος στο ζυγό σε τιμές άνω του 0.98 (επαγωγικού).

Πίνακας 3.7: Δεδομένα μηχανών επαγωγής (αμ στα βασικά μεγέθη κάθε μηχανής)

Μηχανή Επαγωγής	<b>S</b> <sub>nom</sub> (MVA)	<b>R</b> s (αμ)	$X_{ls}$ ( $\alpha\mu$ )	$X_m$ $(\alpha\mu)$	<b>R</b> <sub>r</sub> (αμ)	$X_{lr}$ ( $\alpha\mu$ )	<b>H</b> (s)
Ανεμογεννήτρια	2.0	0.013	0.067	3.8	0.01	0.17	1.5
Κινητήρας	3.0	0.013	0.067	3.8	0.01	0.17	1.5

Σημειώνεται ότι τόσο ο κινητήρας επαγωγής του φορτίου όσο και η ασύγχρονη ανεμογεννήτρια του πάρκου παριστάνονται από το μοντέλο τρίτης τάξης μηχανής επαγωγής, ενώ τα δεδομένα τους φαίνονται στον Πίνακα 3.7.

Επίσης, τα δεδομένα των γραμμών και των μετασχηματιστών φαίνονται στον Πίνακα 3.8.

Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Παράλληλο κύκλωμα	<b>R</b> (αμ)	$X(lpha\mu)$	<b>B</b> (αμ)	r
5	6	1	0.39111	1.12711	0.0	-
5	7	1	0.14333	0.24533	0.0	-
5	7	2	0.14333	0.24533	0.0	-
6	7	1	0.09556	0.16356	0.0	-
6	7	2	0.09556	0.16356	0.0	-
7	8	1	0.04778	0.08178	0.0	-
7	8	2	0.04778	0.08178	0.0	-
4	9	1	0.15	0.25556	0.0	-
4	9	2	0.15	0.25556	0.0	-
8	4	1	0.0	0.25	0.0	0.93125
1	5	1	0.0	0.48571	0.0	1.00000
2	6	1	0.0	0.76667	0.0	1.00000
9	3	1	0.0	0.32	0.0	0.99667

Πίνακας 3.8: Δεδομένα γραμμών και μετασχηματιστών

Τέλος, τα αποτελέσματα της επίλυσης αρχικής ροής φορτίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.9

	Διάνυσμα Τάσ		Παραγωγή		Κατα	νάλωση	Εγκάρσ	Εγκάρσιο Στοιχείο	
Ζυγός	<i>V</i> (αμ)	<b>θ</b> (°)	$P_G$	$Q_G$	$P_L$	$Q_L$	$G_L$	$B_L$	
1	1.07501	0.0	2.50316	1.48669	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	1.065	-5.0	0.6	0.95649	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	1.0000	-8.26	0.0	0.0	-1.50	0.81344	0.0	0.54	
4	1.0000	-12.22	0.0	0.0	2.25	1.18562	2.25	0.0	
5	1.01416	-6.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.99708	-7.48	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.98546	-7.60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.97019	-8.07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	1.00653	-10.98	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα επίλυσης αρχικής ροής φορτίου

## 3.5.2 Παράσταση αυτόνομου δικτύου 9 ζυγών στο WHSSP

Η γραφική αναπαράσταση του εξεταζόμενου αυτόνομου δικτύου του Σχ. 3.4 στο λογισμικό περιβάλλον SIMULINK του WHSSP φαίνεται στο Σχ. 3.5.



Σχ. 3.5: Παράσταση αυτόνομου δικτύου 9 ζυγών στο WHSSP

Οι πινακίδες με το ίδιο όνομα υποδηλώνουν μία κρυμμένη σύνδεση, εξασφαλίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το ευανάγνωστο της συνολικής παράστασης. Όσον αφορά την τοπολογία του Σχ. 3.5, διακρίνονται στο αριστερό μέρος οι δύο συμβατικές μονάδες παραγωγής, στο πάνω δεξιό μέρος το δίκτυο και στο κάτω δεξιό κομμάτι οι δύο μηχανές επαγωγής.

Κάθε συμβατική μονάδα θεωρείται σαν ένα ενιαίο υποσύστημα του δικτύου, το οποίο περιλαμβάνει μία σύγχρονη γεννήτρια, ένα σύστημα διέγερσης που περιλαμβάνει ΑΡΤ, ΣΠΥ και σταθεροποιητή συστήματος ισχύος (στην προκειμένη περίπτωση η τελευταία διάταξη δεν υπάρχει), καθώς επίσης και έναν στρόβιλο με τον αντίστοιχο ρυθμιστή στροφών. Είσοδοι κάθε μονάδας παραγωγής θεωρούνται α) οι προβολές της τερματικής τάσης της γεννήτριας του σταθμού στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του

συστήματος, β) η γωνιακή συχνότητα  $\omega_{sys}$  του συστήματος και γ) μία διακριτή μεταβλητή η οποία παίρνει τιμές 1 ή 0 και φανερώνει εάν ο σταθμός είναι αντίστοιχα εντός ή εκτός λειτουργίας. Έξοδοι του σταθμού είναι ο 2×2 υποπίνακας  $\mathbf{Y}_{SG,i}$  και το 2×1 υποδιάνυσμα  $\mathbf{b}_{SG,i}$  της σύγχρονης γεννήτριας, τα οποία υπολογίζονται από τις (3.53) και (3.55) αντίστοιχα, καθώς επίσης και η ταχύτητα του δρομέα της, η οποία χρησιμοποιείται βάσει της (2.200) για τον υπολογισμό της γωνιακής συχνότητας  $\omega_{sys}$  του συστήματος.

Οι εσωτερικές μεταβλητές, με τη βοήθεια των οποίων εξασφαλίζεται η επικοινωνία μεταξύ των επιμέρους διατάξεων κάθε συμβατικής μονάδας παραγωγής, είναι η τάση και το ρεύμα διέγερσης, η ταχύτητα του δρομέα και η μηχανική ροπή εισόδου της σύγχρονης γεννήτριας. Συγκεκριμένα, το ρεύμα διέγερσης και η ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας αποτελούν τις αντίστοιχες εισόδους του ΣΠΥ και του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος, ενώ η τάση εξόδου του συστήματος διέγερσης τροφοδοτεί το τύλιγμα του πεδίου της γεννήτριας. Ομοίως, το σύστημα στροβίλου-ρυθμιστή στροφών της μονάδας δέχεται σαν είσοδο την ταχύτητα του δρομέα της μηχανής, ενώ στην έξοδό του παράγει την κινητήρια μηχανική ροπή στον άξονα της τελευταίας.

Η εσωτερική παράσταση του μοντέλου τέταρτης τάξης της σύγχρονης γεννήτριας φαίνεται στο Σχ. 3.6. Είσοδοι του μοντέλου είναι οι προβολές της τάσης του ζυγού, στον οποίο συνδέεται η μηχανή, στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy, η τάση διέγερσης, η μηχανική ροπή στον άξονα, η γωνιακή συχνότητα ω<sub>sys</sub> του δικτύου και η κατάσταση (εντός ή εκτός λειτουργίας) του σταθμού παραγωγής. Το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης αποτελείται από τη γωνία δ, την ταχύτητα του δρομέα και τις δύο μεταβατικές ΗΕΔ στον ευθύ και στον εγκάρσιο άξονα του δρομέα.



Σχ. 3.6: Εσωτερική παράσταση μοντέλου σύγχρονης γεννήτριας στο WHSSP

Για να είναι το περιβάλλον φιλικό προς το χρήστη, η ανάθεση τιμών στις παραμέτρους και στα δεδομένα καθενός μοντέλου πραγματοποιείται με τη βοήθεια κατάλληλου παράθυρου δεδομένων. Στην περίπτωση του μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας, το παράθυρο δεδομένων, το οποίο φαίνεται στο Σχ. 3.7, χρησιμεύει για την ανάθεση τιμών στα εξής δεδομένα:

- Βασικά μεγέθη του συστήματος (ισχύς, συχνότητα).
- Ονομαστικά μεγέθη της μηχανής (ισχύς, συχνότητα, ισχύς κινητήριου στροβίλου).
- Κωδικός τερματικού ζυγού της μηχανής.
- Δυναμικά δεδομένα της γεννήτριας (αντιστάσεις, αντιδράσεις, χρονικές σταθερές, αδράνεια, συντελεστής απόσβεσης).
- Ενεργός και άεργος παραγωγή, καθώς επίσης και διάνυσμα τερματικής τάσης στο αρχικό σημείο λειτουργίας.

Οι τιμές των παραπάνω δεδομένων βρίσκονται είτε στα αντίστοιχα αρχεία εισόδου είτε προκύπτουν από την εκτέλεση του προγράμματος αρχικοποίησης. Ουσιαστικά δηλαδή, το παράθυρο δεδομένων του Σχ. 3.7 αποτελεί το συνδετικό κρίκο μεταξύ του περιβάλλοντος εργασίας της MATLAB με το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας στο SIMULINK.



Σχ. 3.7: Παράθυρο δεδομένων για το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας

Η δημιουργία του παραθύρου δεδομένων της σύγχρονης γεννήτριας πραγματοποιείται με τη βοήθεια του παραθύρου δημιουργίας υποσυστήματος του Σχ. 3.8. Όλες οι μεταβλητές που ορίζονται στο τελευταίο παράθυρο αποτελούν τοπικές μεταβλητές του υποσυστήματος της συγκεκριμένης γεννήτριας.

Το κάτω μέρος του παραθύρου του Σχ. 3.8 είναι διαθέσιμο για ανάπτυξη κώδικα σε MATLAB, ο οποίος εκτελείται στο αρχικό χρονικό σημείο της προσομοίωσης (χρονική στιγμή t=0). Στην περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας, ο κώδικας που έχει αναπτυχθεί αποσκοπεί στην επίλυση του προβλήματος αρχικών συνθηκών της μηχανής. Συγκεκριμένα, έχοντας γνωστά από το παράθυρο δεδομένων την ενεργό και άεργο παραγωγής και το διάνυσμα της τερματικής τάσης στο αρχικό σημείο λειτουργίας υπολογίζονται βάσει των (3.104) έως (3.115) οι αρχικές τιμές των μεταβλητών κατάστασης της μηχανής, η αρχική τάση διέγερσης και η αρχική μηχανική ροπή εισόδου στον άξονα.

Αντίστοιχα παράθυρα δεδομένων και δημιουργίας υποσυστήματος όμοια με αυτά των Σχ. 3.7 και Σχ. 3.8 έχουν αναπτυχθεί για όλα τα μοντέλα των διατάξεων ΣΗΕ, τα οποία περιέχονται στην βιβλιοθήκη του WHSSP.

Επανερχόμενοι στο εξεταζόμενο αυτόνομο δίκτυο, σημειώνεται ότι σε αντιστοιχία με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής, κάθε μηχανή επαγωγής αποτελεί ένα υποσύστημα με εισόδους τις τάσεις στάτη και δρομέα στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος, τη ροπή του μηχανικού φορτίου, τη γωνιακή συχνότητα  $ω_{sys}$  του δικτύου και μία διακριτή μεταβλητή, η οποία παίρνει τιμές 1 και 0 ανάλογα με το εάν η μηχανή είναι εντός ή εκτός λειτουργίας αντίστοιχα. Έξόδοι της εξεταζόμενης διάταξης είναι ο 2×2 υποπίνακας  $\mathbf{Y}_{IM,i}$  και το 2×1 υποδιάνυσμα  $\mathbf{b}_{IM,i}$  των σχέσεων (3.58) και (3.60) αντίστοιχα.

🖉 Mask Editor	n hybridsys/DIESEL	GENERATOR		
Icon	Initialization Doc	umentation		
Mask type:				_
	Prompt	Type	Variable	
Add	[Sbase fbase]:	System base	edit	bas -
0.11	bus code: Gener	rator bus	edit	bus
Delete	[Snon from Prot	a]: Nominal	edit	nos
Un	RSI Stator Des:	istance (pu)	edit	R5
	X = [X15 X0 X0]	Xad Xqq]: H.	edit	oct #1
Down		off Open Cir	east	
Prompt: 58	sase (base): System be	Control type:	Edit	
Variable: ba	ie_dala	Assignment	Evaluate	*
Popup strings:				
Initialization co	nmands:			
% System de Sbase = base Base = base wb = 2*bi*tb	nta a_clata[1]: a_clata[2]: ase:			
ОК.	Cancel	nnask Hels		abh

Σχ. 3.8: Παράθυρο δημιουργίας υποσυστήματος

Όσον αφορά το μοντέλο του δικτύου, θεωρείται με τη σειρά του σαν ένα υποσύστημα με εισόδους στην εξεταζόμενη περίπτωση τους 2×2 υποπίνακες  $\mathbf{Y}_{SG,i}$  και  $\mathbf{Y}_{IM,i}$  και τα 2×1 υποδιανύσματα  $\mathbf{b}_{SG,i}$  και  $\mathbf{b}_{IM,i}$  των μηχανών (σύγχρονων και ασύγχρονων), τη γωνιακή συχνότητα  $\omega_{sys}$  του δικτύου, το μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού του μετασχηματιστή που είναι εξοπλισμένος με ΣΑΤΥΦ και τη συνολική χωρητική αγωγιμότητα της συστοιχίας του αυτόματου μηχανισμού ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών.

Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός της γωνιακής συχνότητας ω<sub>sys</sub> του δικτύου πραγματοποιείται βάσει της (2.200) στο εσωτερικό ενός υποσυστήματος, το οποίο δέχεται σαν εισόδους τις γωνιακές ταχύτητες των σύγχρονων γεννητριών.

Επίσης, ο μηχανισμός ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή διανομής αποτελεί ένα ξεχωριστό υποσύστημα με είσοδο το διάνυσμα της ελεγχόμενης τάσης του ζυγού του φορτίου και έξοδο το μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού.

Ομοίως, ο αυτόματος μηχανισμός ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών παριστάνεται σαν ένα υποσύστημα με εισόδους α) το διάνυσμα της τάσης του στάτη, β) την ενεργό παραγωγή και γ) την άεργο κατανάλωση της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας και έξοδο τη συνολική χωρητική αγωγιμότητα της συστοιχίας.

Στη γενική περίπτωση, στις εισόδους του μοντέλου του δικτύου θα πρέπει να προστεθούν επίσης το διάνυσμα των χωρητικών αγωγιμοτήτων των στατών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης και το διάνυσμα των ισοδύναμων μεταβαλλόμενων αγωγιμοτήτων που παριστάνουν τα δυναμικά επαναφερόμενα φορτία.

Στην έξοδο του δικτύου υπολογίζονται οι προβολές όλων των τάσεων των ζυγών του δικτύου στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy σε κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης. Η εσωτερική παράσταση του μοντέλου του εξεταζόμενου δικτύου φαίνεται στο Σχ. 3.9.

Τα αρχεία MATLAB (m-file) network\_vxy\_pre, network\_vxy\_during και network\_vxy\_post αποτελούν τρία προγράμματα επίλυσης δικτύου για τρεις διαφορετικές τοπολογίες του δικτύου, όπως είναι για παράδειγμα οι τοπολογίες πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την εκκαθάριση ενός σφάλματος. Η μεταγωγή από τη μία τοπολογία στην άλλη πραγματοποιείται σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές με τη βοήθεια του διακόπτη στο δεξί μέρος του Σχ. 3.9. Είναι προφανές ότι στην περίπτωση κατά την οποία προσομοιώνεται ένα δίκτυο με απλή απώλεια μίας συνιστώσας του, χρειάζονται δύο μόνο προγράμματα επίλυσης δικτύου (ένα πριν και ένα μετά την απώλεια).



Σχ. 3.9: Εσωτερική παράσταση δικτύου στο WHSSP

Το τελευταίο βήμα πριν την έναρξη της προσομοίωσης είναι η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αριθμητικής ολοκλήρωσης του συνόλου των διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων του εξεταζόμενου δικτύου. Η επιλογή αυτή γίνεται μέσα από μία μεγάλη ποικιλία έτοιμων μεθόδων σταθερού ή μεταβλητού βήματος, οι οποίες υπάρχουν στο παράθυρο παραμέτρων προσομοίωσης του Σχ. 3.10.

🛃 Simu	lation Pa	rameter	s: hybrids;	s		
Solver	Workspa	sce 1/0	Diagnostics	Real-Time \	Volkshop	
Simul Start	ation time time: 0.0		Stop tir	HE: 100	_	
Solve Type	r options Variable	step 💌	ode23	t (nod. still/T	apezoidal)	
Max : Initial	tep size: step size:	0.5		Selative tolera Absolute tolera	nce: 1e5 ence: 1e5	
Outpu	it options ne output		•	Refine fa	ctar: 1	
			OK.	Cancel	Help	Apply

Σχ. 3.10: Παράθυρο παραμέτρων προσομοίωσης

Στο συγκεκριμένο παράθυρο εκτός από τη μέθοδο ολοκλήρωσης, ο χρήστης καθορίζει τη χρονική διάρκεια προσομοίωσης, καθώς επίσης και ορισμένα όρια ανοχής για την ακρίβεια σύγκλιση της μεθόδου.

Στη συνέχεια, το θεωρούμενο αυτόνομο δίκτυο αναλύεται με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου WHSSP από πλευράς ευστάθειας τάσεως και μεταβατικής ευστάθειας.

#### 3.5.3 Μακροπρόθεσμη ευστάθεια: Προσομοίωση σεναρίου βαθμιαίας απώλειας αιολικής παραγωγής

Στην παρούσα ενότητα, το πακέτο λογισμικού WHSSP χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της απόκρισης του αυτόνομου δικτύου του Σχ. 3.4 στο ενδεχόμενο της βαθμιαίας μείωσης της ταχύτητας του ανέμου στο αιολικό πάρκο. Η εξεταζόμενη διαταραχή οδηγεί σε ολική απώλεια του πάρκου λόγω της συνεχούς μείωσης στη μηχανικής ροπής εισόδου της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας. Η μείωση της μηχανικής ροπής παριστάνεται με μία ράμπα σταθερής κλίσης 0.025 MW/s, η οποία αρχίζει τη χρονική στιγμή t=10 s. Θεωρείται ότι το αιολικό πάρκο αποσυνδέεται από το δίκτυο τη χρονική στιγμή t=54.2 s, οπότε και η μηχανική ροπή λόγω του ανέμου γίνεται μικρότερη από το 20% της ονομαστικής της τιμής. Στην περίπτωση αυτή, ο αυτόματος μηχανισμός ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών τίθεται εκτός λειτουργίας 200 ms μετά την αποσύνδεση του πάρκου.

Ενδεικτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης του δικτύου στο ενδεχόμενο του προαναφερόμενου σεναρίου φαίνονται στα διαγράμματα των Σχ. 3.11, Σχ. 3.12 και Σχ. 3.13.



Σχ. 3.11: Ενεργός παραγωγή συμβατικών μονάδων

Συγκρίνοντας τις αποκρίσεις της ενεργού παραγωγής των συμβατικών μονάδων από το Σχ. 3.11, γίνεται αντιληπτός ο τρόπος με τον οποίο οι δύο αυτές μονάδες διατηρούν το ισοζύγιο ενεργού ισχύος μετά την αποσύνδεση του πάρκου. Συγκεκριμένα, λόγω της αδράνειας του νερού στον αγωγό προσαγωγής, η υδροηλεκτρική μονάδα δεν μπορεί να αυξήσει στιγμιαία την παραγωγή της. Επομένως, τη χρονική στιγμή της αποσύνδεσης του πάρκου (*t*=54.2 s) η μονάδα Ντήζελ αναλαμβάνει να καλύψει σχεδόν ολόκληρη την απώλεια της παραγωγής του πάρκου. Στη συνέχεια, ο υδροηλεκτρικός σταθμός αυξάνει βαθμιαία την παραγωγή του με αντίστοιχη μείωση της παραγωγής της μονάδας Ντήζελ, οπότε οι δύο συμβατικές μονάδες μοιράζονται μακροπρόθεσμα το επιπλέον φορτίο σύμφωνα με τις τιμές των στατισμών μονίμου καταστάσεως. Στο τελικό σημείο ισορροπίας, η παραγωγή της μονάδας Ντήζελ έχει αυξηθεί από τα 2.5 στα 3.6 MW περίπου, ενώ η αντίστοιχη της υδροηλεκτρικής μονάδας από τα 0.6 στο 1 MW περίπου.

Λαμβάνοντας υπόψη το Σχ. 3.12, παρατηρούμε ότι η αποσύνδεση του αιολικού πάρκου έχει σαν αποτέλεσμα την υπερδιέγερση της σύγχρονης γεννήτριας του υδροηλεκτρικού σταθμού. Ωστόσο, παρά τον περιορισμό του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας, το δίκτυο επιτυγχάνει ευσταθές σημείο ισορροπίας στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.



Σχ. 3.12: Ρεύμα διέγερσης σύγχρονων γεννητριών



Στο Σχ. 3.13 φαίνονται η τερματική τάση και η ταχύτητα του ασύγχρονου κινητήρα του τοπικού φορτίου.

Σχ. 3.13: Απόκριση κινητήρα επαγωγής

Λαμβάνοντας υπόψη την απόκριση της τερματικής τάσης του κινητήρα, παρατηρείται αύξηση αυτής κατά το χρονικό διάστημα των πρώτων 25 s (από τη χρονική στιγμή t=10 s έως t=35 s) της μείωσης της παραγωγής του πάρκου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι κατά το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα η ισοδύναμη ασύγχρονη ανεμογεννήτρια του πάρκου παραμένει σε υψηλά επίπεδα φόρτισης, οπότε η μείωση της παραγόμενης ισχύος της προκαλεί μείωση της ροής ισχύος στο δίκτυο και άρα αύξηση της τερματικής της τάσης. Αντίθετα, από τη χρονική στιγμή t=35 s έως και τη στιγμή της αποσύνδεσης του πάρκου, το χαμηλό επίπεδο αιολικής διείσδυσης προκαλεί ροή ισχύος προς την αντίθετη κατεύθυνση. Επομένως, η ενεργός παραγωγή και η τερματική τάση της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας μειώνονται ταυτόχρονα.

Η μεταβατική υπέρταση στον τερματικό ζυγό του πάρκου οφείλεται στην αποσύνδεση του αυτόματου μηχανισμού ζεύξης απόζευξης των στατών πυκνωτών, η οποία λαμβάνει χώρα 200 ms μετά την αποσύνδεση του πάρκου.

Επίσης, η μείωση της συνολικής παραγόμενης ενεργού ισχύος, η οποία προκαλείται από τη βαθμιαία μείωση της αιολικής παραγωγής, οδηγεί σε μικρή επιβράδυνση τον τοπικό κινητήρα. Εντούτοις, παρά την απώλεια του αιολικού πάρκου, ο κινητήρας φτάνει τελικά σε ευσταθές σημείο ισορροπίας.

### 3.5.4 Προσομοίωση τριφασικού βραχυκυκλώματος

Η ανάλυση της βραχυπρόθεσμης ευστάθειας στο εξεταζόμενο δίκτυο πραγματοποιείται προσομοιώνοντας την απόκρισή του στο ενδεχόμενο ενός τριφασικού βραχυκυκλώματος στο ένα κύκλωμα της διπλής γραμμής διανομής, η οποία συνδέει το ζυγό του φορτίου (ζυγός 4) με το ζυγό MT του μετασχηματιστή ανύψωσης του αιολικού πάρκου (ζυγός 9). Η εκκαθάριση του σφάλματος θεωρείται ότι γίνεται με το άνοιγμα του κυκλώματος της γραμμής αυτής. Θα εξεταστούν ένα ευσταθές και ένα ασταθές σενάριο. Στην περίπτωση του ευσταθούς σεναρίου, η απόκριση του δικτύου εξετάζεται τόσο στη βραχυπρόθεσμη όσο και στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Όσον αφορά τον αυτόματο μηχανισμό ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών στον τερματικό ζυγό του πάρκου, θεωρείται ότι διαθέτει σύστημα προστασίας από βραχυκυκλώματα, το οποίο ενεργοποιείται ακαριαία τη στιγμή του σφάλματος, αποσυνδέοντας το μηχανισμό από το δίκτυο. Επίσης, αποδεχόμαστε ότι η τάση διέγερσης των δύο σύγχρονων γεννητριών δεν μπορεί να υπερβεί τη μέγιστη μεταβατική τιμή 5 αμ.

### Α) Ευσταθές σενάριο

Θεωρείται ότι το συμμετρικό σφάλμα λαμβάνει χώρα τη χρονική στιγμή t=10 s, ενώ για το ευσταθές σενάριο ο χρόνος εκκαθάρισης είναι ίσος με 70 ms. Στην περίπτωση αυτή, οι αποκρίσεις των τάσεων

των ζυγών, των τάσεων διέγερσης των σύγχρονων γεννητριών και των ταχυτήτων των μηχανών επαγωγής αποτυπώνονται στα διαγράμματα των Σχ. 3.14, Σχ. 3.15 και Σχ. 3.16 αντίστοιχα.



Σχ. 3.14: Αποκρίσεις τάσεων ζυγών (ευσταθές σενάριο)

Από το Σχ. 3.14 γίνεται αντιληπτό ότι το σύστημα επιτυγχάνει ευσταθές σημείο βραχυπρόθεσμης ισορροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος. Ακολούθως, η ενεργοποίηση του μηχανισμού του ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή διανομής στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα βοηθάει στην περαιτέρω αποκατάσταση της τάσης του φορτίου.

Αναφορικά με τις αποκρίσεις των συμβατικών μονάδων του Σχ. 3.15, σημειώνεται ότι και οι δύο τάσεις διέγερσης φτάνουν τη μέγιστη μεταβατική τους τιμή κατά τη διάρκεια και λίγο μετά το βραχυκύκλωμα. Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, η απώλεια του αντίστοιχου κυκλώματος της γραμμής οδηγεί την υδροστροβιλογεννήτρια σε υπερδιέγερση. Εντούτοις, παρά την ενεργοποίηση του αντιστοίχου ΣΠΥ και τον περιορισμού του ρεύματος διέγερσης, το σύστημα φτάνει σε μακροπρόθεσμο ευσταθές σημείο ισορροπίας.



Σχ. 3.15: Τάσεις διέγερσης σύγχρονων γεννητριών (ευσταθές σενάριο)

Επιπρόσθετα, βάσει του Σχ. 3.16, η ασύγχρονη ανεμογεννήτρια επιταχύνεται, ενώ ο κινητήρας επαγωγής επιβραδύνεται κατά τη διάρκεια του σφάλματος.



Σχ. 3.16: Ταχύτητες μηχανών επαγωγής (ευσταθές σενάριο)

Ωστόσο, η εκκαθάριση του σφάλματος και η επερχόμενη αποκατάσταση των τάσεων των ζυγών έχει σαν αποτέλεσμα και οι δύο μηχανές επαγωγής να επιτυγχάνουν τελικά ευσταθές σημείο ισορροπίας.

#### Β) Ασταθές σενάριο

Εάν το εξεταζόμενο τριφασικό σφάλμα διαρκέσει 100 ms, η απόκριση του δικτύου καθίσταται ασταθής στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Σύμφωνα με το Σχ. 3.17, στο οποίο φαίνονται οι ταχύτητες των σύγχρονων γεννητριών, καθώς επίσης και η διαφορά των γωνιών των δρομέων τους, η βραχυπρόθεσμη αστάθεια δεν οφείλεται σε αποσυγχρονισμό των δύο σύγχρονων γεννητριών, αλλά στις μηχανές επαγωγής.



Σχ. 3.17: Αποκρίσεις σύγχρονων γεννητριών (ασταθές σενάριο)

Συγκεκριμένα, ενώ υπάρχει σημείο ευσταθούς ισορροπίας μετά την εκκαθάριση του σφάλματος (όπως αποδείχθηκε στο σενάριο A), η καθυστέρηση εκκαθάρισης έχει απομακρύνει τις μηχανές επαγωγής από την περιοχή έλξης αυτού του ευσταθούς σημείου ισορροπίας. Το συμπέρασμα αυτό δικαιολογείται από τις αποκρίσεις των Σχ. 3.18 και Σχ. 3.19, όπου φαίνονται αντίστοιχα η τερματική τάση και η ταχύτητα του δρομέα κάθε ασύγχρονης μηχανής. Συνεπώς, η εμφανιζόμενη βραχυπρόθεσμη αστάθεια οφείλεται στη δυναμική απόκριση των μηχανών επαγωγής του δικτύου.



Σχ. 3.18: Αποκρίσεις τάσεων ζυγών (ασταθές σενάριο)

Συγκρίνοντας τις αποκρίσεις των τάσεων από τις γραφικές παραστάσεις των Σχ. 3.14 και Σχ. 3.18, παρατηρούμε ότι στην εξεταζόμενη περίπτωση οι τάσεις του δικτύου δεν επανέρχονται κοντά στα προ σφάλματος επίπεδα. Συγκεκριμένα, οι τρεις χαμηλότερες τάσεις (από 0.3 έως 0.6 αμ) αντιστοιχούν στους ζυγούς 3, 9 και 4, δηλαδή στους ζυγούς όπου είναι εγκατεστημένες οι μηχανές επαγωγής.

Στα διαγράμματα του Σχ. 3.19 παρατηρούμε την απώλεια του βραχυπρόθεσμου ισορροπίας τόσο για την ασύγχρονη ανεμογεννήτρια όσο και για τον κινητήρα επαγωγής. Η απώλεια οφείλεται στην επιτάχυνση (και επιβράδυνση) της ανεμογεννήτριας (και του κινητήρα) πέρα από το αντίστοιχο ασταθές σημείο ισορροπίας μετά τη διαταραχή.



Σχ. 3.19: Ταχύτητες μηχανών επαγωγής (ασταθές σενάριο)

Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια των προηγούμενων προσομοιώσεων δεν λαμβάνεται υπόψη η δράση οποιωνδήποτε συστημάτων προστασίας υπερτάχυνσης ή υποτάσεως των μηχανών επαγωγής, τα οποία θα οδηγούσαν στην αποσύνδεσή τους μετά από κάποιο σημείο.

# 3.6 Σύγκριση με EUROSTAG

Στη συνέχεια, το πρόγραμμα πλήρους προσομοίωσης εφαρμόζεται για την προσομοίωση ενός ΣΗΕ 33 ζυγών [Man98]. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του προγράμματος προσομοίωσης EUROSTAG [SBD89,VPM95].

### 3.6.1 Περιγραφή δικτύου 33 ζυγών της CIGRE

Στο Σχ. 3.20 εικονίζεται το μονογραμμικό διάγραμμα του εξεταζόμενου συστήματος των 33 ζυγών. Το εξεταζόμενο σύστημα αποτελείται από 6 μονάδες παραγωγής, 6 αυτομετασχηματιστές 380/150 kV, 7 μετασχηματιστές διανομής 150/70 kV, 16 φορτία, 12 συστήματα χωρητικής αντιστάθμισης και 2 ζυγούς διασύνδεσης N12 και N15.



**Σχ. 3.20:** Σύστημα 33 ζυγών

Στο δίκτυο μεταφοράς του εξεταζόμενου συστήματος, διακρίνονται τρία επίπεδα τάσεως. Στο Σχ. 3.20 οι έντονες γραμμές παριστάνουν το δίκτυο των 380 kV, ενώ οι λεπτές γραμμές το δίκτυο των 150 kV, με εξαίρεση τους ζυγούς φορτίου N201-N207 η ονομαστική τάση των οποίων είναι 70 kV. Οι τελευταίοι ζυγοί τροφοδοτούνται από μετασχηματιστές διανομής 150/70 kV, οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με ΣΑΤΥΦ για τον έλεγχο της τάσεως στο δευτερεύον τύλιγμα. Σημειώνεται ότι η μεταβλητή λήψη των μετασχηματιστών αυτών βρίσκεται στη μεριά των 150 kV, δηλαδή προς τους ζυγούς N101-N107. Οι μετασχηματιστές ανύψωσης των γεννητριών και οι αυτομετασχηματιστές 380/150 kV έχουν σταθερές λήψεις.

Τα φορτία του συστήματος είναι στατικά εκθετικού τύπου. Συγκεκριμένα, τα ενεργά φορτία είναι σταθερού ρεύματος ( $a_{L_i} = 1$ ), ενώ τα άεργα φορτία είναι σταθερής αγωγιμότητας ( $\beta_{L_i} = 2$ ).

Τα συστήματα χωρητικής αντιστάθμισης θεωρούμε ότι παριστάνονται από σταθερές χωρητικές αγωγιμότητες.

Τα δεδομένα των ζυγών, των γραμμών και των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης δίνονται στη διατριβή [Man98].

Στο σύστημα του Σχ. 3.20 υπάρχουν έξι μονάδες παραγωγής στους ζυγούς M1-M6. Οι δύο γεννήτριες στους ζυγούς M1 και M2 είναι όμοιες με ονομαστική ισχύ 1100 MVA η κάθε μία. Το ίδιο συμβαίνει και με τις γεννήτριες στους ζυγούς M3 και M5 με ονομαστική ισχύ 450 MVA η κάθε μία. Τέλος, οι γεννήτριες στους ζυγούς M4 και M6 έχουν ονομαστική ισχύ 300 και 5000 MVA αντίστοιχα. Όλες οι γεννήτριες είναι κυλινδρικού δρομέα ( $X_{d_i} = X_{q_i}$ ). Η ονομαστική τάση των γεννητριών στους ζυγούς

M1, M2 και M6 είναι 24 kV, ενώ στους ζυγούς M3, M4 και M5 είναι 15 kV.

Όλες οι γεννήτριες εκτός της M6 είναι εξοπλισμένες με πανομοιότυπους APT και ίδια ΣΠΥ. Το μοντέλο του APT είναι τύπου AC4 κατά IEEE, με τη διαφορά ότι έχει παραληφθεί το φίλτρο μεταπορείας μετά τον κύριο αθροιστή εισόδου (βλ. Σχ. 2.6). Επίσης, όλα τα ΣΠΥ είναι αθροιστικού τύπου, σταθερής χρονικής καθυστέρησης, ενώ διαθέτουν αναλογική μονάδα ελέγχου.

Τέλος, οι δύο διασυνδέσεις με τα εξωτερικά συστήματα παριστάνονται μέσω δύο ζυγών N12 και N15 με σταθερό διάνυσμα τάσης (κατά μέτρο και γωνία). Συγκεκριμένα, έχουμε  $\hat{V}_{_{N12}} = 1.0994 \angle -1.638^{\circ}$ 

και  $\hat{V}_{\text{N15}} = 1.09289 \angle 0.0^{\circ}$ . Λόγω της ύπαρξης των δύο ζυγών διασύνδεσης, θεωρούμε ότι η συχνότητα του συστήματος παραμένει σταθερή στα 50 Hz. Αποδεχόμαστε δηλαδή ότι οποιαδήποτε μεταβολή ενεργού ισχύος στο σύστημα είναι δυνατόν να καλυφθεί από τους δύο αυτούς ζυγούς.

Θα προσομοιώσουμε στη συνέχεια μία περίπτωση αστάθειας τάσεως, που εμφανίζεται στο εξεταζόμενο σύστημα και η οποία οδηγεί σε κατάρρευση.

### 3.6.2 Προσομοίωση σεναρίου αστάθειας τάσης

Το σενάριο προσομοίωσης ξεκινάει θεωρώντας απώλεια της γεννήτριας στο ζυγό M2 τη χρονική στιγμή t=10 s. Ακολούθως, η γεννήτρια M1, η οποία συνδέεται στον ίδιο ζυγό 380 kV με τη M2, υπερδιεγείρεται με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση του ΣΠΥ της γεννήτριας στα 25 s περίπου. Η απώλεια της γεννήτριας M2 και ο περιορισμός της διέγερσης της M1 προκαλεί την υπερδιέγερση των M4, M3 και M5 και επομένως την ενεργοποίηση των αντιστοίχων ΣΠΥ τις χρονικές στιγμές 63 s, 90 s και 115 s περίπου αντίστοιχα. Τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών διανομής αρχίζουν να λειτουργούν τη χρονική στιγμή t=40 s. Η προσομοίωση τερματίζεται λίγο πριν συμπληρωθούν 163 s από την έναρξή της, επειδή το σύστημα δεν κατορθώνει να φτάσει σε βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας. Μετά το σημείο αυτό, το σύστημα οδηγείται σε κατάρρευση.

Στα Σχ. 3.21(α)-(β) απεικονίζονται οι τάσεις των ζυγών N1 και N205 αντίστοιχα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Όπως γίνεται φανερό από τα διαγράμματα του Σχ. 3.21, τα αποτελέσματα του εξεταζόμενου προγράμματος προσομοίωσης είναι πάρα πολύ ικανοποιητικά σε σχέση με τα αποτελέσματα του λογισμικού πακέτου EUROSTAG. Στη συνέχεια σχολιάζουμε το φαινόμενο της αστάθειας τάσης.

Η τάση του ζυγού N1, στον οποίο συνδέονται οι γεννήτριες M1 και M2, μειώνεται δραστικά τη στιγμή που ενεργοποιείται το ΣΠΥ της γεννήτριας M1 (t=25 s). Η τάση του N1 εξακολουθεί να μειώνεται έως τη στιγμή που το σύστημα καταρρέει. Η μείωση αυτή οφείλεται αφενός στο διαδοχικό περιορισμό διέγερσης των γεννητριών M4, M3 και M5 και αφετέρου στη δράση των ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών διανομής, η οποία προκαλεί αύξηση στις καταναλώσεις των φορτίων.

Ο ζυγός N205 τροφοδοτείται μέσω μετασχηματιστή εξοπλισμένου με ΣΑΤΥΦ, του οποίου το πρωτεύον τύλιγμα με τη μεταβλητή λήψη είναι στο ζυγό N105. Ο θεωρούμενος μηχανισμός ΣΑΤΥΦ αρχίζει να λειτουργεί τη χρονική στιγμή t=40 s και μειώνει το λόγο μετασχηματισμού του μετασχηματιστή N105-N205 προκειμένου να αποκαταστήσει την τάση του ελεγχόμενου ζυγού N205. Όμως, από τη χρονική στιγμή t=90 s και μετά, η διαδικασία αποκατάστασης της τάσης του ζυγού N205 μέσω του ΣΑΤΥΦ καθίσταται ασταθής. Αποτέλεσμα της αστάθειας αυτής είναι το γεγονός ότι παρόλο που ο λόγος μετασχηματισμού μειώνεται, η ελεγχόμενη τάση αντί να αυξάνεται, μειώνεται. Αστάθεια αυτού του τύπου εκδηλώνεται και στη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ των υπολοίπων μετασχηματιστών διανομής.



**Σχ. 3.21:** Απόκριση τάσεων στους ζυγούς Ν1 και Ν205 – Σύγκριση με EUROSTAG





Παρατηρούμε ότι μετά την ενεργοποίηση των ΣΠΥ, το ρεύμα διέγερσης των παραπάνω γεννητριών δεν παραμένει σταθερό, αλλά αυξάνει ελαφρώς σε κάθε μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού των μετασχηματιστών διανομής λόγω της δράσης των αντιστοίχων μηχανισμών ΣΑΤΥΦ. Η αύξηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι όλα τα ΣΠΥ διαθέτουν αναλογική και όχι ολοκληρωτική μονάδα ελέγχου.

Στα Σχ. 3.23(α)-(δ) φαίνονται οι άεργες παραγωγές των γεννητριών M1, M3, M4 και M5 αντίστοιχα. Από το Σχ. 3.23(α) παρατηρούμε ότι αμέσως μετά την απώλεια της γεννήτριας M2 (*t*=10 s), η γειτονική γεννήτρια M1 αναλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου της M2, αυξάνοντας την άεργο παραγωγή της κατά 200 MVAr περίπου. Ωστόσο, μετά τη δράση του ΣΠΥ της M1 (*t*=25 s), η άεργος παραγωγή της μειώνεται σημαντικά κατά 300 MVAr περίπου. Μείωση της τάξης περίπου των 50



MVAr παρατηρείται επίσης και στην άεργο παραγωγή των μονάδων M4, M3 και M5 μετά τον περιορισμό της διέγερσής τους τις χρονικές στιγμές *t*=63 s, *t*=90 s και *t*=115 s αντίστοιχα.

Συμπερασματικά, η προσομοίωση έδειξε πλήρη ταύτιση μεταξύ των αποκρίσεων των προγραμμάτων WHSSP και EUROSTAG και συνεπώς, το αναπτυχθέν πακέτο λογισμικό έχει εξαιρετική ακρίβεια.

# 4 ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

### 4.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο, προτείνεται μία μεθοδολογία για τη γραμμικοποίηση ενός συστήματος πολλών μηχανών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή, κατασκευάζεται ο Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης του συστήματος σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή και υπολογίζονται οι αντίστοιχες ιδιοτιμές με τα σχετικά ιδιοδιανύσματα.

Ειδικότερα, οι εξισώσεις των αλγεβρικών μεταβλητών και των μεταβλητών κατάστασης που προκύπτουν, αναπτύσσονται σε σειρά Taylor από την οποία διατηρούνται μόνο οι όροι πρώτης τάξης, ενώ αγνοούνται οι παράγωγοι ανωτέρας τάξης. Τη χρονική στιγμή  $t_0$  της προσομοίωσης, η γραμμικοποίηση κάθε μεταβλητής πραγματοποιείται γύρω από μία περιοχή της τιμής της  $x(t_0)$  που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη στιγμή, δηλαδή:

$$\Delta x = x(t) - x(t_0) \tag{4.1}$$

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να γίνει σαφές ότι το σύστημα δεν βρίσκεται απαραίτητα σε σημείο ισορροπίας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και επομένως οι πληροφορίες που παρέχει η ανάλυση των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων δεν μπορούν να αποτελέσουν απευθείας ενδείξεις αστάθειας. Στην περίπτωση αυτή, ο Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης, ο οποίος υπολογίζεται σε μία χρονική στιγμή προσομοίωσης, μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκει σε ένα εν δυνάμει σημείο ισορροπίας του συστήματος, στο οποίο οι είσοδοι θα είχαν μεταβληθεί ώστε να το μετατρέψουν σε σημείο ισορροπίας που να ανταποκρίνεται στις τρέχουσες τιμές των μεταβλητών κατάστασης. Σε μαθηματικούς όρους, αυτό σημαίνει ότι τη χρονική στιγμή  $t=t_0$  εξαγωγής του γραμμικοποιημένου μοντέλου του δικτύου, το διάνυσμα εισόδου **u** θεωρείται ότι μεταβάλλεται από την πραγματική του τιμή  $\mathbf{u}(t_0)$  στην τιμή  $\mathbf{u}_p(t_0)$ , ώστε να ικανοποιείται η ακόλουθη εξίσωση:

$$\mathbf{f}[\mathbf{x}(t_0), \mathbf{y}(t_0), \mathbf{u}_p(t_0)] = \mathbf{0}$$
(4.2)

Η ανάλυση των ιδιοτιμών και των σχετικών ιδιοδιανυσμάτων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένα μέσο για την ανάλυση των μηχανισμών που κινούν/διέπουν ένα ενδεχόμενο σενάριο αστάθειας. Με αυτόν τον τρόπο, εκτιμάται ο βαθμός συμμετοχής της κάθε διάταξης του συστήματος στο εμφανιζόμενο φαινόμενο αστάθειας και αξιολογούνται πιθανοί διορθωτικοί χειρισμοί που θα αποτρέψουν τη δυσμενή εξέλιξη του φαινομένου αυτού σε κατάρρευση.

Η μέθοδος γραμμικοποίησης κατά την προσομοίωση έχει γίνει για την ανάλυση ευστάθειας τάσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα κατά την Οιονεί στατική προσομοίωση [VJM94,VCV98]. Στη διατριβή αυτή, η μεθοδολογία γραμμικοποίησης επεκτείνεται και αποσκοπεί στην κατανόηση και στο διαχωρισμό των μηχανισμών αστάθειας, οι οποίοι εκδηλώνονται στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Στα συστήματα πολλών μηχανών, η εξέλιξη των μηχανισμών αυτών οδηγεί συνήθως σε:

- Αποσυγχρονισμό των σύγχρονων γεννητριών.
- Βραχυπρόθεσμη αστάθεια των μηχανών επαγωγής, η οποία διακρίνεται σε:
  - Απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας.
  - Απώλεια της περιοχής έλξης του ευσταθούς βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας.
- Ασταθείς ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις.

Αναφορικά με τις μεταβλητές κατάστασης των διατάξεων που αποκρίνονται στη μακροπρόθεσμη κλίμακα (στρόβιλοι-ρυθμιστές στροφών σύγχρονων γεννητριών, ΣΑΤΥΦ μετασχηματιστών διανομής, δυναμικά αυτορυθμιζόμενα φορτία κλπ.), θεωρούνται σταθερές παράμετροι για τη γραμμικοποίηση των βραχυπρόθεσμων δυναμικών και δεν επηρεάζουν την ανάλυση των ρυθμών του γραμμικοποιημένου συστήματος. Εξάλλου, τα στατά συστήματα αέργου αντιστάθμισης δεν λαμβάνονται υπόψη σε αυτό το κεφάλαιο.

Σύμφωνα με τις προαναφερόμενες παραδοχές, οι δυναμικές διατάξεις του γραμμικοποιημένου συστήματος είναι οι σύγχρονες γεννήτριες (συμπεριλαμβανομένου των διατάξεων προστασίας και ελέγχου) και οι μηχανές επαγωγής.

Όσον αφορά τη δομή του παρόντος κεφαλαίου, αρχικά περιγράφεται το σύνολο των γραμμικοποιημένων αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων του γενικού μοντέλου μίας μονάδας παραγωγής, το οποίο περιλαμβάνει μία σύγχρονη γεννήτρια και συγκεκριμένα μοντέλα Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης, Συστήματος Προστασίας Υπερδιεγέρσεως και σταθεροποιητή συστήματος ισχύος. Το μοντέλο έχει αναπτυχθεί με γνώμονα την ευελιξία και την εύκολη προσαρμογή σε τυχόν αλλαγές των επιμέρους διατάξεων. Για παράδειγμα, εάν επιλεγεί διαφορετικό μοντέλο ΑΡΤ, η προσαρμογή του στο γενικό μοντέλο της μονάδας προϋποθέτει μόνο την ενημέρωση των συγκεκριμένων εξισώσεων που αναφέρονται στον ΑΡΤ. Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, η επίδραση των στροβίλων στο μοντέλο της μονάδας παραγωγής αμελείται, διότι τα δυναμικά φαινόμενα των στροβίλων είναι αρκετά πιο αργά από τη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα που μας ενδιαφέρει στην παρούσα ενότητα.

Στη συνέχεια, αναπτύσσεται το γραμμικοποιημένο μοντέλο  $3^{\eta\varsigma}$  τάξεως μηχανής επαγωγής, με μεταβλητές κατάστασης τις αποκλίσεις της ολίσθησης και των μεταβατικών ΗΕΔ στους δύο άξονες του πλαισίου αναφοράς dq της μηχανής.

Στην περίπτωση στατικών εκθετικών φορτίων, περιγράφεται η μεθοδολογία με την οποία τα φορτία αυτά ενσωματώνονται στον πίνακα αγωγιμοτήτων του γραμμικοποιημένου δικτύου.

Επίσης, εξηγείται η μέθοδος με την οποία το εξεταζόμενο δίκτυο ελαττώνεται ώστε να παριστάνεται από έναν ισοδύναμο πίνακα αγωγιμοτήτων μειωμένης τάξεως, όπου διατηρούνται μόνο οι ζυγοί των μηχανών, ενώ οι υπόλοιποι ζυγοί απαλείφονται.

Στη συνέχεια, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο συνδυάζονται οι γραμμικοποιημένες αλγεβρικές εξισώσεις του απλοποιημένου δικτύου με το σύνολο των γραμμικοποιημένων διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων όλων των μηχανών, ώστε να προκύψει ο Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης του συστήματος.

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η εγκυρότητα της προτεινόμενης μεθόδου γραμμικοποίησης, συγκρίνονται για δύο περιπτώσεις δικτύων οι ιδιοτιμές που υπολογίζονται από τη μέθοδο αυτή με τις αντίστοιχες ιδιοτιμές που υπολογίζονται σε σημεία ισορροπίας από έτοιμη ρουτίνα γραμμικοποίησης της MATLAB (εντολή linmod).

Τέλος, η προτεινόμενη μέθοδος γραμμικοποίησης εφαρμόζεται σε δύο περιπτώσεις αστάθειας στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Στην πρώτη περίπτωση, εξετάζεται η εκδήλωση βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης σε έναν κινητήρα επαγωγής για διάφορες χαρακτηριστικές μηχανικού φορτίου. Το δεύτερο παράδειγμα αναφέρεται στην αστάθεια γωνίας μίας σύγχρονης γεννήτριας, η οποία οδηγεί στον αποσυγχρονισμό της μηχανής από το δίκτυο.

Σημειώνεται ότι όλες οι τιμές των μεγεθών και των παραμέτρων που αναφέρονται στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού, θεωρούνται ανηγμένες στη βάση ισχύος του συστήματος.

# 4.2 Γραμμικοποίηση Σύγχρονων Γεννητριών

### 4.2.1 Μοντέλο συμβατικής μονάδας παραγωγής

Το μοντέλο της συμβατικής μονάδας παραγωγής αποτελείται από:

- Σύγχρονη μηχανή η οποία παριστάνεται από το μοντέλο 4<sup>ης</sup> τάξεως (βλ. ενότητες 2.1.3 και 2.1.4).
- Αυτόματο Ρυθμιστή Τάσης τύπου AC4 κατά ΙΕΕΕ (βλ. ενότητα 2.2.4).
- Σύστημα Προστασίας Υπερδιεγέρσεως αθροιστικού τύπου, με αναλογική-ολοκληρωτική μονάδα ελέγχου (βλ. ενότητα 2.3.2).
- Σταθεροποιητή συστήματος ισχύος με υψιπερατό φίλτρο εισόδου και δύο βαθμίδες αντιστάθμισης (βλ. ενότητα 2.4).

Υπενθυμίζεται ότι κατά τη γραμμικοποίηση δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της δυναμικής συμπεριφοράς των στροβίλων στο θεωρούμενο μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας, διότι δεν ανήκει στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα που μας ενδιαφέρει στη συγκεκριμένη ενότητα. Ωστόσο, κατά την

εξαγωγή του γραμμικοποιημένου μοντέλου της γενικευμένης σύγχρονης γεννήτριας, η απόκλιση της μηχανικής ροπής εισόδου  $\Delta T_{m_i}$  διατηρείται σαν είσοδος του μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο, η προσθήκη οποιουδήποτε είδους στροβίλου στο γραμμικοποιημένο μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας πραγματοποιείται εύκολα με αντικατάσταση της απόκλισης  $\Delta T_{m_i}$  από τη γραμμικοποιημένη εξίσωση

της ροπής εξόδου του στροβίλου.

Σύμφωνα με τις προαναφερόμενες θεωρήσεις και παραδοχές, το σύνολο των διαφορικών και αλγεβρικών σχέσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά της *i* μονάδας παραγωγής αποτελείται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

Διαφορικές εξισώσεις ταλάντωσης της μηχανής:

$$\dot{\delta}_i = \omega_{r_i} - \omega_{sys} \tag{4.3}$$

$$2H_{i}\frac{\dot{\omega}_{r_{i}}}{\omega_{b}} = T_{m_{i}} - E_{d_{i}}'i_{d_{i}} - E_{q_{i}}'i_{q_{i}} - (X_{q_{i}}' - X_{d_{i}}')i_{d_{i}}i_{q_{i}} - D_{i}\left(\frac{\omega_{r}}{\omega_{b}} - 1\right)$$
(4.4)

 Ηλεκτρικές διαφορικές εξισώσεις των τυλιγμάτων του δρομέα της μηχανής στο πλαίσιο αναφοράς d<sub>i</sub>q<sub>i</sub> του δρομέα της:

$$T'_{q0_i}\dot{E}'_{d_i} = -E'_{d_i} + (X_{q_i} - X'_{q_i})i_{q_i}$$
(4.5)

$$T'_{d0_i}\dot{E}'_{q_i} = E_{f_i} - E'_{q_i} - (X_{d_i} - X'_{d_i})i_{d_i}$$
(4.6)

Αλγεβρικές εξισώσεις του στάτη της μηχανής στο πλαίσιο αναφοράς d<sub>i</sub>q<sub>i</sub> του δρομέα της:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_{d_i} \\ \boldsymbol{v}_{q_i} \end{bmatrix} = \lambda_{\omega} \begin{bmatrix} E'_{d_i} \\ E'_{q_i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \boldsymbol{r}_{s_i} & -\lambda_{\omega} X'_{q_i} \\ \lambda_{\omega} X'_{d_i} & \boldsymbol{r}_{s_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{i}_{d_i} \\ \boldsymbol{i}_{q_i} \end{bmatrix}$$
(4.7)

Διαφορικές εξισώσεις του ΑΡΤ τύπου ΑC4 κατά ΙΕΕΕ:

$$\dot{E}_{f_i} = -\frac{1}{T_{A_i}} E_{f_i} + \frac{K_{A_i}}{T_{A_i}} x_{ll_i} + \frac{K_{A_i}}{T_{A_i}} \frac{T_{C_i}}{T_{B_i}} \left( V_{ref_i} - V_{C_i} + V_{PSS_i} - V_{OEL_i} \right)$$
(4.8)

$$\dot{x}_{ll_i} = -\frac{1}{T_{B_i}} x_{ll_i} + \frac{T_{B_i} - T_{C_i}}{T_{B_i}^2} \left( V_{ref_i} - V_{C_i} + V_{PSS_i} - V_{OEL_i} \right)$$
(4.9)

 Διαφορική εξίσωση της ολοκληρωτικής βαθμίδας της μονάδας ελέγχου του ΣΠΥ, εφόσον το σύστημα αυτό έχει ενεργοποιηθεί περιορίζοντας το ρεύμα πεδίου:

$$\dot{x}_{OEL_i} = I_{fd_i} - I_{ref_i} \tag{4.10}$$

Σημειώνεται ότι οι υπόλοιπες μεταβλητές κατάστασης  $x_{t_i}$ ,  $I_{ref_i}$  και  $x_{en_i}$  του ΣΠΥ παραμένουν σταθερές στα αντίστοιχα άνω ή κάτω όριά τους για το χρονικό διάστημα που διαρκεί ο περιορισμός του ρεύματος πεδίου, οπότε οι διαφορικές εξισώσεις (2.81), (2.85) και (2.90) αντίστοιχα που περιγράφουν τη δυναμική τους απόκριση αμελούνται από το γραμμικοποιημένο μοντέλο του ΣΠΥ.

Αλγεβρική εξίσωση σήματος εξόδου του ΣΠΥ:

$$V_{OEL_i} = K_{P_i} (I_{fd_i} - I_{ref_i}) + K_{I_i} x_{OEL_i}$$
(4.11)

Διαφορικές εξισώσεις του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος:

$$\dot{x}_{W_{i}}^{PSS} = -\frac{1}{T_{W_{i}}} x_{W_{i}}^{PSS} + \frac{1}{T_{W_{i}}} \frac{\omega_{r_{i}} - \omega_{sys}}{\omega_{b}}$$
(4.12)

$$\dot{x}_{1_{i}}^{PSS} = -\frac{1}{T_{2_{i}}} x_{1_{i}}^{PSS} + \frac{K_{PSS_{i}}}{T_{2_{i}}} \left( 1 - \frac{T_{1_{i}}}{T_{2_{i}}} \right) \left[ \frac{\omega_{r_{i}} - \omega_{sys}}{\omega_{b}} - x_{W_{i}}^{PSS} \right]$$
(4.13)

$$\dot{x}_{2_{i}}^{PSS} = -\frac{1}{T_{4_{i}}} x_{2_{i}}^{PSS} + \frac{1}{T_{4_{i}}} \left( 1 - \frac{T_{3_{i}}}{T_{4_{i}}} \right) \left[ x_{1_{i}}^{PSS} + K_{PSS_{i}} \frac{T_{1_{i}}}{T_{2_{i}}} \left( \frac{\omega_{r_{i}} - \omega_{sys}}{\omega_{b}} - x_{W_{i}}^{PSS} \right) \right]$$
(4.14)

Αλγεβρική εξίσωση σήματος εξόδου του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος:

$$V_{PSS_{i}} = x_{2_{i}}^{PSS} + \frac{T_{3_{i}}}{T_{4_{i}}} \left[ x_{1_{i}}^{PSS} + K_{PSS_{i}} \frac{T_{1_{i}}}{T_{2_{i}}} \left( \frac{\omega_{r_{i}} - \omega_{sys}}{\omega_{b}} - x_{W_{i}}^{PSS} \right) \right]$$
(4.15)

Για την εξαγωγή του γραμμικοποιημένου μοντέλου της *i* μονάδας παραγωγής, θα πρέπει να γραμμικοποιηθεί το σύνολο των παραπάνω διαφορικών και αλγεβρικών σχέσεων.

Το διάνυσμα  $\Delta \mathbf{x}_{SG,i}$  του συνόλου των γραμμικοποιημένων μεταβλητών κατάστασης αποτελείται από:

• Το γραμμικοποιημένο διάνυσμα κατάστασης  $\Delta \mathbf{x}_{SM,i}$  της σύγχρονης μηχανής.

$$\Delta \mathbf{x}_{SM,i} = \begin{bmatrix} \Delta \delta_i & \Delta \omega_{R_i} & \Delta E'_{d_i} & \Delta E'_{q_i} \end{bmatrix}^T$$
(4.16)

όπου:

$$\Delta \omega_{R_i} = \frac{\Delta \omega_{r_i}}{\omega_b} = \frac{\omega_{r_i}(t_0) - \omega_{\text{sys}}}{\omega_b}$$
(4.17)

δηλαδή, μεταβλητή κατάστασης του γραμμικοποιημένου μοντέλου της σύγχρονης μηχανής θεωρείται η ανά μονάδα απόκλιση της ταχύτητας του δρομέα από την ταχύτητα ω<sub>sys</sub>.

• Το διάνυσμα κατάστασης  $\Delta \mathbf{x}_{AVR,i}$  του APT.

$$\Delta \mathbf{x}_{AVR,i} = \begin{bmatrix} \Delta E_{f_i} & \Delta x_{II_i} \end{bmatrix}^T \tag{4.18}$$

- Τη μεταβλητή κατάστασης  $\Delta x_{OEL_i}$  της ολοκληρωτικής βαθμίδας της μονάδας ελέγχου του ΣΠΥ.
- Το διάνυσμα κατάστασης Δx<sub>PSS,i</sub> του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος.

$$\Delta \mathbf{x}_{PSS,i} = \begin{bmatrix} \Delta x_{W_i}^{PSS} & \Delta x_{1_i}^{PSS} & \Delta x_{2_i}^{PSS} \end{bmatrix}^T$$
(4.19)

Ισοδύναμα, το διάνυσμα  $\Delta \mathbf{x}_{SG,i}$  των γραμμικοποιημένων μεταβλητών κατάστασης της γενικευμένης σύγχρονης γεννήτριας γράφεται:

$$\Delta \mathbf{x}_{SG,i} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{SM,i}^T & \Delta \mathbf{x}_{AVR,i}^T & \Delta \mathbf{x}_{OEL_i} & \Delta \mathbf{x}_{PSS,i}^T \end{bmatrix}^T$$
(4.20)

Επιπρόσθετα, ορίζεται το διάνυσμα  $\Delta \mathbf{u}_{ref.i}$  απόκλισης των σημάτων αναφοράς το οποίο αποτελείται από:

- Την απόκλιση της τάσης αναφοράς  $\Delta V_{ref_i}$  του APT.
- Την απόκλιση του ρεύματος αναφοράς του  $\Delta I_{ref_i}$  ΣΠΥ.

Δηλαδή:

$$\Delta \mathbf{u}_{ref,i} = \begin{bmatrix} \Delta V_{ref_i} & \Delta I_{ref_i} \end{bmatrix}^T$$
(4.21)

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, το ρεύμα αναφοράς  $I_{ref_i}$  του ΣΠΥ παραμένει σταθερό είτε στη μέγιστη  $(I_{fd_i}^{\max})$  είτε στην ελάχιστη  $(I_{fd_i}^{\lim})$  επιτρεπόμενη τιμή του κατά το χρονικό διάστημα περιορισμού του ρεύματος διέγερσης. Επομένως, θεωρείται ότι κατά τη διάρκεια του εξεταζόμενου διαστήματος, το ρεύμα αναφοράς  $I_{ref_i}$  του ΣΠΥ μετατρέπεται από μεταβλητή κατάστασης σε σήμα αναφοράς.

Η σειρά με την οποία θα γραμμικοποιηθούν οι εξισώσεις των επιμέρους συνιστωσών της μονάδας παραγωγής δεν είναι τυχαία. Συγκεκριμένα, αρχικά θα εξαχθεί το γραμμικοποιημένο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής. Στη συνέχεια, θα γραμμικοποιηθούν οι εξισώσεις που αναφέρονται στις διατάξεις του ΣΠΥ και του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος, διότι τα σήματα εξόδου τους  $V_{OEL_i}$  και  $V_{PSS_i}$ 

αντίστοιχα επιδρούν στην είσοδο του APT. Έχοντας τις γραμμικοποιημένες σχέσεις των τελευταίων σημάτων, είναι δυνατή η γραμμικοποίηση του μοντέλου του APT.
#### 4.2.2 Γραμμικοποιημένο μοντέλο σύγχρονης μηχανής

Στη συνέχεια, θα αναφερθούμε αναλυτικά στη γραμμικοποίηση ενός διασυνδεδεμένου συστήματος, για το οποίο θεωρείται ότι η γωνιακή συχνότητα  $\omega_{sys}$  του συστήματος παραμένει σταθερή στην ονομαστική της τιμή, δηλαδή:

$$\omega_{sys} = \omega_b \tag{4.22}$$

Η ανάλυση μπορεί να επεκταθεί και σε αυτόνομο σύστημα θεωρώντας κατά προσέγγιση ότι η συχνότητα του συστήματος  $\omega_{sys}$  παραμένει σταθερή στην τιμή που είχε στο σημείο που γίνεται η γραμμικοποίηση, δηλαδή:

$$\omega_{sys} = \omega_{sys}^0 \tag{4.23}$$

Για διασυνδεδεμένο σύστημα λοιπόν, ο λόγος  $\lambda_{\omega}$  των συχνοτήτων  $\omega_{sys}$  προς  $\omega_b$  είναι ίσος με τη μονάδα, ενώ ισχύει ότι:

$$\Delta \omega_{\rm sys} = 0 \tag{4.24}$$

Συνεπώς, το γραμμικοποιημένο μοντέλο της *i* σύγχρονης μηχανής παριστάνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\Delta \delta_i = \omega_b \Delta \omega_{R_i} \tag{4.25}$$

$$\Delta \dot{\omega}_{R_i} = \frac{1}{2H_i} \Delta T_{m_i} - \frac{i_{d_i}(t_0)}{2H_i} \Delta E'_{d_i} - \frac{i_{q_i}(t_0)}{2H_i} \Delta E'_{q_i} - \frac{E'_{d_i}(t_0) + (X'_{q_i} - X'_{d_i})i_{q_i}(t_0)}{2H_i} \Delta i_{d_i}$$
(4.26)

$$-\frac{E'_{q_i}(t_0) + (X'_{q_i} - X'_{d_i})i_{d_i}(t_0)}{2H_i}\Delta i_{q_i} - \frac{D_i}{2H_i}\Delta\omega_{R_i}$$
(4.20)

$$\Delta \dot{E}'_{d_i} = -\frac{1}{T'_{q0_i}} \Delta E'_{d_i} + \frac{X_{q_i} - X'_{q_i}}{T'_{q0_i}} \Delta i_{q_i}$$
(4.27)

$$\Delta \dot{E}'_{q_i} = \frac{1}{T'_{d0_i}} \Delta E_{f_i} - \frac{1}{T'_{d0_i}} \Delta E'_{q_i} - \frac{X_{d_i} - X'_{d_i}}{T'_{d0_i}} \Delta i_{d_i}$$
(4.28)

$$\begin{bmatrix} \Delta v_{d_i} \\ \Delta v_{q_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta E'_{d_i} \\ \Delta E'_{q_i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{s_i} & -X'_{q_i} \\ X'_{d_i} & r_{s_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{d_i} \\ \Delta i_{q_i} \end{bmatrix}$$
(4.29)

όπου η μεταβλητή  $x(t_0)$  υποδηλώνει την τιμή της αντίστοιχης μεταβλητής τη χρονική στιγμή της γραμμικοποίησης.

Σε μορφή πινάκων, το σύνολο των γραμμικοποιημένων διαφορικών εξισώσεων (4.25)-(4.28) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_{SM,i} = \mathbf{A}_{SM,i} \Delta \mathbf{x}_{SM,i} + \mathbf{B}_{SM,i}^{I} \Delta \mathbf{i}_{dq,i} + \mathbf{A}_{SM,i}^{AVR} \Delta \mathbf{x}_{AVR,i} + \mathbf{B}_{SM,i}^{M} \Delta T_{m_{i}}$$
(4.30)

όπου:

$$\Delta \mathbf{i}_{dq,i} = \begin{bmatrix} \Delta i_{d_i} & \Delta i_{q_i} \end{bmatrix}^T \mathbf{A}_{SM,i}^{AVR} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T'_{d0_i}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \mathbf{B}_{SM,i}^{M} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2H_i} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{A}_{SM,i} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_b & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D_i}{2H_i} & -\frac{i_{d_i}(t_0)}{2H_i} & -\frac{i_{q_i}(t_0)}{2H_i} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T'_{q0_i}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T'_{d0_i}} \end{bmatrix}$$
(4.31)

$$\mathbf{B}_{SM,i}^{I} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{E_{d_{i}}^{\prime}(t_{0}) + (X_{q_{i}}^{\prime} - X_{d_{i}}^{\prime})i_{q_{i}}(t_{0})}{2H_{i}} & 0 & -\frac{X_{d_{i}} - X_{d_{i}}^{\prime}}{T_{d0_{i}}^{\prime}} \\ 0 & -\frac{E_{q_{i}}^{\prime}(t_{0}) + (X_{q_{i}}^{\prime} - X_{d_{i}}^{\prime})i_{d_{i}}(t_{0})}{2H_{i}} & \frac{X_{q_{i}} - X_{q_{i}}^{\prime}}{T_{d0_{i}}^{\prime}} & 0 \end{bmatrix}$$

#### 4.2.3 Γραμμικοποιημένο μοντέλο ΣΠΥ

Το ρεύμα πεδίου  $I_{fd_i}$  το οποίο εισάγεται στο ΣΠΥ *i* σύγχρονης γεννήτριας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_{fd_i} = E'_{q_i} + (X_{d_i} - X'_{d_i})i_{d_i}$$
(4.32)

Εφόσον το ΣΠΥ είναι ενεργοποιημένο, η (4.32) αντικαθίσταται στην (4.10) και άρα η τελευταία παίρνει την εξής μορφή:

$$\dot{x}_{OEL_i} = E'_{q_i} + (X_{d_i} - X'_{d_i})i_{d_i} - I_{ref_i}$$
(4.33)

Από τη γραμμικοποίηση της (4.33) προκύπτει ότι:

$$\Delta \dot{x}_{OEL_{i}} = \Delta E'_{q_{i}} + (X_{d_{i}} - X'_{d_{i}}) \Delta \dot{i}_{d_{i}} - \Delta I_{ref_{i}}$$
(4.34)

Σε μορφή πινάκων, η παραπάνω γραμμικοποιημένη διαφορική εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_{OEL_i} = \mathbf{A}_{OEL,i}^{SM} \Delta \mathbf{x}_{SM,i} + \mathbf{B}_{OEL,i}^{I} \Delta \mathbf{i}_{dq,i} + \mathbf{B}_{OEL,i}^{ref} \Delta \mathbf{u}_{ref,i}$$
(4.35)

όπου:

$$\mathbf{A}_{OEL,i}^{SM} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_{OEL,i}^{I} = \begin{bmatrix} (X_{d_i} - X'_{d_i}) & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_{OEL,i}^{ref} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \end{bmatrix}$$
(4.36)

Το σήμα εξόδου του εξεταζόμενου ΣΠΥ προκύπτει εάν αντικατασταθεί το ρεύμα πεδίου  $I_{fd_i}$  από την (4.32) στην (4.11).

$$V_{OEL_i} = K_{P_i} E'_{q_i} + K_{P_i} (X_{d_i} - X'_{d_i}) i_{d_i} - K_{P_i} I_{ref_i} + K_{I_i} x_{OEL_i}$$
(4.37)

Γραμμικοποίηση της σχέσης (4.37) δίνει:

$$\Delta V_{OEL_i} = K_{P_i} \Delta E'_{q_i} + K_{P_i} (X_{d_i} - X'_{d_i}) \Delta i_{d_i} - K_{P_i} \Delta I_{ref_i} + K_{I_i} \Delta x_{OEL_i}$$
(4.38)

Σε μορφή πινάκων, η γραμμικοποιημένη εξίσωση εξόδου του ΣΠΥ γράφεται ως εξής:

$$\Delta V_{OEL_i} = C_{OEL_i} \Delta \mathbf{x}_{OEL_i} + \mathbf{C}_{OEL,i}^{SM} \Delta \mathbf{x}_{SM,i} + \mathbf{D}_{OEL,i}^{I} \Delta \mathbf{i}_{dq,i} + \mathbf{D}_{OEL,i}^{ref} \Delta \mathbf{u}_{ref,i}$$
(4.39)

όπου:

$$C_{OEL,i} = K_{I_i} \quad \mathbf{C}_{OEL,i}^{SM} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & K_{P_i} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_{OEL,i}^{I} = \begin{bmatrix} K_{P_i} (X_{d_i} - X'_{d_i}) & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D}_{OEL,i}^{ref} = \begin{bmatrix} 0 & -K_{P_i} \end{bmatrix}$$
(4.40)

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση κατά την οποία το ΣΠΥ της i σύγχρονης γεννήτριας είναι ανενεργό, τα διανύσματα γραμμής των (4.36) και (4.40) είναι μηδενικά, ενώ και το βαθμωτό μέγεθος  $C_{OEL,i}$  παίρνει την τιμή μηδέν.

Επίσης, εάν για παράδειγμα το ΣΠΥ της *i* σύγχρονης γεννήτριας διαθέτει μόνο αναλογική μονάδα ελέγχου (δηλαδή  $K_{I_i} = 0$ ), η αντίστοιχη μεταβλητή κατάστασης  $\Delta x_{OEL_i}$  δεν υφίσταται. Οπότε στην περίπτωση αυτή, εφόσον το ΣΠΥ ενεργοποιηθεί, το αντίστοιχο γραμμικοποιημένο μοντέλο προκύπτει θεωρώντας όλα τα διανύσματα της (4.36) και το βαθμωτό  $C_{OEL,i}$  μέγεθος μηδενικά.

## 4.2.4 Γραμμικοποιημένο μοντέλο σταθεροποιητή συστήματος ισχύος

Το σύνολο των γραμμικοποιημένων διαφορικών εξισώσεων του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος αποτελείται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\Delta \dot{x}_{W_{i}}^{PSS} = -\frac{1}{T_{W_{i}}} \Delta x_{W_{i}}^{PSS} + \frac{1}{T_{W_{i}}} \Delta \omega_{R_{i}}$$
(4.41)

$$\Delta \dot{x}_{1_{i}}^{PSS} = -\frac{1}{T_{2_{i}}} \Delta x_{1_{i}}^{PSS} + \frac{K_{PSS_{i}}}{T_{2_{i}}} \left( 1 - \frac{T_{1_{i}}}{T_{2_{i}}} \right) \left[ \Delta \omega_{R_{i}} - \Delta x_{W_{i}}^{PSS} \right]$$
(4.42)

$$\Delta \dot{x}_{2_{i}}^{PSS} = -\frac{1}{T_{4_{i}}} \Delta x_{2_{i}}^{PSS} + \frac{1}{T_{4_{i}}} \left( 1 - \frac{T_{3_{i}}}{T_{4_{i}}} \right) \left[ \Delta x_{1_{i}}^{PSS} + K_{PSS_{i}} \frac{T_{1_{i}}}{T_{2_{i}}} \left( \Delta \omega_{R_{i}} - \Delta x_{W_{i}}^{PSS} \right) \right]$$
(4.43)

Σε μορφή πινάκων, το σύνολο των (4.41)-(4.43) γράφεται ως εξής:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_{PSS,i} = \mathbf{A}_{PSS,i} \Delta \mathbf{x}_{PSS,i} + \mathbf{A}_{PSS,i}^{SM} \Delta \mathbf{x}_{SM,i}$$
(4.44)

όπου:

$$\mathbf{A}_{PSS,i} = \begin{vmatrix} -\frac{1}{T_{W_i}} & 0 & 0 \\ -\frac{K_{PSS_i}}{T_{2_i}} \left( 1 - \frac{T_{1_i}}{T_{2_i}} \right) & -\frac{1}{T_{2_i}} & 0 \\ -\frac{K_{PSS_i}}{T_{4_i}} \frac{T_{1_i}}{T_{2_i}} \left( 1 - \frac{T_{3_i}}{T_{4_i}} \right) & \frac{1}{T_{4_i}} \left( 1 - \frac{T_{3_i}}{T_{4_i}} \right) & -\frac{1}{T_{4_i}} \end{vmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{PSS,i}^{SM} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{T_{W_i}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{PSS_i}}{T_{2_i}} \left( 1 - \frac{T_{1_i}}{T_{2_i}} \right) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{PSS_i}}{T_{2_i}} \left( 1 - \frac{T_{3_i}}{T_{4_i}} \right) & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$(4.45)$$

Το γραμμικοποιημένο σήμα εξόδου του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta V_{PSS_i} = \Delta x_{2_i}^{PSS} + \frac{T_{3_i}}{T_{4_i}} \left[ \Delta x_{1_i}^{PSS} + K_{PSS_i} \frac{T_{1_i}}{T_{2_i}} \left( \Delta \omega_{R_i} - \Delta x_{W_i}^{PSS} \right) \right]$$
(4.46)

ή από την αντίστοιχη σχέση:

$$\Delta V_{PSS,i} = \mathbf{C}_{PSS,i} \Delta \mathbf{x}_{PSS,i} + \mathbf{C}_{PSS,i}^{SM} \Delta \mathbf{x}_{SM,i}$$
(4.47)

όπου:

$$\mathbf{C}_{PSS,i} = \begin{bmatrix} -K_{PSS_i} \frac{T_{1_i} T_{3_i}}{T_{2_i} T_{4_i}} & \frac{T_{3_i}}{T_{4_i}} & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_{PSS,i}^{SM} = \begin{bmatrix} 0 & K_{PSS_i} \frac{T_{1_i} T_{3_i}}{T_{2_i} T_{4_i}} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(4.48)

Εάν η μονάδα παραγωγής δεν διαθέτει σταθεροποιητή συστήματος ισχύος, τότε για τον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα κατάστασης του συστήματος όλοι οι πίνακες των (4.45) και (4.48) είναι ίσοι με τους αντίστοιχους μηδενικούς πίνακες.

#### 4.2.5 Γραμμικοποιημένο μοντέλο APT τύπου AC4 κατά IEEE

Οι δύο διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη δυναμική απόκριση του μοντέλου APT τύπου AC4 κατά ΙΕΕΕ γραμμικοποιούνται ως εξής:

$$\Delta \dot{E}_{f_i} = -\frac{1}{T_{A_i}} \Delta E_{f_i} + \frac{K_{A_i}}{T_{A_i}} \Delta x_{ll_i} + \frac{K_{A_i}}{T_{A_i}} \frac{T_{C_i}}{T_{B_i}} \left( \Delta V_{ref_i} - \Delta V_{C_i} + \Delta V_{PSS_i} - \Delta V_{OEL_i} \right)$$
(4.49)

$$\Delta \dot{x}_{ll_i} = -\frac{1}{T_{B_i}} \Delta x_{ll_i} + \frac{T_{B_i} - T_{C_i}}{T_{B_i}^2} \left( \Delta V_{ref_i} - \Delta V_{C_i} + \Delta V_{PSS_i} - \Delta V_{OEL_i} \right)$$
(4.50)

Αναφορικά με το σήμα τάσεως  $V_{C_i}$ , το οποίο εισάγεται στον κύριο αθροιστή εισόδου του ΑΡΤ, θεωρείται ότι ταυτίζεται με το μέτρο της τερματικής τάσης  $V_{t_i}$  της μηχανής (η αντιστάθμιση πτώσης τάσεως αμελείται), δηλαδή:

$$V_{C_i} = V_{t_i} = \sqrt{v_{d_i}^2 + v_{q_i}^2}$$
(4.51)

Οπότε, η απόκλιση του σήματος τάσεως  $\Delta V_{C_i}$  της *i* σύγχρονης γεννήτριας υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta V_{C_i} = \Delta V_{t_i} = \frac{v_{d_i}(t_0)}{V_{t_i}(t_0)} \Delta v_{d_i} + \frac{v_{q_i}(t_0)}{V_{t_i}(t_0)} \Delta v_{q_i}$$
(4.52)

Η παραπάνω εξίσωση (4.52) καθώς επίσης και οι αποκλίσεις των σημάτων εξόδου του ΣΠΥ ( $\Delta V_{OEL_i}$ ) και του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος ( $\Delta V_{PSS_i}$ ), οι οποίες δίνονται από τις (4.39) και (4.47) αντίστοιχα, αντικαθίστανται στις (4.49) και (4.50), οπότε προκύπτει ότι:

$$\begin{split} \Delta \dot{E}_{f_{i}} &= -\frac{1}{T_{A_{i}}} \Delta E_{f_{i}} + \frac{K_{A_{i}}}{T_{A_{i}}} \Delta x_{ll_{i}} + \frac{K_{A_{i}}T_{C_{i}}}{T_{A_{i}}T_{B_{i}}} \Delta V_{ref_{i}} - \frac{K_{A_{i}}T_{C_{i}}}{T_{A_{i}}T_{B_{i}}} \left\{ \frac{v_{d_{i}}(t_{0})}{V_{t_{i}}(t_{0})} \Delta v_{d_{i}} + \frac{v_{q_{i}}(t_{0})}{V_{t_{i}}(t_{0})} \Delta v_{q_{i}} \right\} \\ &+ \frac{K_{A_{i}}T_{C_{i}}}{T_{A_{i}}T_{B_{i}}} \left\{ C_{PSS,i} \Delta \mathbf{x}_{PSS,i} + \mathbf{C}_{OEL,i}^{SM} \Delta \mathbf{x}_{SM,i} \right\} \\ &- \frac{K_{A_{i}}T_{C_{i}}}{T_{A_{i}}T_{B_{i}}} \left\{ C_{OEL_{i}} \Delta x_{OEL_{i}} + \mathbf{C}_{OEL,i}^{SM} \Delta \mathbf{x}_{SM,i} + \mathbf{D}_{OEL,i}^{I} \Delta \mathbf{i}_{dq,i} + \mathbf{D}_{OEL,i}^{ref} \Delta \mathbf{u}_{ref,i} \right\} \\ &\Delta \dot{\mathbf{x}}_{ll_{i}} = -\frac{1}{T_{B_{i}}} \Delta \mathbf{x}_{ll_{i}} + \frac{T_{B_{i}} - T_{C_{i}}}{T_{B_{i}}^{2}} \Delta V_{ref_{i}} - \frac{T_{B_{i}} - T_{C_{i}}}{T_{B_{i}}^{2}} \left\{ \mathbf{C}_{PSS,i} \Delta \mathbf{x}_{PSS,i} + \mathbf{C}_{PSS,i}^{SM} \Delta \mathbf{x}_{SM,i} \right\} \\ &+ \frac{T_{B_{i}} - T_{C_{i}}}{T_{B_{i}}^{2}} \left\{ \mathbf{C}_{PSS,i} \Delta \mathbf{x}_{PSS,i} + \mathbf{C}_{PSS,i}^{SM} \Delta \mathbf{x}_{SM,i} \right\} \\ &+ \frac{T_{B_{i}} - T_{C_{i}}}{T_{B_{i}}^{2}} \left\{ C_{PSS,i} \Delta \mathbf{x}_{PSS,i} + \mathbf{C}_{PSS,i}^{SM} \Delta \mathbf{x}_{SM,i} \right\} \\ &+ \frac{T_{B_{i}} - T_{C_{i}}}{T_{B_{i}}^{2}} \left\{ C_{OEL_{i}} \Delta \mathbf{x}_{OEL_{i}} + \mathbf{C}_{OEL,i}^{SM} \Delta \mathbf{x}_{SM,i} + \mathbf{D}_{OEL,i}^{I} \Delta \mathbf{i}_{dq,i} + \mathbf{D}_{OEL,i}^{ref} \Delta \mathbf{u}_{ref,i} \right\}$$

$$(4.54)$$

Σε μορφή πινάκων, οι γραμμικοποιημένες εξισώσεις του εξεταζόμενου μοντέλου APT γράφονται ως εξής:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_{AVR,i} = \mathbf{A}_{AVR,i} \Delta \mathbf{x}_{AVR,i} + \mathbf{B}_{AVR,i}^{V} \Delta \mathbf{v}_{dq,i} + \mathbf{A}_{AVR,i}^{SM} \Delta \mathbf{x}_{SM,i} + \mathbf{A}_{AVR,i}^{PSS} \Delta \mathbf{x}_{PSS,i} + \mathbf{A}_{AVR,i}^{OEL} \Delta \mathbf{x}_{OEL,i} + \mathbf{B}_{AVR,i}^{I} \Delta \mathbf{i}_{dq,i} + + \mathbf{B}_{AVR,i}^{ref} \Delta \mathbf{u}_{ref,i}$$

$$(4.55)$$

όπου:

$$\Delta \mathbf{v}_{dq,i} = \begin{bmatrix} \Delta v_{d_i} & \Delta v_{q_i} \end{bmatrix}^T \qquad \mathbf{A}_{AVR,i} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{A_i}} & \frac{K_{A_i}}{T_{A_i}} \\ 0 & -\frac{1}{T_{B_i}} \end{bmatrix}$$
(4.56)

$$\mathbf{H}_{AVR,i} = \begin{bmatrix} \frac{K_{A_i}T_{C_i}}{T_{A_i}T_{B_i}} & \frac{T_{B_i} - T_{C_i}}{T_{B_i}^2} \end{bmatrix}^T \quad \mathbf{B}_{AVR,i}^V = -\mathbf{H}_{AVR,i} \begin{bmatrix} \frac{v_{d_i}(t_0)}{V_{t_i}(t_0)} & \frac{v_{q_i}(t_0)}{V_{t_i}(t_0)} \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{A}_{AVR,i}^{SM} = \mathbf{H}_{AVR,i} \{ \mathbf{C}_{PSS,i}^{SM} - \mathbf{C}_{OEL,i}^{SM} \} \quad \mathbf{A}_{AVR,i}^{OEL} = -\mathbf{H}_{AVR,i} C_{OEL,i} \quad \mathbf{A}_{AVR,i}^{PSS} = \mathbf{H}_{AVR,i} \mathbf{C}_{PSS,i}$$
$$\mathbf{B}_{AVR,i}^I = -\mathbf{H}_{AVR,i} \mathbf{D}_{OEL,i}^I \quad \mathbf{B}_{AVR,i}^{ref} = \mathbf{H}_{AVR,i} \{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} - \mathbf{D}_{OEL,i}^{ref} \}$$

#### 4.2.6 Γραμμικοποιημένο μοντέλο μονάδας παραγωγής

Συνοψίζοντας, το γραμμικοποιημένο μοντέλο της *i* μονάδας παραγωγής παριστάνεται από την ακόλουθη διαφορική σχέση:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_{SG,i} = \mathbf{A}_{SG,i} \Delta \mathbf{x}_{SG,i} + \mathbf{B}_{SG,i}^{I} \Delta \dot{\mathbf{i}}_{dq,i} + \mathbf{B}_{SG,i}^{V} \Delta \boldsymbol{v}_{dq,i} + \mathbf{B}_{SG,i}^{M} \Delta T_{m_{i}} + \mathbf{B}_{SG,i}^{ref} \Delta \mathbf{u}_{ref,i}$$
(4.57)

όπου:

$$\mathbf{A}_{SG,i} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{SM,i} & \mathbf{A}_{SM,i}^{AVR} & \mathbf{0}_{4\times 1} & \mathbf{0}_{4\times 3} \\ \mathbf{A}_{AVR,i}^{SM} & \mathbf{A}_{AVR,i} & \mathbf{A}_{AVR,i}^{OEL} & \mathbf{A}_{AVR,i}^{PSS} \\ \mathbf{A}_{OEL,i}^{SM} & \mathbf{0}_{1\times 2} & \mathbf{0} & \mathbf{0}_{1\times 3} \\ \mathbf{A}_{OEL,i}^{SM} & \mathbf{0}_{3\times 2} & \mathbf{0}_{3\times 1} & \mathbf{A}_{PSS,i} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{SG,i}^{I} = \begin{bmatrix} \left( \mathbf{B}_{SM,i}^{I} \right)^{T} & \left( \mathbf{B}_{AVR,i}^{I} \right)^{T} & \left( \mathbf{B}_{OEL,i}^{I} \right)^{T} & \mathbf{0}_{3\times 2}^{T} \end{bmatrix}^{T} \quad \mathbf{B}_{SG,i}^{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4\times 2}^{T} & \left( \mathbf{B}_{AVR,i}^{V} \right)^{T} & \mathbf{0}_{3\times 2}^{T} \end{bmatrix}^{T}$$

$$(4.58)$$

 $\mathbf{B}_{SG,i}^{M} = \begin{bmatrix} \left( \mathbf{B}_{SM,i}^{M} \right)^{T} & \mathbf{0}_{2\times 1}^{T} & \mathbf{0} & \mathbf{0}_{3\times 1}^{T} \end{bmatrix}^{T} \qquad \mathbf{B}_{SG,i}^{ref} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4\times 2}^{T} & \left( \mathbf{B}_{AVR,i}^{ref} \right)^{T} & \left( \mathbf{B}_{OEL,i}^{ref} \right)^{T} & \mathbf{0}_{3\times 2}^{T} \end{bmatrix}^{T}$ 

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί, ότι εάν για παράδειγμα είναι επιθυμητή η αλλαγή του μοντέλου του APT, τότε στον πίνακα A<sub>SS,i</sub> θα πρέπει να ενημερωθούν μόνο οι πίνακες που βρίσκονται στη δεύτερη γραμμή και στη δεύτερη στήλη, ενώ για κάθε ένα από τους υπόλοιπους πίνακες θα πρέπει να υπολογιστεί εκ νέου μόνο ο πίνακας της δεύτερης γραμμής.

Σε μορφή πινάκων, οι γραμμικοποιημένες αλγεβρικές εξισώσεις του στάτη της μηχανής στο πλαίσιο αναφοράς *d<sub>i</sub>q<sub>i</sub>* του δρομέα μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\Delta \mathbf{v}_{dq,i} = \Delta \mathbf{E}'_{dq,i} - \mathbf{Z}_{SG,i} \Delta \mathbf{i}_{dq,i}$$
(4.59)

όπου:

$$\Delta \mathbf{E}'_{dq,i} = \begin{bmatrix} \Delta E'_{d_i} & \Delta E'_{q_i} \end{bmatrix}^T$$
(4.60)

$$\mathbf{Z}_{SG,i} = \begin{bmatrix} r_{s_i} & -X'_{q_i} \\ X'_{d_i} & r_{s_i} \end{bmatrix}$$
(4.61)

## 4.3 Γραμμικοποίηση Μηχανών Επαγωγής

Το σύνολο των διαφορικών και αλγεβρικών σχέσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά της *i* μηχανής επαγωγής, η οποία παριστάνεται από το μοντέλο 3<sup>ης</sup> τάξης της ενότητας 2.5.2, αποτελείται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

Διαφορική εξίσωση επιταχύνσεως του δρομέα:

$$2H_{i}\frac{\dot{\omega}_{r_{i}}}{\omega_{b}} = E_{d_{i}}'i_{ds_{i}} + E_{q_{i}}'i_{qs_{i}} - T_{m0_{i}}\left[(1 - \alpha_{m_{i}}) + \alpha_{m_{i}}\left(\frac{\omega_{r_{i}}}{\omega_{b}}\right)^{m_{i}}\right]$$
(4.62)

 Ηλεκτρικές διαφορικές εξισώσεις των τυλιγμάτων του δρομέα της μηχανής στο πλαίσιο αναφοράς d<sub>i</sub>q<sub>i</sub> της μηχανής:

$$T'_{r_i}\dot{E}'_{d_i} = -E'_{d_i} - (X_{ss_i} - X'_{s_i})i_{qs_i} + (\omega_{sys} - \omega_{r_i})T'_{r_i}E'_{q_i}$$
(4.63)

$$T'_{r_i} \dot{E}'_{q_i} = -E'_{q_i} + (X_{ss_i} - X'_{s_i})i_{ds_i} - (\omega_{sys} - \omega_{r_i})T'_{r_i}E'_{d_i}$$
(4.64)

Αλγεβρικές εξισώσεις του στάτη της μηχανής στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος:

$$\begin{bmatrix} v_{x_i} \\ v_{y_i} \end{bmatrix} = \lambda_{\omega} \begin{bmatrix} E'_{d_i} \\ E'_{q_i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{s_i} & -\lambda_{\omega} X'_{s_i} \\ \lambda_{\omega} X'_{s_i} & r_{s_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{x_i} \\ i_{y_i} \end{bmatrix}$$
(4.65)

Υπενθυμίζεται ότι στο εξεταζόμενο μοντέλο μηχανής επαγωγής, ως θετική φορά για τα ρεύματα του στάτη  $i_{ds_i}$  και  $i_{qs_i}$  υιοθετείται η εισερχόμενη στη μηχανή.

Από τη γραμμικοποίηση των (4.62)-(4.64) τη χρονική στιγμή t<sub>0</sub> προκύπτει το ακόλουθο σύνολο σχέσεων:

$$\frac{\Delta \dot{\omega}_{r_{i}}}{\omega_{b}} = \frac{E'_{d_{i}}(t_{0})}{2H_{i}} \Delta i_{ds_{i}} + \frac{i_{ds_{i}}(t_{0})}{2H_{i}} \Delta E'_{d_{i}} + \frac{E'_{q_{i}}(t_{0})}{2H_{i}} \Delta i_{qs_{i}} + \frac{i_{qs_{i}}(t_{0})}{2H_{i}} \Delta E'_{q_{i}} - \frac{m_{i}\alpha_{m_{i}}T_{m0_{i}}}{2H_{i}} \left(\frac{\omega_{r_{i}}(t_{0})}{\omega_{b}}\right)^{m_{i}-1} \frac{\Delta \omega_{r_{i}}}{\omega_{b}}$$
(4.66)

$$\Delta \dot{E}'_{d_i} = -\frac{1}{T'_{r_i}} \Delta E'_{d_i} - \frac{X_{ss_i} - X'_{s_i}}{T'_{r_i}} \Delta i_{qs_i} - E'_{q_i} \Delta \omega_{r_i} + (\omega_{sys} - \omega_{r_i}(t_0)) \Delta E'_{q_i}$$
(4.67)

$$\Delta \dot{E}'_{q_i} = -\frac{1}{T'_{r_i}} \Delta E'_{q_i} + \frac{X_{ss_i} - X'_{s_i}}{T'_{r_i}} \Delta i_{ds_i} + E'_{d_i} \Delta \omega_{r_i} - (\omega_{sys} - \omega_{r_i}(t_0)) \Delta E'_{d_i}$$
(4.68)

Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι η ολίσθηση s<sub>i</sub> της i μηχανής επαγωγής ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$s_i = \frac{\omega_{sys} - \omega_{r_i}}{\omega_b} \tag{4.69}$$

όπου η γωνιακή συχνότητα  $\omega_{sys}$  του συστήματος θεωρείται ίση με τη βασική της τιμή  $\omega_b$ . Επομένως, η μεταβολή  $\Delta s_i$  της ολίσθησης προκύπτει ίση με:

$$\Delta s_i = -\frac{\Delta \omega_{r_i}}{\omega_b} \tag{4.70}$$

Αντικαθιστώντας τις (4.69) και (4.70) στις (4.66)-(4.68), προκύπτει το ακόλουθο σύνολο σχέσεων:

$$\Delta \dot{s}_{i} = -\frac{E_{d_{i}}'(t_{0})}{2H_{i}} \Delta \dot{t}_{ds_{i}} - \frac{\dot{t}_{ds_{i}}(t_{0})}{2H_{i}} \Delta E_{d_{i}}' - \frac{E_{q_{i}}'(t_{0})}{2H_{i}} \Delta \dot{t}_{qs_{i}} - \frac{\dot{t}_{qs_{i}}(t_{0})}{2H_{i}} \Delta E_{q_{i}}' - \frac{m_{i}\alpha_{m_{i}}T_{m0_{i}}(1-s_{i}(t_{0}))^{m_{i}-1}}{2H_{i}} \Delta s_{i} \quad (4.71)$$

$$\Delta \dot{E}'_{d_i} = -\frac{1}{T'_{r_i}} \Delta E'_{d_i} - \frac{X_{ss_i} - X'_{s_i}}{T'_{r_i}} \Delta i_{qs_i} + \omega_b E'_{q_i}(t_0) \Delta s_i + s_i(t_0) \omega_b \Delta E'_{q_i}$$
(4.72)

$$\Delta \dot{E}'_{q_i} = -\frac{1}{T'_{r_i}} \Delta E'_{q_i} + \frac{X_{ss_i} - X'_{s_i}}{T'_{r_i}} \Delta i_{ds_i} - \omega_b E'_{d_i}(t_0) \Delta s_i - s_i(t_0) \omega_b \Delta E'_{d_i}$$
(4.73)

όπου:

$$s_i(t_0) = \frac{\omega_{sys} - \omega_{r_i}(t_0)}{\omega_b}$$

$$(4.74)$$

Στη συνέχεια, τα εισερχόμενα ρεύματα του στάτη  $i_{ds_i}$  και  $i_{qs_i}$  και οι αντίστοιχες αποκλίσεις τους στο πλαίσιο αναφοράς  $d_iq_i$  της μηχανής αντικαθίστανται από τα εγχεόμενα ρεύματα στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\begin{bmatrix} i_{ds_i} \\ i_{qs_i} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} i_{x_i} \\ i_{y_i} \end{bmatrix} \quad \kappa \alpha i \qquad \begin{bmatrix} \Delta i_{ds_i} \\ \Delta i_{qs_i} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \Delta i_{x_i} \\ \Delta i_{y_i} \end{bmatrix}$$
(4.75)

Επομένως, το σύνολο των (4.71)-(4.73) παίρνει την εξής μορφή:

$$\Delta \dot{s}_{i} = \frac{E'_{d_{i}}(t_{0})}{2H_{i}} \Delta \dot{t}_{x_{i}} + \frac{\dot{t}_{x_{i}}(t_{0})}{2H_{i}} \Delta E'_{d_{i}} + \frac{E'_{q_{i}}(t_{0})}{2H_{i}} \Delta \dot{t}_{y_{i}} + \frac{\dot{t}_{y_{i}}(t_{0})}{2H_{i}} \Delta E'_{q_{i}} - \frac{m_{i}\alpha_{m_{i}}T_{m0_{i}}(1-s_{i}(t_{0}))^{m_{i}-1}}{2H_{i}} \Delta s_{i}$$

$$(4.76)$$

$$\Delta \dot{E}'_{d_i} = -\frac{1}{T'_{r_i}} \Delta E'_{d_i} + \frac{X_{ss_i} - X'_{s_i}}{T'_{r_i}} \Delta \dot{i}_{y_i} + \omega_b E'_{q_i}(t_0) \Delta s_i + s_i(t_0) \omega_b \Delta E'_{q_i}$$
(4.77)

$$\Delta \dot{E}'_{q_i} = -\frac{1}{T'_{r_i}} \Delta E'_{q_i} - \frac{X_{ss_i} - X'_{s_i}}{T'_{r_i}} \Delta i_{x_i} - \omega_b E'_{d_i}(t_0) \Delta s_i - s_i(t_0) \omega_b \Delta E'_{d_i}$$
(4.78)

Εάν οριστεί το γραμμικοποιημένο διάνυσμα κατάστασης  $\Delta \mathbf{x}_{IM,i}$  της *i* ασύγχρονης μηχανής ως εξής:

$$\Delta \mathbf{x}_{IM,i} = \begin{bmatrix} \Delta s_i & \Delta E'_{d_i} & \Delta E'_{q_i} \end{bmatrix}^T$$
(4.79)

τότε το σύνολο των σχέσεων (4.71)-(4.73) μπορεί να γραφεί στην ακόλουθη μορφή:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_{IM,i} = \mathbf{A}_{IM,i} \Delta \mathbf{x}_{IM,i} + \mathbf{B}_{IM,i}^{I} \Delta \dot{\mathbf{i}}_{xy,i}$$
(4.80)

όπου το διάνυσμα των εξερχόμενων ρευμάτων στάτη  $\Delta \mathbf{i}_{dqs,i}$  δίνεται από την (4.81):

$$\Delta \mathbf{i}_{xy,i} = \begin{bmatrix} \Delta i_{x_i} & \Delta i_{y_i} \end{bmatrix}^T \tag{4.81}$$

ενώ οι πίνακες  $\mathbf{A}_{IM,i}$  και  $\mathbf{B}_{IM,i}$ υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\mathbf{A}_{IM,i} = \begin{bmatrix} -\frac{m_{i}\alpha_{m_{i}}T_{m_{0_{i}}}(1-s_{i})^{m_{i}-1}}{2H_{i}} & \frac{i_{x_{i}}(t_{0})}{2H_{i}} & \frac{i_{y_{i}}(t_{0})}{2H_{i}} \\ \omega_{b}E'_{q_{i}}(t_{0}) & -\frac{1}{T'_{r_{i}}} & s_{i}(t_{0})\omega_{b} \\ -\omega_{b}E'_{d_{i}}(t_{0}) & -s_{i}(t_{0})\omega_{b} & -\frac{1}{T'_{r_{i}}} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_{IM,i}^{I} = \begin{bmatrix} \frac{E'_{d_{i}}(t_{0})}{2H_{i}} & \frac{E'_{q_{i}}(t_{0})}{2H_{i}} \\ 0 & \frac{X_{ss_{i}} - X'_{s_{i}}}{T'_{r_{i}}} \\ -\frac{X_{ss_{i}} - X'_{s_{i}}}{T'_{r_{i}}} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.82)$$

Θεωρώντας ότι  $\lambda_{\omega}=1$ , οι γραμμικοποιημένες αλγεβρικές εξισώσεις του στάτη γράφονται σε μορφή πινάκων ως εξής:

$$\Delta \mathbf{v}_{xy,i} = \Delta \mathbf{E}'_{dq,i} - \mathbf{Z}_{IM,i} \Delta \mathbf{i}_{xy,i}$$
(4.83)

όπου:

$$\Delta \mathbf{v}_{xy,i} = \begin{bmatrix} \Delta v_{x_i} & \Delta v_{y_i} \end{bmatrix}^T \tag{4.84}$$

$$\Delta \mathbf{E}'_{dq,i} = \begin{bmatrix} \Delta E'_{d_i} & \Delta E'_{q_i} \end{bmatrix}^T$$
(4.85)

$$\mathbf{Z}_{IM,i} = \begin{bmatrix} r_{s_i} & -X'_{s_i} \\ X'_{s_i} & r_{s_i} \end{bmatrix}$$
(4.86)

#### 4.4 Γραμμικοποίηση Μη Γραμμικών Στατικών Φορτίων

Στην περίπτωση κατά την οποία το φορτίο ενός ζυγού είναι σταθερής αγωγιμότητας, η σχέση της τάσεως του ζυγού και του ρεύματος του φορτίου είναι γραμμική, οπότε η επίδραση της μεταβολής του φορτίου στο δίκτυο αποτυπώνεται στον πίνακα αγωγιμοτήτων.

Όλοι οι υπόλοιποι τύποι φορτίων παριστάνονται με μία μη γραμμική σχέση μεταξύ της τάσεως του ζυγού και του ρεύματος του φορτίου. Στις περιπτώσεις αυτές, η επίδραση των φορτίων στον Ιακωβιανό

πίνακα κατάστασης του συστήματος υπολογίζεται με την γραμμικοποιημένη παράσταση του ενεργού και του αέργου φορτίου.

Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.8.1, ένα στατικό φορτίο στον *i* ζυγό του δικτύου εγχέει δύο συνιστώσες ρεύματος στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς *xy* του συστήματος, οι οποίες υπολογίζονται από τις παρακάτω μη γραμμικές σχέσεις:

$$i_{Lx_i} = -\frac{P_{L_i}(V_{L_i})v_{Lx_i} + Q_{L_i}(V_{L_i})v_{Ly_i}}{v_{Lx_i}^2 + v_{Ly_i}^2}$$
(4.87)

$$\dot{i}_{Ly_i} = -\frac{P_{L_i}(V_{L_i})v_{Ly_i} - Q_{L_i}(V_{L_i})v_{Lx_i}}{v_{Lx_i}^2 + v_{Ly_i}^2}$$
(4.88)

όπου το μέτρο της τάσεως στο ζυγό i είναι ίσο με:

$$V_{L_i} = \sqrt{v_{Lx_i}^2 + v_{Ly_i}^2}$$
(4.89)

Εάν το στατικό φορτίο είναι εκθετικού τύπου σύμφωνα με τις (2.178)-(2.179), τότε για μικρές μεταβολές της τάσεως του ζυγού, η απόκλιση του ρεύματος που εγχέεται στο δίκτυο για ονομαστική ζήτηση του φορτίου ( $z_{L_i} = 1$ ) περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{Lx_i} \\ \Delta i_{Ly_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{Lxx_i} & -B_{Lxy_i} \\ B_{Lyx_i} & G_{Lyy_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{Lx_i} \\ \Delta v_{Ly_i} \end{bmatrix}$$
(4.90)

όπου τα στοιχεία του 2×2 τετραγωνικού πίνακα υπολογίζονται ως εξής:

$$G_{Lxx_{i}} = \frac{P_{L_{i}}(t_{0})}{V_{L_{i}}^{2}(t_{0})} \left[ (\alpha_{L_{i}} - 2) \left( \frac{v_{Lx_{i}}(t_{0})}{V_{L_{i}}(t_{0})} \right)^{2} + 1 \right] + \frac{Q_{L_{i}}(t_{0})}{V_{L_{i}}^{2}(t_{0})} \left[ (\beta_{L_{i}} - 2) \frac{v_{Lx_{i}}(t_{0})v_{Ly_{i}}(t_{0})}{V_{L_{i}}^{2}(t_{0})} \right]$$
(4.91)

$$B_{Lxy_{i}} = -\frac{P_{L_{i}}(t_{0})}{V_{L_{i}}^{2}(t_{0})} \left[ (\alpha_{L_{i}} - 2) \frac{v_{Lx_{i}}(t_{0})v_{Ly_{i}}(t_{0})}{V_{L_{i}}^{2}(t_{0})} \right] - \frac{Q_{L_{i}}(t_{0})}{V_{L_{i}}^{2}(t_{0})} \left[ (\beta_{L_{i}} - 2) \left( \frac{v_{Ly_{i}}(t_{0})}{V_{L_{i}}(t_{0})} \right)^{2} + 1 \right]$$
(4.92)

$$B_{Lxy_{i}} = \frac{P_{L_{i}}(t_{0})}{V_{L_{i}}^{2}(t_{0})} \left[ (\alpha_{L_{i}} - 2) \frac{v_{Lx_{i}}(t_{0})v_{Ly_{i}}(t_{0})}{V_{L_{i}}^{2}(t_{0})} \right] - \frac{Q_{L_{i}}(t_{0})}{V_{L_{i}}^{2}(t_{0})} \left[ (\beta_{L_{i}} - 2) \left( \frac{v_{Lx_{i}}(t_{0})}{V_{L_{i}}(t_{0})} \right)^{2} + 1 \right]$$
(4.93)

$$G_{Lyy_{i}} = \frac{P_{L_{i}}(t_{0})}{V_{L_{i}}^{2}(t_{0})} \left[ (\alpha_{L_{i}} - 2) \left( \frac{v_{Ly_{i}}(t_{0})}{V_{L_{i}}(t_{0})} \right)^{2} + 1 \right] - \frac{Q_{L_{i}}(t_{0})}{V_{L_{i}}^{2}(t_{0})} \left[ (\beta_{L_{i}} - 2) \frac{v_{Lx_{i}}(t_{0})v_{Ly_{i}}(t_{0})}{V_{L_{i}}^{2}(t_{0})} \right]$$
(4.94)

Από τις παραπάνω σχέσεις, παρατηρείται ότι στη γενική περίπτωση ισχύει  $G_{Lxx_i} \neq G_{Lyy_i}$  και  $B_{Lxy_i} \neq B_{Lyx_i}$ , δηλαδή το γραμμικοποιημένο φορτίο δεν μπορεί να παρασταθεί από ένα μιγαδικό αριθμό Y=G+jB.

Καταλήγοντας, η γραμμικοποίηση ενός δικτύου N ζυγών με μη γραμμικά εκθετικά φορτία οδηγεί στην κατασκευή ενός πίνακα  $\mathbf{Y}_{SL}$  αντίστοιχου του πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου, ο οποίος έχει την εξής μορφή:

$$\mathbf{Y}_{SL} = \begin{bmatrix} d_{iag}^{N} (\mathbf{Y}_{SL,i}) \end{bmatrix} \quad \acute{o}\pi o v \quad \mathbf{Y}_{SL,i} = \begin{bmatrix} G_{Lxx_{i}} & -B_{Lxy_{i}} \\ B_{Lyx_{i}} & G_{Lyy_{i}} \end{bmatrix}$$
(4.95)

# 4.5 Γραμμικοποίηση Συστήματος Πολλών Μηχανών

# 4.5.1 Μεθοδολογία εξαγωγής δικτύου ελαττωμένης τάξεως

Θεωρούμε ένα διασυνδεδεμένο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας το οποίο αποτελείται από N ζυγούς, ενώ τη χρονική στιγμή της γραμμικοποίησης βρίσκονται σε λειτουργία NG γεννήτριες και NM μηχανές επαγωγής. Οι αριθμοί NG και NM μπορεί να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, λόγω του γεγονότος ότι κάποιες μηχανές πιθανόν να βγαίνουν εκτός λειτουργίας. Ο συνολικός αριθμός των σύγχρονων και των ασύγχρονων μηχανών σε λειτουργία συμβολίζεται με M, δηλαδή:

$$M = NG + NM \tag{4.96}$$

Οι διασυνδέσεις με εξωτερικά συστήματα υποθέτουμε ότι παριστάνονται με τη βοήθεια NI ζυγών διασύνδεσης, το πλήθος των οποίων δεν συμπεριλαμβάνεται στον αριθμό των N ζυγών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, οι ζυγοί διασύνδεσης αντιμετωπίζονται σαν ζυγοί σταθερής τάσης κατά μέτρο και γωνία.

Στο σημείο αυτό κάνουμε την ακόλουθη σύμβαση αρίθμησης:

- Οι ζυγοί 1 έως NG είναι ζυγοί γεννητριών.
- Οι ζυγοί NG+1 έως Μ είναι ζυγοί φορτίου, οι οποίοι εκτός των άλλων στατικών φορτίων περιλαμβάνουν και μηχανές επαγωγής.
- Οι ζυγοί M+1 έως N δεν περιλαμβάνουν ούτε σύγχρονες ούτε ασύγχρονες μηχανές σε λειτουργία τη στιγμή της γραμμικοποίησης.
- Οι ζυγοί N+1 έως N+NI είναι ζυγοί διασύνδεσης.

Σημειώνεται ότι σε όλους τους N ζυγούς του δικτύου είναι δυνατόν να συνδέονται στατικά εκθετικά φορτία. Επίσης χωρίς βλάβη της γενικότητας, έχει θεωρηθεί ότι οι ζυγοί γεννητριών δεν περιλαμβάνουν μηχανές επαγωγής, εφόσον οι κινητήρες επαγωγής των συμβατικών σταθμών παραγωγής μπορεί να θεωρηθεί ότι συνδέονται σε βοηθητικούς ζυγούς.

Όπως είδαμε και στην ενότητα 3.4.3, οι αλγεβρικοί περιορισμοί στην περίπτωση διασυνδεδεμένου συστήματος εκφράζονται στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του δικτύου από την παρακάτω σχέση:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_{N} \\ \mathbf{i}_{I} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{N} & \mathbf{Y}_{NI} \\ \mathbf{Y}_{IN} & \mathbf{Y}_{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{N} \\ \mathbf{v}_{I} \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{2(N+NI)\times 1}$$
(4.97)

όπου:

- $\mathbf{i}_N$  είναι το 2N×1 διάνυσμα των εγχεόμενων ρευμάτων των N ζυγών του δικτύου.
- $\mathbf{i}_I$  είναι το 2NI×1 διάνυσμα των εγχεόμενων ρευμάτων στο δίκτυο λόγω των διασυνδέσεων.
- $\mathbf{v}_N$  είναι το 2N×1 διάνυσμα των τάσεων στους N ζυγούς του δικτύου.
- υ<sub>1</sub> είναι το 2*NI*×1 διάνυσμα των τάσεων στους ζυγούς διασύνδεσης.
- $\mathbf{Y}_N$ ,  $\mathbf{Y}_{NI}$ ,  $\mathbf{Y}_{IN}$  και  $\mathbf{Y}_I$  είναι πραγματικοί πίνακες αγωγιμοτήτων διαστάσεων 2N×2N, 2N×2NI, 2NI×2N και 2NI×2NI αντίστοιχα.

Από το πλήθος των 2(NI+N) εξισώσεων του συστήματος (4.97), επιλέγονται μόνο οι 2N εξισώσεις που αντιστοιχούν στο δίκτυο των N ζυγών, δηλαδή:

$$\mathbf{i}_N - \mathbf{Y}_{NI} \mathbf{v}_I - \mathbf{Y}_N \mathbf{v}_N = \mathbf{0}_{2N \times 1}$$
(4.98)

Από τη γραμμικοποίηση της παραπάνω σχέσης προκύπτει ότι:

$$\Delta \mathbf{i}_N - \mathbf{Y}_{NI} \Delta \boldsymbol{v}_I - \mathbf{Y}_N \Delta \boldsymbol{v}_N - \mathbf{Y}_{SL} \Delta \boldsymbol{v}_N = \mathbf{0}_{2N \times 1}$$
(4.99)

όπου ο πίνακας  $\mathbf{Y}_{SL}$  προκύπτει από τη γραμμικοποίηση των στατικών εκθετικών φορτίων και δίνεται από την (4.95).

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ζυγοί διασύνδεσης θεωρούνται ζυγοί σταθερής τάσης κατά μέτρο και γωνία, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το διάνυσμα  $\Delta v_N$  των αποκλίσεων των τάσεων στους ζυγούς αυτούς θα είναι το αντίστοιχο μηδενικό διάνυσμα, δηλαδή:

$$\Delta \mathbf{v}_I = \mathbf{0}_{2NI \times 1} \tag{4.100}$$

Οπότε, καταλήγουμε στην ακόλουθη γραμμικοποιημένη μορφή του συστήματος (4.98):

$$\Delta \mathbf{i}_N - \mathbf{Y}'_N \Delta \mathbf{v}_N = \mathbf{0}_{2N \times 1} \tag{4.101}$$

όπου με  $\mathbf{Y}'_N$  συμβολίζεται ο νέος πίνακας αγωγιμοτήτων του γραμμικοποιημένου δικτύου συμπεριλαμβανομένων των μη γραμμικών φορτίων, ο οποίος υπολογίζεται από το άθροισμα:

$$\mathbf{Y}_{N}^{\prime} = \mathbf{Y}_{N} + \mathbf{Y}_{SL} \tag{4.102}$$

Η (4.101) αποδεικνύει ότι κατά τη γραμμικοποίηση ενός δικτύου δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των διασυνδέσεων με εξωτερικά συστήματα. Ο νέος πίνακας αγωγιμοτήτων  $\mathbf{Y}'_N$  μπορεί να ελαττωθεί ώστε να περιλαμβάνει μόνο τους ζυγούς των μηχανών, οι οποίες βρίσκονται σε λειτουργία τη χρονική στιγμή της γραμμικοποίησης. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία του πίνακα αναδιατάσσονται στη μορφή:

$$\mathbf{X}_{N}^{\prime} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{MM} & \mathbf{Y}_{ML} \\ \mathbf{Y}_{LM} & \mathbf{Y}_{LL} \end{bmatrix}$$
(4.103)

όπου οι πίνακες  $\mathbf{Y}_{MM}$ ,  $\mathbf{Y}_{LL}$ ,  $\mathbf{Y}_{LM}$  και  $\mathbf{Y}_{LL}$  είναι διαστάσεων 2*M*×2*M*, 2*M*×2(*N*-*M*), 2(*N*-*M*)×2*M*, και 2(*N*-*M*)×2(*N*-*M*), αντίστοιχα.

Με χρήση της μεθόδου απαλοιφής Gauss, προκύπτει τελικά ο  $2M \times 2M$  πίνακας αγωγιμοτήτων  $\mathbf{Y}_M$  του δικτύου μειωμένης τάξεως, στο οποίο διατηρούνται μόνο οι M ζυγοί των μηχανών που βρίσκονται σε λειτουργία τη στιγμή της γραμμικοποίησης.

$$\mathbf{Y}_{M} = \mathbf{Y}_{MM} - \mathbf{Y}_{ML} \mathbf{Y}_{LL}^{-1} \mathbf{Y}_{LM}$$
(4.104)

Για λόγους απλοποίησης, όταν αναφέρεται μία μηχανή στο υπόλοιπο του κεφαλαίου αυτού, θα εννοείται ότι βρίσκεται σε λειτουργία, εφόσον οι ζυγοί των μηχανών οι οποίες είναι εκτός λειτουργίας έχουν απαλοιφεί και άρα δεν λαμβάνονται καθόλου υπόψη τη χρονική στιγμή της γραμμικοποίησης.

## 4.5.2 Γραμμικοποίηση αλγεβρικών εξισώσεων δικτύου

Οι γραμμικοποιημένες αλγεβρικές εξισώσεις του απλοποιημένου δικτύου των M ζυγών τη χρονική στιγμή της γραμμικοποίησης (μόνο ζυγοί με μηχανές σε λειτουργία) γράφονται στην εξής μορφή:

$$\Delta \mathbf{i}_{xy}^{M} = \mathbf{Y}_{M}(t_{0}) \Delta \mathbf{v}_{xy}^{M}$$
(4.105)

όπου:

- Δi<sup>M</sup><sub>xy</sub> είναι το 2M×1 διάνυσμα των αποκλίσεων των εγχεόμενων ρευμάτων των μηχανών στο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος. Το διάνυσμα Δi<sup>M</sup><sub>xy</sub> αποτελείται από τα εξής δύο υποδιανύσματα:
  - Το  $2NG \times 1$  διάνυσμα  $\Delta \mathbf{i}_{xy}^{NG}$  που αναφέρεται στις σύγχρονες γεννήτριες:

$$\Delta \mathbf{i}_{xy}^{NG} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{x_1} & \Delta i_{y_1} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \Delta i_{x_r} & \Delta i_{y_r} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \Delta i_{x_{NG}} & \Delta i_{y_{NG}} \end{bmatrix}^T \quad i = 1, \dots, NG$$
(4.106)

- Το 2NM×1 διάνυσμα  $\Delta \mathbf{i}_{xy}^{NM}$  που αναφέρεται στις μηχανές επαγωγής:

$$\Delta \mathbf{i}_{xy}^{NM} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{x_{NG+1}} & \Delta i_{y_{NG+1}} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \Delta i_{x_i} & \Delta i_{y_i} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \Delta i_{x_M} & \Delta i_{y_M} \end{bmatrix} \end{bmatrix}^T \quad i = NG+1, \dots, M$$
(4.107)

- Δυ<sup>M</sup><sub>xy</sub> είναι το 2M×1 διάνυσμα των αποκλίσεων των τάσεων των Μ ζυγών στο πλαίσιο αναφοράς xy
   του συστήματος. Το διάνυσμα Δυ<sup>M</sup><sub>xy</sub> αποτελείται από τα εξής δύο υποδιανύσματα:
  - Το  $2NG \times 1$  διάνυσμα  $\Delta \mathbf{v}_{xy}^{NG}$  που αναφέρεται στις σύγχρονες γεννήτριες:

$$\Delta \mathbf{v}_{xy}^{NG} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{x_1} & \Delta v_{y_1} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \Delta v_{x_i} & \Delta v_{y_i} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \Delta v_{x_{NG}} & \Delta v_{y_{NG}} \end{bmatrix}^T \quad i = 1, \dots, NG$$
(4.108)

- Το 2NM×1 διάνυσμα  $\Delta \mathbf{v}_{xy}^{NM}$  που αναφέρεται στις μηχανές επαγωγής:

$$\Delta \mathbf{v}_{xy}^{NM} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{x_{NG+1}} & \Delta v_{y_{NG+1}} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \Delta v_{x_i} & \Delta v_{y_i} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \Delta v_{x_M} & \Delta v_{y_M} \end{bmatrix} \end{bmatrix}^T \quad i = NG+1, \dots, M$$
(4.109)

Ο πίνακας αγωγιμοτήτων Y<sub>M</sub> του απλοποιημένου δικτύου εξαρτάται από τη χρονική στιγμή t<sub>0</sub> της γραμμικοποίησης.

Σύμφωνα με την αρίθμηση της προηγούμενης παραγράφου, προκύπτει ότι στο ζυγό *i* είναι συνδεδεμένη:

- Η *i* σύγχρονη γεννήτρια, εφόσον  $i \leq NG$ .
- Η *i* μηχανή επαγωγής, εφόσον i > NG.

Στην περίπτωση της *i* σύγχρονης γεννήτριας, οι προβολές της τάσης του ζυγού *i* στο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος και στο πλαίσιο αναφοράς  $d_iq_i$  του δρομέα αυτής, συνδέονται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{bmatrix} v_{x_i} \\ v_{y_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta_i & \cos \delta_i \\ -\cos \delta_i & \sin \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{d_i} \\ v_{q_i} \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, NG$$
(4.110)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 2.1.5, ο 2×2 πίνακας της (4.110) συμβολίζεται με  $T_i(\delta_i(t))$  και ορίζει τον πίνακα μετασχηματισμού της *i* σύγχρονης γεννήτριας. Αναφορικά με το σύνολο των NG γεννητριών, η σχέση (4.110) παίρνει την εξής μορφή:

$$\mathbf{v}_{xy}^{NG} = \left[ \operatorname{diag}_{i=1}^{NG} (\mathbf{T}_i(\delta_i)) \right] \mathbf{v}_{dq}^{NG}$$
(4.111)

όπου  $\mathbf{v}_{dq}^{NG}$  είναι το  $2NG \times 1$  διάνυσμα των τερματικών τάσεων στάτη των σύγχρονων γεννητριών στο πλαίσιο αναφοράς  $d_i q_i$  της κάθε μηγανής, δηλαδή:

$$\mathbf{v}_{dq}^{NG} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{d_1} & v_{q_1} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} v_{d_i} & v_{q_i} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} v_{d_{NG}} & v_{q_{NG}} \end{bmatrix} \end{bmatrix}^T \quad i = 1, \dots, NG$$
(4.112)

Σημειώνεται ότι αντίστοιχη σχέση με την (4.111) ισχύει και για τα ρεύματα του στάτη που εγχέονται στο δίκτυο.

Για τις περιπτώσεις των μηχανών επαγωγής, τα πράγματα είναι σαφώς πιο ξεκάθαρα, καθώς οι γραμμικοποιημένες αλγεβρικές εξισώσεις (4.83)-(4.86) του στάτη έχουν αναπτυχθεί κατευθείαν στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος.

Για το σύνολο των NG σύγχρονων και NM ασύγχρονων μηχανών, ορίζεται το  $2M \times 1$  διάνυσμα  $v_M$  των τερματικών τάσεων των M μηχανών το οποίο αποτελείται από τα ακόλουθα υποδιανύσματα:

 Το 2NG×1 διάνυσμα υ<sup>NG</sup><sub>dq</sub> των προβολών των τερματικών τάσεων των NG σύγχρονων γεννητριών στο πλαίσιο αναφοράς d<sub>i</sub>q<sub>i</sub> της κάθε μηχανής:

$$\mathbf{v}_{dq}^{NG} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{d_1} & v_{d_1} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} v_{d_i} & v_{q_i} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} v_{d_{NG}} & v_{q_{NG}} \end{bmatrix}^T \quad i = 1, \dots, NG$$
(4.113)

Το 2NM×1 διάνυσμα υ<sup>NM</sup><sub>xy</sub> των προβολών των τάσεων στάτη των NM μηχανών επαγωγής στο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος, δηλαδή::

$$\mathbf{v}_{xy}^{NM} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{x_{NG+1}} & v_{y_{NG+1}} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} v_{x_i} & v_{y_i} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} v_{x_M} & v_{y_M} \end{bmatrix} \end{bmatrix}^T \quad i = NG+1, \dots, M$$
(4.114)

Αντίστοιχα, το  $2M \times 1$  διάνυσμα  $\mathbf{i}_M$  των εξερχόμενων ρευμάτων των M μηχανών αποτελείται από τα ακόλουθα υποδιανύσματα:

 Το 2NG×1 διάνυσμα i<sup>NG</sup><sub>dq</sub> των προβολών των τερματικών τάσεων των NG σύγχρονων γεννητριών στο πλαίσιο αναφοράς d<sub>i</sub>q<sub>i</sub> της κάθε μηχανής:

$$\mathbf{i}_{dq}^{NG} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d_1} & i_{d_1} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} i_{d_i} & i_{q_i} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} i_{d_{NG}} & i_{q_{NG}} \end{bmatrix} \end{bmatrix}^T \quad i = 1, \dots, NG$$
(4.115)

Το 2NM×1 διάνυσμα i<sup>NM</sup><sub>xy</sub> των προβολών των τάσεων στάτη των NM μηχανών επαγωγής στο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος, δηλαδή::

$$\mathbf{i}_{xy}^{NM} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{x_{NG+1}} & i_{y_{NG+1}} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} i_{x_i} & i_{y_i} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} i_{x_M} & i_{y_M} \end{bmatrix} \end{bmatrix}^T \quad i = NG+1, \dots, M$$
(4.116)

Οι προβολές των τάσεων και των ρευμάτων του στάτη των μηχανών στο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος συνδέονται με τα παραπάνω διανύσματα  $\mathbf{v}_M$  και  $\mathbf{i}_M$  σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\mathbf{v}_{xy}^{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{xy}^{NG} \\ \mathbf{v}_{xy}^{NM} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{M} \left( \mathbf{\delta} \right) \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{dq}^{NG} \\ \mathbf{v}_{xy}^{NM} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{M} \left( \mathbf{\delta} \right) \mathbf{v}_{M}$$
(4.117)

$$\mathbf{i}_{xy}^{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{xy}^{NG} \\ \mathbf{i}_{xy}^{NM} \\ \mathbf{i}_{xy}^{NM} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{M} \left( \boldsymbol{\delta} \right) \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{dq}^{NG} \\ \mathbf{i}_{xy}^{NM} \\ \mathbf{i}_{xy}^{NM} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{M} \left( \boldsymbol{\delta} \right) \mathbf{i}_{M}$$
(4.118)

όπου ο πίνακας μετασχηματισμού  $\mathbf{T}_{M}(\boldsymbol{\delta})$ υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\mathbf{T}_{M}(\boldsymbol{\delta}) = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} NG \\ \text{diag}(\mathbf{T}_{i}(\boldsymbol{\delta}_{i})) \\ \mathbf{0}_{2NG\times 2NM} \end{bmatrix} & \mathbf{0}_{2NG\times 2NM} \\ \mathbf{0}_{2NM\times 2NG} & \mathbf{I}_{2NM} \end{bmatrix}$$
(4.119)

Ο συμβολισμός  $I_{2NM}$  στην παραπάνω εξίσωση υποδηλώνει τον μοναδιαίο πίνακα διαστάσεων  $2NM \times 2NM$ . Από τον ορισμό του πίνακα  $T_M(\delta)$  προκύπτει ότι ο αντίστροφός του και ο ανάστροφος ταυτίζονται, δηλαδή:

$$\mathbf{T}_{M}^{-1}(\boldsymbol{\delta}) = \mathbf{T}_{M}^{T}(\boldsymbol{\delta}) \tag{4.120}$$

Εάν γραμμικοποιηθεί η σχέση (4.110), προκύπτει ότι:

$$\begin{bmatrix} \Delta v_{x_i} \\ \Delta v_{y_i} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_i \left( \delta_i(t_0) \right) \begin{bmatrix} \Delta v_{d_i} \\ \Delta v_{q_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \delta_i(t_0) & -\sin \delta_i(t_0) \\ \sin \delta_i(t_0) & \cos \delta_i(t_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{d_i}(t_0) \\ v_{q_i}(t_0) \end{bmatrix} \Delta \delta_i \quad i = 1, \dots, NG$$
(4.121)

Εκτελώντας τις πράξεις στο δεξί μέλος της (4.121), καταλήγουμε:

$$\begin{bmatrix} \Delta v_{x_i} \\ \Delta v_{y_i} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_i \left( \delta_i(t_0) \right) \begin{bmatrix} \Delta v_{d_i} \\ \Delta v_{q_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -v_{y_i}(t_0) \\ v_{x_i}(t_0) \end{bmatrix} \Delta \delta_i \quad i = 1, \dots, NG$$
(4.122)

Οπότε, για το σύνολο των NG σύγχρονων γεννητριών, η σχέση (4.122) παίρνει την εξής μορφή:

$$\Delta \mathbf{v}_{xy}^{NG} = \begin{bmatrix} \underset{i=1}{\overset{NG}{\operatorname{diag}}} (\mathbf{T}_i(\delta_i(t_0))) \end{bmatrix} \Delta \mathbf{v}_{dq}^{NG} + \begin{bmatrix} \underset{i=1}{\overset{NG}{\operatorname{diag}}} \begin{pmatrix} -v_{y_i}(t_0) \\ v_{x_i}(t_0) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\delta}$$
(4.123)

Αντίστοιχα, το διάνυσμα  $\Delta \mathbf{i}_{xy}^{NG}$  των αποκλίσεων των εγχεόμενων ρευμάτων των σύγχρονων γεννητριών στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta \mathbf{i}_{xy}^{NG} = \begin{bmatrix} \operatorname{diag}_{i=1}^{NG} (\mathbf{T}_i(\delta_i(t_0))) \end{bmatrix} \Delta \mathbf{i}_{dq}^{NG} + \begin{bmatrix} \operatorname{diag}_{i=1}^{NG} \begin{pmatrix} -i_{y_i}(t_0) \\ i_{x_i}(t_0) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{\delta}$$
(4.124)

όπου  $\Delta \mathbf{i}_{dq}^{NG}$  είναι το  $2NG \times 1$  διάνυσμα των αποκλίσεων των εγχεόμενων ρευμάτων των σύγχρονων γεννητριών στο πλαίσιο αναφοράς  $d_i q_i$  της κάθε μηχανής, δηλαδή:

$$\Delta \mathbf{i}_{dq}^{NG} = \begin{bmatrix} \Delta i_{d_1} & \Delta i_{q_1} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \Delta i_{d_i} & \Delta i_{q_i} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \Delta i_{d_{NG}} & \Delta i_{q_{NG}} \end{bmatrix}^T \quad i = 1, \dots, NG$$

$$(4.125)$$

Επομένως για το συνολικό πλήθος των M μηχανών του δικτύου ισχύει η ακόλουθη σχέση για τις τερματικές τους τάσεις:

$$\Delta \mathbf{v}_{xy}^{M} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{v}_{xy}^{NG} \\ \Delta \mathbf{v}_{xy}^{NM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{G} \\ \text{diag} \\ i=1 \end{bmatrix} \Delta \mathbf{v}_{dq}^{NG} + \begin{bmatrix} N_{G} \\ \text{diag} \\ i=1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -v_{y_{i}}(t_{0}) \\ v_{x_{i}}(t_{0}) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{\delta} \end{bmatrix}$$
(4.126)

από την οποία προκύπτει ότι:

$$\Delta \mathbf{v}_{xy}^{M} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{v}_{xy}^{NG} \\ \Delta \mathbf{v}_{xy}^{NM} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{M} \left( \boldsymbol{\delta}(t_{0}) \right) \Delta \mathbf{v}_{M} + \text{diag} \left( \begin{bmatrix} -v_{y_{i}}(t_{0}) \\ v_{x_{i}}(t_{0}) \end{bmatrix} \right) \Delta \boldsymbol{\delta}$$
(4.127)

όπου:

$$\operatorname{diag}\left(\begin{bmatrix}-\upsilon_{y_{i}}(t_{0})\\\upsilon_{x_{i}}(t_{0})\end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} NG \\ \operatorname{diag} \\ i=1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix}-\upsilon_{y_{i}}(t_{0})\\\upsilon_{x_{i}}(t_{0})\end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \mathbf{0}_{2NM \times NG} \end{bmatrix}$$
(4.128)

Όμοια, για τα εξερχόμενα ρεύματα των Μμηχανών ισχύει ότι:

$$\Delta \mathbf{i}_{xy}^{M} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{i}_{xy}^{NG} \\ \Delta \mathbf{i}_{xy}^{NM} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{M} \left( \boldsymbol{\delta}(t_{0}) \right) \Delta \mathbf{i}_{M} + \text{diag} \left( \begin{bmatrix} -i_{y_{i}}(t_{0}) \\ i_{x_{i}}(t_{0}) \end{bmatrix} \right) \Delta \boldsymbol{\delta}$$
(4.129)

όπου:

$$\operatorname{diag}\left(\begin{bmatrix}-i_{y_{i}}(t_{0})\\i_{x_{i}}(t_{0})\end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix}\begin{bmatrix}NG\\\operatorname{diag}\\i=1\\\begin{bmatrix}-i_{y_{i}}(t_{0})\\i_{x_{i}}(t_{0})\end{bmatrix}\end{bmatrix}\right]$$

$$\mathbf{0}_{2NM \times NG}$$
(4.130)

Στη συνέχεια, οι αποκλίσεις των τάσεων  $\Delta \mathbf{v}_{xy}^{M}$  και των ρευμάτων  $\Delta \mathbf{i}_{xy}^{M}$  στο πλαίσιο αναφοράς xy του συστήματος αντικαθίστανται, βάσει των (4.127) και (4.129) αντίστοιχα, στην (4.105), οπότε προκύπτει ότι:

$$\mathbf{T}_{M}(\boldsymbol{\delta}(t_{0}))\Delta \mathbf{i}_{M} + \operatorname{diag}\left(\begin{bmatrix}-i_{y_{i}}(t_{0})\\i_{x_{i}}(t_{0})\end{bmatrix}\right)\Delta \boldsymbol{\delta} = \mathbf{Y}_{M}(t_{0})\mathbf{T}_{M}(\boldsymbol{\delta}(t_{0}))\Delta \boldsymbol{v}_{M} + \mathbf{Y}_{M}(t_{0})\operatorname{diag}\left(\begin{bmatrix}-v_{y_{i}}(t_{0})\\v_{x_{i}}(t_{0})\end{bmatrix}\right)\Delta \boldsymbol{\delta}$$
(4.131)

Η (4.131) συνδέει τις αποκλίσεις των εγχεόμενων ρευμάτων  $\Delta i_M$  και των τερματικών τάσεων  $\Delta v_M$  όλων των μηχανών του εξεταζόμενου δικτύου με τις αποκλίσεις των γωνιών  $\Delta \delta_i$  των δρομέων όλων των σύγχρονων γεννητριών.

# 4.5.3 Υπολογισμός πίνακα κατάστασης γραμμικοποιημένου συστήματος πολλών μηχανών

Στο απλοποιημένο δίκτυο των *M* μηχανών, από τις οποίες οι πρώτες *NG* είναι σύγχρονες και οι υπόλοιπες *NM* ασύγχρονες, η παράγωγος του διανύσματος των γραμμικοποιημένων μεταβλητών κατάστασης εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{M} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}_{M}^{I} \Delta \mathbf{i}_{M} + \mathbf{B}_{M}^{V} \Delta \mathbf{v}_{M} + \mathbf{B}_{M}^{ref} \Delta \mathbf{u}_{ref} + \mathbf{B}_{M}^{M} \Delta \mathbf{T}_{m}$$
(4.132)

όπου:

 Δx είναι το (10NG+3NM)×1 διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης του γραμμικοποιημένου συστήματος, δηλαδή:

$$\Delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{SS,1}^T \cdots \Delta \mathbf{x}_{SS,NG}^T & \Delta \mathbf{x}_{SS,NG}^T & \Delta \mathbf{x}_{IM,1}^T \cdots \Delta \mathbf{x}_{IM,NM}^T \end{bmatrix}^T$$
(4.133)

 Δu<sub>ref</sub> είναι το 2NG×1 διάνυσμα των αποκλίσεων των σημάτων αναφοράς όλων των σύγχρονων γεννητριών, δηλαδή:

$$\Delta \mathbf{u}_{ref} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{ref_1} & \Delta I_{ref_1} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} \Delta V_{ref_{NG}} & \Delta I_{ref_{NG}} \end{bmatrix} \end{bmatrix}^T$$
(4.134)

 ΔT<sub>m</sub> είναι το NG×1 διάνυσμα των αποκλίσεων στις μηχανικές ροπές εισόδου των σύγχρονων γεννητριών, δηλαδή:

$$\Delta \mathbf{T}_{m} = \begin{bmatrix} \Delta T_{m_{1}} & \cdots & \Delta T_{m_{NG}} \end{bmatrix}^{T}$$
(4.135)

Οι υπόλοιποι πίνακες της (4.132) υπολογίζονται βάσει των ακόλουθων σχέσεων:

$$\mathbf{A}_{M} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{iag}^{NG}(\mathbf{A}_{SG,i}) \\ \mathbf{0}_{i=1}^{NM} \end{bmatrix} \mathbf{0}_{10NG\times 3NM} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3NM\times 10NG} & \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{10MG\times 3NM} \\ \mathbf{0}_{3NM\times 10NG} & \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{10MG\times 2NM} \\ \mathbf{0}_{i=1} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \mathbf{B}_{M}^{I} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{iag}^{NG}(\mathbf{B}_{SG,i}^{I}) \\ \mathbf{0}_{3NM\times 2NG} & \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{10NG\times 2NM} \\ \mathbf{0}_{3NM\times 2NG} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_{M}^{V} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{iag}^{NG}(\mathbf{B}_{SG,i}^{V}) \\ \mathbf{0}_{3NM\times 2NG} & \mathbf{0}_{3NM\times 3NM} \end{bmatrix} \mathbf{B}_{M}^{ref} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{iag}^{NG}(\mathbf{B}_{SG,i}^{ref}) \\ \mathbf{0}_{3NM\times 2NG} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_{M}^{N} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{iag}^{NG}(\mathbf{B}_{SG,i}^{NG}) \\ \mathbf{0}_{3NM\times 2NG} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_{M}^{N} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{iag}^{NG}(\mathbf{B}_{SG,i}^{NG}) \\ \mathbf{0}_{3NM\times 2NG} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$
(4.136)

Οι διαστάσεις των πινάκων  $\mathbf{A}_{M}$ ,  $\mathbf{B}_{M}^{I}$ ,  $\mathbf{B}_{M}^{V}$ ,  $\mathbf{B}_{M}^{ref}$  και  $\mathbf{B}_{M}^{M}$  είναι  $(10NG+3NM)\times(10NG+3NM)$ ,  $(10NG+3NM)\times(2M)$ ,  $(10NG+3NM)\times(2M)$ ,  $(10NG+3NM)\times(2M)$ ,  $(10NG+3NM)\times(2NG)$  και  $(10NG+3NM)\times(NG)$  αντίστοιχα. Οι γραμμικοποιημένες αλγεβρικές εξισώσεις του στάτη των M μηχανών μπορούν να γραφούν σε μορφή πινάκων ως εξής:

$$\Delta \mathbf{v}_M = \Delta \mathbf{E}'_{dq}^M - \mathbf{Z}_M \Delta \mathbf{i}_M \tag{4.137}$$

όπου:

ΔE'<sup>M</sup><sub>dq</sub> είναι το 2M×1 διάνυσμα των αποκλίσεων των μεταβατικών ΗΕΔ στους άξονες d<sub>i</sub> και q<sub>i</sub> που ορίζουν το πλαίσιο αναφοράς d<sub>i</sub>q<sub>i</sub> κάθε μηχανής, δηλαδή:

$$\Delta \mathbf{E}_{dq}^{\prime M} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{d_1}^{\prime} & \Delta E_{q_1}^{\prime} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} \Delta E_{d_i}^{\prime} & \Delta E_{q_i}^{\prime} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} \Delta E_{d_M}^{\prime} & \Delta E_{q_M}^{\prime} \end{bmatrix} \end{bmatrix}^T$$
(4.138)

Ζ<sub>M</sub> είναι ο πίνακας των εσωτερικών σύνθετων αντιστάσεων των μηχανών, διαστάσεων 2M×2M, ο οποίος υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση.

$$\mathbf{Z}_{M} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{G}^{NG} \\ \text{diag}(\mathbf{Z}_{SG,i}) \end{bmatrix} & \mathbf{0}_{2NG \times 2NM} \\ \mathbf{0}_{2NM \times 2NG} & \begin{bmatrix} N_{M} \\ \text{diag}(\mathbf{Z}_{IM,i}) \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$
(4.139)

Ο υποπίνακας **Z**<sub>SG,i</sub> στην περίπτωση των σύγχρονων γεννητριών γράφεται:

$$\mathbf{Z}_{SG,i} = \begin{bmatrix} r_{s_i} & -X'_{q_i} \\ X'_{d_i} & r_{s_i} \end{bmatrix}$$
(4.140)

Αντίστοιχα, υπολογίζεται ο υποπίνακας  $\mathbf{Z}_{IM,i}$  στην περίπτωση των μηχανών επαγωγής.

$$\mathbf{Z}_{IM,i} = \begin{bmatrix} r_{s_i} & -X'_{s_i} \\ X'_{s_i} & r_{s_i} \end{bmatrix}$$
(4.141)

Προκειμένου να υπολογιστεί ο συνολικός πίνακας κατάστασης του εξεταζόμενου συστήματος, θα πρέπει να εκφραστούν τα διανύσματα των αποκλίσεων των ρευμάτων  $\Delta i_M$  και των τάσεων  $\Delta v_M$  συναρτήσει μόνο των διανυσμάτων των γραμμικοποιημένων μεταβλητών κατάστασης  $\Delta x$  και των αποκλίσεων των σημάτων αναφοράς  $\Delta u_{ref}$ . Στο υπόλοιπο μέρος της παρούσας ενότητας περιγράφεται η μεθοδολογία με την οποία εξάγονται οι συναρτήσεις  $f_1$  και  $f_2$ , όπου:

$$\Delta \mathbf{i}_{dq}^{M} = \mathbf{f}_{1} \left( \Delta \mathbf{x}, \Delta \mathbf{u}_{ref} \right)$$
(4.142)

$$\Delta \mathbf{v}_{dq}^{M} = \mathbf{f}_{2} \left( \Delta \mathbf{x}, \Delta \mathbf{u}_{ref} \right)$$
(4.143)

Καταρχήν, το διάνυσμα  $\Delta v_M$  των αποκλίσεων των τάσεων στάτη των M αντικαθίσταται από τη σχέση (4.137) στην (4.131), δηλαδή:

$$\mathbf{T}_{M}(\boldsymbol{\delta}(t_{0}))\Delta\mathbf{i}_{M} + \operatorname{diag}\left(\begin{bmatrix}-i_{y_{i}}(t_{0})\\i_{x_{i}}(t_{0})\end{bmatrix}\right)\Delta\boldsymbol{\delta} = \mathbf{Y}_{M}(t_{0})\mathbf{T}_{M}(\boldsymbol{\delta}(t_{0}))\left\{\Delta\mathbf{E}_{dq}^{\prime M} - \mathbf{Z}_{M}\Delta\mathbf{i}_{M}\right\}$$

$$+ \mathbf{Y}_{M}(t_{0})\operatorname{diag}\left(\begin{bmatrix}-\upsilon_{y_{i}}(t_{0})\\\upsilon_{x_{i}}(t_{0})\end{bmatrix}\right)\Delta\boldsymbol{\delta}$$
(4.144)

ή ισοδύναμα:

$$\left\{ \mathbf{T}_{M} \left( \boldsymbol{\delta}(t_{0}) \right) + \mathbf{Y}_{M} \left( t_{0} \right) \mathbf{T}_{M} \left( \boldsymbol{\delta}(t_{0}) \right) \mathbf{Z}_{M} \right\} \Delta \mathbf{i}_{M} = \mathbf{Y}_{M} \left( t_{0} \right) \mathbf{T}_{M} \left( \boldsymbol{\delta}(t_{0}) \right) \Delta \mathbf{E}_{dq}^{\prime M}$$

$$+ \left\{ \mathbf{Y}_{M} \left( t_{0} \right) \operatorname{diag} \left( \begin{bmatrix} -\upsilon_{y_{i}} \left( t_{0} \right) \\ \upsilon_{x_{i}} \left( t_{0} \right) \end{bmatrix} \right) - \operatorname{diag} \left( \begin{bmatrix} -i_{y_{i}} \left( t_{0} \right) \\ i_{x_{i}} \left( t_{0} \right) \end{bmatrix} \right) \right\} \Delta \mathbf{\delta}$$

$$(4.145)$$

Για λόγους απλοποίησης των συμβολισμών και των παραστάσεων, ορίζονται οι πίνακες  $\mathbf{H}_1$  και  $\mathbf{H}_2$ , διαστάσεων  $2M \times 2M$  και  $2M \times NG$  αντίστοιχα, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις.

$$\mathbf{H}_{1} = \mathbf{T}_{M} \left( \boldsymbol{\delta}(t_{0}) \right) + \mathbf{Y}_{M}(t_{0}) \mathbf{T}_{M} \left( \boldsymbol{\delta}(t_{0}) \right) \mathbf{Z}_{M}$$
(4.146)

$$\mathbf{H}_{2} = \mathbf{Y}_{M}(t_{0}) \operatorname{diag}\left(\begin{bmatrix}-\upsilon_{y_{i}}(t_{0})\\\upsilon_{x_{i}}(t_{0})\end{bmatrix}\right) - \operatorname{diag}\left(\begin{bmatrix}-i_{y_{i}}(t_{0})\\i_{x_{i}}(t_{0})\end{bmatrix}\right)$$
(4.147)

Σύμφωνα με τους ορισμούς των σχέσεων (4.146) και (4.147), η (4.145) παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\mathbf{H}_{1}\Delta\mathbf{i}_{M} = \mathbf{Y}_{M}(t_{0})\mathbf{T}_{M}(\boldsymbol{\delta}(t_{0}))\Delta\mathbf{E}_{dq}^{\prime M} + \mathbf{H}_{2}\Delta\boldsymbol{\delta}$$
(4.148)

Επίλυση της (4.148) ως προς το διάνυσμα  $\Delta i_M$  δίνει:

$$\Delta \mathbf{i}_{M} = \mathbf{H}_{1}^{-1} \mathbf{Y}_{M}(t_{0}) \mathbf{T}_{M}(\boldsymbol{\delta}(t_{0})) \Delta \mathbf{E}_{dq}^{\prime M} + \mathbf{H}_{1}^{-1} \mathbf{H}_{2} \Delta \boldsymbol{\delta}$$
(4.149)

Στο σημείο αυτό ορίζονται οι πίνακες  $\mathbf{H}_3$  και  $\mathbf{H}_4$ , διαστάσεων  $2M \times 2M$  και  $2M \times NG$  αντίστοιχα, ως εξής:

$$\mathbf{H}_{3} = \mathbf{H}_{1}^{-1} \mathbf{Y}_{M}(t_{0}) \mathbf{T}_{M}(\boldsymbol{\delta}(t_{0}))$$
(4.150)

$$\mathbf{H}_4 = \mathbf{H}_1^{-1} \mathbf{H}_2 \tag{4.151}$$

Επομένως, η εξάρτηση του διανύσματος  $\Delta i_M$  από τις γραμμικοποιημένες μεταβλητές κατάστασης του συστήματος παριστάνεται από τη σχέση (4.152).

$$\Delta \mathbf{i}_{M} = \mathbf{H}_{3} \Delta \mathbf{E}_{dq}^{\prime M} + \mathbf{H}_{4} \Delta \boldsymbol{\delta} \tag{4.152}$$

Ακολούθως, η (4.152) αντικαθίσταται στην Εξ (4.137), δηλαδή:

$$\Delta \boldsymbol{v}_{M} = \Delta \mathbf{E}_{dq}^{\prime M} - \mathbf{Z}_{M} \left\{ \mathbf{H}_{3} \Delta \mathbf{E}_{dq}^{\prime M} + \mathbf{H}_{4} \Delta \boldsymbol{\delta} \right\}$$
(4.153)

ή ισοδύναμα:

$$\Delta \mathbf{v}_{M} = \{\mathbf{I}_{2M} - \mathbf{Z}_{M}\mathbf{H}_{3}\}\Delta \mathbf{E}_{dq}^{\prime M} - \mathbf{Z}_{M}\mathbf{H}_{4}\Delta \boldsymbol{\delta}$$
(4.154)

Εάν οριστούν οι πίνακες  $H_5$  και  $H_6$ , διαστάσεων  $2M \times 2M$  και  $2M \times NG$  αντίστοιχα, ως εξής:

$$\mathbf{H}_{5} = \mathbf{I}_{2M} - \mathbf{Z}_{M} \mathbf{H}_{3} \tag{4.155}$$

$$\mathbf{H}_6 = -\mathbf{Z}_M \mathbf{H}_4 \tag{4.156}$$

τότε το διάνυσμα των τάσεων  $\Delta v_M$  υπολογίζεται συναρτήσει των μεταβλητών κατάστασης του γραμμικοποιημένου συστήματος από τη σχέση:

$$\Delta \mathbf{v}_M = \mathbf{H}_5 \Delta \mathbf{E}_{dq}^{\prime M} + \mathbf{H}_6 \Delta \mathbf{\delta} \tag{4.157}$$

Εφόσον έχουν εκφραστεί τα διανύσματα των αποκλίσεων των εγχεόμενων ρευμάτων  $\Delta \mathbf{i}_M$  και των τάσεων στάτη  $\Delta \mathbf{v}_M$  συναρτήσει μόνο γραμμικοποιημένων μεταβλητών κατάστασης, αντικαθίστανται οι (4.152) και (4.157) στην (4.132):

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{M} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}_{M}^{I} \left\{ \mathbf{H}_{3} \Delta \mathbf{E}_{dq}^{\prime M} + \mathbf{H}_{4} \Delta \delta \right\} + \mathbf{B}_{M}^{V} \left\{ \mathbf{H}_{5} \Delta \mathbf{E}_{dq}^{\prime M} + \mathbf{H}_{6} \Delta \delta \right\} + \mathbf{B}_{M}^{M} \Delta \mathbf{T}_{m} + \mathbf{B}_{M}^{ref} \Delta \mathbf{u}_{ref}$$
(4.158)

ή ισοδύναμα εκτελώντας τις πράξεις στο δεξιό μέλος, προκύπτει:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{M} \Delta \mathbf{x} + \left\{ \mathbf{B}_{M}^{I} \mathbf{H}_{3} + \mathbf{B}_{M}^{V} \mathbf{H}_{5} \right\} \Delta \mathbf{E}_{dq}^{\prime M} + \left\{ \mathbf{B}_{M}^{I} \mathbf{H}_{4} + \mathbf{B}_{M}^{V} \mathbf{H}_{6} \right\} \Delta \delta + \mathbf{B}_{M}^{M} \Delta \mathbf{T}_{m} + \mathbf{B}_{M}^{ref} \Delta \mathbf{u}_{ref}$$
(4.159)

Εάν οριστούν οι πίνακες  $\mathbf{H}_7$  και  $\mathbf{H}_8$ , διαστάσεων (10NG+3NM)×2M και (10NG+3NM)×NG αντίστοιχα, ως εξής:

$$\mathbf{H}_7 = \mathbf{B}_M^T \mathbf{H}_3 + \mathbf{B}_M^V \mathbf{H}_5 \tag{4.160}$$

$$\mathbf{H}_8 = \mathbf{B}_M^{\prime} \mathbf{H}_4 + \mathbf{B}_M^{\prime} \mathbf{H}_6 \tag{4.161}$$

η σχέση (4.159) παίρνει την ακόλουθη μορφή.

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_M \Delta \mathbf{x} + \mathbf{H}_7 \Delta \mathbf{E}_{dq}^{\prime M} + \mathbf{H}_8 \Delta \boldsymbol{\delta} + \mathbf{B}_M^M \Delta \mathbf{T}_m + \mathbf{B}_M^{ref} \Delta \mathbf{u}_{ref}$$
(4.162)

Προκειμένου να υπολογιστεί ο πίνακας κατάστασης του γραμμικοποιημένου συστήματος, ορίζονται δύο ακόμα βοηθητικοί πίνακες  $H_9$  και  $H_{10}$ .

Ο πίνακας  $\mathbf{H}_9$ , διαστάσεων (10NG+3NM)×(10NG+3NM), φανερώνει την εξάρτηση της παραγώγου του γραμμικοποιημένου διανύσματος κατάστασης συναρτήσει των αποκλίσεων των μεταβατικών ΗΕΔ των Μ μηχανών στους άξονες  $d_i$  και  $q_i$  που ορίζουν το πλαίσιο αναφοράς  $d_iq_i$  κάθε μηχανής. Η κατασκευή του πίνακα  $\mathbf{H}_9$  πραγματοποιείται με τον ακόλουθο αλγόριθμο:

- Εάν i ≤ 2NG και i περιττός, η (10i-7) στήλη του **H**<sub>9</sub> ισούται με την i στήλη του **H**<sub>7</sub>.
- Εάν i ≤ 2NG και i άρτιος, η (10i-6) στήλη του **H**<sub>9</sub> ισούται με την i στήλη του **H**<sub>7</sub>.
- Εάν i > 2NG και  $i \pi \epsilon \rho_i \tau \tau \delta \varsigma$ , η (10NG+3i-1) στήλη του **H**<sub>9</sub> ισούται με την i στήλη του **H**<sub>7</sub>.
- Eán i > 2NG kai i artioc,  $\eta$  (10NG+3i) στήλη του  $\mathbf{H}_9$  ισούται με την i στήλη του  $\mathbf{H}_7$ .
- Τα υπόλοιπα στοιχεία του Η<sub>9</sub> είναι μηδενικά.

Όσον αφορά τον πίνακα  $\mathbf{H}_{10}$  διαστάσεων (10NG+3NM)×(10NG+3NM), σημειώνεται ότι εκφράζει τον τρόπο με τον θα μεταβληθεί η παράγωγος του διανύσματος κατάστασης του γραμμικοποιημένου συστήματος, εάν μεταβληθούν ελάχιστα όλες οι γωνίες  $\delta_i$  των σύγχρονων γεννητριών. Ο υπολογισμός του πίνακα  $\mathbf{H}_{10}$  γίνεται ως εξής:

- Η (10*i*-9) στήλη του Η<sub>10</sub> ισούται με την *i* στήλη του Η<sub>8</sub>.
- Τα υπόλοιπα στοιχεία του Η<sub>10</sub> είναι μηδενικά.

Ύστερα από τους παραπάνω ορισμούς, η σχέση (4.162) παίρνει την εξής μορφή:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{M} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{H}_{9} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{H}_{10} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}_{M}^{M} \Delta \mathbf{T}_{m} + \mathbf{B}_{M}^{ref} \Delta \mathbf{u}_{ref}$$
(4.163)

Καταλήγοντας, ο πίνακας κατάστασης Α του γραμμικοποιημένου συστήματος υπολογίζεται από το παρακάτω άθροισμα πινάκων.

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_M + \mathbf{H}_9 + \mathbf{H}_{10} \tag{4.164}$$

## 4.6 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Γραμμικοποίησης

,

Η παρούσα ενότητα αποσκοπεί στην επιβεβαίωση της εγκυρότητας και της ορθότητας της προτεινόμενης μεθόδου γραμμικοποίησης. Για το λόγο αυτό, συγκρίνονται σε δύο περιπτώσεις δικτύων οι ιδιοτιμές που υπολογίζονται από:

- Το γραμμικοποιημένο μοντέλο που αναπτύχθηκε παραπάνω.
- Έτοιμη ρουτίνα γραμμικοποίησης της MATLAB σε σημεία ισορροπίας (εντολή linmod).

Το πρώτο εξεταζόμενο σύστημα είναι το δίκτυο των 11 ζυγών, το οποίο αναλύεται λεπτομερώς από πλευράς βραχυπρόθεσμης αστάθειας στο Κεφάλαιο 7 της παρούσας διατριβής. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων γραμμικοποίησης στο αρχικό σημείο λειτουργίας του συστήματος.

Σημειώνεται ότι στις βραχυπρόθεσμες δυναμικές συνιστώσες του εξεταζόμενου δικτύου περιλαμβάνονται δύο σύγχρονες γεννήτριες εξοπλισμένες με ΑΡΤ και τρεις κινητήρες επαγωγής. Παρατηρείται ότι υπάρχει πλήρης ταύτιση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο μεθόδων.

Ιδιοτιμές (α/α)	Γραμμικοποίηση με MATLAB	Γραμμικοποίηση με WHSSP
1	-40.8269 ± j*34.4989	-40.8269 ± j*34.4989
2	-13.0293 ± j*26.6662	-13.0293 ± j*26.6662
3	-21.7738	-21.7738
4	-19.3384	-19.3385
5	-4.3548 ± j*14.3303	-4.3547 ± j*14.3303
6	-1.0207 ± j*13.0547	-1.0207 ± j*13.0547
7	-1.1413 ± j*11.8737	-1.1414 ± j*11.8737
8	-6.4978 ± j*5.4225	-6.4978 ± j*5.4225
9	-3.4679 ± j*5.5073	$-3.4680 \pm j*5.5073$
10	-2.6475	-2.6474
11	-4.8996 ± j*1.2480	-4.8996 ± j*1.2480

Πίνακας 4.1: Σύγκριση ιδιοτιμών για το δίκτυο του Κεφαλαίου 7

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 4.2 συγκρίνονται οι ιδιοτιμές στο αρχικό σημείο ισορροπίας για το δίκτυο της Νότιας Εύβοιας, το οποίο εξετάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5 της διατριβής.

Ιδιοτιμές (α/α)	Γραμμικοποίηση με MATLAB	Γραμμικοποίηση με WHSSP	Ιδιοτιμές (α/α)	Γραμμικοποίηση με MATLAB	Γραμμικοποίηση με WHSSP
1	-0.6580 ± j*7.1205	-0.6580 ± j*7.1205	24	-24.0025	-24.0025
2	0.9450 ± j*7.7989	0.9450 ± j*7.7989	25	-20.3790	-20.3789
3	$-3.0264 \pm j*11.3089$	$-3.0264 \pm j*11.3089$	26	-1.8870	-1.8870
4	-5.4558 ± j*17.1236	-5.4558 ± j*17.1236	27	-2.2074	-2.2074
5	-3.4415 ± j*12.8671	-3.4415 ± j*12.8671	28	-1.9583	-1.9583
6	-3.5343 ± j*13.1696	-3.5343 ± j*13.1696	29	-3.9073	-3.9073
7	-3.7300 ± j*13.6559	-3.7300 ± j*13.6559	30	-4.2681	-4.2681
8	-5.2752 ± j*16.8158	-5.2752 ± j*16.8158	31	-4.7815	-4.7815
9	-4.1329 ± j*14.6126	-4.1329 ± j*14.6126	32	-9.1839	-9.1839
10	-5.0163 ± j*16.3791	-5.0163 ± j*16.3791	33	-5.9297	-5.9297
11	-4.9983 ± j*16.3476	-4.9983 ± j*16.3476	34	-8.7427	-8.7427
12	-4.8387 ± j*16.0484	-4.8387 ± j*16.0484	35	-8.2182	-8.2182
13	-4.8138 ± j*16.0215	-4.8138 ± j*16.0215	36	-8.1787	-8.1787
14	-4.7447 ± j*15.8846	-4.7447 ± j*15.8846	37	-7.7694	-7.7694
15	-4.3600 ± j*15.1915	-4.3600 ± j*15.1915	38	-7.7586	-7.7586
16	-4.3813 ± j*15.2334	-4.3813 ± j*15.2333	39	-6.8434	-6.8434
17	-4.6416 ± j*15.7077	-4.6416 ± j*15.7077	40	-6.8921	-6.8921
18	-4.4813 ± j*15.4309	-4.4813 ± j*15.4309	41	-7.5854	-7.5854
19	-4.5046 ± j*15.4606	-4.5046 ± j*15.4606	42	-7.4088	-7.4088
20	-4.5654 ± j*15.5853	-4.5654 ± j*15.5853	43	-7.2413	-7.2413
21	-4.5675 ± j*15.5686	-4.5675 ± j*15.5685	44	-7.1284	-7.1284
22	-0.2227 ± j*0.3134	-0.2227 ± j*0.3133	45	-7.3084	-7.3084
23	$-0.2411 \pm j*2029$	$-0.2411 \pm j*2029$	46	-7.1385	-7.1385

Πίνακας 4.2: Σύγκριση ιδιοτιμών για το δίκτυο της Ν. Εύβοιας

Οι υπολογιζόμενες ιδιοτιμές αναφέρονται σε δύο σύγχρονες γεννήτριες με ισάριθμους APT και δεκαεννέα ισοδύναμες ασύγχρονες ανεμογεννήτριες. Από τη σύγκριση των ιδιοτιμών αυτών, εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων γραμμικοποίησης συμπίπτουν απόλυτα μεταξύ τους.

## 4.7 Παράδειγμα Βραχυπρόθεσμης Αστάθειας Μηχανών Επαγωγής

Το δίκτυο του άπειρου ζυγού – κινητήρα επαγωγής, το οποίο εικονίζεται στο μονογραμμικό διάγραμμα του Σχ. 4.1, θα χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση των ιδιοτιμών και των αντίστοιχων ιδιοδιανυσμάτων του κινητήρα, κατά τη διάρκεια εκδήλωσης βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης.



Σχ. 4.1: Ισοδύναμο μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου άπειρου ζυγού – ενός κινητήρα επαγωγής

Σύμφωνα με το Σχ. 4.1, ο άπειρος ζυγός (ζυγός 1) τροφοδοτεί έναν τριφασικό κινητήρα επαγωγής φαινόμενης ισχύος 100 MVA μέσω τεσσάρων παράλληλων γραμμών μεταφοράς και ενός μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης. Τα δεδομένα των γραμμών και του μετασχηματιστή φαίνονται στον Πίνακα 4.3

Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός Άφιξης	Παράλληλο Κύκλωμα	<b>R</b> (αμ)	$X(\alpha\mu)$	<b>B</b> (αμ)	r
1	2	1	0.0	0.88	0.0	-
1	2	2	0.0	0.88	0.0	-
1	2	3	0.0	0.88	0.0	-
1	2	4	0.0	0.88	0.0	-
2	3	1	0.0	0.10	0.0	1.00

Πίνακας 4.3: Δεδομένα γραμμών και μετασχηματιστή

Ο κινητήρας επαγωγής μπορεί να θεωρηθεί ότι παριστάνει το αντίστοιχο ισοδύναμο συγκεντρωτικό μοντέλο ενός βιομηχανικού φορτίου ή ενός μεγάλου εμπορικού-οικιακού φορτίου με κυρίαρχες συνιστώσες τις συσκευές ψύξης και κλιματισμού. Στον τερματικό ζυγό του κινητήρα θεωρείται εγκατεστημένη συστοιχία στατών πυκνωτών, προκειμένου ο συντελεστής ισχύος να είναι μοναδιαίος στο αρχικό σημείο λειτουργίας.

Όσον αφορά τις προσομοιώσεις που ακολουθούν, σημειώνεται ότι η δυναμική συμπεριφορά του εξεταζόμενου κινητήρα προσεγγίζεται από το μοντέλο τρίτης τάξης ασύγχρονης μηχανής, ενώ οι ανά μονάδα τιμές των παραμέτρων του ανηγμένες στη βάση αυτού φαίνονται στον Πίνακα 4.4.

S <sub>nom</sub> (MVA)	<b>R</b> <sub>s</sub> (αμ)	<i>X</i> <sub>ls</sub> (αμ)	$\begin{array}{c} X_m \\ (\alpha \mu) \end{array}$	<b>R</b> <sub>r</sub> (αμ)	$X_{lr}$ ( $\alpha\mu$ )	<b>H</b> (s)
100.0	0.0	0.091	2.23	0.059	0.071	0.342

Πίνακας 4.4: Δεδομένα μηχανών επαγωγής (αμ στα βασικά μεγέθη της μηχανής)

Βάσει των τιμών των παραπάνω παραμέτρων και λαμβάνοντας υπόψη την κατηγοριοποίηση των μηχανών επαγωγής σύμφωνα με τη διατριβή [Nom05], ο θεωρούμενος κινητήρας κατατάσσεται στους «μικρούς» κινητήρες με μικρή χρονική σταθερά ανοιχτοκυκλώσεως ( $T'_r = 0.1241$  s). Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι ο εξεταζόμενος κινητήρας αναμένεται να εμφανίσει διαδοχικά τις εξής δύο μεταβατικές συμπεριφορές:

 Μία γρήγορη δυναμική συμπεριφορά των ηλεκτρικών μεταβατικών φαινομένων του δρομέα, η οποία διεγείρει έναν ταλαντωτικό ρυθμό απόκρισης της μαγνητικής ροής, με κυρίαρχες μεταβλητές κατάστασης τις δύο μεταβατικές ΗΕΔ στον ευθύ και στον εγκάρσιο μαγνητικό άξονα του δρομέα.  Μία αργή δυναμική συμπεριφορά του μηχανικού μέρους του δρομέα, η οποία εκδηλώνεται σαν ένας απεριοδικός ρυθμός απόκρισης με κυρίαρχη μεταβλητή κατάστασης την ολίσθηση της μηχανής.

Κατά συνέπεια, οι τρεις ιδιοτιμές του γραμμικοποιημένου μοντέλου του ασύγχρονου κινητήρα συνιστούν ένα ζεύγος συζυγών μιγαδικών ιδιοτιμών και μία πραγματική ιδιοτιμή, διεγείροντας αντίστοιχα έναν ταλαντωτικό και έναν απεριοδικό ρυθμό απόκρισης.

Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης ροής φορτίου στο αρχικό σημείο ισορροπίας.

	Διάνυσμα Τάσης		Παραγωγή		Κατανάλωση		Εγκάρσιο Στοιχείο	
Ζυγός	$V(\alpha\mu)$	<b>θ</b> (°)	<b>P</b> <sub>G</sub> (MW)	<b>Q</b> <sub>G</sub> (MVAr)	<b>P</b> <sub>L</sub> (MW)	$Q_L$ (MVAr)	$G_L$ (MW)	<b>B</b> <sub>L</sub> (MVAr)
1	1.04147	0.0	90.93	26.45866	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1.00412	-11.03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	1.0000	-16.22	0.0	0.0	90.93	57.63781	0.0	57.63917

Πίνακας 4.5: Επίλυση προβλήματος αρχικής ροής φορτίου

Για λόγους πληρότητας της μελέτης, θα εξεταστούν οι εξής δύο περιπτώσεις εκδήλωσης μηχανισμού βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης:

- 1. Απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας.
- 2. Απώλεια έλξης ευσταθούς βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας.

Ειδικότερα για την πρώτη από τις παραπάνω περιπτώσεις, η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του ασύγχρονου κινητήρα θα πραγματοποιηθεί θεωρώντας ότι το μηχανικό του φορτίο παριστάνεται είτε από μοντέλο σταθερής ροπής ή από μοντέλο ροπής ανάλογης με το τετράγωνο των στροφών.

## 4.7.1 Περίπτωση 1: Απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας

Στην περίπτωση αυτή, θα εξεταστεί η απόκριση του συστήματος του Σχ. 4.1 στο ενδεχόμενο απώλειας των δύο από τα τέσσερα κυκλώματα της γραμμής μεταφοράς τη χρονική στιγμή t=1 s. Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά τα εξής δύο μοντέλα μηχανικού φορτίου: α) σταθερής ροπής και β) τετραγωνικής ροπής.

## Α. Μοντέλο σταθερής μηχανικής ροπής φορτίου

Το μοντέλο μηχανικού φορτίου σταθερής ροπής εκφράζεται από τη σχέση:

$$T_m(s) = T_{m0} (4.165)$$

όπου  $T_{m0}$  είναι η μηχανική ροπή του φορτίου στις σύγχρονες στροφές.

Στο Σχ. 4.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροπής ολίσθησης μονίμου καταστάσεως (για όλα τα σημεία ισορροπίας) ενός τυπικού κινητήρα επαγωγής, θεωρώντας μοντέλο μηχανικού φορτίου σταθερής ροπής.

Το διάγραμμα αυτό κατασκευάζεται με βάση το μοντέλο μονίμου καταστάσεως του κινητήρα για σταθερή τάση ακροδεκτών [Man98,VCV98]. Η χαρακτηριστική του μηχανικού φορτίου, η οποία φαίνεται με εστιγμένη γραμμή για διάφορες τιμές της φόρτισης του κινητήρα, είναι μία ευθεία γραμμή παράλληλη με τον άξονα της ολίσθησης.

Όταν η ροπή του μηχανικού φορτίου είναι μικρότερη από τη μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ροπή  $T_{\text{max}}$ , η μηχανική χαρακτηριστική έχει δύο σημεία τομής με την ηλεκτρική χαρακτηριστική (σημεία S και U του Σχ. 4.2). Σημειώνεται ότι για χαμηλό μηχανικό φορτίο, το σημείο U μπορεί να μη βρίσκεται στην περιοχή κανονικής λειτουργίας (s<1), αλλά στην περιοχή της πέδησης (s>1). Όταν η ροπή του μηχανικού φορτίου είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ροπή  $T_{\text{max}}$ , οι δύο χαρακτηριστικές δεν τέμνονται, ενώ όταν είναι ακριβώς ίσες υπάρχει ένα σημείο ισορροπίας (σημείο C του Σχ. 4.2).

Αναφορικά με τον χαρακτηρισμό των σημείων ισορροπίας του κινητήρα ως προς την ευστάθειά τους, σημειώνεται ότι το σημείο S είναι ευσταθές. Συγκεκριμένα, μία μικρή αύξηση (μείωση) της ολίσθησης,

η οποία αντιστοιχεί σε επιβράδυνση (επιτάχυνση) του κινητήρα, δημιουργεί μία συνισταμένη επιταχύνουσα (επιβραδύνουσα) ροπή, η οποία, σύμφωνα με τη διαφορική εξίσωση (2.108) επιτάχυνσης του δρομέα, τείνει να μειώσει (αυξήσει) την ολίσθηση, οδηγώντας τον κινητήρα πίσω στο σημείο S. Αντίθετα, το σημείο U χαρακτηρίζεται ως ασταθές, διότι μία μικρή αύξηση της ολίσθησης δημιουργεί μία συνισταμένη επιβραδύνουσα ροπή, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την περαιτέρω επιβράδυνση του κινητήρα ως το σημείο ακινησίας, το οποίο αντιστοιχεί σε μοναδιαία τιμή της ολίσθησης. Από την άλλη πλευρά, μία μικρή μείωση της ολίσθησης του κινητήρα από το σημείο U δημιουργεί ένα πλεόνασμα ηλεκτρομαγνητικής ροπής, με συνέπεια την επιτάχυνση του κινητήρα έως το ευσταθές σημείο ισορροπίας S.



Σχ. 4.2: Καμπύλη ροπής-ολίσθησης κινητήρα επαγωγής με φορτίο σταθερής ροπής

Στο σημείο C μηδενίζεται η κλίση της χαρακτηριστικής ροπής-ολίσθησης. Το σημείο C, στο οποίο τα δύο σημεία (το ευσταθές και το ασταθές) συγχωνεύονται και κατόπιν εξαφανίζονται, είναι σημείο διακλάδωσης σαγματικού κόμβου του κινητήρα (μηδενική ιδιοτιμή). Μετά το σημείο C ο κινητήρας επιβραδύνεται μέχρι να σταματήσει εντελώς (s=1).

Ο μηχανισμός εκδήλωσης βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης στο δίκτυο του Σχ. 4.1 μέσω της απώλειας βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας του κινητήρα περιγράφεται με τη βοήθεια των καμπυλών ροπής-ολίσθησης του Σχ. 4.3.



Σχ. 4.3: Καμπύλη ροπής-ολίσθησης κινητήρα (Περίπτωση 1.Α)

Συγκεκριμένα, στο Σχ. 4.3 παρουσιάζονται οι καμπύλες ηλεκτρομαγνητικής ροπής-ολίσθησης στις δύο περιπτώσεις κατά τις οποίες όλα τα κυκλώματα (διακεκομμένη καμπύλη) ή δύο από τα κυκλώματα (συνεχής καμπύλη) της γραμμής μεταφοράς βρίσκονται σε λειτουργία. Η χαρακτηριστική του μηχανικού φορτίου, η οποία φαίνεται με εστιγμένη γραμμή, είναι μία ευθεία γραμμή παράλληλη με τον άξονα της ολίσθησης.

Στο αρχικό σημείο ισορροπίας, ο κινητήρας λειτουργεί στο ευσταθές σημείο ισορροπίας S. Από το Σχ. 4.3 παρατηρείται ότι μετά την απώλεια των δύο κυκλωμάτων της γραμμής μεταφοράς, η χαρακτηριστική ηλεκτρομαγνητικής ροπής-ολίσθησης συρρικνώνεται ώστε ο κινητήρας δεν εμφανίζει σημείο ισορροπίας. Το σημείο C της καμπύλης ροπής-ολίσθησης μετά τη διαταραχή αντιστοιχεί στην ανάπτυξη μέγιστης ηλεκτρομαγνητικής ροπής.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του εξεταζόμενου δικτύου στο προαναφερόμενο σενάριο αστάθειας φαίνονται στα διαγράμματα του Σχ. 4.4.



Σχ. 4.4: Απόκριση κινητήρα επαγωγής (Περίπτωση 1.Α)

Παρατηρείται ότι μετά τη διαταραχή ο κινητήρας επιβραδύνεται απεριοδικά μέχρι την πλήρη ακινησία, ενώ παράλληλα η τερματική του τάση πέφτει σε απαράδεκτα χαμηλές τιμές. Η προσομοίωση τερματίζεται τη χρονική στιγμή κατά την οποία ο κινητήρας ακινητοποιείται εντελώς (μοναδιαία τιμή ολίσθησης).

Στο Σχ. 4.5 φαίνεται στο μιγαδικό επίπεδο η εξέλιξη των ιδιοτιμών του κινητήρα για το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης μετά τη διαταραχή (χρονική στιγμή t=1 s σημειωμένη με «\*»). Σημειώνεται ότι για λόγους οικονομίας, δείχνεται μόνο το άνω μιγαδικό ημιεπίπεδο.



Σχ. 4.5: Γεωμετρικό τόπος ιδιοτιμών αμέσως μετά τη διαταραχή (Περίπτωση 1.Α)

Αναφορικά με τη μιγαδική ιδιοτιμή, παρατηρείται ότι αμέσως μετά τη διαταραχή κινείται σχεδόν παράλληλα με τον πραγματικό άξονα προς τα αριστερά αυξάνοντας την απόσβεση, ενώ στη συνέχεια κινείται παράλληλα με τον φανταστικό άξονα προς τα πάνω αυξάνοντας τη συχνότητα του αντίστοιχου ρυθμού. Αντίθετα, η πραγματική ιδιοτιμή κινείται προς τα δεξιά, ώστε κάποια χρονική περνά στο δεξί ημιεπίπεδο, συμβάλλοντας στην εμφάνιση ενός απεριοδικού ασταθούς ρυθμού απόκρισης.

Στο Σχ. 4.6 φαίνεται η εξέλιξη της πραγματικής ιδιοτιμής συναρτήσει του χρόνου από τη χρονική στιγμή της διαταραχής έως τον τερματισμό της προσομοίωσης.



Σχ. 4.6: Εξέλιζη κρίσιμης ιδιοτιμής (Περίπτωση 1.Α)

Παρατηρείται ότι για τις διαδοχικές χρονικές στιγμές t=1.2541 s (σημειώνεται με «\*») και t=1.2695 s (σημειώνεται με «+») η εξεταζόμενη κρίσιμη ιδιοτιμή παίρνει την τελευταία αρνητική και την πρώτη θετική της τιμή, αντίστοιχα. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η εξεταζόμενη ιδιοτιμή μηδενίζεται εντός του χρονικού διαστήματος το οποίο ορίζεται από τις παραπάνω χρονικές στιγμές.

Σημειώνεται ότι εφόσον η κρίσιμη ιδιοτιμή περάσει στο δεξί ημιεπίπεδο, απαιτείται μεγαλύτερη μείωση φορτίου από την ελάχιστη ώστε να μπορέσει ο κινητήρας να επιστρέψει σε ευσταθές σημείο ισορροπίας. Στα Σχ. 4.7-(α) και Σχ. 4.7-(β) παρουσιάζεται η απαραίτητη μείωση του μηχανικού φορτίου του κινητήρα για την ευσταθή και την ασταθή περιοχή λειτουργίας του, αντίστοιχα.



(a) Απόρριψη στην ευσταθή περιοχή
 (β) Απόρριψη στην ασταθή περιοχή
 Σχ. 4.7: Απόρριψη μηχανικού φορτίου κινητήρα επαγωγής (Περίπτωση 1.Α)

Ειδικότερα, σύμφωνα με το Σχ. 4.7-(α), εάν ο κινητήρας επιβραδύνεται απεριοδικά στην ευσταθή περιοχή λειτουργίας του, η ελάχιστη απαραίτητη μείωση της μηχανικής ροπής του φορτίου  $\Delta T_{m1}$  είναι ίση με:

$$\Delta T_{m1} = \left| T_{m0} - T_{mC} \right| \tag{4.166}$$

όπου  $T_{mC}$ είναι η μηχανική ροπή που ισούται με την ηλεκτρομαγνητική ροπή ανατροπής.

Από την άλλη πλευρά, λαμβάνοντας υπόψη το Σχ. 4.7-(β), εάν ο κινητήρας βρίσκεται στο ασταθές σημείο P και συνεχίζει να επιβραδύνεται, απαιτείται η μείωση του μηχανικού φορτίου  $\Delta T_{m2}$ , ώστε ο κινητήρας να επιταχυνθεί προς το ευσταθές σημείο ισορροπίας S, να είναι ίση με:

$$\Delta T_{m2} = \left| T_{m0} - T_{mS} \right| \tag{4.167}$$

όπου η μηχανική ροπή  $T_{mS}$  ταυτίζεται με την ηλεκτρομαγνητική ροπή που αντιστοιχεί στην ολίσθηση του σημείου S.

Επειδή ισχύει ότι:

$$T_{mC} > T_{mS} \tag{4.168}$$

προκύπτει ισοδύναμα ότι:

$$\Delta T_{m1} < \Delta T_{m2} \tag{4.169}$$

Ακολούθως, στο Σχ. 4.8 παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα η καμπύλη ροπής-ολίσθησης μονίμου καταστάσεως μετά τη διαταραχή (διακεκομμένη καμπύλη), καθώς επίσης και η αντίστοιχη καμπύλη με συνεχή γραμμή που προκύπτει από την προσομοίωση. Η διαφορά στις δύο καμπύλες οφείλεται στο ότι οι μεταβατικές ΗΕΔ  $E'_d$  και  $E'_q$  δεν είναι σε ισορροπία λόγω της συνεχιζόμενης μεταβολής της ολίσθησης s.



Σχ. 4.8: Σύγκριση καμπυλών ροπής-ολίσθησης (Περίπτωση 1.Α)

Αρχικά ο κινητήρας λειτουργεί στο ευσταθές σημείο ισορροπίας S. Μετά την απώλεια των δύο κυκλωμάτων της γραμμής μεταφοράς, η καμπύλη από την προσομοίωση εμφανίζει μία ταλάντωση που αποσβένεται σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, για να ακολουθήσει στη συνέχεια μία απεριοδική απόκριση, η οποία προσεγγίζεται ικανοποιητικά από την αντίστοιχη καμπύλη μονίμου καταστάσεως. Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση, η αρχική ταλάντωση περιγράφει τη γρήγορη δυναμική των ηλεκτρικών μεταβατικών φαινομένων του δρομέα της μηχανής. Ακολούθως, θεωρώντας τα γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα σε ισορροπία, ο κινητήρας εισέρχεται σε μία εμφανώς βραδύτερη δυναμική, στην οποία εμπλέκεται κατά κύριο λόγο η ολίσθησή του.

Εξετάζοντας προσεκτικά τις καμπύλες του Σχ. 4.8, παρατηρείται ότι το μέγιστο της καμπύλης ροπής ολίσθησης μονίμου καταστάσεως (σημείο C) εντοπίζεται εντός του χρονικού διαστήματος κατά το

οποίο η κρίσιμη πραγματική ιδιοτιμή του κινητήρα μηδενίζεται και μεταβάλλει το πρόσημό της (από αρνητική γίνεται πραγματική).

## Β. Μοντέλο τετραγωνικής μηχανικής ροπής φορτίου

Το μοντέλο μηχανικού φορτίου τετραγωνικής ροπής εκφράζεται για  $\omega_{sys} = \omega_b$  από τη σχέση:

$$T_m(s) = T_{m0}(1-s)^2 \tag{4.170}$$

Στο Σχ. 4.9 φαίνεται η καμπύλη ηλεκτρομαγνητικής ροπής-ολίσθησης ενός τυπικού ασύγχρονου κινητήρα για σταθερή τάση ακροδεκτών, μαζί με διάφορες χαρακτηριστικές μηχανικού φορτίου τετραγωνικής ροπής. Ανάλογα με τη φόρτισή του, ο κινητήρας εμφανίζει από ένα έως τρία σημεία ισορροπίας [Man98].



Σχ. 4.9: Καμπύλη ροπής-ολίσθησης κινητήρα επαγωγής με φορτίο τετραγωνικής ροπής

Για χαμηλή φόρτιση, ο κινητήρας έχει μόνο ένα σημείο ισορροπίας S σε χαμηλή ολίσθηση κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα, το οποίο είναι ευσταθές. Εάν το μηχανικό φορτίο αυξηθεί, εμφανίζονται δύο νέα σημεία ισορροπίας μετά τη διακλάδωση σαγματικού κόμβου που αντιστοιχεί στο σημείο C<sub>A</sub>. Το σημείο ισορροπίας S κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα παραμένει ευσταθές, το ενδιάμεσο σημείο ισορροπίας U είναι ασταθές, ενώ το σημείο SS που αντιστοιχεί σε χαμηλή ταχύτητα (μεγάλη τιμή της ολίσθησης) είναι ευσταθές. Το ασταθές σημείο ισορροπίας U καθορίζει την περιοχή έλξης του ευσταθούς σημείου S. Πρέπει να σημειωθεί ότι για τέτοιες φορτίσεις (όπου υπάρχουν τρία σημεία ισορροπίας), ο κινητήρας δεν μπορεί να ξεκινήσει από μόνος του, αφού έλκεται από το ευσταθές σημείο ισορροπίας S και το ασταθές U συμπίπτουν στο σημείο C<sub>B</sub>, το οποίο αποτελεί ένα δεύτερο σημείο διακλάδωσης σαγματικού κόμβου του κινητήρα, το οποίο συναντάται σε υψηλή φόρτιση. Για ακόμα μεγαλύτερη αύξηση φορτίου (μετά από το σημείο C<sub>B</sub>), ο κινητήρας που αρχικά λειτουργούσε στο ευσταθές σημείο S οδηγείται στο μοναδικό σημείο Iσορροπίας SS των χαμηλών στροφών.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση του τετραγωνικού μοντέλου φορτίου, ο κινητήρας μετά την επιβράδυνσή του δεν οδηγείται στην πλήρη ακινησία, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του φορτίου σταθερής ροπής, αλλά στο ευσταθές σημείο ισορροπίας SS χαμηλών στροφών. Το ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας στο σημείο ισορροπίας χαμηλών στροφών είναι πολύ κοντά στο ρεύμα εκκινήσεως.

Εάν θεωρηθεί ότι το μηχανικό φορτίο του κινητήρα μειώνεται μετά την επιβράδυνσή του, η λειτουργία του θα συνεχιστεί σε σημεία ισορροπίας χαμηλών στροφών, μέχρι να οδηγηθεί στο σημείο  $C_A$ . Από το σημείο αυτό και μετά, ο κινητήρας θα επιταχυνθεί εκ νέου, ώσπου να ισορροπήσει τελικά σε σημείο λειτουργίας υψηλών στροφών.

Επομένως, ένας κινητήρας επαγωγής με τετραγωνικό μοντέλο φορτίου εμφανίζει τις εξής δύο περιοχές ευσταθούς λειτουργίας: α) την περιοχή υψηλών στροφών ανάμεσα στη σύγχρονη ταχύτητα (s=0) και το

σημείο διακλάδωσης  $C_B$  και β) την περιοχή χαμηλών στροφών ανάμεσα στο σημείο διακλάδωσης  $C_A$  και την ακινησία (s=1). Η περιοχή της καμπύλης ανάμεσα στα σημεία σαγματικού κόμβου  $C_A$  και  $C_B$  είναι ασταθής.

Στο Σχ. 4.10 φαίνονται οι καμπύλες ηλεκτρομαγνητικής ροπής-ολίσθησης για το εξεταζόμενο δίκτυο του Σχ. 4.1 πριν (διακεκομμένη καμπύλη) και μετά (συνεχής καμπύλη) τη διαταραχή, καθώς επίσης και η χαρακτηριστική του τετραγωνικού μηχανικού φορτίου (με εστιγμένη γραμμή).



Σχ. 4.10: Καμπύλες ροπής-ολίσθησης (Περίπτωση 1.Β)

Σύμφωνα με το Σχ. 4.10, ο κινητήρας εμφανίζει πριν τη διαταραχή ένα μόνο ευσταθές σημείο ισορροπίας  $S_1$  υψηλών στροφών. Ακολούθως, μετά την απώλεια των δύο κυκλωμάτων της γραμμής μεταφοράς, το ευσταθές σημείο ισορροπίας υψηλών στροφών και το ασταθές σημείο συμπίπτουν στο σημείο διακλάδωσης σαγματικού κόμβου  $C_B$  υψηλών στροφών. Κατά συνέπεια, ο κινητήρας επιβραδύνεται στην ασταθή περιοχή λειτουργίας του (από το σημείο  $C_B$  μέχρι το σημείο  $C_A$ ) μέχρι να ηρεμήσει τελικά στο ευσταθές σημείο ισορροπίας  $SS_2$  των χαμηλών στροφών.



Σχ. 4.11: Απόκριση κινητήρα επαγωγής (Περίπτωση 1.Β)

Οι παραπάνω διαπιστώσεις αυτές επιβεβαιώνονται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα οποία φαίνονται στα διαγράμματα του Σχ. 4.11.

Από το Σχ. 4.11 παρατηρείται ότι στο τελικό σημείο ισορροπίας τόσο η τιμή της τερματικής τάσης (κοντά στο 0.3 αμ) όσο και η τιμή της ολίσθησης (λίγο μεγαλύτερη από 45%) του κινητήρα είναι εμφανώς μη αποδεκτές. Ο κινητήρας σε κάποιο χρονικό σημείο θα αποσυνδεθεί λόγω προστασίας υποτάσεως ή υπερθερμάνσεως.

Στο Σχ. 4.12 φαίνεται στο μιγαδικό επίπεδο η εξέλιξη των ιδιοτιμών του κινητήρα για το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης μετά τη διαταραχή (χρονική στιγμή *t*=1 s σημειωμένη με «\*»).



Σχ. 4.12: Γεωμετρικό τόπος ιδιοτιμών αμέσως μετά τη διαταραχή (Περίπτωση 1.Β)

Όσον αφορά την εξέλιξη της μιγαδικής ιδιοτιμής ισχύουν ακριβώς τα ίδια ποιοτικά συμπεράσματα με την προηγούμενη περίπτωση του μοντέλου φορτίου σταθερής ροπής. Εντούτοις, η απόκριση του απεριοδικού ρυθμού διαφέρει σημαντικά σε σχέση με την προηγούμενο μοντέλο μηχανικού φορτίου, όπως προκύπτει και από τη χρονική εξέλιξή του σύμφωνα με το Σχ. 4.13.



Σχ. 4.13: Εζέλιζη κρίσιμης ιδιοτιμής (Περίπτωση 1.Β)

Συγκεκριμένα, μετά τη διαταραχή η πραγματική ιδιοτιμή κινείται προς τα δεξιά, μηδενίζεται κάποια χρονική στιγμή στο διάστημα μεταξύ των t=22.4229 s και t=22.5088 s και στη συνέχεια αυξάνεται απεριοδικά περνώντας στο δεξί ημιεπίπεδο. Ωστόσο, από ένα σημείο και μετά η πραγματική ιδιοτιμή μεταβάλλει την κίνησή της, αρχίζοντας να κατευθύνεται αριστερά. Η κίνηση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα το νέο μηδενισμό της ιδιοτιμής σε κάποια χρονική στιγμή που ανήκει στο διάστημα από t=47.76 s έως t=47.8394 s και την επιστροφή της στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο. Τελικά, η ιδιοτιμή ηρεμεί σε μία τιμή κοντά στο -0.8, που αντιστοιχεί σε ένα ευσταθές σημείο ισορροπίας.

Τέλος, στο Σχ. 4.14 παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα η καμπύλη ροπής-ολίσθησης μονίμου καταστάσεως μετά τη διαταραχή (διακεκομμένη καμπύλη), καθώς επίσης και η αντίστοιχη καμπύλη (με συνεχή γραμμή) που προκύπτει από την προσομοίωση.



Σχ. 4.14: Σύγκριση καμπυλών ροπής-ολίσθησης (Περίπτωση 1.Β)

Τα ποιοτικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των καμπυλών του Σχ. 4.14 είναι τα ίδια με τα αντίστοιχα συμπεράσματα της προηγούμενης περίπτωσης μοντέλου μηχανικού φορτίου σταθερής ροπής. Ωστόσο, το ενδιαφέρον στην παρούσα περίπτωση εστιάζεται στα εξής δύο σημεία:

- Όταν η κρίσιμη πραγματική ιδιοτιμή περνά στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο, ο κινητήρας συναντά το σημείο διακλάδωσης σαγματικού κόμβου C<sub>B</sub> υψηλών στροφών και εισέρχεται στην ασταθή περιοχή λειτουργίας.
- Όταν η παραπάνω ιδιοτιμή επιστρέφει στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο, ο κινητήρας συναντά το σημείο διακλάδωσης σαγματικού κόμβου C<sub>A</sub> χαμηλών στροφών και εξέρχεται από την ασταθή περιοχή λειτουργίας κατευθυνόμενος προς το σημείο ισορροπίας SS<sub>2</sub> χαμηλών στροφών.

# 4.7.2 Περίπτωση 2: Απώλεια έλξης ευσταθούς βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας

Στην εξεταζόμενη περίπτωση θεωρείται ότι τη χρονική στιγμή t=1 s λαμβάνει χώρα τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ένα κύκλωμα της γραμμής μεταφοράς πολύ κοντά στο ζυγό άφιξης (ζυγός 2). Κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος, η τερματική τάση του κινητήρα και άρα και η αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική του ροπή αναμένεται να πέσουν σχεδόν στο μηδέν, με αποτέλεσμα την επιβράδυνσή του. Η εκκαθάριση του σφάλματος πραγματοποιείται με το άνοιγμα του αντίστοιχου κυκλώματος.

Στο Σχ. 4.15 φαίνονται οι καμπύλες μονίμου καταστάσεως ροπής-ολίσθησης του κινητήρα πριν και μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, θεωρώντας μοντέλο σταθερής μηχανικής ροπής φορτίου.

Σύμφωνα με το Σχ. 4.15, ο κινητήρας συνεχίζει να εμφανίζει δύο σημεία ισορροπίας (το ευσταθές  $S_2$  και ασταθές  $U_2$ ) μετά την εκκαθάριση του εξεταζόμενου βραχυκυκλώματος. Εάν το σφάλμα εκκαθαριστεί προτού ο κινητήρας επιβραδυνθεί πέραν της ολίσθησης του ασταθούς σημείου  $U_2$ , η χαρακτηριστική της ηλεκτρομαγνητικής ροπής θα υπερβαίνει τη χαρακτηριστική της μηχανικής ροπής, οπότε η συνισταμένη επιταχύνουσα ροπή θα οδηγήσει τον κινητήρας να επιβραδυνθεί πέρα από την άλλη πλευρά, εάν το σφάλμα διαρκέσει αρκετά, ώστε ο κινητήρας να επιβραδυνθεί πέρα από την ολίσθηση που αντιστοιχεί στο ασταθές σημείο  $U_2$ , η καμπύλη της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, με αποτέλεσμα την περαιτέρω επιβράδυνση αυτού. Σε μαθηματικούς όρους, η ευσταθής πολλαπλότητα του  $U_2$  αποτελεί το όριο της περιοχής έλξης του ευσταθούς σημείου ισορροπίας  $S_2$  μετά την εκκαθάριση του εξεταζόμενου σφάλματος.



Σχ. 4.15: Καμπύλες ροπής-ολίσθησης (Περίπτωση 2)

Οι αποκρίσεις του κινητήρα για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες το σφάλμα εκκαθαρίζεται μετά από χρονικό διάστημα 75 ms και 80 ms φαίνονται στα διαγράμματα του Σχ. 4.16.



Σχ. 4.16: Απόκριση κινητήρα επαγωγής (Περίπτωση 2)

Κατά τη διάρκεια του σφάλματος, παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις, η τερματική τάση του κινητήρα σχεδόν μηδενίζεται, με αποτέλεσμα τη γρήγορη επιβράδυνσή του. Εάν το σφάλμα εκκαθαριστεί μετά από 75 ms, ο κινητήρας επιταχύνεται προς την ευσταθή περιοχή λειτουργίας του με αποτέλεσμα την αποκατάσταση των τάσεων του δικτύου. Αντίθετα, εάν το βραχυκύκλωμα διαρκέσει 80 ms, ο κινητήρας αδυνατεί να επιταχυνθεί εκ νέου, οδηγούμενος σε περαιτέρω επιβράδυνση, η οποία προκαλεί την κατάρρευση του συστήματος. Είναι προφανές ότι ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του υπόψη σφάλματος βρίσκεται μεταξύ των δύο παραπάνω τιμών.

Στα διαγράμματα του Σχ. 4.17 φαίνεται στο μιγαδικό επίπεδο η εξέλιξη των ιδιοτιμών του κινητήρα μετά την εκκαθάριση του σφάλματος τόσο για το ευσταθές όσο και για το ασταθές σενάριο.

Βάσει των παραπάνω διαγραμμάτων, συμπεραίνεται ότι ο ρυθμός ταλάντωσης της μαγνητικής ροής του δρομέα του κινητήρα δεν παρουσιάζει κανένα ενδιαφέρον όσον αφορά την ευστάθεια του δικτύου σε καμία από τις δύο περιπτώσεις. Αντίθετα, παρατηρείται ότι και στα δύο σενάρια μετά την εκκαθάριση του σφάλματος η πραγματική ιδιοτιμή κινείται αρχικά προς τα αριστερά, ενώ στη συνέχεια μεταβάλλει την κατεύθυνσή της και περνά στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο. Εάν το σφάλμα εκκαθαριστεί έγκαιρα, η εξεταζόμενη ιδιοτιμή αλλάζει εκ νέου την κατεύθυνσή της, επιστρέφοντας στο αριστερό ημιεπίπεδο, όπου και παραμένει μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Στην περίπτωση καθυστερημένης εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος, η θεωρούμενη ιδιοτιμή παραμένει στο δεξί ημιεπίπεδο, με αποτέλεσμα την εξέλιξη του εμφανιζόμενου μηχανισμού βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης σε κατάρρευση του συστήματος.



Σχ. 4.17: Γεωμετρικός τόπος ιδιοτιμών μετά την εκκαθάριση του σφάλματος (Περίπτωση 2)

Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώνονται και από τις γραφικές παραστάσεις του Σχ. 4.18, όπου φαίνεται η χρονική απόκριση της πραγματικής ιδιοτιμής για τα δύο εξεταζόμενα σενάρια μετά την εκκαθάριση του τριφασικού βραχυκυκλώματος. Σύμφωνα με το Σχ. 4.18 για το ευσταθές σενάριο προσομοίωσης, η πραγματική ιδιοτιμή επιστρέφει στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο τη χρονική στιγμή *t*=2.2588 s.



Σχ. 4.18: Εξέλιξη κρίσιμης ιδιοτιμής μετά την εκκαθάριση του σφάλματος (Περίπτωση 2)

Καταλήγοντας, στο Σχ. 4.19 παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα η καμπύλη ροπής-ολίσθησης μονίμου καταστάσεως μετά τη διαταραχή (διακεκομμένη καμπύλη), καθώς επίσης και οι αντίστοιχες καμπύλες που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις τόσο για το ευσταθές (με συνεχή γραμμή) όσο και για το ασταθές (με διακεκομμένη-εστιγμένη γραμμή) σενάριο.

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται η περιοχή έλξης του ευσταθούς σημείου ισορροπίας  $S_2$  του κινητήρα μετά την εκκαθάριση του σφάλματος. Συγκεκριμένα, στην ευσταθή απόκριση η επιβράδυνση του κινητήρα σταματά πριν φτάσει στο ασταθές σημείο  $U_2$ , οπότε ο τελευταίος επιταχύνεται και έλκεται προς το ευσταθές σημείο  $S_2$ . Αντίθετα, στο ασταθές σενάριο η επιβράδυνση του κινητήρα πέραν της ολίσθησης του ασταθούς σημείου  $U_2$  έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια της έλξης από το ευσταθές σημείο  $S_2$  με κατάληξη την κατάρρευση του συστήματος.

Τέλος, παρατηρείται ότι οι χρονικές στιγμές μηδενισμού της κρίσιμης πραγματικής ιδιοτιμής και μεγίστου της ηλεκτρομαγνητικής ροπής μετά την εκκαθάριση (σημείο C<sub>2</sub>) σχεδόν συμπίπτουν μεταξύ τους.



Σχ. 4.19: Σύγκριση καμπυλών ροπής-ολίσθησης (Περίπτωση 2)

## 4.8 Παράδειγμα Αποσυγχρονισμού Σύγχρονης Γεννήτριας

Το ΣΗΕ των πέντε ζυγών [VCV98], που εικονίζεται στο μονογραμμικό διάγραμμα του Σχ. 4.20, θα χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή της μεθοδολογίας γραμμικοποίησης κατά την προσομοίωση που αναπτύχθηκε προηγουμένως, προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά των ιδιοτιμών και των αντίστοιχων ιδιοδιανυσμάτων μίας σύγχρονης γεννήτριας, στην οποία εκδηλώνεται βραχυπρόθεσμη αστάθεια γωνίας, με κατάληξη τον αποσυγχρονισμό της από το δίκτυο.



Σχ. 4.20: Ισοδύναμο μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 4 ζυγών

Το φορτίο του παραπάνω ηλεκτρικού δικτύου, το οποίο βρίσκεται συγκεντρωμένο στο ζυγό 4, θεωρείται εκθετικού τύπου με τους εκθέτες της ενεργού και της αέργου συνιστώσας να είναι ίσοι με 1.5 και 2.5 αντίστοιχα. Το θεωρούμενο φορτίο τροφοδοτείται μέσω του μετασχηματιστή διανομής T2, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με μηχανισμό ΣΑΤΥΦ με σκοπό τη διατήρηση της τάσης του ζυγού 4 σε ένα προκαθορισμένο εύρος τιμών. Τα δεδομένα του μηχανισμού του ΣΑΤΥΦ φαίνονται στον Πίνακα 4.6.

Ζυγός μεταβλητής λήψης	Ζυγός αγωγιμότητας	Ρυθμιζόμενος ζυγός	$V_{\rm max}$ ( $\alpha\mu$ )	$V_{\min}$ ( $\alpha\mu$ )	<i>r</i> <sub>max</sub>	r <sub>min</sub>	$\Delta r$	<i>T</i> <sub>D0</sub> (S)	<b>T</b> <sub>D1</sub> (S)
3	4	4	1.01	0.99	1.10	0.80	0.01	10	10

Πίνακας 4.6: Δεδομένα μηχανισμού ΣΑΤΥΦ

Η ζήτηση του φορτίου καλύπτεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό από έναν άπειρο ζυγό (ζυγός 1), καθώς επίσης και από μία τοπική σύγχρονη γεννήτρια, η οποία είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 2.

Ο άπειρος ζυγός θεωρείται ότι παριστάνει τη διασύνδεση με ένα αρκετά μεγαλύτερο σύστημα, το οποίο συνδέεται στο τοπικό φορτίο με μία μεγάλου μήκους, διπλού κυκλώματος γραμμή μεταφοράς.

Τα δεδομένα της τοπικής γεννήτριας φαίνονται στον Πίνακα 4.7.

		2		1	15	170 12	, ,	2		
S <sub>nom</sub>	$R_s$	X <sub>ls</sub>	$X_d$	$X_q$	$\dot{X_{d}}$	$\dot{X_q}$	$T_{d0}$	$T_{q0}$	H	מ
(MVA)	(αμ)	(αμ)	(αμ)	(αμ)	(αμ)	(αμ)	(s)	(s)	(s)	ν
500	0.0	0.1	2.1	2.1	0.4	0.25	8.0	0.5	3.5	4.0

Πίνακας 4.7: Δεδομένα τοπικής σύγχρονης γεννήτριας

Η γεννήτρια είναι εξοπλισμένη με APT, ο οποίος παριστάνεται με μία πρωτοβάθμια συνάρτηση μεταφοράς (βλ. Σχ. 2.6 χωρίς φίλτρο μεταπορείας) και αθροιστικό ΣΠΥ με αναλογική μονάδα ελέγχου, ενώ συνδέεται στο δίκτυο μέσω του μετασχηματιστή T1, ο οποίος έχει τη δυνατότητα για μη ονομαστική πλην όμως σταθερή λήψη. Τα δεδομένα του APT και του ΣΠΥ παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8: Δεδομένα ΑΡΤ και ΣΠΥ τοπικής σύγχρονης γεννήτριας

A	РТ	ΣΠΥ				
K <sub>AVR</sub>	$\overline{T_{AVR}}$ (S)	$I_{lim}$ ( $\alpha\mu$ )	T <sub>OEL</sub> (S)	K <sub>P</sub>		
50	0.1	2.825	60	10.0		

Προκειμένου να υποστηριχθεί η άεργος ζήτηση του τοπικού δικτύου, εγκαθίσταται στο ζυγό 4 μία συστοιχία στατών πυκνωτών, η οποία βελτιώνει το συντελεστή ισχύος του φορτίου στο αρχικό σημείο λειτουργίας.

Η παρουσία του άπειρου ζυγού εξασφαλίζει τη διατήρηση της συχνότητας του δικτύου στην ονομαστική της τιμή σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης ( $\omega_{sys}=\omega_b$ ).

Τα δεδομένα των γραμμών μεταφοράς και των μετασχηματιστών φαίνονται στον Πίνακα 4.9.

Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός Άφιξης	Παράλληλο κύκλωμα	<b>R</b> (αμ)	$X(\alpha\mu)$	<b>B</b> (αμ)	r
5	3	1	0.0	0.0554	0.0	-
5	3	2	0.0	0.0554	0.0	-
1	5	1	0.0	0.010	0.0	-
3	4	1	0.0	0.004	0.0	0.99
3	2	1	0.0	0.016	0.0	1.04

Πίνακας 4.9: Δεδομένα γραμμών και μετασχηματιστών

Επίσης, τα αποτελέσματα της επίλυσης ροή φορτίου στο αρχικό σημείο λειτουργίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.10.

	Διάνυσμα Τάσης		Παραγωγή		Κατα	νάλωση	Εγκάρσιο Στοιχείο	
Ζυγός	$V(\alpha\mu)$	<b>θ</b> (°)	<b>P</b> <sub>G</sub> (MW)	<b>Q</b> <sub>G</sub> (MVAr)	$P_L$ (MW)	$Q_L$ (MVAr)	$G_L$ (MW)	<b>B</b> <sub>L</sub> (MVAr)
1	1.10	0.0	1050.0	469.276	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1.00	-16.70	450.0	222.597	0.0	0.0	0.0	0.0
3	1.00575	-20.97	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	1.00821	-24.32	0.0	0.0	1500.0	750.0	0.0	590.263
5	1.06164	-5.16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Πίνακας 4.10: Επίλυση αρχικού προβλήματος ροής φορτίου

Ακολούθως, εξετάζεται από πλευράς ευστάθειας τάσης και γωνίας η απόκριση του συστήματος του Σχ. 4.20 στο ενδεχόμενο απώλειας του ενός κυκλώματος της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 1 και 3. Η διαταραχή, η οποία θεωρείται ότι πραγματοποιείται τη χρονική στιγμή *t*=1 s, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της μέγιστης ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί από το απομονωμένο σύστημα προς το τοπικό φορτίο.

Η απόκριση της τάσης του φορτίου και του λόγου μετασχηματισμού του μετασχηματιστή T2 στο προαναφερόμενο σενάριο διαταραχής, καθώς επίσης και η «νεκρή» ζώνη τάσης αναφοράς του μηχανισμού ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή αυτού, φαίνονται στο Σχ. 4.21-(α).



Σχ. 4.21: Απόκριση τοπικού δικτύου

Από το Σχ. 4.21-(α) παρατηρείται ότι η μείωση της εισαγωγής ισχύος από το απομονωμένο σύστημα μετά την απώλεια του ενός κυκλώματος της γραμμής μεταφοράς προκαλεί πτώσης τάσης στο ζυγό του τοπικού φορτίου κάτω από τη μικρότερη επιθυμητή τιμή της. Κατά συνέπεια, ενεργοποιείται ο μηχανισμός ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή διανομής Τ2, επιτυγχάνοντας μετά από χρονικό διάστημα περίπου 50 s να επαναφέρει την τάση του φορτίου εντός των επιθυμητών ορίων τιμών.

Εντούτοις, λαμβάνοντας υπόψη την απόκριση του ρεύματος πεδίου της τοπικής σύγχρονης γεννήτριας από το Σχ. 4.21-(β), εξάγεται το συμπέρασμα ότι η θεωρούμενη μηχανή υπερδιεγείρεται πέραν του ορίου μονίμου καταστάσεως (I<sub>lim</sub>) μετά την προαναφερόμενη διαταραχή. Αξίζει να αναφερθεί ότι η υπερδιέγερση επιδεινώνεται κατά τη διάρκεια αποκατάστασης του φορτίου μέσω του μηχανισμού του ΣΑΤΥΦ, διότι η επαναφορά της τάσης του φορτίου συνοδεύεται από αύξηση της κατανάλωσής του. Κατά συνέπεια, η ενεργοποίηση του ΣΠΥ της γεννήτριας στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα (περίπου 60 s μετά τη διαταραχή) και η επερχόμενη μείωση του ρεύματος διεγέρσεως της γεννήτριας στη μέγιστη τιμή μονίμου καταστάσεως προκαλούν νέα πτώση των τάσεων στους ζυγούς του εξεταζόμενου δικτύου.

Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η τάση του φορτίου να μειωθεί ξανά κάτω από τη μικρότερη επιθυμητή τιμή της και άρα να ενεργοποιηθεί εκ νέου ο μηχανισμός ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή Τ2. Ωστόσο, σύμφωνα με το Σχ. 4.21-(α), η διαδικασία αποκατάστασης του φορτίου μέσω του μηχανισμού ΣΑΤΥΦ έχει καταστεί πλέον ασταθής. Συγκεκριμένα, από τη χρονική στιγμή του περιορισμού της τοπικής γεννήτριας και μετά, παρατηρείται ότι μολονότι ο λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή Τ2.

Η συνεχής μείωση του παραπάνω λόγου μετασχηματισμού από τον αντίστοιχο μηχανισμό ΣΑΤΥΦ προκαλεί τον αποσυγχρονισμό της σύγχρονης γεννήτριας τη χρονική στιγμή t=183.5 s περίπου. Η απώλεια του συγχρονισμού της σύγχρονης μηχανής με το δίκτυο είναι προφανής από το Σχ. 4.22, στο οποίο φαίνεται η απόκριση της γωνίας του δρομέα αυτής. Σημειώνεται ότι η προσομοίωση τερματίζεται λίγο μετά την προαναφερόμενη χρονική στιγμή, όταν η τιμή της γωνίας του δρομέα υπερβεί τις 360<sup>0</sup>. Οι ταλαντώσεις της τάσης του φορτίου και του ρεύματος πεδίου της τοπικής γεννήτριας λίγο πριν τον τερματισμό της προσομοίωσης οφείλονται στην υπερπήδηση των πόλων της τελευταίας αμέσως μετά τον αποσυγχρονισμό της από το δίκτυο.



Σχ. 4.22: Γωνία δρομέα σύγχρονης γεννήτριας

Η πιθανή τελική κατάληξη του προαναφερόμενου σεναρίου θα ήταν η ολική σβέση της τοπικής περιοχής, την οποία θα προκαλούσε η αποσύνδεση της τοπικής γεννήτριας από το δίκτυο, ακολουθούμενη από το άνοιγμα της παραμένουσας σε λειτουργία γραμμής μεταφοράς λόγω υπερφόρτωσης.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι η κατάρρευση του συστήματος μπορεί να αποφευχθεί εάν ληφθούν εγκαίρως κατάλληλα μέτρα για την αντιμετώπιση της μακροπρόθεσμης αστάθειας του μηχανισμού του ΣΑΤΥΦ, δηλαδή πριν τη βραχυπρόθεσμη αστάθεια γωνίας της τοπικής γεννήτριας.

Συνοψίζοντας, στην εξεταζόμενη περίπτωση ο περιορισμός του ρεύματος διεγέρσεως της τοπικής γεννήτριας μετά την απώλεια του ενός κυκλώματος της γραμμής μεταφοράς καθιστά ασταθή τη λειτουργία αποκατάστασης του φορτίου μέσω του μηχανισμού του ΣΑΤΥΦ. Η εμφανιζόμενη μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης οδηγεί σε περαιτέρω επιδείνωση το δίκτυο, με αποτέλεσμα την εκδήλωση βραχυπρόθεσμης αστάθειας γωνίας στην τοπική γεννήτρια, με κατάληξη την απώλεια συγχρονισμού της τελευταίας και τελικά την κατάρρευση του τοπικού δικτύου.

Ακολούθως, το ενδιαφέρον εστιάζεται στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο λαμβάνει χώρα η απώλεια του συγχρονισμού της τοπικής γεννήτριας. Συγκεκριμένα, γίνεται εφαρμογή της μεθοδολογίας γραμμικοποίησης κατά την προσομοίωση, ώστε να εξηγηθεί ο μηχανισμός με τον οποίο εκδηλώνεται η μεταβατική αστάθεια γωνίας στην εξεταζόμενη περίπτωση.

Όσον αφορά το γραμμικοποιημένο μοντέλο του εξεταζόμενου δικτύου του Σχ. 4.20 σημειώνεται ότι εμφανίζει συνολικά πέντε ιδιοτιμές, από τις οποίες οι τέσσερις αντιστοιχούν στις μεταβλητές κατάστασης του μοντέλου της σύγχρονης μηχανής, ενώ η πέμπτη σχετίζεται με την τάση διέγερσης, η οποία αποτελεί ταυτόχρονα μεταβλητή κατάστασης και έξοδο του μοντέλου του ΑΡΤ.

Στον Πίνακα 4.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της γραμμικοποίησης του βραχυπρόθεσμου συστήματος του Σχ. 4.20 «γύρω» από το εν δυνάμει σημείο ισορροπίας αμέσως μετά την τελευταία αλλαγή λήψης του μηχανισμού του ΣΑΤΥΦ (χρονική στιγμή *t*=181.0827 s). Σημειώνεται ότι η αστάθεια του ΣΑΤΥΦ στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα δεν εξετάζεται εδώ. Συγκεκριμένα, για κάθε ιδιοτιμή του βραχυπρόθεσμου μοντέλου φαίνονται οι κυρίαρχες μεταβλητές κατάστασης και οι τιμές των συντελεστών συμμετοχής, βάσει των οποίων προκύπτει ο χαρακτηρισμός των αντιστοίχων ρυθμών. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.11, οι πέντε ιδιοτιμές του εξεταζόμενου γραμμικοποιημένου δικτύου συνιστούν δύο ζεύγη συζυγών μιγαδικών και μία πραγματική ιδιοτιμή, διεγείροντας αντίστοιχα δύο ταλαντωτικούς ρυθμούς και έναν απεριοδικό.

Το πρώτο ζεύγος μιγαδικών ιδιοτιμών αντιστοιχεί στην ταλάντωση του συστήματος διέγερσης, καθώς εμπλέκει κατά κύριο λόγο τη μεταβατική ΗΕΔ κατά τον εγκάρσιο μαγνητικό άξονα και την τάση διέγερσης της σύγχρονης μηχανής. Η σχετικά μεγάλη συχνότητα του ρυθμού αυτού (περίπου στα 7.44 Hz) οφείλεται στο γεγονός ότι έχει αναλογικό-αθροιστικού τύπου περιοριστή του ρεύματος πεδίου.

Όσον αφορά το δεύτερο συζυγές ζευγάρι των μιγαδικών ιδιοτιμών, συμπεραίνεται ότι αντιστοιχεί στο ρυθμό της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης μεταξύ της τοπικής γεννήτριας και του άπειρου ζυγού, καθώς οι κυρίαρχες μεταβλητές κατάστασης είναι η γωνία και η ταχύτητα δρομέα της μηχανής. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εξεταζόμενη ιδιοτιμή εμφανίζει λόγο απόσβεσης ζ=0.182. Τέλος, η πραγματική ιδιοτιμή σχετίζεται με τον απεριοδικό ρυθμό απόκρισης του τυλίγματος απόσβεσης της σύγχρονης γεννήτριας και είναι αρκετά απομακρυσμένη από το δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο.

Ιδιοτιμή	Συχνότητα Ταλάντωσης (Hz)	Απόσβεση Ταλάντωσης	Μεταβλητή Κατάστασης	Συντελεστές Συμμετοχής	Χαρακτηρισμός Ρυθμού
$-5.014 \pm j*46.743$	7.44	0.107	$E_{qSG} \\ E_{fSG}$	1.000 0.999	Ρυθμός διέγερσης
-0.358 ± j*1.939	0.31	0.182	$\delta_{SG} \ \omega_{rSG}$	0.989 1.000	Ρυθμός ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης
-10.235	0.00	1.000	$\dot{E_{dSG}}$	1.000	Ρυθμός τυλίγματος απόσβεσης

Πίνακας 4.11: Ανάλυση ρυθμών δικτύου αμέσως μετά την τελευταία αλλαγή λήψης του ΣΑΤΥΦ

Στο Σχ. 4.23 παρουσιάζεται στο μιγαδικό επίπεδο η εξέλιξη των ιδιοτιμών του συστήματος κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για το χρονικό διάστημα αμέσως μετά την τελευταία αλλαγή λήψης του ΣΑΤΥΦ (χρονική στιγμή t=181.0827 s σημειωμένη με «\*») έως τη χρονική στιγμή t=182.7632 s. Όμοια με προηγουμένως, παρουσιάζεται μόνο το άνω μιγαδικό ημιεπίπεδο.



Σχ. 4.23: Απόκριση ιδιοτιμών μετά την τελευταία αλλαγή λήψης του ΣΑΤΥΦ

Από το Σχ. 4.23, παρατηρείται ότι κατά το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα αυξάνεται πολύ λίγο η συχνότητα του ρυθμού διέγερσης, ενώ το πραγματικό μέρος της αντίστοιχης ιδιοτιμής παραμένει πρακτικά σταθερό. Επίσης, η πραγματική ιδιοτιμή που σχετίζεται με τον απεριοδικό ρυθμό του τυλίγματος απόσβεσης μετακινείται ελάχιστα προς τα δεξιά.

Σε αντίθεση με τους παραπάνω ρυθμούς, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η απόκριση της δεύτερης μιγαδικής ιδιοτιμής, η οποία αντιστοιχεί στο ρυθμό ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης μεταξύ της τοπικής γεννήτριας και του άπειρου ζυγού. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης η ιδιοτιμή αυτή μετακινείται σχεδόν κατακόρυφα (δηλαδή με πρακτικά σταθερό πραγματικό μέρος) προς τον πραγματικό άξονα. Ακολούθως, το αποτέλεσμα της τομής του εξεταζόμενου ζεύγους των συζυγών μιγαδικών ιδιοτιμών με τον πραγματικό άξονα είναι η δημιουργία δύο πραγματικών ιδιοτιμών, οι οποίες κινούνται προς αντίθετες μεταξύ τους κατευθύνσεις. Οι παρατηρήσεις αυτές φαίνονται καλύτερα στο διάγραμμα του Σχ. 4.24, το οποίο αποτελεί μεγέθυνση του Σχ. 4.23, προκειμένου το

ενδιαφέρον να επικεντρωθεί στην απόκριση του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού για το χρονικό διάστημα μεταξύ *t*=181.7969 s (σημειωμένο με «\*») και *t*=181.8610 s (σημειωμένο με τετράγωνο).



Σχ. 4.24: Απόκριση ρυθμού ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης κατά τον αποσυγχρονισμό

Λαμβάνοντας υπόψη το διάγραμμα του Σχ. 4.24, παρατηρείται ότι η τομή της απόκρισης της θεωρούμενης μιγαδικής ιδιοτιμής με τον πραγματικό άξονα, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία δύο ξεχωριστών πραγματικών ιδιοτιμών που κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις, πραγματοποιείται τη χρονική στιγμή t=181.8268 s. Τη στιγμή αυτή σημειώνεται η απώλεια του συγχρονισμού της μηχανής από το δίκτυο, ενώ μετά από ελάχιστο χρονικό διάστημα η μία από τις προαναφερόμενες δύο πραγματικές ιδιοτιμές εισέρχεται στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο, προκαλώντας την εμφάνιση ενός απεριοδικού ασταθούς ρυθμού, ο οποίος κινεί το μηχανισμό εκδήλωσης της μεταβατικής αστάθειας γωνίας της τοπικής γεννήτριας.

Από την ανάλυση μεταβατικής ευστάθειας σε απλούστερο μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας [Pap85] είναι γνωστό ότι η απώλεια συγχρονισμού συμβαίνει τη χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στο μέγιστο της καμπύλης ηλεκτρομαγνητικής ροπής-γωνίας δρομέα. Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν ο ισχυρισμός αυτός βρίσκει εφαρμογή στην εξεταζόμενη περίπτωση, παρουσιάζεται στο Σχ. 4.25 η καμπύλη ηλεκτρομαγνητικής ροπής-γωνίας δρομέα της τοπικής γεννήτριας μετά την τελευταία αλλαγή λήψης του μηχανισμού του ΣΑΤΥΦ.



Σχ. 4.25: Καμπύλη ηλεκτρομαγνητικής ροπής-γωνίας δρομέα γεννήτριας κατά τον αποσυγχρονισμό

Σημειώνεται ότι η μηχανική ροπή εισόδου, η οποία δεν εμφανίζεται στο παραπάνω διάγραμμα για λόγους μεγαλύτερης ευκρίνειας, παραμένει σταθερή στα 450 MW σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Σύμφωνα με το Σχ. 4.25, το τοπικό μέγιστο της ηλεκτρομαγνητική ροπής για το χρονικό διάστημα μετά την τελευταία αλλαγή λήψης του μηχανισμού του ΣΑΤΥΦ παρουσιάζεται τη χρονική στιγμή *t*=181.8187 s, η οποία αντιστοιχεί σε τρία βήματα προσομοίωσης πριν τον αποσυγχρονισμό της μηχανής.

Επομένως, επαληθεύεται ο προαναφερόμενος ισχυρισμός, ο οποίος συνδέει το φαινόμενο του αποσυγχρονισμού μίας σύγχρονης μηχανής με το μέγιστο της αντίστοιχης καμπύλης ηλεκτρομαγνητικής ροπής-γωνίας δρομέα.
# 5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΝΟΤΙΑΣ ΕΥΒΟΙΑΣ

## 5.1 Συνοπτική Περιγραφή Δικτύου Νότιας Εύβοιας

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται από πλευράς βραχυπρόθεσμης ευστάθειας ένα προσεγγιστικό ρεαλιστικό μοντέλο του ηλεκτρικού δικτύου της Νότιας Εύβοιας για το έτος 2001. Το ισοδύναμο μονογραμμικό διάγραμμα του εξεταζόμενου συστήματος φαίνεται στο Σχ. 5.1.



Σχ. 5.1: Ισοδύναμο μονογραμμικό διάγραμμα ηλεκτρικού δικτύου Νότιας Εύβοιας

Το δίκτυο του Σχ. 5.1 αποτελείται από έναν τοπικό συμβατικό σταθμό παραγωγής συνολικής ονομαστικής ισχύος 280 MW, δεκαεννέα αιολικά πάρκα συνολικής παραγωγής 199.5 MW, δύο συγκεντρωμένα τοπικά φορτία, καθώς επίσης και τοπικά δίκτυα μεταφοράς και διανομής στα επίπεδα των 150 kV και 20 kV αντίστοιχα.

Ο τοπικός συμβατικός σταθμός βρίσκεται στο Αλιβέρι και αποτελείται από δύο σύγχρονες γεννήτριες (Γ1 και Γ2) ονομαστικής ισχύος 140 MW η κάθε μία. Κάθε γεννήτρια είναι εξοπλισμένη με APT τύπου AC4 κατά ΙΕΕΕ και ΣΠΥ αθροιστικού τύπου με αναλογική μονάδα ελέγχου για τον περιορισμό πιθανών υπερδιεγέρσεων τόσο στη βραχυπρόθεσμη όσο και στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Οι δύο γεννήτριες συνδέονται στο δίκτυο μεταφοράς μέσω μετασχηματιστών MT/YT με δυνατότητα σταθερών μη ονομαστικών λήψεων.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 5.1, τα δεκαεννέα αιολικά πάρκα είναι εγκατεστημένα στις πέντε περιοχές της Καρύστου, του Λειβαδίου, του Πολυποτάμου, του Αργυρού και της Μυρτιάς. Τα αιολικά πάρκα και τα μεγέθη αιολικής παραγωγής σε κάθε περιοχή φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

Όλα τα αιολικά πάρκα θεωρείται ότι είναι εξοπλισμένα με ασύγχρονες ανεμογεννήτριες. Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης που ακολουθεί, κάθε αιολικό πάρκο θεωρείται ότι παριστάνεται από μία ισοδύναμη ανεμογεννήτρια επαγωγής. Η μηχανική ροπή ανέμου στον άξονα κάθε ανεμογεννήτριας υποτίθεται σταθερή. Στον τερματικό ζυγό κάθε ισοδύναμης ανεμογεννήτριας εγκαθίσταται σύστημα χωρητικής αντιστάθμισης αέργου ισχύος με σκοπό τη διατήρηση του συντελεστή ισχύος του ζυγού στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας σε τιμές μεγαλύτερες του 0.95 (επαγωγικός).

Τα αιολικά πάρκα συνδέονται στο τοπικό δίκτυο μεταφοράς μέσω ισοδυνάμων μετασχηματιστών XT/MT, ακτινικών γραμμών διανομής μέσης τάσης και υποσταθμών MT/YT. Οι μετασχηματιστές XT/MT έχουν τη δυνατότητα μη ονομαστικών λήψεων (η μεταβλητή λήψη βρίσκεται προς την πλευρά της MT), προκειμένου να επιτευχθεί ονομαστική τερματική τάση σε όλα τα αιολικά πάρκα στο αρχικό σημείο λειτουργίας.

Περιοχή	Αιολικά Πάρκα (WF)	Παραγόμενη Ισχύς (MW)
Κάρυστος	1-7	42.1
Λειβάδι	8-11	45.2
Πολυπόταμος	12	12
Αργυρό	13-14	22.8
Μυρτιά	15-19	77.4
Συνολική	Αιολική Παραγωγή	199.5 MW

Πίνακας 5.1: Μεγέθη αιολικών πάρκων

Κάθε υποσταθμός MT/YT αποτελείται από έναν μετασχηματιστή ισχύος 20/150 kV, ο οποίος διαθέτει μηχανισμό ΣΑΤΥΦ με τη μεταβλητή λήψη να βρίσκεται προς τη μεριά των 150 kV. Ο ρόλος του ΣΑΤΥΦ είναι να εξασφαλίζει την κανονική λειτουργία των αιολικών πάρκων που συνδέονται στον αντίστοιχο υποσταθμό, ρυθμίζοντας την τάση στο ζυγό MT εντός ενός προκαθορισμένου εύρους τιμών. Το μοντέλο ΣΑΤΥΦ που χρησιμοποιείται στην παρούσα εφαρμογή ανήκει στα μοντέλα ΣΑΤΥΦ με ρυθμιζόμενο ζυγό το ζυγό αγωγιμότητας. Σε όλα τα ΣΑΤΥΦ θεωρείται ότι όλες ανεξαρτήτως οι αλλαγές λήψης πραγματοποιούνται σε διακριτά βήματα των 10 s.

Το τοπικό δίκτυο μεταφοράς αποτελείται από μία απλή γραμμή μεταφοράς στα 150 kV, η οποία συνδέει το ζυγό YT του Αλιβερίου (H6) με το ζυγό YT του Λειβαδίου (H2).

Όσον αφορά τα συγκεντρωμένα τοπικά φορτία, θεωρούνται φορτία σταθερής αγωγιμότητας. Η ενεργός και άεργος κατανάλωσή τους σε ονομαστική τάση είναι αντίστοιχα 26.97 MW και 5.75 MVAr για το φορτίο 1 και 10.97 MW και 6.8 MVAr για το φορτίο 2.

Το δίκτυο της Ν. Εύβοιας συνδέεται με το ηπειρωτικό Ελληνικό διασυνδεδεμένο ΣΗΕ μέσω δύο εναέριων γραμμών μεταφοράς και δύο υποβρυχίων καλωδίων στο επίπεδο των 150 kV. Η συνολική δυνατότητα μεταφοράς των τεσσάρων αυτών γραμμών είναι ίση με 800 MVA περίπου. Για τη διευκόλυνση της ανάλυσης που ακολουθεί, θεωρείται ότι η παραπάνω σύνδεση πραγματοποιείται με δύο ισοδύναμες γραμμές μεταφοράς των 150 kV. Η συνολική σύνθετη αντίσταση των δύο ισοδυνάμων αυτών γραμμών υπολογίζεται από τη στάθμη βραχυκύκλωσης στο ζυγό ΥΤ του Αλιβερίου.

Τα δεδομένα του συστήματος μεταφοράς-διανομής, καθώς επίσης και τα δυναμικά στοιχεία όλων των μηχανών (σύγχρονες γεννήτριες και ασύγχρονες ανεμογεννήτριες) βρίσκονται στο Παράρτημα Α της μελέτης με τίτλο «Ανάλυση Ασφάλειας Ηλεκτρικού Δικτύου Νότιας Εύβοιας με Μέγιστη Αιολική Παραγωγή», η οποία εκπονήθηκε με επιβλέποντα τον Καθηγητή του ΕΜΠ κ. Κ. Βουρνά το Φεβρουάριο του 2001 στα πλαίσια σύμβασης μεταξύ της ΔΕΗ και του ΕΠΙΣΕΥ.

Κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων που ακολουθούν, θεωρείται ότι κάθε σύγχρονη γεννήτρια παριστάνεται από το μοντέλο τέταρτης τάξεως, ενώ κάθε μηχανή επαγωγής από το αντίστοιχο τρίτης τάξης. Επίσης, αμελείται η επίδραση των στροβίλων του συμβατικού σταθμού παραγωγής, με αποτέλεσμα η μηχανική ροπή εισόδου των δύο σύγχρονων γεννητριών να θεωρείται σταθερή.

Αναφορικά με το αρχικό σημείο λειτουργίας του θεωρούμενου δικτύου, σημειώνεται ότι:

- Το ηπειρωτικό Ελληνικό διασυνδεδεμένο ΣΗΕ απορροφά από το δίκτυο της Ν. Εύβοιας ενεργό ισχύ ίση με 417 MW, ενώ υποστηρίζει το τελευταίο με άεργο ισχύ της τάξης των 97 MVAr.
- Κάθε σύγχρονη γεννήτρια παράγει 140 MW και 76 MVAr με την τερματική της τάση να ισούται με 1.04 αμ.
- Οι μηχανισμοί ΣΑΤΥΦ των υποσταθμών ΜΤ/ΥΤ στις περιοχές της Καρύστου και του Λειβαδίου βρίσκονται στο κάτω όριο του λόγου μετασχηματισμού τους, δηλαδή αδυνατούν να αποκαταστήσουν τις αντίστοιχες ρυθμιζόμενες τάσεις σε ενδεχόμενο πτώσης αυτών.

Τα αποτελέσματα της επίλυσης ροής φορτίου στο αρχικό σημείο λειτουργίας φαίνονται στον Πίνακα 5.2.

	Διάνυσμα	ι Τάσης	Παρα	γωγή	Κατα	νάλωση	Εγκάρσ	ιο Στοιχείο
Ζυγός	V (au)	<b><i>H</i></b> (°)	$P_{G}$	$Q_G$	$P_L$	$Q_L$	$G_L$	$B_L$
	r (uµ)	0()	(MW)	(MVAr)	(MW)	(MVAr)	(MW)	(MVAr)
Ηπειρωτικό ΣΗΕ	1.03	0.0	-416.983	97.449	0.0	0.0	0.0	0.0
Γ1	1.04	13.73	140.0	76.72	0.0	0.0	0.0	0.0
Г2	1.04	13.73	140.0	76.72	0.0	0.0	0.0	0.0
A/Π 1	1.00	25.95	0.0	0.0	-13.5	7.216	0.0	2.779
А/П 2	1.00	25.12	0.0	0.0	-1.0	0.535	0.0	0.206
А/П 3	1.00	26.36	0.0	0.0	-3.0	1.604	0.0	0.618
А/П 4	1.00	26.37	0.0	0.0	-1.8	0.962	0.0	0.371
А/П 5	1.00	28.36	0.0	0.0	-6.0	3.207	0.0	1.235
А/П 6	1.00	28.64	0.0	0.0	-9.0	4.811	0.0	1.853
А/П 7	1.00	27.83	0.0	0.0	-7.8	4.170	0.0	1.606
А/П 8	1.00	32.72	0.0	0.0	-15.0	8.018	0.0	3.088
А/П 9	1.00	31.93	0.0	0.0	-12.6	6.735	0.0	2.594
А/П 10	1.00	31.57	0.0	0.0	-12.6	6.735	0.0	2.594
А/П 11	1.00	29.19	0.0	0.0	-5.0	2.673	0.0	1.029
А/П 12	1.00	22.39	0.0	0.0	-12.0	6.415	0.0	2.470
А/П 13	1.00	22.89	0.0	0.0	-10.2	5.452	0.0	2.100
А/П 14	1.00	23.55	0.0	0.0	-12.6	6.735	0.0	2.594
А/П 15	1.00	27.48	0.0	0.0	-9.0	4.811	0.0	1.853
А/П 16	1.00	25.98	0.0	0.0	-14.4	7.698	0.0	2.964
А/П 17	1.00	26.41	0.0	0.0	-18.6	9.943	0.0	3.829
А/П 18	1.00	25.72	0.0	0.0	-24.0	12.829	0.0	4.941
А/П 19	1.00	24.81	0.0	0.0	-11.4	6.094	0.0	2.347
H1	0.97452	15.48	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
H2	0.96912	16.34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Н3	0.99664	13.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
H4	1.01545	10.78	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Н5	1.00521	12.06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
H6	1.03751	8.19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
M1 (ΦΟΡΤΙΟ 2)	1.02295	20.95	0.0	0.0	0.0	0.0	10.97	6.80
M2	1.02903	24.29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
M3	1.02373	16.35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
M4	1.02899	16.87	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
M5	1.02103	19.09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
M6 (ΦΟΡΤΙΟ 1)	0.99554	2.88	0.0	0.0	0.0	0.0	26.97	5.75

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα επίλυσης αρχικής ροής φορτίου

Όπως έχει αποδειχθεί στην αναφορά [VMP01], το εξεταζόμενο ΣΗΕ με την προσθήκη δύο κατάλληλων συστοιχιών πυκνωτών στο δίκτυο μεταφοράς παραμένει ευσταθές στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα ακόμα και μετά από ιδιαίτερα κρίσιμες διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα το σενάριο διακοπής της λειτουργίας μίας τοπικής γεννήτριας ακολουθούμενη από την απώλεια μίας διασυνδετικής γραμμής ΥΤ. Στις περιπτώσεις αυτές, η μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης διατηρείται κυρίως επειδή οι μηχανισμοί ΣΑΤΥΦ των υποσταθμών ΜΤ/ΥΤ προλαβαίνουν να αποκαταστήσουν τις τάσεις στους ζυγούς των ακτινικών δικτύων διανομής, στα οποία συνδέονται τα αιολικά πάρκα, με αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής αέργου ζήτησης του δικτύου και άρα την αποδιέγερση της παραμένουσας σε λειτουργία τοπικής γεννήτριας. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η εγκατάσταση απλών συστοιχιών πυκνωτών είναι επαρκής στην άεργη υποστήριξη του δικτύου, αποτρέποντας την εκδήλωση μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης.

### 5.2 Προσομοίωση Σεναρίου Βραχυπρόθεσμης Αστάθειας Ανεμογεννητριών

Στην παρούσα ενότητα θεωρείται μία ελαφρά παραλλαγή του προαναφερόμενου κρίσιμου σεναρίου διπλής διαταραχής, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση της βαθμίδας μείωσης του ρεύματος πεδίου της γεννήτριας Γ1 στη μέγιστη μεταβατική του τιμή. Συγκεκριμένα, το θεωρούμενο σενάριο αποτελείται από τις ακόλουθες απλές διαταραχές:

- Τη χρονική στιγμή t=10 s, η τοπική σύγχρονη γεννήτρια Γ2 τίθεται εκτός λειτουργίας.
- Τη χρονική στιγμή t=50 s, σημειώνεται απώλεια μίας διασυνδετικής γραμμής YT.

Έχοντας σκοπό τη διερεύνηση του κινδύνου εμφάνισης αστάθειας τάσης στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, υποθέτουμε μία μάλλον μικρή τιμή για τη μέγιστη επιτρεπόμενη υπερδιέγερση της γεννήτριας Γ1 ( $I_{max}$ =2.41 αμ για χρονικό διάστημα 100 ms), για την οποία το εξεταζόμενο σύστημα αποδεικνύεται ασταθές μετά την προαναφερόμενη διπλή διαταραχή. Ωστόσο, στο σημείο αυτό οφείλουμε να τονίσουμε ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της παρούσας ενότητας θα πρέπει να αντιμετωπιστούν ως αποτελέσματα μίας ακαδημαϊκής έρευνας για τον προσδιορισμό του είδους της βραχυπρόθεσμης αστάθειας και σε καμία περίπτωση δεν αντανακλούν τον βαθμό ασφάλειας του πραγματικού συστήματος.

Η αστάθεια τάσης, η οποία προκαλείται από το βραχυπρόθεσμο περιορισμό του ρεύματος πεδίου της γεννήτριας Γ1, είναι εμφανής στις αποκρίσεις των τάσεων (συνεχείς καμπύλες 1) στους ζυγούς ΜΤ (M2) και ΥΤ (H2) του υποσταθμού 150/20 kV στην περιοχή του Λειβαδίου, όπως φαίνονται στο Σχ. 5.2. Οι δύο οριζόντιες διακεκομμένες γραμμές ορίζουν το επιθυμητό διάστημα τιμών της τάσης του ρυθμιζόμενου ζυγού ΜΤ.



**Σχ. 5.2:** Απόκριση τάσης ζυγών ΜΤ και ΥΤ υποσταθμού Λειβαδίου (1: Ασύγχρονες ανεμογεννήτριες, 2: Στατικά φορτία)

Αναλυτικότερα, από το Σχ. 5.2 παρατηρείται ότι τη χρονική στιγμή της απώλειας της τοπικής γεννήτριας  $\Gamma 2$  (t=10 s), μειώνονται σημαντικά οι τάσεις στους ζυγούς του δικτύου, λόγω της μείωσης της τοπικής υποστήριξης αέργου ισχύος. Την ίδια στιγμή - όπως φαίνεται από το Σχ. 5.3 - αυξάνεται το ρεύμα διέγερσης της παραμένουσας σε λειτουργία τοπικής γεννήτριας  $\Gamma 1$ , προκειμένου να αποκατασταθεί το συνολικό ισοζύγιο αέργου ισχύος.

Η μείωση των ρυθμιζόμενων τάσεων στους ζυγούς MT των υποσταθμών MT/YT πέρα από τις αντίστοιχες επιθυμητές ελάχιστες τιμές έχει σα συνέπεια την ενεργοποίηση των μηχανισμών των ΣΑΤΥΦ, με σκοπό την επαναφορά των παραπάνω τάσεων εντός των επιθυμητών ορίων τιμών τους. Ωστόσο, η αποκατάσταση των ρυθμιζόμενων τάσεων επιτυγχάνεται μόνο στους υποσταθμούς MT/YT των περιοχών του Πολυποτάμου, του Αργυρού και της Μυρτιάς, καθώς όπως προαναφέρθηκε, οι μηχανισμοί των ΣΑΤΥΦ στους υποσταθμούς MT/YT των περιοχών της Καρύστου και του Λειβαδίου παραμένουν ανενεργοί, διότι πριν τη διαταραχή έχουν ήδη συναντήσει τα κάτω όρια του λόγου μετασχηματισμού τους.



Σχ. 5.3: Απόκριση ρεύματος πεδίου σύγχρονης γεννήτριας Γ1 (1: Ασύγχρονες ανεμογεννήτριες, 2: Στατικά φορτία)

Από το Σχ. 5.2 παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια των ρυθμίσεων των ΣΑΤΥΦ αυξάνονται ταυτόχρονα οι τάσεις τόσο στους ελεγχόμενους ζυγούς των 20 kV, όσο και στους ζυγούς μεταβλητής λήψης των 150 kV. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η αποκατάσταση των ρυθμιζόμενων τάσεων στο επίπεδο των 20 kV αυξάνει τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς των επιμέρους ακτινικών δικτύων διανομής, συμπεριλαμβανομένων και των τερματικών τάσεων των ισοδυνάμων ανεμογεννητριών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της αέργου κατανάλωσης στα αιολικά πάρκα, οπότε η επιφερόμενη συνολική μείωση της αέργου ζήτησης στο δίκτυο οδηγεί στην αύξηση των τάσεων στο σύστημα μεταφοράς.

Οι ευεργετικές συνέπειες της ενεργοποίησης των μηχανισμών των ΣΑΤΥΦ σχετικά με την αποφόρτιση της αέργου παραγωγής της τοπικής γεννήτριας Γ1 αποδεικνύονται από τη μείωση του ρεύματος πεδίου αυτής, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.3.

Ακολούθως, η απώλεια της διασυνδετικής γραμμής έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της εισαγόμενης αέργου ισχύος από το ηπειρωτικό Ελληνικό διασυνδεδεμένο ΣΗΕ. Την ίδια στιγμή, μειώνονται εκ νέου οι τάσεις στους ζυγούς του τοπικού δικτύου, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται το ρεύμα πεδίου της γεννήτριας Γ1. Η αύξηση του ρεύματος πεδίου είναι τόσο μεγάλη, ώστε προκαλεί μεταβατική υπερδιέγερση της γεννήτριας. Επομένως, μετά την πάροδο χρονικού διαστήματος ίσου με 100 ms, ενεργοποιείται η μεταβατική βαθμίδα του ΣΠΥ της θεωρούμενης γεννήτριας (τη χρονική στιγμή t=50.317 s), με σκοπό τη μείωση του ρεύματος πεδίου στη μέγιστη μεταβατική του τιμή.

Η δράση του ΣΠΥ προκαλεί νέα πτώση τάσης στο σύστημα, οδηγώντας τις ισοδύναμες ανεμογεννήτριες σε βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης. Ο μηχανισμός με τον οποίο εκδηλώνεται η αστάθεια αυτή έχει ως εξής: η μείωση των τερματικών τάσεων σε όλα τα αιολικά πάρκα έχει ως αποτέλεσμα η (εξαρτώμενη από το τετράγωνο του μέτρου της τάσης) μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ροπή να γίνει κατ' απόλυτη τιμή μικρότερη από τη σταθερή μηχανική ροπή, η οποία ασκείται στο δρομέα υπό την επίδραση του ανέμου. Οπότε, για όλες τις ισοδύναμες ανεμογεννήτριες η εξίσωση ισορροπίας του δρομέα δεν παρουσιάζει λύση για καμία τιμή της ταχύτητάς του, με συνέπεια την απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας και την υπερτάχυνση των ανεμογεννητριών. Η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης για την περίπτωση της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας του αιολικού πάρκου WF8 στην περιοχή του Λειβαδίου φαίνεται στο Σχ. 5.4.



Σχ. 5.4: Ταχύτητα δρομέα ανεμογεννήτριας WG8 περιοχής Λειβαδίου

Σύμφωνα με το Σχ. 5.2, η εμφανιζόμενη αστάθεια τάσης καταλήγει τελικά σε κατάρρευση του δικτύου. Η προσομοίωση τερματίζεται τη χρονική στιγμή t=57.509 s, κατά την οποία η τερματική τάση της τοπικής γεννήτριας Γ1 γίνεται μικρότερη από 0.85 αμ.

Συμπερασματικά, παρά το γεγονός ότι η εμφανιζόμενη αστάθεια οφείλεται στις ασύγχρονες ανεμογεννήτριες, το φαινόμενο αυτό δεν θα λάμβανε χώρα εάν δεν συνέβαινε ενεργοποίηση της μεταβατικής βαθμίδας του ΣΠΥ της τοπικής γεννήτριας Γ1 στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Άρα ο πρωτογενής παράγοντας για την αστάθεια είναι ο περιορισμός διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας.

Προκειμένου να αποδειχθεί ο κυρίαρχος ρόλος των ασύγχρονων ανεμογεννητριών στο μηχανισμό της βραχυπρόθεσμης αστάθειας, το εξεταζόμενο δίκτυο προσομοιώνεται εκ νέου αντικαθιστώντας τα αιολικά πάρκα από ισοδύναμα στατικά φορτία με αρνητική και θετική κατανάλωση ενεργού και αέργου ισχύος, τα οποία εξαρτώνται εκθετικά από το μέτρο της τάσης με εκθέτες ίσους με 0 και 0.5 για την ενεργό και την άεργο ισχύ αντίστοιχα. Στην περίπτωση αυτή, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στα Σχ. 5.2 και Σχ. 5.3 με εστιγμένες γραμμές (καμπύλες 2). Μολονότι το θεωρούμενο μοντέλο εκθετικού φορτίου αποτελεί έναν ιδιαίτερα απαιτητικό τύπο φορτίου, το δίκτυο αποκρίνεται ευσταθώς, ενώ και οι τάσεις αποκαθίστανται στα προ διαταραχής επίπεδα. Αυτό οφείλεται στο ότι το φορτίο αυτό δεν παρουσιάζει δυναμική συμπεριφορά, με αποτέλεσμα οι μηχανισμοί των ΣΑΤΥΦ στους υποσταθμούς ΜΤ/ΥΤ να έχουν στη διάθεσή τους αρκετό χρονικό διάστημα για την αποκατάσταση των ρυθμιζόμενων τάσεων, γεγονός το οποίο οδηγεί στην αποφυγή της κατάρρευσης του δικτύου.

Από την καμπύλη 2 του Σχ. 5.3 παρατηρείται ότι στην περίπτωση των στατικών εκθετικών φορτίων, επιτυγχάνεται περαιτέρω περιορισμός του εξεταζόμενου ρεύματος πεδίου στο αντίστοιχο όριο μονίμου καταστάσεως, χωρίς να παρατηρηθεί κανένα πρόβλημα στην απόκριση του δικτύου. Συνεπώς, η δυναμική συμπεριφορά των ασύγχρονων μηχανών είναι αυτή που κινεί το μηχανισμό αστάθειας.

Από το Σχ. 5.5, στο οποίο παρουσιάζεται η απόκριση της γωνίας του δρομέα της παραμένουσας σε λειτουργία τοπικής γεννήτριας Γ1, παρατηρείται ότι η σύγχρονη μηχανή παραμένει σε συγχρονισμό με το δίκτυο παρά το γεγονός ότι η τερματική της τάση μειώνεται σημαντικά. Συνεπώς, επιβεβαιώνεται ότι η δυναμική συμπεριφορά των ασύγχρονων μηχανών είναι αυτή που κινεί το μηχανισμό αστάθειας.

Οι αποσβενύμενες ταλαντώσεις που παρατηρούνται στην απόκριση της γωνίας δρομέα αλλά και του ρεύματος πεδίου της γεννήτριας Γ1 μετά από κάθε διαταραχή οφείλονται στη διέγερση του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού μεταξύ της γεννήτριας και του άπειρου ζυγού.

Καταλήγοντας, το πρωταρχικό αίτιο της εμφανιζόμενης αστάθειας στην εξεταζόμενη περίπτωση είναι ο βραχυπρόθεσμος περιορισμός στη διέγερση της τοπικής γεννήτριας, ωστόσο, η κινητήρια δύναμη της αστάθειας είναι η δυναμική συμπεριφορά των ασύγχρονων ανεμογεννητριών, ενώ η τελική έκβαση του φαινομένου είναι η υπερτάχυνση των τελευταίων με άμεσο επακόλουθο την κατάρρευση του δικτύου. Το αποτέλεσμα ενός τέτοιου φαινομένου αστάθειας θα είναι η αποκοπή των ανεμογεννητριών λόγω προστασίας υπερτάχυνσης, χωρίς η αστάθεια να επεκταθεί στο διασυνδεδεμένο σύστημα, όπως θα συνέβαινε σε περίπτωση αποσυγχρονισμού της τοπικής γεννήτριας.



Σχ. 5.5: Απόκριση γωνίας δρομέα σύγχρονης γεννήτριας ΓΙ

### 5.3 Ανάλυση Ιδιοτιμών και Ιδιοδιανυσμάτων

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα της προηγούμενης ενότητας, η αιτία για την εκδήλωση της βραχυπρόθεσμης αστάθειας των ανεμογεννητριών στο δίκτυο της Ν. Εύβοιας θα πρέπει να αναζητηθεί στον μεταβατικό περιορισμό διεγέρσεως της παραμένουσας σε λειτουργία τοπικής γεννήτριας.

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η πλήρης και σε βάθος κατανόηση της κινητήριας δύναμης του εμφανιζόμενου μηχανισμού αστάθειας τάσης με τη βοήθεια της ανάλυσης των ρυθμών του εξεταζόμενου συστήματος. Στα πλαίσια της ανάλυσης αυτής, χρησιμοποιείται η ρουτίνα γραμμικοποίησης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης του λογισμικού πακέτου WHSSP, ώστε να υπολογιστούν οι ιδιοτιμές και τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα σε κάθε χρονική στιγμή προσομοίωσης.

Στο Σχ. 5.6 παρουσιάζεται η εξέλιξη της κυρίαρχης κρίσιμης πραγματικής ιδιοτιμής για το εξεταζόμενο σενάριο βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης.



Σχ. 5.6: Εξέλιζη κρίσιμης πραγματικής ιδιοτιμής στην περίπτωση βραχυπρόθεσμης αστάθειας των ανεμογεννητριών

Η εξεταζόμενη πραγματική ιδιοτιμή αντιστοιχεί σε έναν απεριοδικό ρυθμό απόκρισης του συστήματος, ενώ εμφανίζεται μετά τον μεταβατικό περιορισμό του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας Γ1 (χρονική στιγμή t=50.317 s) και αυξάνεται ακολουθώντας παράλληλα τις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις, οι οποίες εμφανίζονται και στο περιοριζόμενο ρεύμα πεδίου. Η κρίσιμη ιδιοτιμή περνά στο δεξί ημιεπίπεδο τη χρονική στιγμή t=52.505 s. Στον Πίνακα 5.3 φαίνεται η ανάλυση των δεξιών ιδιοδιανυσμάτων και των συντελεστών συμμετοχής για την παραπάνω κρίσιμη ιδιοτιμή τη χρονική στιγμή του μηδενισμού της.

Αιολικό	Μεταβλητή	Δεξί Ιδιο	διάνυσμα	λυντελεστης	
Πάρκο	Κατάστασης	Μέτρο	Γωνία	Συμμετοχής	
WF1	S	0.0136	0.0	0.158	
WT1	$\dot{E_{d}}$	0.7018	0.0	0.558	
WF3	$\dot{E_{d}}$	0.6958	0.0	0.122	
WF5	$\dot{E_{d}}$	0.7482	0.0	0.264	
WEG	S	0.0142	0.0	0.124	
WFO	$\dot{E_{d}}$	0.7654	0.0	0.408	
WF7	$\dot{E_{d}}$	0.7403	0.0	0.340	
	S	0.0203	0.0	0.418	
WF8	$\dot{E_{d}}$	1.0000	0.0	1.000	
	$E'_q$	0.1673	0.0	0.290	
	S	0.0197	0.0	0.329	
WF9	$\dot{E_{d}}$	0.9676	0.0	0.814	
	$E'_q$	0.1518	0.0	0.211	
	S	0.0195	0.0	0.320	
WF10	$\dot{E_{d}}$	0.9544	0.0	0.804	
	$E'_q$	0.1458	0.0	0.199	
WE11	S	0.0178	0.0	0.102	
VV F 1 1	$\dot{E_{d}}$	0.8639	0.0	0.288	
WF12	$\dot{E_{d}}$	0.3808	0.0	0.173	
WF13	$\dot{E_{d}}$	0.3402	0.0	0.115	
WF14	$E'_d$	0.3479	0.0	0.147	
WF15	$\dot{E_{d}}$	0.4430	0.0	0.154	
WF16	$\dot{E_{d}}$	0.4245	0.0	0.235	
WF17	$\dot{E_{d}}$	0.4320	0.0	0.311	
WF18	$\dot{E_{d}}$	0.4232	0.0	0.392	
WF19	$\dot{E_{d}}$	0.4146	0.0	0.182	

Πίνακας 5.3: Δεζιά ιδιοδιανύσματα και συντελεστές συμμετοχής της κρίσιμης μηδενικής ιδιοτιμής

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.3, η εμφανιζόμενη βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης εκδηλώνεται κατά κύριο λόγο:

- Στα τέσσερα αιολικά πάρκα WF8 έως WF11 του πλέον απομακρυσμένου ζυγού 150 kV του Λειβαδίου.
- Στα αιολικά πάρκα WF1, WF3, WF5, WF6 και WF7 της γειτονικής με το Λειβάδι περιοχής της Καρύστου.

Ειδικότερα, το αιολικό πάρκο WF11 της περιοχής του Λειβαδίου φαίνεται να έχει μικρή συμμετοχή στην βραχυπρόθεσμη αστάθεια σε σχέση με τα γειτονικά αιολικά πάρκα WF8-WF10. Αυτό οφείλεται στα χαρακτηριστικά της γραμμής διανομής από τον ζυγό MT του υποσταθμού 150/20 kV στην περιοχή του Λειβαδίου μέχρι τον μετασχηματιστή XT/MT του πάρκου αυτού.

Τα υπόλοιπα αιολικά πάρκα των περιοχών του Πολυποτάμου, του Αργυρού και της Μυρτιάς, τα οποία βρίσκονται εγγύτερα στην περιοχή του Αλιβερίου, συμμετέχουν επίσης, αν και σε μικρότερο βαθμό στην εκδήλωση της εξεταζόμενης αστάθειας.

Σημειώνεται ότι σύμφωνα με το σύστημα αξόνων που χρησιμοποιείται, το οποίο φαίνεται στο Σχ. 5.7, η συνιστώσα  $E_d$  της μεταβατικής ΗΕΔ κατά τον ευθύ άξονα επηρεάζει κυρίως το μέτρο της τερματικής

τάσης V κάθε ανεμογεννήτριας και συνδέεται με το ρυθμό μαγνητικής ροής της ασύγχρονης μηχανής [Nom05].



**Σχ. 5.7:** Τερματική τάση και μεταβατικές ΗΕΔ δρομέα ασύγχρονων ανεμογεννητριών

Κατά συνέπεια, ο κρίσιμος ρυθμός υποδηλώνει επιτάχυνση (δηλαδή η ολίσθηση γίνεται πιο αρνητική) ή απομαγνήτιση (η μεταβατική  $HE\Delta E_{d}$  μειώνεται), με έμφαση στον τελευταίο.

Σημειώνεται επίσης ότι η απουσία των μεταβλητών κατάστασης της παραμένουσας σε λειτουργία τοπικής γεννήτριας από τον Πίνακα 5.3 επιβεβαιώνει τη μη συμμετοχή αυτής στο μηχανισμό εκδήλωσης της βραχυπρόθεσμης αστάθειας.

Αναφορικά με το δεξί ιδιοδιάνυσμα της κρίσιμης μηδενικής ιδιοτιμής, σημειώνονται οι εξής δύο διαπιστώσεις:

- 1. Η μεταβλητή κατάστασης των ασύγχρονων ανεμογεννητριών που επηρεάζεται πρωτίστως από την αστάθεια είναι η μεταβατική ΗΕΔ κατά τον ευθύ μαγνητικό άξονα.
- 2. Επειδή όλα τα κυρίαρχα στοιχεία του δεξιού ιδιοδιανύσματος είναι ομόσημα, η κρίσιμη ιδιοτιμή αντιστοιχεί σε έναν κοινό ρυθμό απόκρισης όλων των ανεμογεννητριών.

Οι δύο παραπάνω διαπιστώσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι από τη χρονική στιγμή μηδενισμού της κρίσιμης ιδιοτιμής και μετά, οι μηχανές επαγωγής λειτουργούν απομαγνητίζονται και υπερταχύνονται.

Συμπερασματικά, η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης εκδηλώνεται αρχικά στις τρεις ανεμογεννήτριες WG8, WG9 και WG10 της περιοχής του Λειβαδίου, οι οποίες αδυνατούν να επιτύχουν βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας, αποδιεγείρονται και επιταχύνονται, συμπαρασύροντας στη συνέχεια και τις υπόλοιπες ανεμογεννήτριες, οδηγώντας το δίκτυο σε κατάρρευση.

#### 5.4 Μέτρα Αντιμετώπισης Βραχυπρόθεσμης Αστάθειας Ανεμογεννητριών

Η διερεύνηση του μηχανισμού και της κινητήριας δύναμης της εμφανιζόμενης αστάθειας, η οποία πραγματοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, δεν έχει μόνο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον, καθώς είναι δυνατόν να συμβάλλει στην αποτελεσματική σχεδίαση διαφόρων διορθωτικών μέτρων για την αποφυγή της εξέλιξης του φαινομένου της αστάθειας, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση του συστήματος.

Συγκεκριμένα, στην εξεταζόμενη περίπτωση αποδείχθηκε ότι η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης οφείλεται αποκλειστικά στις ασύγχρονες ανεμογεννήτριες. Στηριζόμενοι στο συμπέρασμα αυτό, προτείνονται στη συνέχεια τέσσερα μέτρα για την αντιμετώπιση της εμφανιζόμενης αστάθειας τα οποία επικεντρώνονται στις μηχανές επαγωγής.

Τα τρία πρώτα μέτρα αναφέρονται στην αποσύνδεση των αιολικών πάρκων από το δίκτυο μέσω κατάλληλων ηλεκτρονόμων υπερτάχυνσης, υποτάσεως ή συνδυασμό αυτών, οι οποίοι εγκαθίστανται στις ισοδύναμες ανεμογεννήτριες. Όπως είναι φυσικό, στις τρεις αυτές περιπτώσεις θα σημειωθεί μερική (ή πιθανόν ακόμα και ολική) απώλεια της αιολικής παραγωγής στην εξεταζόμενη περιοχή.

Το τελευταίο μέτρο προϋποθέτει τη διατήρηση του προ διαταραχής επιπέδου της αιολικής παραγωγής στο σύστημα (δηλαδή να μην αποσυνδεθεί κανένα αιολικό πάρκο) και αφορά την εγκατάσταση ενός στατού συστήματος αέργου αντιστάθμισης στον υποσταθμό MT/YT της περιοχής του Λειβαδίου, τα αιολικά πάρκα της οποίας αποδείχθηκαν τα πλέον επιρρεπή στην αστάθεια σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων. Σημειώνεται ότι η εξεταζόμενη περίπτωση βραχυπρόθεσμης αστάθειας δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με απλά συστήματα ζεύξηςαπόζευξης στατών πυκνωτών, διότι ο χρόνος απόκρισης των τελευταίων τα κατατάσσει στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα και έτσι δεν προλαβαίνουν να συνεισφέρουν σε γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα.

### 5.4.1 Προστασία υπερτάχυνσης ανεμογεννητριών

Το πρώτο μέτρο αντιμετώπισης της εξεταζόμενης βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης είναι η κατάλληλη ρύθμιση του ηλεκτρονόμου υπερτάχυνσης κάθε ανεμογεννήτριας, ο οποίος την αποσυνδέει από το δίκτυο (μαζί και με τον πυκνωτή αντιστάθμισης) εάν η ταχύτητα του δρομέα της υπερβεί μία μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή (η οποία ορίζεται ως ταχύτητα αποκοπής), για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από μερικές εκατοντάδες ms. Ο συγκεκριμένος ηλεκτρονόμος αποτελεί αναπόσπαστο μέρος κάθε ανεμογεννήτριας, ώστε να προστατευθεί πρωτίστως ο εξοπλισμός της (π.χ. προστασία του άξονα από μεγάλες ταχύτητες). Στην παρούσα ενότητα, επεκτείνεται η λειτουργία των ηλεκτρονόμων υπερτάχυνσης, ώστε εκτός από διατάξεις προστασίας εξοπλισμού, να προσφέρουν ως συνιστώσες ενός ευρύτερου σχήματος προστασίας του συστήματος, με κατάλληλο προσδιορισμό της ταχύτητας αποκοπής.

Στο Σχ. 5.8 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των τάσεων στους ζυγούς MT (συνεχής καμπύλη) και YT (εστιγμένη καμπύλη) των υποσταθμών 150/20 kV του Λειβαδίου και της Καρύστου για τις εξής δύο περιπτώσεις ρυθμίσεων στους ηλεκτρονόμους υπερτάχυνσης των ανεμογεννητριών: (α) ταχύτητα αποκοπής ίση με 102.5% της σύγχρονης ταχύτητας για χρονικό διάστημα 100 ms και (β) ταχύτητα αποκοπής ίση με 105% της σύγχρονης ταχύτητας για χρονικό διάστημα 100 ms. Οι οριζόντιες διακεκομμένες γραμμές ορίζουν τη «νεκρή» ζώνη των αντίστοιχων μηχανισμών ΣΑΤΥΦ.



(i) Υποσταθμός ΜΤ/ΥΤ Λειβαδίου (ii) Υποσταθμός ΜΤ/ΥΤ Καρύστου (a) Ταχύτητα αποκοπής: 1.025 αμ για 100 ms



Σχ. 5.8: Απόκριση τάσης ζυγών ΜΤ και ΥΤ υποσταθμών Λειβαδίου και Καρύστου (προστασία υπερτάχυνσης ανεμογεννητριών)

Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις ρυθμίσεων, η ενεργοποίηση των ηλεκτρονόμων υπερτάχυνσης των ανεμογεννητριών έχει ευεργετικές συνέπειες για το δίκτυο από πλευράς ευστάθειας τάσης. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση (α) αποσυνδέονται μόνο τα αιολικά πάρκα WF8, WF9 και WF10 της περιοχής του Λειβαδίου, γεγονός το οποίο αντιστοιχεί σε μείωση της αιολικής παραγωγής κατά 40.2 MW. Αντίθετα, στην περίπτωση (β) αποσυνδέονται όλα τα αιολικά πάρκα tης περιοχής του Λειβαδίου (WF8, WF9, WF10 και WF11), αλλά και τα αιολικά πάρκα WF5, WF6 και WF7 της περιοχής της Καρύστου, δηλαδή η συνολική απόρριψη της αιολικής παραγωγής ανέρχεται στα 68 MW.

Μετά την αποσύνδεση των παραπάνω αιολικών πάρκων από το δίκτυο και την επιφερόμενη μείωση της συνολικής αέργου ζήτησης, σημειώνεται και στις δύο περιπτώσεις σημαντική άνοδος των τάσεων σε όλους τους ζυγούς. Όπως φαίνεται και στις καμπύλες του Σχ. 5.8, οι υπερτάσεις είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση (β), διότι η απόρριψη της αιολικής παραγωγής γίνεται αργότερα και είναι μεγαλύτερη κατά 75% περίπου σε σχέση με την περίπτωση (α). Εντούτοις, οι υπερτάσεις αυτές αντιμετωπίζονται επιτυχώς από την ενεργοποίηση των μηχανισμών των ΣΑΤΥΦ στους υποσταθμούς MT/YT, οι οποίοι αποκαθιστώντας τις ελεγχόμενες τάσεις εντός των επιθυμητών τους ορίων, συνεισφέρουν σημαντικά στο να καταλήξει το δίκτυο σε ευσταθές σημείο ισορροπίας.

Επίσης και για τις δύο ρυθμίσεις στους ηλεκτρονόμους υπερτάχυνσης των ανεμογεννητριών, η παραμένουσα σε λειτουργία τοπική γεννήτρια - όπως φαίνεται και στα διαγράμματα του Σχ. 5.9 - αποδιεγείρεται σημαντικά μετά την αποσύνδεση των προαναφερόμενων αιολικών πάρκων, μολονότι στο τελικό σημείο ισορροπίας το ρεύμα πεδίου αυτής περιορίζεται στην αντίστοιχη επιτρεπόμενη τιμή μονίμου καταστάσεως.





Τέλος, στο Σχ. 5.10 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις της τερματικής τάσης και της ταχύτητας δρομέα για την ισοδύναμη ανεμογεννήτρια του αιολικού πάρκου WF12 της περιοχής του Πολυποτάμου για τις δύο περιπτώσεις ρυθμίσεων των ηλεκτρονόμων υπερτάχυνσης των ανεμογεννητριών. Υπενθυμίζεται ότι το εξεταζόμενο αιολικό πάρκο δεν αποσυνδέεται από το δίκτυο σε καμία από τις δύο περιπτώσεις.

Από το Σχ. 5.10 παρατηρείται ότι σε κάθε περίπτωση η απόρριψη της αιολικής παραγωγής μειώνει τη συνολική ζήτηση αέργου ισχύος, προκαλώντας μεταβατικές υπερτάσεις στους τερματικούς ζυγούς των ισοδύναμων ανεμογεννητριών που παραμένουν σε λειτουργία. Κατά συνέπεια αυξάνεται σημαντικά η ηλεκτρομαγνητική ροπή κάθε μηχανής επαγωγής και διευκολύνεται η σύγκλιση προς βραχυπρόθεσμο ευσταθές σημείο ισορροπίας.

Ακολούθως, η αποκατάσταση των ρυθμιζόμενων τάσεων μέσω των μηχανισμών των ΣΑΤΥΦ επαναφέρει τη λειτουργία των αιολικών πάρκων που παραμένουν εντός δικτύου στα προ των διαταραχών επίπεδα τάσεως.



Σχ. 5.10: Απόκριση ανεμογεννήτριας WG12 περιοχής Πολυποτάμου (προστασία υπερτάχυνσης ανεμογεννητριών)

Προκειμένου να εξηγηθεί γιατί το πιο αυστηρό όριο αποκοπής υπερτάχυνσης των ανεμογεννητριών (102.5% της σύγχρονης ταχύτητας) αντιστοιχεί σε μικρότερη απόρριψη αιολικής παραγωγής, παρουσιάζονται στο Σχ. 5.11 οι ταχύτητες των ανεμογεννητριών WG8-WG11 της περιοχής του Λειβαδίου για το χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος και για τις δύο περιπτώσεις ρυθμίσεων των ηλεκτρονόμων.



**Σχ. 5.11:** Ταχύτητα ανεμογεννητριών WG8-WG11 περιοχής Λειβαδίου (προστασία υπερτάχυνσης ανεμογεννητριών)

Από το Σχ. 5.11-(α) που αντιστοιχεί στο πιο αυστηρό όριο αποκοπής, παρατηρείται ότι η διαδοχική αποσύνδεση των ανεμογεννητριών WG8, WG9 και WG10 αποτρέπει την εκδήλωση βραχυπρόθεσμης αστάθειας στην τέταρτη ανεμογεννήτρια WG11, η οποία επιβραδύνεται προς ευσταθές σημείο ισορροπίας.

Αντίθετα, λαμβάνοντας υπόψη το Σχ. 5.11-(β), στην περίπτωση που το όριο αποκοπής μεγαλώσει στο 105% της σύγχρονης ταχύτητας, τότε η εξέλιξη του φαινομένου της βραχυπρόθεσμης αστάθεια τάσης πραγματοποιείται με γρηγορότερο ρυθμό, συμπαρασύροντας περισσότερες ανεμογεννήτριες. Συνεπώς, μολονότι και στην περίπτωση αυτή η διαδοχική αποσύνδεση των ανεμογεννητριών WG8, WG9 και WG10 πραγματοποιείται πριν η ανεμογεννήτρια WG11 υπερβεί το όριο αποκοπής, εντούτοις, δεν αποτρέπεται η επιβράδυνσή της και άρα αποσυνδέεται και αυτή από το δίκτυο.

Οι διαπιστώσεις αυτές επιβεβαιώνονται από το Σχ. 5.12, στο οποίο φαίνεται για το χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος η ταχύτητα της ανεμογεννήτριας WG11 και για τις δύο περιπτώσεις ρυθμίσεων των ηλεκτρονόμων υπερτάχυνσης.



Σχ. 5.12: Ταχύτητα ανεμογεννήτριας WG11 περιοχής Λειβαδίου (προστασία υπερτάχυνσης ανεμογεννητριών)

Συμπερασματικά, το αυστηρό όριο της προστασίας εξοπλισμού των ανεμογεννητριών (προστασία υπερτάχυνσης) μπορεί να βοηθήσει στη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος.

#### 5.4.2 Προστασία υποτάσεως ανεμογεννητριών

Ένα εναλλακτικό διορθωτικό μέτρο για την αντιμετώπισης της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης των ανεμογεννητριών είναι η χρήση ηλεκτρονόμων υποτάσεως. Σε αντιστοιχία με τους ηλεκτρονόμους υπερτάχυνσης, κάθε ηλεκτρονόμος υποτάσεως δίνει σήμα για την αποκοπή του αντιστοίχου αιολικού πάρκου (μαζί και με τον πυκνωτή αντιστάθμισης) στην περίπτωση κατά την οποία η τερματική του τάση πέσει κάτω από μία ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή (τάση αποκοπής) για χρονικό διάστημα λίγων δευτερολέπτων. Το διάστημα αυτό αποσκοπεί στο να αποφευχθεί αποκοπή της ανεμογεννήτριας σε μία ενδεχόμενη μεταβατική βύθιση της τερματικής της τάσης.

Στο Σχ. 5.13 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των τάσεων στους ζυγούς MT (συνεχής καμπύλη) και YT (εστιγμένη καμπύλη) των υποσταθμών 150/20 kV του Λειβαδίου και της Καρύστου για τις εξής δύο περιπτώσεις ρυθμίσεων στους ηλεκτρονόμους υποτάσεως των ανεμογεννητριών: (α) τάση αποκοπής ίση με 90% της ονομαστικής τερματικής τάσης για χρονικό διάστημα 2.5 s και (β) τάση αποκοπής ίση με 90% της ονομαστικής τερματικής τάσης για χρονικό διάστημα 5 s. Υπενθυμίζεται ότι οι οριζόντιες διακεκομμένες γραμμές ορίζουν τα επιθυμητά διαστήματα τιμών για τις ρυθμιζόμενες τάσεις στους ζυγούς MT.

Όπως και στην περίπτωση (α) της προηγούμενης παραγράφου, σημειώνεται ότι και στην εξεταζόμενη περίπτωση (α) αποσυνδέονται τα αιολικά πάρκα WF8, WF9 και WF10 της περιοχής του Λειβαδίου, δηλαδή η αιολική παραγωγή μειώνεται κατά 40.2 MW. Στην περίπτωση (β) ενεργοποιούνται οι

ηλεκτρονόμοι υποτάσεως για όλα τα αιολικά πάρκα της περιοχής του Λειβαδίου (WF8, WF9, WF10 και WF11), συμπεριλαμβανομένων και των αιολικών πάρκων WF1, WF5, WF6 και WF7 της περιοχής της Καρύστου, ώστε συνολικά πραγματοποιείται αποκοπή 81.5 MW αιολικής παραγωγής. Επομένως, η απόρριψη της αιολικής παραγωγής στην περίπτωση (β) είναι διπλάσια από την αντίστοιχη απόρριψη της περίπτωσης (α).



Σχ. 5.13: Απόκριση τάσης ζυγών ΜΤ και ΥΤ υποσταθμών Λειβαδίου και Καρύστου (προστασία υποτάσεως ανεμογεννητριών)

Από το Σχ. 5.13 εξάγεται το συμπέρασμα ότι και οι δύο ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων υποτάσεως στις ανεμογεννήτριες αποτρέπουν τη γενίκευση της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης στις υπόλοιπες ανεμογεννήτριες.

Ωστόσο, στην περίπτωση (β) παρατηρούνται μεγαλύτερες μεταβατικές υπερτάσεις, οι οποίες οφείλονται στο γεγονός ότι αποσυνδέεται μεγαλύτερος αριθμός αιολικών πάρκων σε σχέση με την περίπτωση (α) και άρα μειώνεται περισσότερο η συνολική άεργος ζήτηση του συστήματος.

Για τον ίδιο λόγο, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.14, το ρεύμα διέγερσης της τοπικής γεννήτριας Γ1 για την περίπτωση (α) περιορίζεται στην επιτρεπόμενη τιμή μονίμου καταστάσεως στο τελικό σημείο ισορροπίας, σε αντίθεση με την περίπτωση (β), στην οποία η θεωρούμενη μηχανή αποδιεγείρεται πλήρως μετά τις αποσυνδέσεις των αντίστοιχων αιολικών πάρκων.



Σχ. 5.14: Απόκριση ρεύματος πεδίου τοπικής γεννήτριας Γ1 (προστασία υποτάσεως ανεμογεννητριών)

Οι ευσταθείς αποκρίσεις του μοναδικού αιολικού πάρκου WF12 στην περιοχή του Πολυποτάμου και για τις δύο περιπτώσεις ρυθμίσεων των ηλεκτρονόμων υποτάσεως φαίνονται στις καμπύλες του Σχ. 5.15.



Σχ. 5.15: Απόκριση ανεμογεννήτριας WG12 περιοχής Πολυποτάμου (προστασία υποτάσεως ανεμογεννητριών)

Κατά συνέπεια, και σε αυτήν την περίπτωση προστασίας, το πιο αυστηρό όριο αποκοπής υποτάσεως των ανεμογεννητριών (τερματική τάση 0.9 αμ για 2.5 s) αντιστοιχεί σε μικρότερη απόρριψη αιολικής παραγωγής. Για την εξήγηση της διαπίστωσης αυτής, παρουσιάζονται στο Σχ. 5.16 οι τερματικές

τάσεις των ανεμογεννητριών WG8-WG11 της περιοχής του Λειβαδίου για το χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος και για τις δύο περιπτώσεις ρυθμίσεων των ηλεκτρονόμων υποτάσεως.



**Σχ. 5.16:** Τερματική τάση ανεμογεννητριών WG8-WG11 περιοχής Λειβαδίου (προστασία υποτάσεως ανεμογεννητριών)

Από το Σχ. 5.16-(α) που αντιστοιχεί στο πιο αυστηρό όριο αποκοπής, παρατηρείται ότι η διαδοχική αποσύνδεση των ανεμογεννητριών WG8, WG9 και WG10 αποτρέπει την εκδήλωση βραχυπρόθεσμης αστάθειας στην τέταρτη ανεμογεννήτρια WG11. Συνεπώς, η τερματική τάση της τελευταίας αποκαθίσταται, με αποτέλεσμα την επιβράδυνσή της προς ευσταθές σημείο ισορροπίας.

Αντίθετα, σύμφωνα με το Σχ. 5.16-(β), στην περίπτωση που επιτραπεί στην υπόταση να διαρκέσει για χρονικό διάστημα 5 s, τότε η εξέλιξη του φαινομένου της βραχυπρόθεσμης αστάθεια τάσης πραγματοποιείται με γρηγορότερο ρυθμό, συμπαρασύροντας περισσότερες ανεμογεννήτριες. Συνεπώς, μολονότι και στην περίπτωση αυτή η διαδοχική αποσύνδεση των ανεμογεννητριών WG8, WG9 και WG10 πραγματοποιείται πριν η ανεμογεννήτρια WG11 ξεπεράσει το κρίσιμο διάστημα αποκοπής, εντούτοις, δεν αποκαθίσταται η τερματική της τάση και άρα αποσυνδέεται και αυτή από το δίκτυο.

Οι διαπιστώσεις αυτές επιβεβαιώνονται από το Σχ. 5.17, στο οποίο φαίνεται για το χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος η τερματική τάση της ανεμογεννήτριας WG11 και για τις δύο περιπτώσεις ρυθμίσεων των ηλεκτρονόμων υποτάσεως.



Σχ. 5.17: Τερματική τάση ανεμογεννήτριας WG11 περιοχής Λειβαδίου (προστασία υποτάσεως ανεμογεννητριών)

Καταλήγοντας, και σε αυτήν την περίπτωση εξάγεται το συμπέρασμα ότι το αυστηρό χρονικό όριο ανοχής της υποτάσεως μπορεί να βοηθήσει στη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος.

#### 5.4.3 Συνδυασμένη προστασία υπερτάχυνσης και υποτάσεως ανεμογεννητριών

Στην εξεταζόμενη περίπτωση θεωρούμε ότι κάθε ανεμογεννήτρια είναι εξοπλισμένη και με τα δύο είδη ηλεκτρονόμων που μελετήθηκαν παραπάνω, δηλαδή και με ηλεκτρονόμο υπερτάχυνσης και με ηλεκτρονόμο υποτάσεως. Αναφορικά με τα όρια ενεργοποίησης των ηλεκτρονόμων, θεωρούνται οι πιο αυστηρές από τις ρυθμίσεις που εξετάστηκαν προηγούμενα, δηλαδή:

- Ηλεκτρονόμος υπερτάχυνσης: Ταχύτητα αποκοπής ίση με 102.5% της σύγχρονης ταχύτητας για χρονικό διάστημα 100 ms.
- Ηλεκτρονόμος υποτάσεως: Τάση αποκοπής ίση με 90% της ονομαστικής τερματικής τάσης για χρονικό διάστημα 2.5 s.

Οι χρονικές προσομοιώσεις για την περίπτωση αυτή απέδειξαν ότι το προτεινόμενο σχήμα προστασίας αντιστοιχεί ακριβώς στην περίπτωση (α) για τις ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων υποτάσεως της ενότητας 5.4.2. Ειδικότερα, αποδείχθηκε ότι αποσυνδέονται τα αιολικά πάρκα WF8, WF9 και WF10 της περιοχής του Λειβαδίου (δηλαδή η αιολική παραγωγή μειώνεται κατά 40.2 MW), λόγω της δράσης των αντίστοιχων ηλεκτρονόμων υποτάσεως.

Συνεπώς, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι ηλεκτρονόμοι υποτάσεως των κρίσιμων ανεμογεννητριών έδρασαν γρηγορότερα από τους αντίστοιχους ηλεκτρονόμους υπερτάχυνσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι κρίσιμες μηχανές αρχικά απομαγνητίστηκαν και στη συνέχεια επιταχύνθηκαν, όπως προέκυψε και από την ανάλυση των ιδιοδιανυσμάτων που προηγήθηκε.

#### 5.4.4 Εγκατάσταση στατών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης (SVC)

Στην περίπτωση κατά την οποία είναι ταυτόχρονα επιθυμητά: (α) η αντιμετώπιση της εμφανιζόμενης βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης των ανεμογεννητριών και (β) η διατήρηση του αρχικού επιπέδου της αιολικής παραγωγής στο σύστημα, είναι απαραίτητη η ενίσχυσή του μέσω δυναμικής αέργου αντιστάθμισης.

Το επιλεγόμενο σενάριο ενίσχυσης αφορά την εγκατάσταση ενός στατού συστήματος αέργου αντιστάθμισης στο ζυγό ΥΤ του υποσταθμού ΜΤ/ΥΤ της περιοχής του Λειβαδίου, τα αιολικά πάρκα της οποίας αποδείχθηκαν τα πλέον επιρρεπή στην αστάθεια σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων. Η μέγιστη χωρητική αγωγιμότητα του στατού συστήματος αέργου αντιστάθμισης ανέρχεται στα 25 MVAr υπό ονομαστική τάση, ενώ το αναλογικό κέρδος ( $K_{SVC}$ ) είναι ίσο με 25 και η χρονική σταθερά ( $T_{SVC}$ ) είναι της τάξεως των 200 ms. Επίσης, η τάση αναφοράς ( $V_{ref}$ ) για την οποία δεν απαιτείται άεργος αντιστάθμιση ( $B_{SVC}$ =0) θεωρείται ίση με την αρχική τάση του ζυγού ΥΤ όπου εγκαθίσταται το θεωρούμενο σύστημα.

Στο Σχ. 5.18 φαίνεται η άεργος παραγωγή του στατού συστήματος αέργου αντιστάθμισης.



Σχ. 5.18: Άεργος παραγωγή στατού συστήματος αέργου αντιστάθμισης

Στο Σχ. 5.19 φαίνονται οι αποκρίσεις των τάσεων στο ζυγό MT (M2) και YT (H2) του υποσταθμού 150/20 kV στην περιοχή του Λειβαδίου.



Σχ. 5.19: Απόκριση τάσης ζυγών ΜΤ και ΥΤ υποσταθμού Λειβαδίου (με στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης)

Από το Σχ. 5.19 παρατηρείται ότι η εγκατάσταση του προαναφερόμενου στατού συστήματος αέργου αντιστάθμισης διασφαλίζει την ευσταθή απόκριση του δικτύου της Ν. Εύβοιας στο εξεταζόμενο σενάριο διπλής διαταραχής. Ιδιαίτερα αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η ρυθμιζόμενη τάση του ζυγού ΜΤ δεν βγαίνει σε καμία χρονική στιγμή εκτός της «νεκρής» ζώνης του αντιστοίχου μηχανισμού ΣΑΤΥΦ, λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας απόκρισης του SVC.

Στις γραφικές παραστάσεις του Σχ. 5.20 φαίνεται η απόκριση του ρεύματος πεδίου της παραμένουσας σε λειτουργία τοπικής γεννήτριας Γ1.



Σχ. 5.20: Απόκριση ρεύματος πεδίου τοπικής σύγχρονης γεννήτριας ΓΙ (με στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης)

Σύμφωνα με το Σχ. 5.20, το ρεύμα πεδίου της γεννήτριας Γ1 περιορίζεται διαδοχικά τόσο στη μέγιστη μεταβατική του τιμή ( $I_{max}$ ) λίγο μετά την απώλεια της διασυνδετικής γραμμής, όσο και στην επιτρεπόμενη τιμή μονίμου καταστάσεως ( $I_{lim}$ ) μερικά δευτερόλεπτα αργότερα. Εντούτοις, κανένας από τους παραπάνω περιορισμούς δεν δημιουργεί κανένα πρόβλημα στη συμπεριφορά του εξεταζόμενου συστήματος, καθώς στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των δύο περιορισμών αυτών, οι μηχανισμοί των ΣΑΤΥΦ στους υποσταθμούς MT/YT αποκαθιστούν τις τάσεις προς την πλευρά των αντιστοίχων δικτύων διανομής.

Από τα Σχ. 5.18 και Σχ. 5.20, παρατηρείται ότι ο περιορισμός του ρεύματος διέγερσης της τοπικής γεννήτριας Γ1 στην επιτρεπόμενη τιμή μονίμου καταστάσεως και επομένως η προκαλούμενη μείωση της αέργου παραγωγής της τελευταίας, έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αέργου υποστήριξης από το εξεταζόμενο στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης.

Αναφορικά με τα αιολικά πάρκα, η έγκαιρη δυναμική άεργος υποστήριξη που προσφέρει το εγκατεστημένο στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης βοηθάει τις ισοδύναμες ανεμογεννήτριες να επιτύχουν βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας αμέσως μετά το μεταβατικό περιορισμό της υπερδιέγερσης στη γεννήτρια Γ1. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται από την απόκριση του αιολικού πάρκου WF8 της περιοχής του Λειβαδίου, όπως φαίνεται στις καμπύλες του Σχ. 5.21.



Σχ. 5.21: Απόκριση ανεμογεννήτριας WG8 περιοχής Λειβαδίου (με στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης)

Σημειώνεται τέλος ότι παρόμοια απόκριση με το στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης μπορεί να επιτευχθεί εάν κάποια από τα αιολικά πάρκα έχουν ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης με κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος και ρύθμισης της τάσεως [TPV04].

# 6 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΣΕ ΑΣΘΕΝΕΣ ΔΙΚΤΥΟ

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται από πλευράς βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης ένα ασθενές δίκτυο Μέσης Τάσης (MT), το οποίο αναπαριστά προσεγγιστικά το ηλεκτρικό δίκτυο της Ν. Σαμοθράκης με την προοπτική εισόδου σε αυτό ενός νέου μεγάλου αιολικού πάρκου. Η μελέτη που παρουσιάζεται στη συνέχεια χρηματοδοτήθηκε από το ερευνητικό πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης «Microgrids».

## 6.1 Συνοπτική Περιγραφή Δικτύου

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ ΣΑΜΟΘΡΑΚΗ

Το μονογραμμικό διάγραμμα του εξεταζόμενου ΣΗΕ φαίνεται στο Σχ. 6.1.



Σχ. 6.1: Μονογραμμικό διάγραμμα ηλεκτρικού δικτύου

Το δίκτυο του Σχ. 6.1 αποτελείται από το νησιωτικό δίκτυο της Σαμοθράκης και από το ηπειρωτικό δίκτυο της Αλεξανδρούπολης.

Το δίκτυο της Ν. Σαμοθράκης αποτελείται από ένα (προς εγκατάσταση) αιολικό πάρκο, δύο συγκεντρωμένα τοπικά φορτία (ΦΟΡΤΙΟ3 και ΦΟΡΤΙΟ4), δύο Ρυθμιστές Τάσεως Διανομής (ΡΤΔ), καθώς επίσης και ένα ακτινικό δίκτυο διανομής στο επίπεδο των 20 kV.

Στα δύο συγκεντρωμένα τοπικά φορτία 3 και 4, η ενεργός κατανάλωσή τους θεωρείται σταθερού ρεύματος, ενώ η άεργος σταθερής αγωγιμότητας. Σημειώνεται ότι το μέγιστο της ενεργού κατανάλωσης στο νησί φτάνει περίπου τα 3 MW.

Όσον αφορά την ηπειρωτική χώρα, το δίκτυο διανομής της Αλεξανδρούπολης παριστάνεται με δύο συγκεντρωμένα τοπικά φορτία (ΦΟΡΤΙΟ1 και ΦΟΡΤΙΟ2), ενώ συνδέεται στο δίκτυο μεταφοράς μέσω ενός υποσταθμού MT/YT στο επίπεδο των 150 kV. Τα φορτία στο ηπειρωτικό σύστημα είναι του ίδιου τύπου με τα προαναφερόμενα τοπικά φορτία της Ν. Σαμοθράκης.

Τα δεδομένα των φορτίων του δικτύου του Σχ. 6.1 φαίνονται στον Πίνακα 6.1.

	-		,	
ΦΟΡΤΙΟ	$P_0$ (MW)	$Q_0$ (MVar)	α	β
1	4.8272	2.3426	1.00	2.00
2	0.936	0.4527	1.00	2.00
3	0.629	0.238	1.00	2.00
4	1.433	0.615	1.00	2.00

Πίνακας 6.1: Δεδομένα ζυγών φορτίων

Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης που ακολουθεί, θεωρείται ότι το Ελληνικό διασυνδεδεμένο ΣΗΕ παριστάνεται με ένα ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin, του οποίου η συνολική ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση υπολογίζεται από τη στάθμη βραχυκύκλωσης στο ζυγό ΥΤ της Αλεξανδρούπολης.

Το ηλεκτρικό δίκτυο της Ν. Σαμοθράκης συνδέεται με την ηπειρωτική χώρα μέσω δύο υποβρυχίων καλωδίων των 20 kV μήκους 46 χιλιομέτρων το καθένα.

Τα δεδομένα των γραμμών και των μετασχηματιστών του εξεταζόμενου δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2.

Κωδικός Στοιχείου	<b>R</b> (αμ)	$X(\alpha\mu)$	<b>B</b> (αμ)	r
Κύκλωμα Thevenin	0.0	0.007	0.0	-
Γ1	0.12094	0.18788	0.0	-
Г2	0.04031	0.06263	0.0	-
Г3	0.05375	0.08350	0.0	-
Г4	0.08063	0.12525	0.0	-
YK1	0.28520	0.14375	0.13116	-
YK2	0.28520	0.14375	0.13116	-
ΓΔ1	0.02688	0.04175	0.0	-
ΓΔ2	0.02688	0.04175	0.0	-
ΓΔ3	0.29505	0.19425	0.0	-
$\Gamma \Delta 4$	0.05050	0.04825	0.0	-
$Y/\Sigma MT/YT$	0.0	0.04	0.0	쾨
Μ/Σ 1	0.0	0.10	0.0	ιι από ολογία
PTΔ1	0.0	0.15	0.0	αρτάτο νδεσμο
ΡΤΔ2	0.0	0.15	0.0	Eği

Πίνακας 6.2: Δεδομένα γραμμών και μετασχηματιστών

Στο αιολικό πάρκο θεωρούμε ότι πρόκειται να εγκατασταθούν δώδεκα ασύγχρονες ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 600 kW η κάθε μία, δηλαδή η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του πάρκου θα ανέρχεται στα 7.2 MW. Η μηχανική ροπή ανέμου στον άξονα κάθε ανεμογεννήτριας θεωρείται σταθερή. Στον τερματικό ζυγό κάθε ισοδύναμης ανεμογεννήτριας εγκαθίσταται σύστημα χωρητικής αντιστάθμισης αέργου ισχύος, ώστε ο συντελεστής ισχύος στο αρχικό σημείο λειτουργίας να είναι ίσος με 0.97 (επαγωγικός) υπό ονομαστική τάση. Για λόγους απλοποίησης της ανάλυσης που ακολουθεί, η τερματική τάση κάθε ανεμογεννήτριας θεωρείται ίση με την ονομαστική της τιμή στο αρχικό σημείο λειτουργίας. Κάθε ανεμογεννήτρια συνδέεται στο τοπικό δίκτυο διανομής μέσω ξεχωριστού μετασχηματιστή XT/MT και των δύο γραμμών διανομής ΓΔ1 και ΓΔ2 τύπου ACSR-95 στο επίπεδο των 20 kV. Τα δεδομένα κάθε ασύγχρονης μηχανής φαίνονται στον Πίνακα 6.3.

 $P_{nom}$  (kW)
  $R_s$  ( $\alpha\mu$ )
  $X_{ls}$  ( $\alpha\mu$ )
  $X_m$  ( $\alpha\mu$ )
  $R_r$  ( $\alpha\mu$ )
  $X_{lr}$  ( $\alpha\mu$ )
 H (s)

 600
 0.013
 0.067
 3.8
 0.01
 0.17
 1.5

Πίνακας 6.3: Δεδομένα ασύγχρονων ανεμογεννητριών

Επίσης, στο Σχ. 6.1 διακρίνονται δεκαπέντε διακόπτες Δ1 έως Δ15, οι οποίοι ανάλογα με τη λειτουργία που επιτελούν, χωρίζονται στις εξής τρεις κατηγορίες:

- Οι πρώτοι έντεκα διακόπτες Δ1 έως Δ11 ορίζουν τον αριθμό των ανεμογεννητριών που θα συνδεθούν σε κάθε μία από τις δύο γραμμές διανομής ΓΔ1 και ΓΔ2.
- Οι δύο διακόπτες Δ12 και Δ13 καθορίζουν το επίπεδο της αιολικής διείσδυσης, το οποίο θα τροφοδοτήσει τα τοπικά φορτία 3 και 4, καθώς επίσης και τη φόρτιση των δύο υποβρυχίων καλωδίων YK1 και YK2.
- Οι δύο τελευταίοι διακόπτες Δ14 και Δ15 χρησιμεύουν για την παράσταση της απώλειας της αντίστοιχης γραμμής διανομής στο δίκτυο της Αλεξανδρούπολης, διαταραχή η οποία θα εξεταστεί στη συνέχεια.

Ειδικότερα, ανάλογα με την κατάσταση των πρώτων δεκατριών διακοπτών Δ1 έως Δ13, η παραγόμενη αιολική ισχύς μπορεί να χωριστεί σε δύο τμήματα, τα οποία διεισδύουν στο δίκτυο μέσω των γραμμών διανομής ΓΔ1 και ΓΔ2 στα σημεία ΣΣ1 και ΣΣ2 αντίστοιχα. Για παράδειγμα, εάν οι πρώτοι δώδεκα διακόπτες Δ1 έως Δ12 είναι κλειστοί και ο διακόπτης Δ13 ανοιχτός, ολόκληρη η αιολική παραγωγή θα διοχετευθεί στο ένα από τα δύο υποβρύχια καλώδια μέσω του σημείου ΣΣ1, οπότε οι δύο γραμμές διανομής ΓΔ1 και ΓΔ2 θα λειτουργούν παράλληλα. Στην περίπτωση αυτή, το δεύτερο υποβρύχιο καλώδιο, το οποίο συνδέεται στο σημείο ΣΣ2, θα τροφοδοτεί μόνο τα δύο τοπικά φορτία. Επιπρόσθετα, εάν όλοι οι διακόπτες εκτός των Δ6 (ενδιάμεσος διακόπτης που συνδέει ή απομονώνει μεταξύ τους τις ανεμογεννήτριες Α/Γ 6 και Α/Γ 7) και Δ12 είναι κλειστοί, τότε η αιολική διείσδυση θα χωριστεί σε δύο ακριβώς ίσα μέρη, τα οποία εγχέονται στο δίκτυο στα σημεία ΣΣ1 και ΣΣ2 μέσω των γραμμών ΓΔ1 και ΓΔ2 αντίστοιχα. Στην παραπάνω τοπολογία, τα δύο τοπικά φορτία τροφοδοτούνται απευθείας από τις έξι ανεμογεννήτριες Α/Γ 7 έως Α/Γ 12.

Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, το αιολικό πάρκο παριστάνεται με μία ή δύο ισοδύναμες ανεμογεννήτριες επαγωγής, αντίστοιχα συγκεντρωμένα συστήματα χωρητικής αντιστάθμισης και αντίστοιχους ισοδύναμους μετασχηματιστές ΧΤ/ΜΤ. Στο αρχικό σημείο λειτουργίας, η τερματική τάση και των δύο ισοδύναμων ανεμογεννητριών θεωρείται ονομαστική. Η πρώτη (δεύτερη) ισοδύναμη μηχανή συνδέεται στο σημείο ΣΣ1 (ΣΣ2) μέσω του πρώτου (δεύτερου) ισοδυνάμου μετασχηματιστή XT/MT και της γραμμής διανομής ΓΔ1 (ΓΔ2). Ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου η οποία καθορίζεται από την κατάσταση των δεκατριών διακοπτών Δ1 έως Δ13, υπολογίζεται η ονομαστική αιολική παραγωγή κάθε ισοδύναμης ανεμογεννήτριας από το άθροισμα των αντίστοιχων ανεμογεννητριών, ενώ οι παράμετροι της τελευταίας αντιστοιχούν στον παράλληλο συνδυασμό των επιμέρους ανεμογεννητριών. Όμοια, η αντίδραση κάθε ισοδύναμου μετασχηματιστών, ενώ η συγκεντρωμένη χωρητική αντιστάθμιση προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους συστημάτων κάθε ανεμογεννήτριας.

Κάθε Ρυθμιστής Τάσεως Διανομής (ΡΤΔ) είναι ένας αυτομετασχηματιστής 20/20 kV, ο οποίος θεωρείται εξοπλισμένος με μηχανισμό ΣΑΤΥΦ. Ο ρόλος των ΡΤΔ είναι η εξασφάλιση της κανονικής λειτουργίας του τοπικού δικτύου της Ν. Σαμοθράκης, διατηρώντας την τάση στα αντίστοιχα τυλίγματα δευτερεύοντος εντός προκαθορισμένων διαστημάτων τιμών. Εξαιτίας της πλήρους έλλειψης τοπικής συμβατικής παραγωγής, η παρουσία των ΡΤΔ για τη ρύθμιση της τάσεως είναι επιβεβλημένη.

## 6.2 Προσδιορισμός Βέλτιστης Συνδεσμολογίας Αιολικής Διείσδυσης Από Πλευράς Βραχυπρόθεσμης Αστάθειας Τάσης

## 6.2.1 Απώλεια γραμμής διανομής στην Αλεξανδρούπολη

Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης του ηλεκτρικού δικτύου της Ν. Σαμοθράκης θα εξεταστεί κατά πρώτον στο ενδεχόμενο ανοίγματος ενός από τους δύο διακόπτες Δ14 ή Δ15, γεγονός το οποίο οδηγεί στην απώλεια της αντίστοιχης γραμμής διανομής του δικτύου της Αλεξανδρούπολης. Η διαταραχή αυτή θεωρείται ότι λαμβάνει χώρα τη χρονική στιγμή t=1 s.

Η απόκριση του εξεταζόμενου συστήματος στην προαναφερόμενη διαταραχή θα μελετηθεί για τις εξής τέσσερις περιπτώσεις συνδεσμολογίας του επιπέδου της αιολικής διείσδυσης:

- Το σύνολο της ονομαστικής αιολικής παραγωγής (7.2 MW) εγχέεται στο δίκτυο μέσω του σημείου ΣΣ1, δηλαδή οι δύο γραμμές διανομής ΓΔ1 και ΓΔ2 λειτουργούν παράλληλα.
- Το 75% του ονομαστικού επιπέδου της αιολικής παραγωγής (5.4 MW) εισέρχεται στο δίκτυο μέσω της γραμμής ΓΔ1, ενώ το υπόλοιπο 25% (1.8 MW) εγχέεται μέσω της γραμμής ΓΔ2 και του σημείου ΣΣ2, τροφοδοτώντας εν μέρει και τα φορτία 3 και 4.
- Κάθε μία από τις γραμμές διανομής ΓΔ1 και ΓΔ2 τροφοδοτεί το δίκτυο με το 50% της ονομαστικής αιολικής διείσδυσης (3.6 MW).
- 4. Το 25% της ονομαστικής αιολικής παραγωγής (1.8 MW) εισέρχεται στο δίκτυο μέσω της γραμμής ΓΔ1 και του σημείου ΣΣ1, ενώ το υπόλοιπο 75% (5.4 MW) εγχέεται μέσω της γραμμής ΓΔ2 και του σημείου ΣΣ2, όπου τροφοδοτούνται τα φορτία 3 και 4.

Στον Πίνακα 6.4 φαίνονται για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις τοπολογίας της αιολικής διείσδυσης, το σύνολο των απαιτούμενων ανοιχτών διακοπτών για την επίτευξη της εξεταζόμενης συνδεσμολογίας, καθώς επίσης και η ονομαστική παραγωγή κάθε ισοδύναμης ανεμογεννήτριας Α/Γ Α

και Α/Γ Β, θεωρώντας ότι η Α/Γ Α (Α/Γ Β) συνδέεται στο δίκτυο μέσω της γραμμής διανομής ΓΔ1 (ΓΔ2) και του σημείου ΣΣ1 (ΣΣ2).

Συνδεσμολογία	Ανοιχτοί Διακόπτες	Ισχύς Α/Γ Α (MW)	Ισχύς Α/Γ Β (MW)
1	Δ13	7.2	0.0
2	Δ9 και Δ12	5.4	1.8
3	Δ6 και Δ12	3.6	3.6
4	Δ3 και Δ12	1.8	5.4

Πίνακας 6.4: Περιπτώσεις συνδεσμολογίας αιολικής διείσδυσης

Αναφορικά με τη δυναμική συμπεριφορά των ΣΑΤΥΦ, θεωρείται ότι η χρονική καθυστέρηση μεταξύ οποιωνδήποτε δύο διαδοχικών αλλαγών λήψης των αυτομετασχηματιστών 20/20 kV είναι ίση με 10 s. Ωστόσο, επειδή το χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος εκτείνεται στα πρώτα δευτερόλεπτα της προσομοίωσης, οι μηχανισμοί ΣΑΤΥΦ θεωρούνται ανενεργοί κατά τη διάρκεια της ανάλυσης.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι προγενέστερες στατικές μελέτες του δικτύου έχουν αποδείξει ότι υπάρχει λειτουργικό σημείο μονίμου κατάστασης μετά την εξεταζόμενη διαταραχή. Ειδικότερα, για τη δυσμενέστερη περίπτωση συνδεσμολογίας, η οποία όπως θα αποδειχθεί στη συνέχεια είναι η συνδεσμολογία 1, τα λειτουργικά σημεία ισορροπίας πριν και μετά τη διαταραχή φαίνονται στον Πίνακα 6.5. Συνεπώς, στην παρούσα ενότητα θα εξεταστεί κατά πόσον η δυναμική απόκριση του συστήματος οδηγεί ή όχι σε αυτό το ευσταθές σημείο ισορροπίας.

Ζυνός	Προ διατ	ταραχής	Μετά διαταραχής			
20705	Τάση (αμ)	Γωνία (°)	Τάση (αμ)	Γωνία (°)		
Άπειρος	1.04	0.00	1.04	0.00		
ΥΤ Υ/Σ ΜΤ/ΥΤ	1.03646	-0.09	1.03566	-0.10		
MT Y/ $\Sigma$ MT/YT	1.04334	-0.56	1.03808	-0.66		
Πρωτεύον Μ/Σ 1	1.04490	-0.04	1.02530	0.91		
Άφιξης Δ15	1.02513	2.19	0.95090	6.42		
ΦΟΡΤΙΟ 1	0.99734	-2.09	0.99183	-2.20		
ΦΟΡΤΙΟ 2	1.00809	0.65	0.95879	2.34		
Πρωτεύον ΡΤΔ1	1.16213	10.23	1.08947	16.19		
Πρωτεύον ΡΤΔ2	0.95733	1.03	0.87454	5.29		
ΣΣ1	1.04098	14.92	0.96930	21.55		
$\Sigma\Sigma2$	1.01357	-0.96	0.92281	2.90		
ΦΟΡΤΙΟ 3	0.99014	-1.25	0.89695	2.54		
ΦΟΡΤΙΟ 4	1.00339	-1.17	0.91161	2.64		
Πρωτεύον Μ/Σ Α/ΓΑ	1.04538	15.88	0.97381	22.67		
A/Γ A	1.00	19.93	0.92809	27.35		

Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα επίλυσης ροής φορτίου πριν και μετά τη διαταραχή για τη συνδεσμολογία Ι

Στο Σχ. 6.2 φαίνεται η απόκριση της τερματικής τάσης κάθε ισοδύναμης ανεμογεννήτριας Α/Γ Α και Α/Γ Β, για κάθε μία περίπτωση συνδεσμολογίας αιολικής διείσδυσης του Πίνακα 6.4.

Από το Σχ. 6.2-(α) παρατηρείται ότι στην πρώτη περίπτωση συνδεσμολογίας της αιολικής διείσδυσης, η τάση πέφτει απότομα και το σύστημα οδηγείται σε κατάρρευση, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες τρεις περιπτώσεις, στις οποίες η προσομοίωση τερματίζεται κανονικά. Υπενθυμίζεται ότι στην πρώτη περίπτωση υπάρχει μόνο η ισοδύναμη ανεμογεννήτρια Α/Γ Α, η οποία θεωρείται ότι αντιστοιχεί στη συνολική ονομαστική παραγωγή του αιολικού πάρκου.

Επιπρόσθετα, από τις γραφικές παραστάσεις του Σχ. 6.2, παρατηρείται ότι σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις η απώλεια της γραμμής διανομής στην Αλεξανδρούπολη οδηγεί σε πτώση των τάσεων στο τοπικό δίκτυο της Ν. Σαμοθράκης. Η πτώση αυτή οφείλεται στη μείωση της εισαγωγής αέργου ισχύος προς το τελευταίο δίκτυο.



**Σχ. 6.2:** Απόκριση τερματικής τάσης ισοδύναμων ανεμογεννητριών Α/Γ Α και Α/Γ Β

Στις περιπτώσεις 2,3 και 4 ωστόσο, η πτώση τάσης περιορίζεται σε μικρές τιμές, οπότε και οι δύο ισοδύναμες ανεμογεννήτριες Α/Γ Α και Α/Γ Β επιτυγχάνουν βραχυπρόθεσμο ευσταθές σημείο ισορροπίας μετά την εξεταζόμενη διαταραχή, σύμφωνα με τις αντίστοιχες αποκρίσεις της ταχύτητας του δρομέα τους από το Σχ. 6.3.



Σχ. 6.3: Απόκριση ταχύτητας δρομέα ισοδυνάμων ανεμογεννητριών Α/Γ Α και Α/Γ Β

Αντίθετα, στην πρώτη περίπτωση η τερματική τάση της μοναδικής ισοδύναμης ανεμογεννήτριας Α/Γ Α πέφτει σε απαράδεκτα χαμηλά επίπεδα. Αυτό οφείλεται στην επιτάχυνση της ασύγχρονης μηχανής, σύμφωνα με τη συνεχή καμπύλη του Σχ. 6.3-(α). Από την ίδια καμπύλη, παρατηρείται ότι η θεωρούμενη ανεμογεννήτρια επιβραδύνεται για μικρό χρονικό διάστημα προσπαθώντας να επιτύχει ευσταθές λειτουργικό σημείο μετά τη διαταραχή, εντούτοις, η μηχανή δεν έλκεται πλέον από το ευσταθές σημείο ισορροπίας. Η εξέλιξη του σεναρίου της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης της ισοδύναμης ανεμογεννήτριας οδηγεί σε κατάρρευση τάσης του δικτύου.

Οι εμφανιζόμενες ταλαντώσεις της ταχύτητας του δρομέα των ισοδυνάμων ανεμογεννητριών οφείλονται στους ηλεκτρικούς και μηχανικούς ρυθμούς ταλάντωσης μεταξύ των μηχανών και του εξωτερικού συστήματος.

Συμπερασματικά, η περίπτωση κατά την οποία το σύνολο της αιολικής παραγωγής εισέρχεται στο δίκτυο μέσω του σημείου σύνδεσης ΣΣ1 και του παράλληλου συνδυασμού των δύο γραμμών διανομής ΓΔ1 και ΓΔ2 δεν είναι αποδεκτή από πλευράς βραχυπρόθεσμης ασφάλειας τάσης, αφού η απώλεια μίας γραμμής οδηγεί στην αστάθεια του αιολικού πάρκου και στην κατάρρευση τάσεως του δικτύου.

Συνεπώς, η μέγιστη ισχύς που επιτρέπεται από πλευράς ασφάλειας τάσεως να συνδεθεί στο υποβρύχιο καλώδιο YK1 μέσω του σημείου ΣΣ1 είναι 75% της ονομαστικής. Φυσικά, ακριβέστερο όριο μεταξύ του 75% και του 100% μπορεί να υπολογιστεί, όμως για να υπάρχουν λογικά περιθώρια ασφάλειας

είναι προτιμότερο να μην επιτρέπεται η σύνδεση παραπάνω από εννέα ανεμογεννητριών στο σημείο ΣΣ1. Οπότε, το μέγιστο όριο διείσδυσης στο σημείο ΣΣ1 ισούται με 5.4 MW (μέχρι στιγμής).

### 6.2.2 Τριφασικό βραχυκύκλωμα σε γραμμή διανομής στην Αλεξανδρούπολη

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η απόκριση του δικτύου της Ν. Σαμοθράκης στο ενδεχόμενο μίας άλλης σοβαρής διαταραχής και συγκεκριμένα στο ενδεχόμενο ενός τριφασικού βραχυκυκλώματος στο μέσον της γραμμής διανομής μεταξύ των διακοπτών Δ14 και Δ15. Το σφάλμα λαμβάνει χώρα τη χρονική στιγμή *t*=1 s και θεωρείται ότι εκκαθαρίζεται με το άνοιγμα και των δύο παραπάνω διακοπτών. Σημειώνεται ότι θα εξεταστούν μόνο οι τρεις τελευταίες συνδεσμολογίες της αιολικής διείσδυσης, καθώς η πρώτη περίπτωση απορρίφθηκε λόγω της μελέτης που προηγήθηκε. Επίσης, σε κάθε περίπτωση τοπολογίας θα εξεταστούν ένα ευσταθές και ένα ασταθές σενάριο.

#### • Συνδεσμολογία 2

Στα Σχ. 6.4 και Σχ. 6.5 φαίνονται οι αποκρίσεις της τερματικής τάσης και της ταχύτητας δρομέα κάθε ισοδύναμης ανεμογεννήτριας στις περιπτώσεις που το σφάλμα εκκαθαριστεί μετά από 59 ms (συνεχής καμπύλη) ή μετά από 60 ms (εστιγμένη καμπύλη).



Σχ. 6.4: Απόκριση τερματικής τάσης ανεμογεννητριών Α/Γ Α και Α/Γ Β (Συνδεσμολογία 2-Βραχυκύκλωμα)

Προφανώς, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στη συγκεκριμένη περίπτωση βρίσκεται μεταξύ των 59 και 60 ms.



Σχ. 6.5: Απόκριση ταχύτητας δρομέα ανεμογεννητριών Α/Γ Α και Α/Γ Β (Συνδεσμολογία 2-Βραχυκύκλωμα)

#### • Συνδεσμολογία 3

Στα Σχ. 6.6 και Σχ. 6.7 φαίνονται οι αποκρίσεις της τερματικής τάσης και της ταχύτητας δρομέα κάθε ισοδύναμης ανεμογεννήτριας στις περιπτώσεις που το σφάλμα εκκαθαριστεί μετά από 73 ms (συνεχής καμπύλη) ή μετά από 74 ms (εστιγμένη καμπύλη).



Σχ. 6.6: Απόκριση τερματικής τάσης ανεμογεννητριών Α/Γ Α και Α/Γ Β (Συνδεσμολογία 3-Βραχυκύκλωμα)

Προφανώς, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στη συγκεκριμένη περίπτωση βρίσκεται μεταξύ των 73 και 74 ms.



Σχ. 6.7: Απόκριση ταχύτητας δρομέα ανεμογεννητριών Α/Γ Α και Α/Γ Β (Συνδεσμολογία 3-Βραχυκύκλωμα)

#### • Συνδεσμολογία 4

Στα Σχ. 6.8 και Σχ. 6.9 φαίνονται οι αποκρίσεις της τερματικής τάσης και της ταχύτητας δρομέα κάθε ισοδύναμης ανεμογεννήτριας στις περιπτώσεις που το σφάλμα εκκαθαριστεί μετά από 59 ms (συνεχής καμπύλη) ή μετά από 60 ms (εστιγμένη καμπύλη).



Σχ. 6.8: Απόκριση τερματικής τάσης ανεμογεννητριών Α/Γ Α και Α/Γ Β (Συνδεσμολογία 4-Βραχυκύκλωμα)

Προφανώς, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στη συγκεκριμένη περίπτωση βρίσκεται μεταξύ των 59 και 60 ms.



Σχ. 6.9: Απόκριση ταχύτητας δρομέα ανεμογεννητριών Α/Γ Α και Α/Γ Β (Συνδεσμολογία 4-Βραχυκύκλωμα)

#### 6.2.3 Συμπεράσματα

Σε όλες τις περιπτώσεις βραχυκυκλώματος, η πτώση τάσης κατά τη διάρκεια του σφάλματος έχει σαν αποτέλεσμα την επιτάχυνση των δύο ισοδυνάμων ανεμογεννητριών. Στη συνέχεια, η εκκαθάριση του σφάλματος και η μερική αποκατάσταση των τάσεων στους ζυγούς οδηγεί σε ταλαντώσεις της ταχύτητας του δρομέα των μηχανών. Όπως προαναφέρθηκε, οι ταλαντώσεις αυτές οφείλονται στη διέγερση ηλεκτρικών και μηχανικών ρυθμών ταλάντωσης μεταξύ των μηχανών και του εξωτερικού συστήματος. Ακολούθως, εάν το βραχυκύκλωμα εκκαθαριστεί έγκαιρα, κάθε μία ισοδύναμη ανεμογεννήτρια επιβραδύνεται στο αντίστοιχο βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας μετά τη διαταραχή. Αντίθετα, εάν το σφάλμα διαρκέσει περισσότερο από τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης, η κάθε μηχανή έχει επιταχυνθεί πέρα από το αντίστοιχο βραχυπρόθεσμο ασταθές σημείο ισορροπίας μετά τη διαταραχή. Οπότε, οι ασύγχρονες ανεμογεννήτριες επιταχύνονται συνεχώς, αδυνατώντας να επιβραδυνθούν, με αποτέλεσμα την δυσμενή εξέλιξη της εμφανιζόμενης βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης σε κατάρρευση του δικτύου.

Σημειώνεται ότι η βέλτιστη περίπτωση τοπολογίας αιολικής διείσδυσης από πλευράς απόκρισης του δικτύου στο εξεταζόμενο σφάλμα είναι η τρίτη, επειδή ο υπολογιζόμενος κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος (73-74 ms) είναι αρκετά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο χρόνο των υπόλοιπων δύο περιπτώσεων (59-60 ms).

Άρα ο ισομερής καταμερισμός των δύο τμημάτων του αιολικού πάρκου στα δύο υποβρύχια καλώδια φαίνεται να είναι η πλέον ενδεδειγμένη λύση από πλευράς μεταβατικής συμπεριφοράς και βελτιστοποίησης της ευστάθειας του δικτύου.

Σημειώνεται ότι όπως έγινε η παραπάνω ανάλυση για το πλήρες φορτίο των ανεμογεννητριών, αντίστοιχες αναλύσεις μπορούν να γίνουν για όλα τα ενδιάμεσα φορτία του πάρκου, έτσι ώστε να βρεθεί ο κατάλληλος βέλτιστος διαχωρισμός των δύο συνιστωσών του πάρκου σε κάθε επιμέρους φορτίο. Επίσης μπορούν στην ανάλυση να εισαχθούν και άλλες διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα η απώλεια ενός υποβρυχίου καλωδίου, ή η βαθμιαία απώλεια της αιολικής παραγωγής λόγω της αντίστοιχης μείωσης της ταχύτητας του ανέμου.

## 7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ-ΟΙΚΙΑΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

## 7.1 Περιγραφή Δικτύου Με Βιομηχανικούς-Οικιακούς Κινητήρες

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται από πλευράς βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης ένα σύστημα 11 ζυγών, το οποίο αποτελεί ουσιαστικά μία τροποποιημένη μορφή του δικτύου των 10 ζυγών που συναντάται στην αναφορά [Tay94] και χρησιμοποιείται εκτενώς σε παρόμοιες μελέτες. Το εξεταζόμενο σύστημα είναι μία πολύ απλοποιημένη εκδοχή των συστημάτων της Βορειοδυτικής Αμερικής, ενώ το ισοδύναμο μονογραμμικό του διάγραμμα φαίνεται στο Σχ. 7.1.



Σχ. 7.1: Ισοδύναμο μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου με βιομηχανικούς-οικιακούς κινητήρες

Το εξεταζόμενο δίκτυο αποτελείται από μία περιοχή φορτίου, η οποία τροφοδοτείται μέσω πέντε όμοιων παράλληλων γραμμών μεταφοράς 500 kV από μία απομακρυσμένη γεννήτρια (SG2) ονομαστικής ισχύος 2200 MVA και έναν άπειρο ζυγό (SG1) που αντιπροσωπεύει τη διασύνδεση με ένα αρκετά μεγαλύτερο ΣΗΕ. Η παρουσία του άπειρου ζυγού εξασφαλίζει ότι η συχνότητα του δικτύου παραμένει σταθερή στην ονομαστική της τιμή (60 Hz) κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Ο άπειρος ζυγός συνδέεται στο ζυγό αναχώρησης (ζυγός 8) των πέντε παράλληλων γραμμών μεταφοράς 500 kV μέσω του μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης T1 (13.2/540 kV) και της γραμμής μεταφοράς 500 kV μεταξύ των ζυγών 7 και 8. Η απομακρυσμένη γεννήτρια SG2 συνδέεται στο ζυγό 8 μέσω του μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης T2 (13.2/540 kV). Η τερματική τάση της γεννήτριας ελέγχεται από ένα APT τύπου AC4 κατά IEEE, αμελώντας τη βαθμίδα μείωσης του μεταβατικού κέρδους (βλ. ενότητα 2.2.4).

Η προαναφερόμενη περιοχή φορτίου των ζυγών 3-6 και 9-11 περιέχει δύο συγκεντρωμένα φορτία ένα βιομηχανικό και ένα οικιακό-εμπορικό, μία τοπική σύγχρονη γεννήτρια ονομαστικής ισχύος 1600 MVA, ενώ υπάρχει σημαντική άεργος αντιστάθμιση.

Γεννήτρια	S <sub>nom</sub> (MVA)	<b>R</b> <sub>s</sub> (αμ)	$X_{ls}$ ( $\alpha\mu$ )	$X_d$ ( $\alpha\mu$ )	$X_q$ ( $\alpha\mu$ )	$\dot{X_{d}}$ $(\alpha\mu)$	$X_q$ ( $\alpha\mu$ )	$T_{d0}$ (s)	<i>T</i> <sub>q0</sub> (s)	<b>H</b> (s)	D
SG2	2200	0.0046	0.155	2.11	2.02	0.28	0.49	4.2	0.565	2.32	2.0
SG3	1600	0.0046	0.155	2.11	2.02	0.28	0.49	4.2	0.565	2.32	2.0

Πίνακας 7.1: Δεδομένα σύγχρονων γεννητριών

Η τοπική γεννήτρια θεωρείται εξοπλισμένη με ΑΡΤ όμοιο με τον αντίστοιχο της απομακρυσμένης γεννήτριας SG2, ο οποίος διαθέτει αναλογικό ΣΠΥ αθροιστικού τύπου με βαθμίδα μείωσης του ρεύματος πεδίου στη μέγιστη μεταβατική του τιμή (βλ. ενότητα 2.3.2). Η γεννήτρια αυτή συνδέεται στο

ζυγό άφιξης (ζυγός 9) των πέντε παράλληλων γραμμών μεταφοράς 500 kV μέσω του μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης T3 (13.2/530 kV).

Τα δεδομένα των σύγχρονων γεννητριών, καθώς επίσης και των αντίστοιχων APT και ΣΠΥ φαίνονται στους Πίνακες 7.1 και 7.2, αντίστοιχα.

	AI	ΣΠΥ					
Γεννήτρια	K <sub>AVR</sub>	T <sub>AVR</sub> (s)	$I_{lim}$ ( $\alpha\mu$ )	T <sub>OEL</sub> (s)	$I_{max}$ ( $\alpha\mu$ )	<i>T<sub>en</sub></i> (S)	K <sub>P</sub>
SG2	100	0.1	2.0	20.0	3.0	0.2	10
SG3	100	0.1	1.5	20.0	1.9	0.1	10

Πίνακας 7.2: Δεδομένα ΑΡΤ και ΣΠΥ σύγχρονων γεννητριών

Αναφορικά με τα φορτία, το βιομηχανικό φορτίο θεωρείται ότι αποτελείται από δύο κινητήρες επαγωγής, ένα μεγαλύτερο και ένα μικρότερο ονομαστικής ισχύος 3375 MVA και 500 MVA αντίστοιχα, των οποίων η ενεργός κατανάλωση στο αρχικό σημείο λειτουργίας ανέρχεται στα 2700 MW και 300 MW υπό ονομαστική τάση αντίστοιχα. Η ροπή του μηχανικού φορτίου και των δύο βιομηχανικών κινητήρων θεωρείται αμιγώς εξαρτώμενη από το τετράγωνο της ταχύτητας του δρομέα τους. Το συνολικό βιομηχανικό φορτίο τροφοδοτείται από το ζυγό 9 μέσω του μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης T4 (525/13.8 kV), ο οποίος έχει μη ονομαστικό (πλην όμως σταθερό) λόγο μετασχηματισμού, με τη μεταβλητή λήψη να βρίσκεται προς την πλευρά των 525 kV. Για τη διευκόλυνση της ανάλυσης που ακολουθεί, θεωρείται ότι οι δύο βιομηχανικοί κινητήρες εγκαθίστανται σε διαφορετικούς ζυγούς (ζυγοί 4 και 5), οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω μίας γραμμής με πρακτικά μηδενική σύνθετη αντίσταση.

Το οικιακό-εμπορικό φορτίο καταναλώνει συνολικά 3000 MW υπό ονομαστική τάση στο αρχικό λειτουργικό σημείο, αποτελούμενο κατά 50% από καθαρά ωμικό φορτίο και κατά 50% από έναν ισοδύναμο κινητήρα επαγωγής ονομαστικής ισχύος 2440 MVA. Ο ισοδύναμος αυτός κινητήρας θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει συγκεντρωμένα συστήματα ψύξης και κλιματισμού, ενώ το μηχανικό του φορτίο αποτελεί σύνθεση μοντέλου σταθερής και τετραγωνικής ροπής. Στο αρχικό σημείο λειτουργίας, θεωρείται ότι η άεργος κατανάλωση του υπόψη κινητήρα αντισταθμίζεται πλήρως από κατάλληλη συστοιχία στατών πυκνωτών, με αποτέλεσμα ο συντελεστής ισχύος του συνολικού οικιακού-εμπορικού φορτίου να είναι ίσος με τη μονάδα. Τα δεδομένα των τριών ασύγχρονων κινητήρων φαίνονται στον Πίνακα 7.3.

Κινητήρας	S <sub>nom</sub>	$R_s$	$X_{ls}$	$X_m$	$R_r$	$X_{lr}$	H	Μηχα φορ	ινικό τίο
		(αμ)	(αμ)	(αμ)	(αμ)	(αμ)	(3)	$a_m$	т
IM1	3375	0.013	0.067	3.8	0.009	0.17	1.5	1.00	2
IM2	500	0.031	0.1	3.2	0.018	0.18	0.7	1.00	2
IM3	2440	0.056	0.092	2.14	0.059	0.075	0.342	0.32	2

Πίνακας 7.3: Δεδομένα κινητήρων επαγωγής

Το οικιακό-εμπορικό φορτίο συνδέεται στο ζυγό 9 μέσω δύο μετασχηματιστών υποβιβασμού τάσης T5 (525/115 kV) και T6 (115/13.8 kV), μεταξύ των οποίων μεσολαβεί γραμμή μεταφοράς στο επίπεδο των 115 kV (μεταξύ των ζυγών 10 και 11).

Ζυγός μεταβλητής λήψης	Ζυγός αγωγιμότητας	Ρυθμιζόμενος ζυγός	$V_{\rm max}$ ( $\alpha\mu$ )	V <sub>min</sub> (αμ)	<i>r</i> <sub>max</sub>	<i>r</i> <sub>min</sub>	Δr	<i>T</i> <sub>D0</sub> (s)	<i>T</i> <sub>D1</sub> (s)
11	6	6	1.00833	0.99167	1.10	0.90	0.00625	25	10

Πίνακας 7.4: Δεδομένα μηχανισμού ΣΑΤΥΦ

Ο μετασχηματιστής T6 (115/13.8 kV), στο δευτερεύον τύλιγμα του οποίου συνδέεται το οικιακόεμπορικό φορτίο, είναι εξοπλισμένος με μηχανισμό ΣΑΤΥΦ ώστε να διατηρείται η τάση στο φορτίο εντός ενός επιθυμητού εύρους τιμών. Η μεταβλητή λήψη βρίσκεται προς την πλευρά των 13.8 kV (μοντέλο ΣΑΤΥΦ με ρυθμιζόμενο ζυγό το ζυγό αγωγιμότητας), ενώ τα δεδομένα του μηχανισμού του ΣΑΤΥΦ φαίνονται στον Πίνακα 7.4.

Στον Πίνακα 7.5 παρουσιάζονται τα δεδομένα των γραμμών και των μετασχηματιστών.

Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Παράλληλο κύκλωμα	<b>R</b> (αμ)	$X(lpha\mu)$	<b>B</b> (αμ)	r
8	9	1	0.015	0.288	0.2346	-
8	9	2	0.015	0.288	0.2346	-
8	9	3	0.015	0.288	0.2346	-
8	9	4	0.015	0.288	0.2346	-
8	9	5	0.015	0.288	0.2346	-
7	8	1	0.0	0.04	0.0	-
10	11	1	0.00909	0.0303	0.0	-
4	5	1	0.0	10-5	0.0	-
7	1	1	0.0	0.02	0.0	1.08
8	2	1	0.0	0.045	0.0	1.08
9	3	1	0.0	0.0625	0.0	1.06
9	4	1	0.0	0.03	0.0	1.066
9	10	1	0.0	0.03	0.0	1.06
11	6	1	0.0	0.01	0.0	0.97478

Πίνακας 7.5: Δεδομένα γραμμών και μετασχηματιστών

Στο αρχικό λειτουργικό σημείο, ο άπειρος ζυγός και η απομακρυσμένη γεννήτρια τροφοδοτούν μέσω του ζυγού 9 την περιοχή φορτίου με 5000 MW ενεργού ισχύος (η αντίστοιχη έγχυση αέργου ισχύος είναι πρακτικά μηδενική), ενώ η υπόλοιπη ενεργός ζήτηση καλύπτεται από την τοπική σύγχρονη γεννήτρια. Όσον αφορά την τοπική άεργο ζήτηση, ικανοποιείται εξ ολοκλήρου από την προαναφερόμενη χωρητική αντιστάθμιση του οικιακού-εμπορικού φορτίου, καθώς επίσης και από τρεις συστοιχίες στατών πυκνωτών που εγκαθίστανται στους ζυγούς 4, 9 και 10 και παράγουν 1301, 868 και 300 MVAr υπό ονομαστική τάση αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της επίλυσης ροής φορτίου στο αρχικό σημείο λειτουργίας φαίνονται στον Πίνακα 7.6.

Ζυγός	Διάνυσμα Τάσης		Παραγωγή		Κατανάλωση		Εγκάρσιο Στοιχείο	
	<i>V</i> (αμ)	<b>θ</b> (°)	<b>P</b> <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVAr)	$P_L$ (MW)	$Q_L$ (MVAr)	$G_L$ (MW)	<b>B</b> <sub>L</sub> (MVAr)
1	1.02460	0.00	3565.016	624.439	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1.00780	-6.98	1500.0	15.180	0.0	0.0	0.0	0.0
3	1.01640	-21.27	1094.0	-2.350	0.0	0.0	0.0	0.0
4	1.00003	-30.15	0.0	0.0	2700.0	1401.367	0.0	1301.0
5	1.00003	-30.15	0.0	0.0	300.0	199.859	0.0	0.0
6	1.00245	-37.16	0.0	0.0	1500.0	1182.990	0.0	1177.213
7	1.09598	-3.93	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	1.09009	-10.79	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	1.07989	-25.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	868.0
10	1.01258	-30.21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	300.0
11	0.97761	-35.45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Πίνακας 7.6: Αποτελέσματα επίλυσης αρχικής ροής φορτίου

Όσον αφορά τις προσομοιώσεις που ακολουθούν, σημειώνεται ότι επειδή το χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος εκτείνεται σε μερικά δευτερόλεπτα, αμελείται η απόκριση των στροβίλων και των ρυθμιστών στροφών των σύγχρονων γεννητριών. Συνεπώς, η μηχανική ροπή εισόδου στον άξονα κάθε γεννήτριας θεωρείται ότι παραμένει σταθερή στην τιμή του αρχικού λειτουργικού σημείου.

#### 7.2 Προσομοίωση Σεναρίου Βραχυπρόθεσμης Αστάθειας Κινητήρων Επαγωγής

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται η απόκριση του δικτύου του Σχ. 7.1 στο ενδεχόμενο απώλειας μίας εκ των πέντε παράλληλων γραμμών μεταφοράς 500 kV τη χρονική στιγμή t=1 s.

Υποθέτοντας μία μάλλον αυστηρά μικρή τιμή για τη μέγιστη μεταβατική υπερδιέγερση της τοπικής γεννήτριας SG3 ( $I_{max}$ =1.9 αμ για χρονικό διάστημα 100 ms), η εξεταζόμενη διαταραχή οδηγεί το σύστημα σε βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης, σύμφωνα με την απόκριση της τάσης του ζυγού 9, η οποία φαίνεται στην καμπύλη 1 του Σχ. 7.2.



Σχ. 7.2: Απόκριση τάσης ζυγού 9 (1: Κινητήρες επαγωγής, 2: Στατικά φορτία)

Συγκεκριμένα, μετά την απώλεια της μίας διασυνδετικής γραμμής σημειώνεται πτώση των τάσεων σε όλους τους ζυγούς στην περιοχή φορτίου. Η πτώση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της αέργου υποστήριξης από τις τοπικές συστοιχίες πυκνωτών, των οποίων ως γνωστό η παραγόμενη άεργος ισχύς είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης.

Κατά συνέπεια, αυξάνεται το ρεύμα διέγερσης της τοπικής γεννήτριας SG3, προκειμένου να αποκατασταθεί το συνολικό ισοζύγιο αέργου ισχύος. Ωστόσο, όπως φαίνεται από την καμπύλη 1 του Σχ. 7.3, η αύξηση του ρεύματος πεδίου είναι τόσο μεγάλη, ώστε προκαλείται μεταβατική υπερδιέγερση της γεννήτριας.



Σχ. 7.3: Ρεύμα πεδίου τοπικής γεννήτριας SG3 (1: Κινητήρες επαγωγής, 2: Στατικά φορτία)

Ακολούθως, ο μεταβατικός περιορισμός του εξεταζόμενου ρεύματος πεδίου στη μέγιστη μεταβατική του τιμή τη χρονική στιγμή t=1.1491 s προκαλεί εκ νέου πτώση των τάσεων στην τοπική περιοχή, η οποία οδηγεί τους κινητήρες επαγωγής των φορτίων σε βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης. Στην περίπτωση αυτή, η αστάθεια των κινητήρων εκδηλώνεται λόγω της μείωσης της τάσης του στάτη κάθε κινητήρα, η οποία έχει ως αποτέλεσμα η εξαρτώμενη από το τετράγωνο του μέτρου της τάσης μέγιστη (επιταχύνουσα) ηλεκτρομαγνητική ροπή να γίνει κατ' απόλυτη τιμή μικρότερη από τη(ν) (επιβραδύνουσα) ροπή του αντίστοιχου μηχανικού φορτίου. Έτσι, και για τους τρεις ισοδύναμους κινητήρες η εξίσωση ισορροπίας του δρομέα δεν παρουσιάζει λύση, με συνέπεια την επιβράδυνσή τους, όπως φαίνεται στο Σχ. 7.4-(β).



Σχ. 7.4: (α): Γωνία δρομέα σύγχρονων γεννητριών, (β) Ταχύτητα δρομέα ασύγχρονων κινητήρων

Σύμφωνα με την καμπύλη 1 του Σχ. 7.2, η εμφανιζόμενη αστάθεια τάσης καταλήγει τελικά σε κατάρρευση. Η προσομοίωση τερματίζεται τη χρονική στιγμή *t*=7.2538 s, λόγω μη αποδεκτής τερματικής τάσης στην τοπική γεννήτρια SG3 (0.5 αμ).

Συμπερασματικά, και σε αυτήν την περίπτωση το πρωταρχικό αίτιο για την εκδήλωση της αστάθειας είναι ο μεταβατικός περιορισμός του ρεύματος διέγερσης της τοπικής γεννήτριας SG3. Εντούτοις, ο κυρίαρχος ρόλος των ασύγχρονων κινητήρων στην εμφανιζόμενη αστάθεια αποδεικνύεται από τις καμπύλες 2 των Σχ. 7.2 και Σχ. 7.3, όπου το εξεταζόμενο δίκτυο προσομοιώνεται εκ νέου αντικαθιστώντας τους κινητήρες από ισοδύναμα στατικά φορτία, των οποίων τόσο η ενεργός όσο και η άεργος κατανάλωση εξαρτώνται εκθετικά από το μέτρο της τάσης με εκθέτες ίσους με 0 και 1.5, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι παρά το γεγονός ότι το θεωρούμενο μοντέλο εκθετικού φορτίου αποτελεί έναν ιδιαίτερα απαιτητικό τύπο φορτίου, το δίκτυο αποκρίνεται ευσταθώς στην εξεταζόμενη διαταραχή. Ειδικότερα, από την καμπύλη 2 του Σχ. 7.3 παρατηρείται ότι στην περίπτωση των στατικών φορτίων, ο μεταβατικός περιορισμός υπερδιέγερσης της τοπικής γεννήτριας δεν προκαλεί κανένα πρόβλημα αστάθειας στην απόκριση του δικτύου.

Λαμβάνοντας υπόψη τις αποκρίσεις του Σχ. 7.4, ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην εξεταζόμενη περίπτωση παρουσιάζει το γεγονός ότι στην τελική έκβαση του εμφανιζόμενου σεναρίου αστάθειας, συμβαίνουν σχεδόν ταυτόχρονα η επιβράδυνση των κινητήρων επαγωγής και ο αποσυγχρονισμός της τοπικής γεννήτριας SG3. Οπότε, δεν είναι εύκολο να διακριθεί με μία πρόχειρη ανάλυση εάν η θεωρούμενη βραχυπρόθεσμη αστάθεια προκλήθηκε από την αστάθεια γωνίας της σύγχρονης γεννήτριας ή την αστάθειας τάσης των ασύγχρονων μηχανών.

Για το λόγο αυτό, ο διαχωρισμός των φαινομένων αστάθειας στην περίπτωση αυτή, θα γίνει στις ακόλουθες δύο ενότητες με τη βοήθεια της παρακολούθησης των ρυθμών του συστήματος και της ανάλυσης των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων, χρησιμοποιώντας τη ρουτίνα γραμμικοποίησης κατά την προσομοίωση του λογισμικού πακέτου WHSSP.

## 7.3 Ανάλυση Ρυθμών

### 7.3.1 Προσδιορισμός διακλάδωσης σαγματικού κόμβου

Όπως διαπιστώθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η αστάθεια προκλήθηκε από τον μεταβατικό περιορισμό υπερδιέγερσης της τοπικής γεννήτριας. Στην παρούσα ενότητα, πραγματοποιείται μία λεπτομερής διερεύνηση αυτού του πρωταρχικού αιτίου της εμφανιζόμενης αστάθειας. Για το λόγο αυτό, μεταβάλλεται η μέγιστη μεταβατική τιμή του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας SG3, υπό την προϋπόθεση ωστόσο ότι το δίκτυο επιτυγχάνει ευσταθές σημείο ισορροπίας μετά τη διαταραχή και τον μεταβατικό περιορισμό υπερδιέγερσης της θεωρούμενης γεννήτριας. Στη συνέχεια, το σύστημα γραμμικοποιείται γύρω από το τελικό σημείο ισορροπίας και υπολογίζονται οι αντίστοιχες ιδιοτιμές.

Στο Σχ. 7.5 παρουσιάζεται η εξέλιξη της αλγεβρικά μεγαλύτερης (πλησιέστερης στο μηδέν) πραγματικής ιδιοτιμής (δηλαδή της κρίσιμης ιδιοτιμής) συναρτήσει της μέγιστης μεταβατικής τιμής του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας SG3.



Σχ. 7.5: Κρίσιμη ιδιοτιμή συναρτήσει της μέγιστης μεταβατικής τιμής του ρεύματος πεδίου της τοπικής γεννήτριας

Από το Σχ. 7.5 παρατηρείται ότι εάν η τιμή  $I_{max}$  είναι αρκετά μεγάλη, διασφαλίζεται η ευστάθεια του συστήματος. Καθώς η μέγιστη μεταβατική τιμή του θεωρούμενου ρεύματος πεδίου μειώνεται, η κρίσιμη ιδιοτιμή του γραμμικοποιημένου συστήματος μετακινείται προς το δεξί ημιεπίπεδο, δηλαδή το μη γραμμικό σύστημα οδηγείται σε μία διακλάδωση σαγματικού κόμβου, η οποία χαρακτηρίζεται από την απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας μετά την εξεταζόμενη διαταραχή.

Σημειώνεται ότι η τελευταία τιμή της κρίσιμης ιδιοτιμής λίγο πριν τη διακλάδωση σαγματικού κόμβου είναι ίση με -0.024 και αντιστοιχεί σε μέγιστη μεταβατική τιμή  $I_{max}$  του ρεύματος πεδίου ίση με 1.9241 αμ. Αυτό σημαίνει ότι εάν η τιμή του  $I_{max}$  μειωθεί ελαφρώς (για παράδειγμα εάν  $I_{max}$ =1.924 αμ), το σύστημα θα υποπέσει σε αστάθεια, αφού το σημείο ισορροπίας μετά τη διαταραχή θα εξαφανιστεί.

Είναι σαφές ότι η παραπάνω κρίσιμη πραγματική ιδιοτιμή αντιστοιχεί σε έναν απεριοδικό ρυθμό απόκρισης του συστήματος, για τον χαρακτηρισμό του οποίου θα χρησιμοποιηθεί η ανάλυση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων.

#### 7.3.2 Ανάλυση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων

Η ανάλυση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων για το βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας στην περίπτωση κατά την οποία η μέγιστη μεταβατική τιμή του ρεύματος πεδίου της τοπικής γεννήτριας είναι ίση με 1.95 αμ συνοψίζεται στον Πίνακα 7.7, όπου φαίνονται οι ιδιοτιμές, οι κυρίαρχες μεταβλητές κατάστασης με τα αντίστοιχα στοιχεία των δεξιών ιδιοδιανυσμάτων, αλλά και οι αντίστοιχοι συντελεστές συμμετοχής.

Από το συνολικό πλήθος των ιδιοτιμών, σημειώνεται ότι δέκα σχετίζονται με τις σύγχρονες μηχανές SG2 και SG3, και αντιστοιχούν σε τέσσερις ρυθμούς ταλάντωσης και δύο απεριοδικούς ρυθμούς. Οι

υπόλοιπες εννέα ιδιοτιμές αναφέρονται στους κινητήρες επαγωγής και αντιστοιχούν σε τρεις ταλαντωτικούς και τρεις απεριοδικούς ρυθμούς.

α/α	Ιδιοτιμές	Μεταβλητή	Δεξί Ιδιοδιάνυσμα		Συντελεστής	<b>Χαραισποισμός Ρυθμού</b>	
		Κατάστασης	Πλάτος	Γωνία	Συμμετοχής	Χαρακτηριομος Ι σομου	
	6 805	$E'_{qSG2}$	0.0000	-60.3	-		
1	-0.895	$E_{fSG2}$	0.0008	70.7	-	Ρυθμός διέγερσης τοπικής	
1	⊥ i 110.885	$\dot{E_{qSG3}}$	0.0021	-10.8	0.999	σύγχρονης γεννήτριας	
	J 110.885	$E_{fSG3}$	1.0000	82.1	1.000		
	-41.851	S <sub>IM3</sub>	0.0010	163.8	0.345	Ρυθμός ταλάντωσης μαγνητικής	
2	±	$E_{dIM3}$	0.0196	-94.7	1.000	ροής οικιακού-εμπορικού	
	j 35.762	E qIM3	0.0159	-14.7	0.996	κινητήρα	
		S <sub>IM1</sub>	0.0012	131.4	-		
	-13 437	$E_{dM1}$	0.0127	-118.7	-	Ρυθμός ταλάντωσης	
3	+	$E_{qIM1}$	0.0082	-94.0	-	αλληλεπίδοασης βιομηγανικών	
5	i 24 444	SIM2	0.0204	-44.9	1.000	κινητήσων	
	521.111	$E_{,dIM2}$	0.2072	57.1	0.546		
		$E_{qIM2}$	0.1639	87.8	0.625		
		S <sub>IM1</sub>	0.0009	180.0	-		
			0.0504	0.0	-	Ρυθμός αλληλεπίδρασης	
4	-20.671	$E_{qIM1}$	0.0335	180.0	-	μαγνητικής ροής βιομηχανικών	
-		S <sub>IM2</sub>	0.0300	0.0	0.218	κινητήρων	
		$E_{dIM2}$	1.0000	180.0	1.000		
		E qIM2	0.4928	0.0	0.849		
	-0.934	O <sub>SG2</sub>	0.0869	-/5.5	0.998	Ρυθμός ηλεκτρομηχανικής	
5	±	$\omega_{rSG2}$	0.0029	18.8	1.000	ταλάντωσης μεταξύ των	
_	j 12.429	OSG3	0.0154	108.7	-	σύγχρονων γεννητριών	
	-	W <sub>rSG3</sub>	0.0003	-137.0	-		
		SIMI E	0.0011	-35.2	0.973		
	-5.094	$E_{dIM1}$	0.0222	52.1 74.0	0.303	Κοιμός ουθμός ταλάμτωσης	
6	<u>+</u>	$E_{qIM1}$	0.0219	/4.9	1.000	βιουπταμικών ταλαντωσης	
	j 12.168	E we	0.0000	21.2	-	ριομηχανικών κινητηρών	
		E dIM2 E' nro	0.0200	77.6	-		
		E qIM2	0.0105	0.0	1 000		
7	-14.634	E	0.0748	180.0	-	Ρυθμός ολίσθησης	
,		$E_{alM3}$	0.0068	180.0	-	οικιακού-εμπορικού κινητήρα	
	1.155	dsc2	0.0106	-72.9	-		
0	-1.177	$\omega_{rSG2}$	0.0002	26.7	-	Κοινός ρυθμός	
8	±	$\delta_{SG3}$	0.0651	-64.9	0.992	ηλεκτρομηχανικης ταλαντωσης	
	J 6.985	$\omega_{rSG3}$	0.0012	34.6	1.000	συγχρονων γεννητριων	
	5.540	$E'_{aSG2}$	0.0289	33.3	0.976	D. 0. / 5./	
0	-3.340	$E_{fSG2}$	1.0000	160.5	1.000	Ρυθμος διεγερσης	
9	$\pm$	$E^{'}_{qSG3}$	0.0048	-29.3	-	απομακρυομένης συγχρονης	
	J 0.093	$E_{fSG3}$	0.1747	100.4	-	γεννητριας	
		E <sub>dSG2</sub>	0.1077	180.0	1.000	Ρυθμός τυλίνματος απόσβεσης	
10	-2.721	$\dot{E_{qSG2}}$	0.0971	0.0	0.445	ε στομακουσμέτης αποσρεσης	
		$E_{fSG2}$	1.0000	180.0	0.150	απομακροσμένης γεννητρίας	
	-0.924	S <sub>IM1</sub>	0.0049	0.0	0.284		
11		$E_{dIM1}$	0.2873	180.0	1.000		
		$E_{qIM1}$	0.0731	0.0	0.292	Κοινός ρυθμός μαγνητικής ροής	
	0.744	S <sub>IM2</sub>	0.0075	0.0	-	βιομηχανικών κινητήρων	
		$E_{dIM2}$	0.2654	180.0	-		
		$E_{qIM2}$	0.0664	0.0	-		
10	2.6.12	E <sub>dSG3</sub>	0.1020	0.0	1.000	Ρυθμός τυλίγματος απόσβεσης	
12	-3.943	$E_{qSG3}$	0.0604	180.0	-	τοπικής γεννήτριας	
		$E_{fSG3}$	1.0000	0.0	-	12 / 20 / 20 / 20 / 20 / 20 / 20 / 20 /	

Πίνακας 7.7: Ανάλυση ρυθμών συστήματος για Ι<sub>max</sub>=1.95 αμ

Ο χαρακτηρισμός των ρυθμών στον Πίνακα 7.7 στηρίζεται στη σχετική γωνία των κυρίαρχων στοιχείων του δεξιού ιδιοδιανύσματος, καθώς επίσης και στο μέτρο των αντιστοίχων συντελεστών συμμετοχής.

Στο σημείο αυτό, υπενθυμίζεται ότι οι ρυθμοί απόκρισης των συστημάτων με πολλές σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές διαχωρίζονται σε [Nom05]:

 Κοινούς ρυθμούς, στους οποίους οι αντίστοιχες μεταβλητές κατάστασης διαφορετικών μηχανών αποκρίνονται εν φάση.  Ρυθμούς αλληλεπίδρασης, όπου οι σχετικές μεταβλητές κατάστασης διαφορετικών μηχανών αποκρίνονται σε αντίθετες κατευθύνσεις, όπως είναι για παράδειγμα η διαφορά φάσης 180<sup>0</sup>.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 7.7, οι δύο βιομηχανικοί κινητήρες παρουσιάζουν δυναμική συμπεριφορά όμοια με την αντίστοιχη των μεγάλων μηχανών επαγωγής, δηλαδή εμφανίζουν μία ταλαντωτική απόκριση που περιλαμβάνει την ολίσθηση και τη γωνία του διανύσματος της εσωτερικής ΗΕΔ, καθώς επίσης και έναν απεριοδικό ρυθμό που αντιστοιχεί στη μαγνητική ροή (βλ. ενότητα 5.3). Το συμπέρασμα αυτό είναι ευδιάκριτο από τους συντελεστές συμμετοχής των ρυθμών 3 και 6, όπου η ολίσθηση και η μεταβατική ΗΕΔ κατά τον εγκάρσιο μαγνητικό άξονα αποτελούν τις κυρίαρχες μεταβλητές κατάστασης, αλλά και από τις απεριοδικές αποκρίσεις, οι οποίες εκφράζονται από τις πραγματικές ιδιοτιμές 4 και 11 και σχετίζονται με τη μεταβατική ΗΕΔ κατά τον ευθύ μαγνητικό άξονα κάθε βιομηχανικού κινητήρα.

Από την άλλη πλευρά, οι ρυθμοί απόκρισης του κινητήρα του οικιακού-εμπορικού φορτίου αντιστοιχούν στη δυναμική απόκριση μικρών ασύγχρονων μηχανών. Αυτό σημαίνει ότι ο εξεταζόμενος κινητήρας παρουσιάζει μία ταλαντωτική συμπεριφορά μεταξύ των ηλεκτρικών μεταβλητών κατάστασης των τυλιγμάτων του δρομέα, ενώ η απόκριση της ταχύτητας του δρομέα είναι σχετικά βραδύτερη και απεριοδική (ρυθμοί 2 και 7).

Βάσει του Πίνακα 7.7, σημειώνεται ότι η αλγεβρικά μεγαλύτερη ιδιοτιμή 11, η οποία βρίσκεται πλησιέστερα στο δεξί ημιεπίπεδο, είναι η κρίσιμη ιδιοτιμή και αντιστοιχεί στον κοινό ρυθμό μαγνητικής ροής των δύο βιομηχανικών κινητήρων. Αυτό φανερώνει ότι ο κινητήριος μηχανισμός της αστάθειας είναι οι βιομηχανικοί κινητήρες.

Επίσης, παρατηρείται ότι οι κοινοί ρυθμοί (απεριοδικός ρυθμός και ρυθμός ταλάντωσης) των δύο βιομηχανικών κινητήρων επηρεάζουν κυρίως το μεγαλύτερο κινητήρα. Αντίθετα, οι αντίστοιχοι ρυθμοί αλληλεπίδρασης εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στο μικρότερο κινητήρα.

Όσον αφορά τις σύγχρονες μηχανές του συστήματος, παρατηρείται ότι η συχνότητα ταλάντωσης του ρυθμού διέγερσης της τοπικής γεννήτριας (ρυθμός 1) είναι αρκετά μεγάλη (~ 17.65 Hz).

Επίσης, ο ρυθμός αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης μεταξύ των δύο σύγχρονων γεννητριών SG2-SG3 (ρυθμός 5) έχει σημαντικά μικρότερη απόσβεση από τον αντίστοιχο κοινό ρυθμό (ρυθμός 8).

Ειδικότερα, ο κοινός ρυθμός ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης των σύγχρονων γεννητριών (ρυθμός 8) εμφανίζεται περισσότερο στην τοπική γεννήτρια SG3, η οποία είναι περισσότερο απομακρυσμένη από τον άπειρο ζυγό σε σχέση με τη γεννήτρια SG2. Από την άλλη πλευρά, ο ρυθμός ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης μεταξύ των γεννητριών SG2-SG3 (ρυθμός 5) επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τη γεννήτρια SG2.

## 7.4 Εξέλιξη Ιδιοτιμών και Ιδιοδιανυσμάτων

#### 7.4.1 Αστάθεια κινητήρων επαγωγής

Στο Σχ. 7.6 φαίνεται η εξέλιξη της κυρίαρχης (κρίσιμης) πραγματικής ιδιοτιμής του εξεταζόμενου δικτύου για το σενάριο αστάθειας που αναλύθηκε στην ενότητα 7.2.

Η εξεταζόμενη ιδιοτιμή εμφανίζεται για πρώτη φορά τη χρονική στιγμή του μεταβατικού περιορισμού υπερδιέγερσης της τοπικής γεννήτριας (t=1.1491 s) και αυξάνεται με ταλαντώσεις κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Οι ταλαντώσεις αυτές οφείλονται στην επίδραση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων στο υπό περιορισμό ρεύμα διέγερσης. Όπως εξηγήθηκε κατά την ανάλυση των ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων της παραγράφου 7.3.2, η θεωρούμενη ιδιοτιμή αντιστοιχεί στον κοινό ρυθμό μαγνητικής ροής των δύο βιομηχανικών κινητήρων.

Στον Πίνακα 7.8, φαίνονται τα κυρίαρχα στοιχεία του δεξιού ιδιοδιανύσματος και των συντελεστών συμμετοχής για την παραπάνω κρίσιμη ιδιοτιμή τη χρονική στιγμή *t*=3.5211 s, κατά την οποία η ιδιοτιμή αυτή γίνεται για πρώτη φορά θετική.

Από τα στοιχεία του δεξιού ιδιοδιανύσματος του Πίνακα 7.8, επιβεβαιώνεται καταρχήν ότι η εξεταζόμενη ιδιοτιμή αντιστοιχεί στον κοινό ρυθμό μαγνητικής ροής των δύο βιομηχανικών κινητήρων. Επίσης, στον εξεταζόμενο ρυθμό φαίνεται να συμμετέχουν τόσο η μεταβατική ΗΕΔ κατά
τον ευθύ μαγνητικό άξονα του τρίτου κινητήρα, όσο και η μεταβατική ΗΕΔ κατά τον εγκάρσιο μαγνητικό άξονα και η τάση διέγερσης των δύο σύγχρονων μηχανών. Ειδικότερα για τις σύγχρονες μηχανές, αξίζει να σημειωθεί ότι η γεννήτρια SG2 που είναι πιο μακριά από το φορτίο φαίνεται να συμμετέχει περισσότερο στην απόκριση του θεωρούμενου ρυθμού σε σχέση με την τοπική γεννήτρια, επειδή στην πρώτη μηχανή η ρύθμιση της τάσεως είναι σε λειτουργία και έτσι αναλαμβάνει την άεργο υποστήριξη του συστήματος.



Σχ. 7.6: Εξέλιζη κρίσιμης πραγματικής ιδιοτιμής

Οι τιμές των συντελεστών συμμετοχής του Πίνακα 7.8 οδηγούν στο συμπέρασμα ότι από τη χρονική στιγμή μηδενισμού της κυρίαρχης κρίσιμης ιδιοτιμής και μετά, πρώτος ο μεγαλύτερος βιομηχανικός κινητήρας απομαγνητίζεται και επιβραδύνεται.

Μηχανή	Μεταβλητή Δεξί Ιδιοδιάνυσμα		οδιάνυσμα	Συντελεστής
	Κατάστασης	Μέτρο	Γωνία	Συμμετοχής
SG2	$E'_q$	0.3398	180.0	0.329
	$E_f$	1.0000	180.0	-
SG3	$E_{q}$	0.3642	0.0	-
	$E_f$	0.0152	180.0	-
IM1	S	0.0070	180.0	0.395
	$E_{d}$	0.3402	0.0	1.000
	$E_{q}$	0.0870	180.0	0.291
IM2	S	0.0105	180.0	-
	$E_{d}$	0.3199	0.0	-
	$E_{q}$	0.0829	180.0	-
IM3	S	0.0343	180.0	0.304
	$\vec{E_d}$	0.2854	0.0	-
	$E_{q}$	0.1127	180.0	-

Πίνακας 7.8: Δεζί ιδιοδιάνυσμα και συντελεστές συμμετοχής κατά την εζέλιζη της κρίσιμης ιδιοτιμής (t=3.5211 s)

Συμπερασματικά, στην εξεταζόμενη περίπτωση η αστάθεια στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα εκδηλώνεται αρχικά στο μεγαλύτερο βιομηχανικό κινητήρα ως αστάθεια τάσης. Η αδυναμία αποκατάστασης σημείου ισορροπίας συμπαρασύρει και τους άλλους δύο κινητήρες στην αστάθεια τάσης. Στη συνέχεια, η εξέλιξη του φαινομένου οδηγεί την τοπική σύγχρονη γεννήτρια σε αστάθεια γωνίας, με τελική κατάληξη τον αποσυγχρονισμό της από το δίκτυο, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια.

#### 7.4.2 Αποσυγχρονισμός σύγχρονων γεννητριών

Στο παρόν εδάφιο, η παρακολούθηση της εξέλιξης των ιδιοτιμών χρησιμοποιείται για να κατανοηθεί ο μηχανισμός εκδήλωσης της αστάθειας γωνίας της τοπικής γεννήτριας, η οποία καταλήγει στον αποσυγχρονισμό της μηχανής. Στο Σχ. 7.7 παρουσιάζεται στο μιγαδικό επίπεδο η εξέλιξη της ιδιοτιμής που αντιστοιχεί στην αστάθεια γωνίας της τοπικής γεννήτριας για το χρονικό διάστημα μεταξύ t=7.08 s και t=7.12 s. Σημειώνεται ότι στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ο κρίσιμος ρυθμός είναι ήδη στο δεξί ημιεπίπεδο (τιμή ελαφρώς μεγαλύτερη από τα 4 s<sup>-1</sup>), όπως φαίνεται στο Σχ. 7.6.



Σχ. 7.7: Γεωμετρικός τόπος ριζών από t=7.08 s έως t=7.12 s στο εξεταζόμενο σενάριο αστάθειας

Ο παραπάνω γεωμετρικός τόπος ριζών περιέχει τρεις ιδιοτιμές, οι οποίες εμφανίζονται είτε σαν ένα μιγαδικό ζευγάρι με μία πραγματική ή σαν τρεις πραγματικές. Στο αρχικό σημείο του γεωμετρικού τόπου (t=7.08 s), το μιγαδικό ζευγάρι των ιδιοτιμών αντιστοιχεί στον κοινό ρυθμό της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης των δύο σύγχρονων γεννητριών, του οποίου η συχνότητα έχει ήδη μειωθεί πάρα πολύ σε σχέση με τον Πίνακα 7.7. Στο ίδιο σημείο η πραγματική ιδιοτιμή αντιπροσωπεύει τον απεριοδικό άξονα σε σχέση με τον Πίνακα 7.7.

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, το μιγαδικό ζευγάρι κινείται προς τον πραγματικό άξονα διατηρώντας το πραγματικό του μέρος σχεδόν σταθερό, ενώ η πραγματική ιδιοτιμή μετακινείται προς τα δεξιά. Οι κινήσεις αυτές των ιδιοτιμών, οι οποίες αντιστοιχούν σε μείωση της συχνότητας της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης και σε επιβράδυνση της απόκρισης του ρυθμού ολίσθησης του οικιακού-εμπορικού κινητήρα, οφείλονται στην αστάθεια που έχει ήδη εκδηλωθεί στους βιομηχανικούς κινητήρες.

Τη χρονική στιγμή *t*=7.0879 s, το ζεύγος των μιγαδικών ιδιοτιμών συναντάει τον πραγματικό άξονα και διαχωρίζεται σε δύο πραγματικές ιδιοτιμές, οι οποίες κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις. Τη χρονική αυτή στιγμή, η τοπική σύγχρονη γεννήτρια χάνει το συγχρονισμό της με το δίκτυο, καθώς ο ισοδύναμος συντελεστής συγχρονισμού γίνεται μηδενικός.

Μετά τον αποσυγχρονισμό της τοπικής γεννήτριας, η μία πραγματική ιδιοτιμή περνάει στο δεξί ημιεπίπεδο τη χρονική στιγμή t=7.1075 s και αντιστοιχεί στην απεριοδική αστάθεια της γωνίας του δρομέα της θεωρούμενης μηχανής, ενώ η άλλη ιδιοτιμή αλληλεπιδρά με αυτήν της ολίσθησης του οικιακού-εμπορικού κινητήρα και γίνεται μιγαδική.

Επομένως, στη διαδοχή των φαινομένων αστάθειας που εκδηλώνονται στην εξεταζόμενη περίπτωση, είναι φανερό ότι προηγείται η αστάθεια και επιβράδυνση των κινητήρων επαγωγής, για να ακολουθήσει ύστερα από χρονικό διάστημα 3-4 δευτερολέπτων ο αποσυγχρονισμός της τοπικής γεννήτριας.

## 7.5 Μέτρα Αντιμετώπισης Βραχυπρόθεσμης Αστάθειας Κινητήρων Επαγωγής

Η ανάλυση ρυθμών και η ανίχνευση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων που προηγήθηκαν, βοήθησαν στο να γίνουν κατανοητές η διάκριση και η χρονική αλληλουχία μεταξύ των φαινομένων της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης των κινητήρων επαγωγής και της αστάθειας γωνίας της τοπικής σύγχρονης γεννήτριας που παρατηρήθηκαν στο εξεταζόμενο δίκτυο του Σχ. 7.1 μετά την απώλεια της μίας γραμμής των 500 kV.

Συγκεκριμένα, αποδείχθηκε ότι ο μεταβατικός περιορισμός στην υπερδιέγερση της τοπικής γεννήτριας μετά την απώλεια της παραπάνω γραμμής προκάλεσε τη βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης των κινητήρων, η επιβράδυνση των οποίων οδήγησε την τοπική γεννήτρια σε αστάθεια γωνίας και τελικά σε αποσυγχρονισμό από το δίκτυο. Επομένως, αναδείχθηκε ο κυρίαρχος ρόλος των μηχανών επαγωγής ως κινητήριας δύναμης στο εμφανιζόμενο σενάριο αστάθειας.

Στηριζόμενοι στα συμπεράσματα αυτά, προτείνονται στη συνέχεια δύο μέτρα για την αντιμετώπιση της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης των κινητήρων. Το πρώτο μέτρο αναφέρεται στην αποσύνδεση του μικρού βιομηχανικού κινητήρα από το δίκτυο μέσω ηλεκτρονόμου υποτάσεως. Στη δεύτερη περίπτωση, η αστάθεια αποτρέπεται με την εγκατάσταση ενός στατού συστήματος αέργου αντιστάθμισης (SVC) στο ζυγό άφιξης των πέντε παραλλήλων γραμμών στο επίπεδο των 500 kV.

#### 7.5.1 Προστασία υποτάσεως βιομηχανικού κινητήρα

Στην παρούσα παράγραφο, εξετάζεται η απόκριση του δικτύου στην περίπτωση κατά την οποία ο μικρός βιομηχανικός κινητήρας εξοπλιστεί με έναν ηλεκτρονόμο υποτάσεως, ο οποίος θέτει τον θεωρούμενο κινητήρα εκτός λειτουργίας, όταν η τερματική του τάση πέσει κάτω από την οριακή τιμή 0.9 αμ για χρονικό διάστημα μερικών δευτερολέπτων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης του εξεταζόμενου ηλεκτρονόμου υποτάσεως δεν θα πρέπει να υπερβαίνει μία κρίσιμη τιμή, διότι από τη χρονική στιγμή αυτή και μετά οι υπόλοιποι κινητήρες που θα παραμείνουν σε λειτουργία, θα βρεθούν εκτός της περιοχής έλξης του ευσταθούς σημείου ισορροπίας τους μετά την αποκοπή του μικρότερου βιομηχανικού κινητήρα.

Ο κρίσιμος χρόνος αποκοπής του μικρού βιομηχανικού κινητήρα από το δίκτυο υπολογίζεται κατόπιν διαδοχικών προσομοιώσεων, οι οποίες συνοψίζονται στα Σχ. 7.8 έως Σχ. 7.10. Οι συνεχείς καμπύλες 1 των σχημάτων αυτών αντιστοιχούν στο ευσταθές σενάριο, κατά το οποίο η χρονική καθυστέρηση αποσύνδεσης του μικρού βιομηχανικού κινητήρα από το δίκτυο ισούται με τον κρίσιμο χρόνο αποκοπής που είναι 3.54 s. Αντίθετα, εάν η θεωρούμενη χρονική καθυστέρηση υποτεθεί ίση με 3.55 s (δηλαδή 10 ms μεγαλύτερη του κρίσιμου χρόνου αποκοπής), η απόκριση του εξεταζόμενου δικτύου γίνεται ασταθής, όπως φαίνεται από τις εστιγμένες καμπύλες 2.

Συγκεκριμένα, στις τέσσερις γραφικές παραστάσεις του Σχ. 7.8 φαίνονται οι αποκρίσεις των τάσεων στους τερματικούς ζυγούς της απομακρυσμένης και της τοπικής σύγχρονης γεννήτριας, καθώς επίσης και των τάσεων στους ζυγούς του βιομηχανικού και του οικιακού-εμπορικού φορτίου, αντίστοιχα.

Όσον αφορά το ευσταθές σενάριο (συνεχείς καμπύλες 1), η αποσύνδεση του μικρού βιομηχανικού κινητήρα από το δίκτυο πραγματοποιείται τη χρονική στιγμή *t*=6.6834 s, προκαλώντας μείωση της συνολικής ενεργού και αέργου ζήτησης. Κατά συνέπεια, αποκαθίστανται οι τάσεις στην τοπική περιοχή των φορτίων και το δίκτυο καταλήγει σε ευσταθές σημείο ισορροπίας μετά την απώλεια της γραμμής των 500 kV και την αποκοπή του μικρού βιομηχανικού κινητήρα.

Σύμφωνα με το Σχ. 7.9, το ρεύμα διέγερσης της τοπικής γεννήτριας SG3 στην περίπτωση της έγκαιρης αποσύνδεσης του μικρού βιομηχανικού κινητήρα μειώνεται κάτω από τη μέγιστη μεταβατική του τιμή. Επομένως, η μεταβατική βαθμίδα του αντιστοίχου ΣΠΥ απενεργοποιείται τη χρονική στιγμή *t*=9.7283 s, οδηγώντας σε περαιτέρω μείωση το εξεταζόμενο ρεύμα διέγερσης.



Σχ. 7.8: (α,β) Τερματικές τάσεις γεννητριών, (γ,δ) Τάσεις ζυγών φορτίων (προστασία υποτάσεως μικρού βιομηχανικού κινητήρα)

Οι γωνίες δρομέα των δύο σύγχρονων γεννητριών και οι ταχύτητες των δύο κινητήρων που παραμένουν συνδεδεμένοι στο δίκτυο μετά τη διαταραχή φαίνονται στις καμπύλες του Σχ. 7.10.



Σχ. 7.9: Ρεύμα πεδίου τοπικής γεννήτριας SG3 (προστασία υποτάσεως μικρού βιομηχανικού κινητήρα)

Λαμβάνοντας υπόψη τις αποκρίσεις του Σχ. 7.10, επιβεβαιώνεται το προαναφερθέν συμπέρασμα σύμφωνα με το οποίο εάν η χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου υποτάσεως στο μικρό βιομηχανικό κινητήρα υπερβεί τον κρίσιμο χρόνο αποκοπής, οι υπόλοιποι δύο σύγχρονοι κινητήρες οδηγούνται σε βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης. Η αστάθεια αυτή οφείλεται στην αδυναμία των κινητήρων αυτών να προσεγγίσουν το βραχυπρόθεσμο ευσταθές σημείο ισορροπίας τους μετά τη διαταραχή και καταλήγει στον αποσυγχρονισμό της τοπικής σύγχρονης γεννήτριας.



**Σχ. 7.10:** (α,β) Γωνία δρομέα σύγχρονων γεννητριών, (γ,δ) Ταχύτητα δρομέα κινητήρων επαγωγής (προστασία υποτάσεως μικρού βιομηχανικού κινητήρα)

#### 7.5.2 Εγκατάσταση στατών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης (SVC)

Στην περίπτωση κατά την οποία είναι επιθυμητό η αντιμετώπιση της εμφανιζόμενης αστάθειας να γίνεται χωρίς απόρριψη φορτίου, θα πρέπει το σύστημα να ενισχυθεί μέσω δυναμικής αέργου αντιστάθμισης κοντά στο βιομηχανικό φορτίο.

Ένα τέτοιο σενάριο ενίσχυσης είναι η εγκατάσταση ενός στατού συστήματος αέργου αντιστάθμισης (SVC) στο ζυγό του βιομηχανικού φορτίου (ζυγός 4), καθώς από την ανάλυση των ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων που προηγήθηκε, αποδείχθηκε ότι η δυναμική των δύο βιομηχανικών κινητήρων συμβάλλει κατά κύριο λόγο στην εκδήλωση της εμφανίζόμενης αστάθειας. Η μέγιστη χωρητική αγωγιμότητα του στατού συστήματος αέργου αντιστάθμισης ανέρχεται στα 300 MVAr υπό ονομαστική τών 200 ms. Η τάση αναφοράς ( $K_{svc}$ ) είναι ίσο με 25 και η χρονική σταθερά ( $T_{svc}$ ) είναι της τάξεως των 200 ms. Η τάση αναφοράς ( $V_{ref}$ ) για την οποία δεν απαιτείται άεργος αντιστάθμιση ( $B_{svc}$  =0) θεωρείται ίση με την αρχική τάση του ζυγού του βιομηχανικού φορτίου όπου εγκαθίσταται το θεωρούμενο σύστημα.

Στις τέσσερις γραφικές παραστάσεις του Σχ. 7.11 φαίνονται για το προαναφερόμενο σενάριο ενίσχυσης του δικτύου οι αποκρίσεις των τάσεων στους τερματικούς ζυγούς της απομακρυσμένης και της τοπικής σύγχρονης γεννήτριας, καθώς επίσης και των τάσεων στους ζυγούς του βιομηχανικού και του οικιακού-εμπορικού φορτίου αντίστοιχα, στο ενδεχόμενο απώλειας της μίας διασυνδετικής γραμμής των 500 kV. Υπενθυμίζεται ότι η εξεταζόμενη διαταραχή προκαλούσε αστάθεια χωρίς την εγκατάσταση SVC.

Σύμφωνα με τις αποκρίσεις των τάσεων του Σχ. 7.11, διαπιστώνεται ότι η προσθήκη του στατού συστήματος αέργου αντιστάθμισης δρα ευεργετικά ως προς την ευστάθεια του εξεταζόμενου συστήματος στο ενδεχόμενο απώλειας της μίας διασυνδετικής γραμμής των 500 kV. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η γρήγορη δυναμική άεργος αντιστάθμιση βοηθάει στην έγκαιρη αποκατάσταση των τάσεων στους ζυγούς των φορτίων, με αποτέλεσμα την επίτευξη ευσταθούς σημείου ισορροπίας μετά τη διαταραχή.



Σχ. 7.11: (α,β) Τερματικές τάσεις γεννητριών, (γ,δ) Τάσεις ζυγών φορτίων (με στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης)

Στη γραφική παράσταση του Σχ. 7.12 παρουσιάζεται η απόκριση του ρεύματος πεδίου της τοπικής γεννήτριας, στην οποία φαίνεται ότι η υπόψη γεννήτρια οδηγείται σε μεταβατικό περιορισμό υπερδιέγερσης (χρονική στιγμή t=1.1520 s) μετά την απώλεια της διασυνδετικής γραμμής. Ωστόσο, η άεργος υποστήριξη που προσφέρει το στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης στο ζυγό του βιομηχανικού φορτίου συμβάλλει στην αποδιέγερση της θεωρούμενης μηχανής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την απενεργοποίηση της μεταβατικής βαθμίδας του αντιστοίχου ΣΠΥ (χρονική στιγμή t=6.0124 s) και άρα την περαιτέρω μείωση του ρεύματος πεδίου της τοπικής γεννήτριας σε τιμές μικρότερες του μέγιστου μεταβατικού ορίου ( $I_{max}$ ).



Σχ. 7.12: Ρεύμα πεδίου τοπικής σύγχρονης γεννήτριας SG3 (με στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης)

Στα διαγράμματα του Σχ. 7.13 φαίνονται οι ταχύτητες δρομέα των τριών ασύγχρονων κινητήρων στο εξεταζόμενο σενάριο ενίσχυσης του συστήματος με SVC.



Σχ. 7.13: Ταχύτητα δρομέα κινητήρων επαγωγής (με στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης)

Παρατηρείται ότι η αποκατάσταση των τάσεων του τοπικού δικτύου μέσω της αέργου υποστήριξης από το στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης έχει σαν αποτέλεσμα την επίτευξη βραχυπρόθεσμου ευσταθούς σημείου ισορροπίας και για τους τρεις κινητήρες, οπότε αποτρέπεται η εκδήλωση της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης.

Στο Σχ. 7.14 παρουσιάζεται η εξέλιξη της γωνίας δρομέα τόσο για την τοπική (συνεχής καμπύλη) όσο και για την απομακρυσμένη (εστιγμένη καμπύλη) σύγχρονη γεννήτρια.



Σχ. 7.14: Γωνία δρομέα σύγχρονων γεννητριών (με στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης)

Από το Σχ. 7.14, παρατηρείται ότι η τοπική γεννήτρια παραμένει σε συγχρονισμό με το δίκτυο. Συνεπώς, στην εξεταζόμενη περίπτωση εξάγεται το συμπέρασμα ότι η αποτελεσματική αντιμετώπιση της βραχυπρόθεσμης αστάθειας των μηχανών επαγωγής αποτρέπει την εκδήλωση αστάθειας γωνίας στην τοπική σύγχρονη γεννήτρια.

Τέλος, στο Σχ. 7.15 παρουσιάζεται η άεργος ισχύς που παράγεται από το εγκατεστημένο στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης.



Σχ. 7.15: Άεργος παραγωγή στατού συστήματος αέργου αντιστάθμισης

Παρατηρείται ότι μετά την απενεργοποίηση του μεταβατικού περιορισμού υπερδιέγερσης της τοπικής γεννήτριας, αυξάνεται ελαφρώς η άεργος παραγωγή του εξεταζόμενου συστήματος χωρητικής αντιστάθμισης. Αυτό συμβαίνει διότι, όπως φαίνεται και στο Σχ. 7.12, μετά την απενεργοποίηση της μεταβατικής βαθμίδας του ΣΠΥ της τοπικής γεννήτριας, το αντίστοιχο ρεύμα πεδίου μειώνεται κάτω από τη μέγιστη μεταβατική του τιμή, οδηγώντας σε πτώση των τάσεων στους ζυγούς του τοπικού δικτύου. Επομένως, το στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης αυξάνει την χωρητική του αγωγιμότητα και άρα και την άεργο παραγωγή του, προκειμένου να υποστηρίξει τις τάσεις των παραπάνω ζυγών.

# 8 ΣΥΜΒΟΛΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Στην παρούσα διατριβή εξετάστηκε το θέμα της ανάλυσης ευστάθειας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, όπως αυτό διαμορφώνεται σε περιβάλλον αυξημένης διείσδυσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Ειδικότερα, η διατριβή εστιάζει στη διερεύνηση των προβλημάτων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης, τα οποία οφείλονται σε μηχανές επαγωγής, είτε αυτές λειτουργούν ως φορτία σε οικιακούς, εμπορικούς ή βιομηχανικούς καταναλωτές, είτε ως γεννήτριες σε αιολικά πάρκα.

Η συμβολή της διδακτορικής διατριβής έγκειται στα ακόλουθα:

- 1. Στη διερεύνηση των προβλημάτων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης, όπως αυτά εμφανίζονται στις σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές.
- 2. Στην ανάπτυξη ενός προγράμματος προσομοίωσης, το οποίο θεωρείται κατάλληλο για δυναμικές προσομοιώσεις και μελέτες ευστάθειας μικρών έως μεσαίων διασυνδεδεμένων ή αυτόνομων ΣΗΕ στα οποία έχουν διεισδύσει μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και ειδικότερα αιολικά πάρκα.
- 3. Το πρόγραμμα προσομοίωσης που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκπαιδευτικούς και εργαστηριακούς σκοπούς, ιδιαίτερα πάνω σε θέματα προσομοιώσεων μεταβατικής συμπεριφοράς, ανάλυσης ευστάθειας και σχεδίασης διατάξεων ελέγχου των ΣΗΕ.
- 4. Στην επέκταση ενός μοντέλου Συστήματος Προστασίας Υπερδιεγέρσεως για σύγχρονες μηχανές, το οποίο ανάλογα με το μέγεθος της υπερδιέγερσης έχει τη δυνατότητα να δράσει τόσο στη μακροπρόθεσμη όσο και στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα.
- 5. Στη διερεύνηση των ορίων διείσδυσης αιολικών πάρκων με απλές ασύγχρονες ανεμογεννήτριες από πλευράς βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης.
- 6. Στην ανάπτυξη μίας διαδικασίας γραμμικοποίησης ΣΗΕ κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, η οποία προσφέρει τη δυνατότητα παρακολούθησης των ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων του συστήματος, ώστε:
  - Να διακριθεί η χρονική αλληλουχία εκδήλωσης μεταξύ των φαινομένων της αστάθειας τάσης και της αστάθειας γωνίας στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα.
  - II. Να εντοπιστούν οι μεταβλητές κατάστασης και άρα οι διατάξεις του μηχανισμού βραχυπρόθεσμης αστάθειας.
- 7. Στην πρόταση και αξιολόγηση μέτρων για την αντιμετώπιση του προβλήματος, όπως είναι η αποκοπή από το δίκτυο των μηχανών που εμφανίζουν την αστάθεια και η χρήση ταχέων συστημάτων αέργου αντιστάθμισης.

Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, το οποίο ονομάστηκε WHSSP (Wind-Hybrid System Simulation Package) και αποτελεί μέρος του λογισμικού πακέτου, το οποίο έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον MATLAB/SIMULINK στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Όπως φάνηκε και στα συστήματα που μελετήθηκαν, μία από τις πιθανές αρχικές αιτίες ενός φαινομένου βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης είναι ο βραχυπρόθεσμος περιορισμός στο ρεύμα διέγερσης των τοπικών σύγχρονων γεννητριών και η συνακόλουθη αδυναμία στήριξης των τάσεων στους αντίστοιχους ζυγούς. Ο περιορισμός διέγερσης στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα μπορεί να οφείλεται είτε σε μία σχετικά μεγάλη και απότομη αύξηση του ρεύματος διέγερσης (σαν αποτέλεσμα μίας αρκετά σοβαρής διαταραχής) είτε σε μία απαράδεκτα χαμηλή τιμή στο αντίστοιχο μεταβατικό όριο υπερδιέγερσης. Για το λόγο αυτό, δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην επέκταση του μοντέλου του ΣΠΥ για σύγχρονες μηχανές, το οποίο ανάλογα με το μέγεθος της υπερδιέγερσης έχει τη δυνατότητα να δράσει τόσο στη μακροπρόθεσμη όσο και στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Επίσης, μελετήθηκε η συμβολή των φαινομένων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης στην εμφάνιση αστάθειας γωνίας των σύγχρονων μηχανών. Ειδικότερα, διερευνήθηκε η χρονική αλληλουχία μεταξύ των φαινομένων της αστάθειας τάσης και γωνίας στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, η οποία σε αρκετές περιπτώσεις είναι αρκετά δύσκολο να εξακριβωθεί.

Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία γραμμικοποίησης Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, σύμφωνα με την οποία κατασκευάζεται σε κάθε χρονική στιγμή ο Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης του συστήματος. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα παρακολούθησης των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων του γραμμικοποιημένου συστήματος, η ανάλυση των οποίων μπορεί να υποδείξει τις μεταβλητές κατάστασης και άρα τις διατάξεις του μηχανισμού βραχυπρόθεσμης αστάθειας.

Ωστόσο, θα πρέπει να γίνει σαφές ότι οι πληροφορίες και τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη διαδικασία της γραμμικοποίησης κατά την προσομοίωση δεν αποτελούν ακριβείς και αυστηρές ενδείξεις της ευστάθειας του συστήματος, αποδεικνύονται ωστόσο ιδιαίτερα χρήσιμες στον χαρακτηρισμό της φύσης ενός φαινομένου αστάθειας.

Η μεθοδολογία γραμμικοποίησης που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή, χρησιμοποιείται για την ανάλυση της βραχυπρόθεσμης αστάθειας δύο συστημάτων, στα οποία η βραχυπρόθεσμη αστάθεια παρουσιάζεται μετά τον βραχυπρόθεσμο περιορισμό υπερδιέγερσης των τοπικών σύγχρονων γεννητριών.

Επίσης, στην παρούσα διατριβή, το πρόγραμμα προσομοίωσης WHSSP χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να διερευνηθεί η βέλτιστη - από πλευράς βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης - συνδεσμολογία ενός συγκεκριμένου επιπέδου αιολικής παραγωγής σε ένα ασθενές νησιωτικό δίκτυο, το οποίο συνδέεται με το ηπειρωτικό σύστημα μέσω δύο υποβρυχίων καλωδίων (παραλλαγή του δικτύου της Ν. Σαμοθράκης).

Αξίζει να αναφερθεί ότι στα συστήματα που εξετάστηκαν δεν συναντήσαμε προβλήματα βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσεως σε ρεαλιστικές συνθήκες δικτύου. Ωστόσο, επειδή στη βιβλιογραφία αναφέρονται τέτοια φαινόμενα, προκειμένου αυτά να μελετηθούν, δημιουργήσαμε τεχνητά συνθήκες βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσεως στα συστήματα που εξετάστηκαν με τη μείωση του μεταβατικού ορίου υπερδιεγέρσεως για ορισμένες σύγχρονες γεννήτριες. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη μελέτη του μηχανισμού βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσεως στα συστάθειας τάσεως τάσεως η επιτρέπει τη μελέτη του μηχανισμού βραχυπρόθεσμης αστάθειας περιορίζονται στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Στο πρώτο σύστημα που μελετήθηκε (αντιστοιχεί σε μία παραλλαγή του δικτύου της Νότιας Εύβοιας), παρατηρείται υψηλό ποσοστό διείσδυσης αιολικών πάρκων τα οποία είναι εξοπλισμένα με απλές ασύγχρονες ανεμογεννήτριες. Στην περίπτωση αυτή, η αστάθεια εκδηλώθηκε αρχικά σε μία ομάδα γειτονικών ανεμογεννητριών, οι οποίες παρέμειναν συνδεδεμένες στο δίκτυο, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρουν και τις υπόλοιπες σε αστάθεια και τελικά να οδηγήσουν το δίκτυο σε κατάρρευση.

Η διαδικασία γραμμικοποίησης του δικτύου κατά την προσομοίωση επιβεβαίωσε ότι η κινητήρια δύναμη του εμφανιζόμενου μηχανισμού αστάθειας ήταν αποκλειστικά οι ασύγχρονες μηχανές. Μάλιστα, ο ασταθής ρυθμός απόκρισης του γραμμικοποιημένου μοντέλου προκαλούσε την απομαγνήτιση των ανεμογεννητριών επαγωγής, με αποτέλεσμα την υπερτάχυνσή τους. Στη συνέχεια, η ανάλυση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων βοήθησε στον εντοπισμό των ανεμογεννητριών στις οποίες εκδηλώθηκε αρχικά η αστάθεια ώστε να προταθούν και να αξιολογηθούν μέτρα για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Τα μέτρα αυτά αφορούσαν είτε την αποσύνδεση των πλέον επιρρεπών στην αστάθεια μηχανών είτε την εγκατάσταση στατών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης.

Όσον αφορά τις προσομοιώσεις αποσύνδεσης των ανεμογεννητριών, εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις προστασίας α) με ηλεκτρονόμους υπερτάχυνσης, β) με ηλεκτρονόμους υποτάσεως και γ) με συνδυασμό των δύο προηγούμενων ειδών ηλεκτρονόμων.

Στην περίπτωση των ηλεκτρονόμων υπερτάχυνσης, οι οποίοι σημειώνεται ότι αποτελούν αναπόσπαστο μέρος κάθε ανεμογεννήτριας ώστε να προστατευθεί πρώτιστα ο εξοπλισμός της, δείξαμε τον τρόπο με τον οποίο μία διάταξη προστασίας εξοπλισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συνιστώσα ενός ευρύτερου σχήματος προστασίας του συστήματος, με κατάλληλο προσδιορισμό του ορίου αποκοπής.

Αποδείχθηκε ότι όσο πιο αυστηρά είναι τα όρια υπερτάχυνσης και υποτάσεως, τόσο μικρότερο θα είναι το ποσό της αιολικής παραγωγής που θα αποκοπεί από το δίκτυο, καθώς η πιο σύντομη αποσύνδεση των πλέον επιρρεπών στην αστάθεια μηχανών θα αποτρέψει την εκδήλωση του φαινομένου σε περισσότερες ανεμογεννήτριες.

Επιπρόσθετα, στη συνδυασμένη μέθοδο αποκοπής που εξετάστηκε, οι κρίσιμες μηχανές αποσυνδέθηκαν λόγω της δράσης του ηλεκτρονόμου υποτάσεως. Αυτό οφείλεται στο ότι οι κρίσιμες μηχανές αρχικά απομαγνητίστηκαν και στη συνέχεια επιταχύνθηκαν, όπως προέκυψε και από την ανάλυση των ιδιοδιανυσμάτων που προηγήθηκε.

Στο δεύτερο δίκτυο, το οποίο είναι μία πολύ απλοποιημένη παράσταση του δικτύου της Βορειοδυτικής Αμερικής και περιλαμβάνει δύο συγκεντρωμένους βιομηχανικούς κινητήρες καθώς επίσης και έναν οικιακό-εμπορικό κινητήρα, παρουσιάστηκαν σημαντικές δυσκολίες στην εξακρίβωση του είδους της βραχυπρόθεσμης αστάθειας, διότι σύμφωνα με τις εξαγόμενες χρονικές προσομοιώσεις εκδηλώθηκαν σχεδόν ταυτόχρονα τα φαινόμενα της επιβράδυνσης των τριών παραπάνω κινητήρων επαγωγής και του αποσυγχρονισμού της τοπικής σύγχρονης γεννήτριας.

Στην περίπτωση αυτή, η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας γραμμικοποίησης οδήγησε στη διάκριση της χρονικής αλληλουχίας μεταξύ των φαινομένων της αστάθειας τάσης και γωνίας. Ειδικότερα, η κινητήρια δύναμη του μηχανισμού αστάθειας εντοπίστηκε στους δύο βιομηχανικούς κινητήρες του δικτύου, οι οποίοι προκάλεσαν την αστάθεια γωνίας και τελικά τον αποσυγχρονισμό της τοπικής γεννήτριας σε αλληλεπίδραση με τον οικιακό-εμπορικό κινητήρα.

Για την εμφανιζόμενη αστάθεια, τα μέτρα αντιμετώπισης που εξετάστηκαν ήταν η απόρριψη του μικρότερου βιομηχανικού κινητήρα από προστασία υποτάσεως, καθώς επίσης και η εγκατάσταση ενός ταχέως συστήματος αέργου αντιστάθμισης (SVC), προκειμένου να αποφευχθεί η αποκοπή του κινητήρα.

Ειδικότερα, στην περίπτωση της αποκοπής του κινητήρα, αποδείχθηκε ότι η χρονική καθυστέρηση του αντίστοιχου ηλεκτρονόμου υποτάσεως δεν θα πρέπει να υπερβαίνει μία κρίσιμη τιμή, διότι από τη χρονική στιγμή αυτή και μετά η αστάθεια θα συμπαρασύρει και τους υπόλοιπες κινητήρες.

Συνοπτικά, τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι:

- 1. Η εξακρίβωση του είδους της βραχυπρόθεσμης αστάθειας, εάν δηλαδή πρόκειται για αστάθεια τάσης ή αστάθεια γωνίας, παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες.
- 2. Και στα δύο συστήματα που εξετάστηκαν, ο πρωτογενής παράγοντας για την εμφάνιση της βραχυπρόθεσμης αστάθειας ήταν ο μεταβατικός περιορισμός υπερδιέγερσης των σύγχρονων γεννητριών, ενώ η κινητήρια δύναμη του μηχανισμού αστάθειας εντοπίστηκε στη δυναμική των μηχανών επαγωγής.
- 3. Στο πρώτο σύστημα, η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης επεκτάθηκε σε όλες τις ανεμογεννήτριες, οδηγώντας το σύστημα σε κατάρρευση, χωρίς να αποσυγχρονιστεί η τοπική σύγχρονη γεννήτρια.
- 4. Στο δεύτερο σύστημα, η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης των δύο βιομηχανικών κινητήρων προκάλεσε την επιβράδυνση του οικιακού-εμπορικού κινητήρα και τον αποσυγχρονισμό της τοπικής γεννήτριας.
- 5. Η παρακολούθηση και ανάλυση των ιδιοτιμών και των ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου μοντέλου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης μπορεί να υποδείξει τις μεταβλητές κατάστασης και άρα τις διατάξεις του μηχανισμού βραχυπρόθεσμης αστάθειας.
- 6. Δεν εξετάστηκαν ρεαλιστικά συστήματα με προβλήματα βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσεως, ωστόσο θα πρέπει να υπάρχει η αντίστοιχη γνώση σε περίπτωση που το πρόβλημα αυτό εμφανιστεί στο μέλλον.

Αντικείμενο μίας μελλοντικής ερευνητικής προσπάθειας που θα επεκτείνει τις μεθοδολογίες και τα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής αποτελούν:

- 1. Η ανάπτυξη πιο σύγχρονων μοντέλων ανεμογεννητριών, όπως είναι για παράδειγμα οι ασύγχρονες μηχανές διπλής τροφοδότησης και οι σύγχρονες μηχανές με κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος.
- 2. Η προσθήκη επιπλέον μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στη βιβλιοθήκη των μοντέλων διατάξεων του λογισμικού πακέτου WHSSP, όπως είναι για παράδειγμα οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου και οι κυψέλες καυσίμου.
- 3. Οι προσθήκες των μοντέλων στροβίλων και των αντίστοιχων ρυθμιστών στροφών, των δυναμικών αυτορυθμιζόμενων φορτίων, καθώς επίσης και των στατών συστημάτων αέργου αντιστάθμισης για την παράσταση του γραμμικοποιημένου μοντέλου του δικτύου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

- 4. Η επέκταση της μεθοδολογίας γραμμικοποίησης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης σε αυτόνομα δίκτυα.
- 5. Ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση κατάλληλων συνόλων συντονισμένων μέτρων προστασίας για την αντιμετώπιση των προβλημάτων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης.
- 6. Η ανάλυση ρεαλιστικών συστημάτων με προβλήματα βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης.

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [AAS01] T. Ackermann, G. Andersson, L. Soder, "Distributed Generation: A Definition", International Journal of Electrical Power Systems Research, Vol. 57, No 3, pp. 195-204, April 2001.
- [ABB00] ABB Power Systems, "Power System Simulation & Analysis Software SIMPOW User Manual", Vasteras, Sweden, 2000.
- [AF1977] P. M. Anderson, A. A. Fouad, "Power System Control and Stability", The Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977. P. M. Anderson, A. A. Fouad, "Power System Control and Stability", Revised Printing, IEEE Power Systems Engineering Series, IEEE Press.
- [AK02] V. Akhmatov, H. Knudsen, "An Aggregate Model of a Grid-Connected, Large-Scale, Offshore Wind Farm for Power Stability Investigations - Importance of Windmill Mechanical System", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 24, No 9, pp. 709-717, July 2002.
- [AKB00] V. Akhmatov, H. Knudsen, M. Bruntt, A. H. Nielsen, J. K. Pedersen, N. K. Poulsen, "A Dynamic Stability Limit of Grid-Connected Induction Generators", Proceedings of the IASTED International Conference on Power & Energy Systems, pp. 235-244, September 19-22, 2000, Marbella, Spain.
- [AKN00] V. Akhmatov, H. Knudsen, A. H. Nielsen, "Advanced Simulation of Windmills in the Electric Power Supply", International Journal of Electrical Power & Energy Systems Vol. 22, No 6, pp. 421-434, 2000.
- [AKN03] V. Akhmatov, H. Knudsen, A. H. Nielsen, J. K. Pedersen, N. K. Poulsen, "Modelling and Transient Stability of Large Wind Farms", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 25, pp. 123-144, 2003.
- [ALW01] E. Allen, N. LaWhite, Y. Yoon, J. Chapman, M. Ilic, "Interactive Object-Oriented Simulation of Interconnected Power Systems Using SIMULINK", IEEE Transactions on Education, Vol. 44, No 1, pp. 87-94, February 2001.
- [AM94] M. M. Adibi, D. P. Milanicz, "Reactive Capability Limitation of Synchronous Machines", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, February 1994.
- [AML00] A. Abur, F. Magnago, Y. Lu, "Educational Toolbox for Power System Analysis", IEEE Transactions on Computer Applications in Power, Vol. 13, No 4, pp. 31-35, October 2000.
- [AMS00] R. Adapa, K. Madajewski, M. Sobierajski, "The Study of Voltage Problems in Polish Power System", Proceedings of 2000 IEEE PES Winter Meeting, Vol. 3, pp. 1727-1732, January 23-27, 2000.
- [AS03] C. Aumuller, T. K. Saha, "Investigating Voltage Collapse and Subsequent Transient Instability in a Large Power System", Proceedings of 2003 IEEE PES General Meeting, pp. 700-705, July 13-17, 2003.
- [BCC96] E. Bompard, E. Carpaneto, G. Chicco, R. Napoli, "A Dynamic Interpretation of the Load-Flow Jacobian Singularity for Voltage Stability Analysis", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 18, No 6, pp. 385-395, 1996.
- [BDS01] L. Bao, X. Duan, Z. Song, Y. He, "Dynamical Analysis of Voltage Stability for a Simple Power System", International Journal of Electrical Power Systems Research, Vol. 23, pp. 557-564, 2001.
- [Bih03] A. Bihain, et al, "OMASES: A Dynamic Security Assessment Tool for the New Market Environment", Proceedings of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy, June 23-26, 2003.

[Bil04]	M. Biglari, "Dynamics of Voltage Stability in a Multi Machine System", Proceedings of IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Vol. 1, pp. 354-359, 10-13 October, 2004.
[BJ05]	L. Bam, W. Jewell, "Review: Power System Analysis Software Tools", Proceedings of 2005 IEEE PES General Meeting, pp. 146-151, June 12-16, 2005.
[BPA02]	R. Balanathan, N. C. Pahalawaththa, U. D. Annakkage, "Modelling Induction Motor Loads for Voltage Stability Analysis", International Journal of Electrical Power Systems Research, Vol. 24, pp. 469-480, 2002.
[BSN99]	W. Bignell, H. Saffron, T. T. Nguyen, W. D. Humpage, "Effects of Machine Inertia Constants on System Transient Stability", International Journal of Electrical Power Systems Research, Vol. 51, pp. 153-165, 1999.
[Bul90a]	G. C. Bullock, "Cascading Voltage Collapse in West Tennessee, August 22, 1987", Georgia Institute of Technology 44th Annual Protective Relaying Conference, May 2–4, 1990.
[Bul90b]	G. C. Bullock, "Cascading Voltage Collapse in West Tennessee, August 22, 1987", Western Protective Relaying Conference, October 1990.
[CBM04]	J. H. Chow, G. E. Boukarim, A. Murdoch, "Power System Stabilizers as Undergraduate Control Design Projects", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 144- 151, February 2004.
[CC92]	J. H. Chow, K. W. Cheung, "A Toolbox for Power System Dynamics and Control Engineering Education and Research", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No 4, pp. 1559-1564, November 1992.
[CFJ99]	R. M. G. Castro, J. M. Ferreira de Jesus, "An Aggregated Wind Park Model", 13th PSCC Power Systems Computation Conference Proceedings, Trondheim, Norway, June 28 – July 2, 1999, Vol. 2, pp. 1302-1307.
[CH99]	Γ. Κονταξής, Ν. Χατζηαργυρίου, "Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας", Αθήνα, 1999.
[Che90]	E. Cheres, "Small and Medium Size Drum Boiler Models Suitable For Long Term Dynamic Response", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 5, No 4, pp. 686-692 December 1990.
[CTF96]	CIGRE Task Force 38.01.07 on Power System Oscillations, "Analysis and Control of Power System Oscillations", CIGRE Technical Brochure, No. 111, December 1996.
[CTF99]	CIGRE Task Force 38.02.14 Report, "Analysis and Modeling Needs of Power Systems Under Major Frequency Disturbances", January 1999.
[CWH05]	L. Cong, Y. Wang, D. J. Hill, "Transient Stability and Voltage Regulation Enhancement via Coordinated Control of Generator Excitation and SVC", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 27, pp. 121-130, 2005.
[DCY04]	L. Dong, M. L. Crow, Z. Yang, C. Shen, L. Zhang, S. Atcitty, "A Reconfigurable FACTS System for University Laboratories", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No 1, pp. 120-128, February 2004.
[DDT96]	M. K. Donnelly, J. E. Dagle, D. J. Trudnowski, G. J. Rogers, "Impact of the Distributed Utility on Transmission System Stability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 1, May 1996.
[DLT02]	J. A. Diaz de Leon II, C. W. Taylor, "Understanding and Solving Short-Term Voltage Stability Problems", Proceedings of 2002 IEEE PES Summer Meeting, Vol.2, pp. 745-752, 21-25 July, 2002.

- [DRT98] M. B. Duric, Z. M. Radojevic, E. D. Turkovic, "A Reduced Order Multimachine Power System Model Suitable for Small Signal Stability Analysis", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 20, No. 5, pp. 369-374, 1998.
- [DS72] H. W. Dommel, N. Sato, "Fast Transient Stability Solutions", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 10, No. 2, July/August 1972.
- [EHJ03] J. B. Ekanayake, L. Holdsworth, N. Jenkins, "Comparison of 5th Order and 3rd Order Machine Models for Doubly Fed Induction Generator (DFIG) Wind Turbines", International Journal of Electrical Power Systems Research, Vol. 67, pp. 207-215, 2003.
- [EKS04] W. El-Khattam, M. M. A. Salama, "Distributed Generation Technologies, Definitions and Benefits", International Journal of Electrical Power Systems Research, Vol. 71, pp. 119-128, 2004.
- [EPR92] EPRI, "Users Manual-Extended Transient/Mid-Term Stability Program Package (ETMSP Version 3.0)", Prepared by Ontario Hydro, June 1992.
- [FJG03] F. Fesquet, P. Juston, I. Garzulino, "Impact and Limitation of Wind Power Generation in an Island Power System", Proceedings of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy, June 23-26, 2003.
- [GCQ05] X. Guanghu, C. Chen, S. Qu, "The Influence of Induction Motor/Inertia Constant on Small-Signal Stability", International Journal of Electrical Power Systems Research, Vol. 74, pp. 197-202, 2005.
- [GMK92] B. Gao, G. K. Morison, P. Kundur, "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, pp 1529-1542, 1992.
- [GMK96] B. Gao, G. K. Morison, P. Kundur, "Toward the Development of a Systematic Approach for Voltage Stability Assessment of Large-Scale Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, pp 1314-1324, August 1996.
- [Hea99] Heatwave 1999 July Low Voltage Condition Root Cause Analysis Report, www.pjm.com
- [Hei98] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Chicester, UK: John Wiley and Sons Ltd., 1998.
- [HEZ89] A. E. Hammad, M. Z. El-Sadek, "Prevention of Transient Voltage Instabilities Due to Induction Motor Loads by Static Var Compensators", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 1182-1190, August 1989.
- [HK92] J. Hale, H. Kocak, "Dynamics and Bifurcations", Springer Verlag, 1992.
- [HKH98] N. Hatziargyriou, E. Karapidakis, D. Hatzifotis, "Frequency Stability of Power System in Large Islands with High Wind Power Penetration", Bulk Power Systems Dynamics Control Symposium-IV Restructuring, Vol. PAS-102, August 24-28, 1998, Santorini, Greece.
- [HKJ04] N. Hatziargyriou, G. Kariniotakis, N. Jenkins, J. Peças Lopes, J. Oyarzabal, F. Kanellos, X. Le Pivert, N. Jayawarna, N. Gil, "Modelling of MicroSources for Security Studies", CIGRE, Paris, 30 August-3 September 2004.
- [HU00] T. Hiyama, A. Ueno, "Development of Real-Time Power System Simulator in MATLAB/Simulink Environment", Proceedings of 2000 IEEE PES Summer Meeting, Vol. 4, pp. 2096-2100, July 16-20, 2000.
- [HY03] I. A. Hamzah, J. A. Yasin, "Static Var Compensators (SVC) Required to Solve the Problem of Delayed Voltage Recovery Following Faults in the Power System of the Saudi Electricity Company, Western Region (SEC-WR)", IEEE Power Tech 2003 Conference Proceedings, Bologna Italy, June 23-26, 2003.
- [ICR93] IEEE Committee Report, "Load Representation for Dynamic Performance Analysis," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 472–482, May 1993.

- [ITF95] IEEE Task Force on Excitation Limiters, "Recommended Models for Overexcitation Limiting Devices", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 4, December 1995.
- [IWG81] IEEE Working Group on Computer Modeling of Excitation Systems, "Excitation System Models for Power System Stability Studies", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 100, No 2, pp 494-509, February 1981.
- [IWG95] IEEE PES Working Group on System Oscillations, "Power System Oscillations", IEEE Special Publication 95-TP-101, 1995.
- [Jac93] D. Jackson, "Sympathetic Tripping on Distribution Feeders", 46<sup>th</sup> Annual Conference for Protective Relay Engineers, Texas A&M University, April 12–14, 1993.
- [JVC04] F. Jurado, M. Valverde, J. Carpio, "Effect of the Fuel Cell on Distribution System Stability", Proceedings of 2004 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol. 1, pp. 47-50, May 2-5, 2004.
- [JZX02] G. Jian, W. Zhongxi, Z. Xiaoxin, L. Wenying, "Voltage Stability Problems of Gansu Power Grid: Assessment and Countermeasures", Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Power System Technology, Vol. 3, pp 1695-1699, 13-17 October.
- [KAH04] M. Kezunovic, A. Abur, G. Huang, A. Bose, K. Tomsovic, "The Role of Digital Modeling and Simulation in Power Engineering Education", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 64-72, February 2004.
- [Kar05] Μ. Ε. Καρυστιανός, "Βελτιστοποίηση Ορίων Μεταφοράς Ισχύος σε Συνθήκες Ασφάλειας Τάσεως", Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Δεκέμβριος 2005.
- [KS00] K. B. Kilania, R. A. Schlueter, "Trends in Model Development for Stability Studies in Power Systems", International Journal of Electrical Power Systems Research, Vol. 53, pp. 207-215, 2000.
- [KST05] G. Kariniotakis, N. Soultanis, A. Tsouchnikas, S. Papathanassiou, N. Hatziargyriou, "Dynamic Analysis of Microgrids", Proceedings of International Conference on Future Power Systems, The Netherlands, 16-18 November 2005.
- [Kun04] P. Kundur, et al, "Definitions and Classification of Power System Stability", IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 1387-1401, May 2004.
- [Kun94] P. Kundur, "Power System Stability and Control", EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994.
- [KWS00] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, "Analysis of Electric Machinery", IEEE Press, New York 2000.
- [Lar04] M. Larsson, "ObjectStab An Educational Tool for Power System Stability Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 56-63, February 2004.
- [LMN92] E. Larsen, N. Miller, S. Nilsson, and S. Lindgren, "Benefits of GTOBased Compensation Systems for Electric Utility Applications", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, pp. 2056–2064, October 1992.
- [LN01] V. A. Levi, D. P. Nedic, "Application of the Optimal Power Flow Model in Power System Education", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No 4, pp. 572-580, November 2001.
- [LRL01] L. Loud, P. Rousseaux, D. Lefebvre, T. Van Cutsem, "A Time-Scale Decomposition-Based Simulation Tool for Voltage Stability Analysis", Proceedings of 2001 IEEE Porto Power Tech Conference, Porto, Portugal, September 10-13, 2001.

- [LUR03] P. Ledesma, J. Usaola, J. L. Rodriguez, "Transient Stability of a Fixed Speed Wind Farm", International Journal of Renewable Energy, Vol. 28, pp. 1341-1355, 2003.
- [Man98] Γ. Α. Μάνος, "Ανάλυση Φαινομένων Κατάρρευσης Τάσεως σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας", Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Απρίλιος 1998.
- [MBB97] J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, "Power System Dynamics and Stability", John Wiley and Sons, 1997.
- [MC04] A. P. Meliopoulos, G. J. Cokkinides, "A Virtual Environment for Protective Relaying Evaluation and Testing", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 104-111, February 2004.
- [MD02] J. V. Milanovic, T. M. David, "Stability of Distribution Networks with Embedded Generators and Induction Motors", Proceedings of 2002 IEEE PES Winter Meeting, Vol. 2, pp. 1023-1028, 27-31 January, 2002.
- [MDV00] A. Murdoch, R. W. Delmerico, S. Venkataraman, R. A. Lawson, J. E. Curran, and W. R. Pearson, "Excitation System Protective Limiters and Their Effect on Volt/Var Control— Design, Computer Modeling, and Field Testing," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 15, No. 4, pp. 440–450, December 2000.
- [MHW03] K. Morison, H. Hamadani, L. Wang, "Practical Issues in Load Modeling for Voltage Stability Studies", Proceedings of 2003 IEEE PES General Meeting, Vol. 3, pp. 1392-1397, July 13-17, 2003.
- [Mil05] F. Milano, "PSAT: Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT version 1.3.3. January 26, 2005", available at http://www.power.uwaterloo.ca.
- [Mil82] T. J. E Miller, "Reactive Power Control in Electric Power Systems", John Wiley and Sons, New York, 1982.
- [MM01] M. A. Merkle, A. M. Miri, "Modelling of Industrial Loads for Voltage Stability Studies in Power Systems", Proceedings of 2001 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol. 2, pp. 881-886, May 13-16, 2001.
- [MNB00] E. Muljadi, G. Nix, J. T. Bialasiewicz, "Analysis of the Dynamics of a Wind-Turbine Water Pumping System", Proceedings of 2000 IEEE PES Summer Meeting, Vol. 4, pp. 2506-2519, 16-20 July.
- [MRS00] C. Middlebrook, V. Ranganathan, N. D. Schulz, "A Case Study on Blackout Restoration as an Educational Tool", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No 2, pp. 467-471, May 2000.
- [NAE96] North American Electric Reliability Council, System Disturbances, Review of Selected 1995 Electric System Disturbances in North America, March 1996.
- [Nom05] Β. Μ. Νομικός, "Συστηματική Σχεδίαση Σταθεροποιητών σε ΣΗΕ με Σύγχρονες και Ασύγχρονες Μηχανές", Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Απρίλιος 2005.
- [NPV03] B. M. Nomikos, E. G. Potamianakis, C. D. Vournas, "Linear and Non-Linear Analysis of a Realistic Power System with Strong Wind Penetration", UPEC03, Thessaloniki, September 2003.
- [NV03] B. M. Nomikos, C. D. Vournas, "Evaluation of Motor Effects on the Electromechanical Oscillations of Multimachine Systems", Proceedings of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy, June 23-26, 2003.
- [NV05] B. M. Nomikos and C. D. Vournas, "Investigation of Induction Machine Contribution to Power System Oscillations," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 2, pp. 916-925, May 2005.

- [OFT04] A. C. C. de Oliveira, D. M. Falcao, G. N. Taranto, G. L. Torres, "Voltage Stability Assessment by Fast Time Domain Simulation and Interior-Point Optimal Power Flow", Proceedings of 2004 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Vol. 3, pp. 1272-1276, October 10-13, 2004.
- [PAM97a] G. D. Prasad, M. A. Al-Mulhim, G. D. Ray, B. Gopinchand, "Comparative Assessment of the Effect Dynamic Load Models on Voltage Stability", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 19, No. 5, pp. 305-309, 1997.
- [PAM97b] G. D. Prasad, M. A. Al-Mulhim, "Performance Evaluation of Dynamic Load Models for Voltage Stability Analysis", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 19, No. 8, pp. 533-540, 1997.
- [Pap85] Β. Κ. Παπαδιάς, "Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας", Τόμοι Ι-ΙΙ, Αθήνα 1985.
- [Pap97] Μ. Π. Παπαδόπουλος, "Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές", Αθήνα 1997.
- [PB02] K. R. Padiyar, K. Bhaskar, "An Integrated Analysis of Voltage and Angle Stability of a Three Node Power System", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 24, pp. 489-501, 2002.
- [PB05] K. R. Padiyar, K. Bhaskar, "Analysis of Small Signal Voltage Stability in Multimachine Systems Using Detailed and Reduced Formulations", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 27, pp. 301-317, 2005.
- [PH01] S. A. Papathanassiou, N. D. Hatziargyriou, "Technical Requirements for the Connection of Dispersed Generation to the Grid", IEEE PES Summer Meeting 2001, June 2001, Vancouver, Canada.
- [PHH98] D. H. Popovic, I. A. Hiskens, D. J. Hill, "Stability Analysis of Induction Motor Networks ", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 20, No. 7, pp. 475-487, 1998.
- [PPR02] J. E. O. Pessanha, V. L. Paucar, M. J. Rider, "A Review of Power System Voltage and Angular Stability Dynamics", Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Power System Technology, Vol. 3, pp. 1669-1673, October 13-17, 2002.
- [PR96] K. R. Padiyar, S. S. Rao, "Dynamic Analysis of Small Signal Voltage Instability Decoupled from Angle Instability", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 18, No. 7, pp. 445-452, 1996.
- [PSR03] J. Persson, J. G. Slootweg, L. Rouco, L. Söder, W. L. Kling, "A Comparison of Eigenvalues Obtained with Two Dynamic Simulation Software Packages", Proceedings of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy, June 23-26, 2003.
- [PTU02] M. Palsson, T. Toftenvaag, K. Uhlen, J. O. G. Tande, "Large-Scale Wind Power Integration and Voltage Stability Limits in Regional Networks", Proceedings of 2002 IEEE PES Summer Meeting, Vol. 2, pp. 762-769, 2002.
- [PV03a] E. G. Potamianakis, C. D. Vournas, "Modeling and Simulation of Small Hybrid Power Systems", Proceedings of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy, June 23-26, 2003.
- [PV03b] E. G. Potamianakis, C. D. Vournas, "Aggregation of Wind Farms in Distribution Networks", Proceedings of 2003 European Wind Energy Conference and Exhibition, Madrid, June 17-19, 2003.
- [PV04] E. G. Potamianakis and C. D. Vournas, "Investigation of Short-Term Voltage Stability Problems and Countermeasures," Proceedings of 2004 IEEE Power Systems Conference and Exposition, Vol. 1, pp. 385-391, New York, October 10-13, 2004.

- [PV06] E. G. Potamianakis, C. D. Vournas, "Short-Term Voltage Instability: Effects on Synchronous and Induction Machines," to be appeared on IEEE Transactions on Power Systems 2006.
  [PV91] B. Κ. Παπαδιάς, Κ. Δ. Βουρνάς, "Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Έλεγχος Συχνότητας και Τάσεως", Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.
- [PWH05] P. Pourbeik, D. Wang, K. Hoang, "Load Modeling in Voltage Stability Studies", Proceedings of 2005 IEEE PES General Meeting, pp. 23-30, June 12-16, 2005.
- [RC95] G. Rogers, J. Chow, "Hand-on Teaching of Power System Dynamics", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 8, No 1, pp. 12-16, January 1995.
- [RFB02] J. M. Rodriguez, J. L. Fernandez, D. Beato, R. Iturbe, J. Usaola, P. Ledesma, J. R. Wilhelmi, "Incidence on Power System Dynamics of High Penetration of Fixed Speed and Doubly Fed Wind Energy Systems: Study of the Spanish Case", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 4, pp. 1089-1095, November 2002.
- [Rog99] G. Rogers, "Power System Toolbox User Guide", Colborne, ON, Canada, Cherry Tree Scientific Software, 1999.
- [RSR97] J. Roberts, T. L. Stulo, and A. Reyes, "Sympathetic Tripping Problem Analysis and Solutions", Proceedings of 24th Annual Western Protective Relay Conference, 21-23 October, 1997, Spokane, Washington.
- [RSS03] M. Reza, J. G. Slootweg, P. H. Schavemaker, W. L. Kling, L. Van Der Sluis, "Investigating Impacts of Distributed Generation on Transmission System Stability", Proceedings of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy, June 23-26, 2003.
- [RV002] D. Ruiz-Vega, T. I. A. Olivares, D. O. Salinas, "An Approach to the Initialization of Dynamic Induction Motor Models", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 3, August 2002.
- [Sak03] Ν. Γ. Σακελλαρίδης, "Τοπικές Υπερτοπικές Διακλαδώσεις Συνδιάστασης 1 έως 3 σε μικρό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Οκτώβριος 2003.
- [SBD89] M. Stubbe, A. Bihain, J. Deuse, J-C Baader, "STAG A New Unified Software Program for the Study of the Dynamic Behaviour of Electrical Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 1, February 1989, pp. 129-138.
- [SC05] V. Stewart, E. H. Camm, "Modeling of Stalled Motor Loads for Power System Short-Term Voltage Stability Analysis", Proceedings of 2005 IEEE PES General Meeting, pp. 1252-1257, June 12-16, 2005.
- [SC92] H. M. Shuh, J. R. Cowan, "Undervoltage Load Shedding An Ultimate Application for Voltage Collapse", Georgia Institute of Technology 46th Annual Protective Relaying Conference, April 29–May 1, 1992.
- [SCE00] Southern California Edison, System Impact of Stalled Residential Air Conditioning, January 2000. August 5, 1997 disturbance summary at www.nerc.com/dawg/database.html.
- [SF02] K. Sedghisigarchi, A. Feliachi, "Control of Grid-Connected Fuel Cell Power Plant for Transient Stability Enhancement", Proceedings of 2002 IEEE PES Winter Meeting, Vol. 1, pp. 383-388, January 27-31, 2002.
- [Sha97] J. W. Shaffer, "Air Conditioner Response to Transmission Faults", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 614–621, May 1997.
- [SHF03] K. Schoder, Am. Hasanovic, A. Feliachi, Az. Hasanovic, "PAT: A Power Analysis Toolbox for MATLAB/Simulink", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, pp. 42-47, February 2003.

- [SHP01] J. G. Slootweg, S. W. H. de Haan, H. Polinder, W. L. Kling, "Modeling Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations", Proceedings of 2001 IEEE PES Summer Meeting, Vol. 1, pp. 22-26, July 15-19, 2001.
- [SHP02] J. G. Slootweg, S. W. H. de Haan, H. Polinder, W. L. Kling, "Aggregated Modelling of Wind Parks with Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations", 14th PSCC Power Systems Computation Conference Proceedings, Sevilla, Spain, June 24-28, 2002, Session 06, Paper 1.
- [SHP03] J. G. Slootweg, S. W. H. de Haan, H. Polinder, W. L. Kling, "General Model for Representing Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18, No 1, pp. 144-151, February 2003.
- [SK02] J. G. Slootweg, W. L. Kling, "Impacts of Distributed Generation on Power System Transient Stability", Proceedings of 2002 IEEE PES Summer Meeting, Vol. 2, pp. 862-867, July 25-29, 2002.
- [SK03a] J. G. Slootweg, W. L. Kling, "Aggregated Modelling of Wind Parks in Power System Dynamics Simulations", Proceedings of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy, June 23-26, 2003.
- [SK03b] J. G. Slootweg, W. L. Kling, "The impact of Large Scale Wind Power Generation on Power System Oscillations", International Journal of Electrical Power Systems Research, Vol. 67, pp. 9-20, 2003.
- [SO90] Y. Sekine, H. Ohtsuki, "Cascaded Voltage Collapse", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 1, February 1990.
- [SP98] P. W. Sauer, M. A. Pai, "Power Systems Dynamics and Stability", Prentice-Hall, 1998.
- [SPK01] J. G. Slootweg, H. Polinder, W. L. Kling, "Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator", Proceedings of the 2001 IEEE PES Summer Meeting, Vol. 1, pp. 644-649, Vancouver, July 15-19, 2001.
- [Stu02] M. Stubbe, "The OMASES Advanced Simulation Environment", Proceedings of 2002 MED Power Conference, Athens, Greece, November 4-6, 2002.
- [Syb04] G. Sybille, "SimPowerSystems User's Guide, Version 4", published under sublicense from Hydro-Quebec and The MathWorks, Inc., 2004. Available at http://www.mathworks.com.
- [Tay03] C. W. Taylor, "Shunt Compensation for Voltage Stability", IFAC Symposium on Power Plants and Power System Control, Panel Session on Voltage Stability, 15-18 September 2003, Seoul, Korea.
- [Tay94] C. W. Taylor, "Power System Voltage Stability", McGraw-Hill, 1994.
- [TE97] C. W. Taylor and D. C. Erickson, "Recording and Analysing the July 2 Cascading Outage", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 10, No. 1, pp. 26–30, January 1997.
- [TH00] L. Taylor and S.-M. Hsu, "Transmission Voltage Recovery Following a Fault Event in the Metro Atlanta Area", Proceedings of 2000 IEEE PES Summer Meeting, Vol. 1, pp. 537– 542, July 16-20, 2000.
- [TPV04] G. Tsourakis, E. Potamianakis, C. Vournas, "Eliminating Voltage Instability Problems in Wind Parks by Using Doubly Fed Induction Generators", European Wind Energy Conference and Exhibition, London UK, 22-25 November 2004.
- [TV05] G. Tsourakis, C. Vournas, "Modelling, Control and Stability of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generators", Proceedings of CIGRE Symposium "Power Systems with Dispersed Generation", Athens, Greece, 13-16 April 2005.
- [USP97] US: Power Technologies Inc., "PSS/E On-Line Documentation", Schenectady, December 1997.

- [Vas00] S. Vassena, "Simulatore Didattico in Ambiente Simulink per lo Studio della Dinamica dei Sistemi Elettrici per l' Energia con Particolare Riferimento al Collasso della Tensione", Thesis of Laurea. University of Bologna, Bologna, Italy, 2000.
- [VCJ95] T. Van Cutsem, Y. Jacquemart, J. N. Marquet, P. Pruvot, "A Comprehensive Analysis of Mid-Term Voltage Stability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, pp 1173-1182, 1995.
- [VCK05] T. Van Cutsem, J. Kabouris, J. Christoforidis, C. D. Vournas, "Application of Real-Time Voltage Security Assessment to the Hellenic Interconnected System", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 152, No. 1, pp. 123-131, January 2002.
- [VCM97] T. Van Cutsem, R. Mailhot, "Validation of a Fast Voltage Stability Analysis Method on the Hydro-Quebec System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, pp 282-292, February 1997.
- [VCV98] T. Van Cutsem, C. D. Vournas, "Voltage Stability of Electric Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [VD93] C. D. Vournas, N. Daskalakis, "Governor Tuning and Regulating Capacity of Hydroelectric Units", WESCANEX '93 Proceedings pp. 228-233, Saskatoon, Canada 1993.
- [VJM94] T. Van Cutsem, Y. Jacquemart, J.-N. Marquet, P. Pruvot, "Extensions and Applications of A Mid-Term Voltage Stability Analysis Method", Bulk Power System Voltage Phenomena - Voltage Stability and Security III, Davos, Switzerland, August 1994.
- [VM98] C. D. Vournas, G. A. Manos, "Modelling of Stalling Motors During Voltage Stability Studies", IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 13, No. 3, pp. 775-781, August 1998.
- [VMK00] C. D. Vournas, G. A. Manos, J. Kabouris, T. Van Cutsem, "Analysis of a Voltage Instability in the Greek Power System", Proceedings of 2000 IEEE PES Winter Meeting, Vol. 2, pp. 1483-1488, January 23-27, 2000.
- [VMK99] C. D. Vournas, G. A. Manos, M. E. Karystianos, "Bifurcation Analysis of Induction Motors", Proceedings of 1999 IEEE International Conference on Electric Power Engineering, pp. 110, August 29-September 2 1999, Budapest.
- [VMP01] C. D. Vournas, G.A. Manos, E. G. Potamianakis, J. Kabouris, "Voltage Security Assessment of Greek Interconnected Power System with Large Wind Penetration", Proceedings of 2001 European Wind Energy Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark, July 2001.
- [VMS99] C. D. Vournas, G. A. Manos, P. W. Sauer, M. A. Pai, "Effect of Overexcitation Limiters on Power System Long-Term Modeling", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No 4, pp. 1529-1536 December 1999.
- [VNT05] C. D. Vournas, V. C. Nikolaidis, A. A. Tassoulis, "Experience from the Athens Blackout of July 12, 2004", Proceedings of 2005 IEEE St Petersburg Power Tech Conference, St Petersburg, Russia, June 27-30, 2005.
- [Vou94] C. D. Vournas, "On the Modelling of Collapse in Dynamical Systems", Bulk Power System Voltage Phenomena - Voltage Stability and Security III, Davos, Switzerland, August 1994.
- [VP01] Κ. Βουρνάς, Εμ. Ποταμιανάκης, Γ. Μάνος, "Ασφάλεια Τάσεως και Όρια Διείσδυσης Αιολικής Ενέργειας", RENES-NTUA, Αθήνα, Μάρτιος 2001.
- [VP95] C. D. Vournas, G. Papaioannou, "Modelling and Stability of a Hydro Plant with Two Surge Tanks", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 2, pp. 368-375, June 1995.

- [VPM04] C. D. Vournas, E. G. Potamianakis, C. Moors, T. Van Cutsem, "An Educational Simulation Tool for Power System Control and Stability", IEEE Transactions on Power Systems, Special Section on Power Engineering Education, Vol. 19, No. 1, pp. 48-55, February 2004.
- [VPM95] J-F Vernotte, P. Panciatici, B. Meyer, J-P Antoine, J. Deuse, M. Stubbe, "High Fidelity Simulation of Power System Dynamics", CAP – Computer Applications on Power (IEEE), January 1995.
- [VPS96] C. D. Vournas, M. A. Pai, P. W. Sauer, "The Effect of Automatic Voltage Regulation on the Bifurcation Evolution in Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No 4, pp. 1683-1688, November 1996.
- [VSP96] C. D. Vournas, P. W. Sauer, M. A. Pai, "Relationships Between Voltage and Angle Stability of Power Systems", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 18, No. 8, pp. 493-500, 1996.
- [VTD04] V. Van Thong, J. Driesen, R. Belmans, "The Influence of the Connection Technology of Dispersed Energy Sources on Grid Stability", Proceedings of IEEE 2nd International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Vol. 2, pp. 742-745, March 31-April 2, 2004.
- [VZ93] C. D. Vournas, A. Zaharakis, "Hydro Turbine Transfer Functions with Hydraulic Coupling", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 8, No 3, pp. 527-532, September 1993.
- [Wan03] H. F. Wang, "Modelling Multiple FACTS Devices Into Multi-Machine Power Systems and Applications", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 25, pp. 227-237, 2003.
- [WCZ00] Y. Wang, H. Chen, R. Zhou, "A Nonlinear Controller Design for SVC to Improve Power System Voltage Stability", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 22, pp. 463-470, 2000.
- [WM02] R. A. Walling, N. W. Miller "Distributed Generation Islanding Implications on Power System Dynamic Performance", Proceedings of 2002 IEEE PES Summer Meeting, Vol. 1, pp. 92-96, July 21-25, 2002.
- [WS00] H. L. Willis, W. G. Scott, "Distributed Power Generation: Planning and Evaluation", Marcel Dekker, New York 2000.
- [WSD92] B. R. Williams, W. R. Schmus, D. C. Dawson, "Transmission Voltage Recovery Delayed by Stalled Air Conditioner Compressors", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 3, August 1992.
- [XEA04] B. Xu, C. Y. Evrenosoglu, A. Abur, E. Akleman, "Interactive Evaluation of ATC Using a Graphical User Interface", Proceedings of 2004 IEEE PES General Meeting, Vol. 1, pp. 84-87, June 6-10, 2004.
- [YA06] D. Yang, V. Ajjarapu, "A Decoupled Time-Domain Simulation Method via Invariant Subspace Partition for Power System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 1, pp 11-18, February 2006.
- [YTY02] B. Yanhong, X. Taishan, X. Yusheng, "A Fast Simulation Method for Mid-Term Voltage Stability", Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Power System Technology, Vol. 2, pp. 849-852, October 13-17, 2002.
- [ZA02] Y. Zhou, V. Ajjarapu, "Identification and Tracing of Voltage and Oscillatory Stability Margins", Proceedings of 2002 IEEE PES Winter Meeting, Vol .1, pp. 250-255, January 27-31, 2002.

- [ZJA05] F. Zhou, G. Joos, C. Abbey, "Voltage Stability in Weak Connection Wind Farms", Proceedings of 2005 IEEE PES General Meeting, pp. 610-615, June 12-16, 2005.
- [ZZL00] S. Z. Zhu, J. H. Zheng, L. Li, S. D. Shen, G. M. Luo, "Effect of Load Modeling on Voltage Stability", Proceedings of 2000 IEEE PES General Meeting, Vol. 1, pp. 395-400, July 16-20, 2000.