



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Η Επιρροή του Φορτίου Εικονικών Σταθμών Παραγωγής
στην Πρωτεύουσα Ρύθμιση Φορτίου - Συχνότητας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΗΛΙΑΣ Π. ΣΑΡΑΝΤΑΚΟΣ

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Η Επιρροή του Φορτίου Εικονικών Σταθμών Παραγωγής στην Πρωτεύουσα Ρύθμιση Φορτίου - Συχνότητας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΗΛΙΑΣ Π. ΣΑΡΑΝΤΑΚΟΣ

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Ιανουάριο του 2014.

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Σταύρος Παπαθανασίου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Πάυλος Γεωργιάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2014

.....

ΗΛΙΑΣ Π. ΣΑΡΑΝΤΑΚΟΣ

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

Copyright © Ηλίας Π. Σαραντάκος, 2014.

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.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία που μου έδωσε να προσεγγίσω ένα σύγχρονο πρόβλημα της επιστήμης του ηλεκτρολόγου μηχανικού καθώς και για τη διάθεσή του να βοηθήσει και να δώσει τις πολύτιμες συμβουλές του στους φοιτητές.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Παναγιώτη Μουτή καταρχήν για τη διάθεσή του να συνεργαστούμε καθώς επίσης και για τη βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου. Πολύ σημαντική ήταν, επίσης, η συμπαράσταση και η ενθάρρυνσή του αλλά και οι συμβουλές του, τόσο για την εργασία όσο και για άλλα θέματα. Χωρίς τον Παναγιώτη δε θα ήταν δυνατή η εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τη συνάδελφό μου Αναστασία Σαμπάνη για την άριστη συνεργασία μας σε όλη τη διάρκεια των εργασιών μας.

Θα ήθελα να συνεχίσω τις ευχαριστίες μου με έναν όχι και τόσο συνηθισμένο τρόπο.

Καταρχήν ευχαριστώ το Θεό. Δεν το κάνουμε όσο θα έπρεπε και νιώθω ότι είναι, σαφώς, το πρώτο πράγμα που πρέπει να κάνουμε.

Συνεχίζοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου. Χάρη σε αυτήν είχα τη δυνατότητα να μπω σε αυτή τη σχολή και να ολοκληρώσω αυτήν την εργασία. Τους ευχαριστώ για το χρόνο που μου αφιέρωσαν και για τη στήριξη που μου παρείχαν.

Σαφώς, ευχαριστώ την Αντιγόνη για την υπομονή της και την κατανόηση που έδειξε.

Επίσης, με την ευκαιρία αυτή -της ολοκλήρωσης της διπλωματικής μου εργασίας- θα ήθελα να ευχαριστήσω ορισμένους ανθρώπους τόσο για τη βοήθεια που μου προσέφεραν -πρακτική και ψυχολογική- όσο και για τις στιγμές -ευχάριστες και δύσκολες- που περάσαμε μαζί στη διάρκεια των φοιτητικών μας χρόνων.

Αρχίζω με τον Γιάννη Κανδηλώρο που μαζί ξεκινήσαμε να ασχολούμαστε σοβαρά με τη σχολή και μέσα από τη συνεργασία μας και τη βοήθειά του μου έδωσε την ώθηση για να συνεχίσω.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τη Μυρτώ, ένα από τα λίγα άτομα που ταιριάζαμε τόσο πολύ στο διάβασμα.

Συνεχίζω με τη Νατάσα, την κολλητή μου. Τη Λένια, την Κατερίνα, το Γιώργο, το Στέφανο και το Νίκο για τη βοήθειά τους και τη φιλοξενία τους. Ευχαριστώ, επίσης τον Πύρρο, τον Πέρπε, τον Παντελή, τον Σπύρο, το Λαμ και το Μιχάλη για την παρέα τους και την ευχάριστη συνεργασία μας.

Αναφέρομαι συγκεκριμένα στους Κολλιόπουλο και Κοτζά και το Κολλιοπουλάδικο και σε αυτά που περάσαμε μαζί.

Επίσης, ευχαριστώ τους Μάριους, την Άννα, τη Λαμπρινή και τελευταίες αλλά όχι λιγότερο σημαντικές τις Έρικα, Μαρία και Μαργαρίτα.

Θα έπρεπε να γράψω πολύ περισσότερα και να μιλήσω ξεχωριστά για τον καθένα.
Με συγχωρείτε,

Ηλίας Σαραντάκος

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μελετάται ο τρόπος με τον οποίο το φορτίο, που συγκεντρώνεται και συντονίζεται από έναν Εικονικό Σταθμό Παραγωγής (ΕιΣΠ), συμμετέχει στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου - συχνότητας και εξετάζονται τα πιθανά οφέλη από αυτή τη συγκέντρωση. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται και αναπτύσσεται το μοντέλο των ωμικών θερμοστατικών φορτίων, που ελέγχονται από PID ελεγκτές θερμοκρασίας και αναλύεται η σημασία της αυτορρύθμισης του φορτίου.

Για την πραγματοποίηση της μελέτης αυτής, μοντελοποιείται σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στο περιβάλλον Simulink του λογισμικού Matlab, η αναπαράσταση του οποίου γίνεται σύμφωνα με το μοντέλο ισχύος - ροπής ενός ζυγού. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επίδραση ορισμένων παραμέτρων στη συμμετοχή του φορτίου στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου - συχνότητας. Οι παράμετροι αυτές είναι η σχέση ΕιΣΠ - υπολοίπου συστήματος, η αδράνεια του συστήματος, το μέγεθος και το κέρδος ρύθμισης του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ και ο συντελεστής αυτορρύθμισης του φορτίου του ΕιΣΠ. Παρουσιάζεται, επίσης, η περίπτωση στην οποία το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση υψηλής φόρτισης και παράλληλα η εφεδρεία πρωτεύουσας ρύθμισης βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα. Η διαταραχή που διεξάγεται συνίσταται σε βηματική αύξηση του φορτίου μία ορισμένη χρονική στιγμή με σκοπό να παρατηρηθεί η απόκριση της συχνότητας και η μεταβολή της ισχύος του φορτίου του ΕιΣΠ.

Λέξεις Κλειδιά: πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου - συχνότητας, εικονικός σταθμός παραγωγής, διαχείριση φορτίου, θερμοστατικά φορτία, PID έλεγχος θερμοκρασίας, αυτορρύθμιση φορτίου

Abstract

This thesis examines the way electric loads contribute to primary load - frequency control when they are aggregated and coordinated by a Virtual Power Plant (VPP) and the potential benefits that arise from such an aggregation. Especially, the model of a purely resistive PID controlled Thermostatically Controlled Load (TCL) is studied and developed and also the significance of load self-regulation is analyzed. For this study, a model of a power system is developed in Matlab/Simulink environment, the representation of which is implemented according to the single-bus system. Specifically, the effect of certain parameters in primary load - frequency control is examined. These parameters are the size proportion between the VPP and the rest of the system, the system inertia, the size and the primary regulation gain of the controllable VPP TCL and the VPP load self-regulation. The scenario of high loading conditions and low primary control reserves is also presented. The disturbance that takes place is a step load increase so as the frequency response and the VPP load power variation to be observed.

Key Words: primary load - frequency control, virtual power plant, demand response, thermostatically controlled loads, PID temperature control, load self-regulation

Πίνακας Περιεχομένων

1 Εισαγωγή	21
1.1 Γενικά.....	21
1.1.1 Ιστορία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	21
1.1.2 Το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής	22
1.1.3 Η μεταβλητότητα των ΑΠΕ.....	23
1.1.4 Διανεμημένη Παραγωγή – ΔΠ (Distributed Generation – DG)	25
1.1.5 Απελευθέρωση της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας	25
1.1.6 Ευφυή Δίκτυα (Smart Grids)	26
1.1.6.1 Τεχνολογία Πληροφορίας και Επικοινωνιών - ΤΠΕ (Information and Communication Technology - ICT).....	27
1.1.6.2 Χαρακτηριστικά των Smart Grids σε διαφορετικά επίπεδα του δικτύου	27
1.1.6.3 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας (Energy Storage)	28
1.1.6.4 Το φορτίο ως ένα ενεργά ελεγχόμενο στοιχείο	29
1.1.6.5 Συγκεντρωτές (Aggregators), Εικονικοί Σταθμοί Παραγωγής (Virtual Power Plants) και Μικροδίκτυα (MicroGrids)	30
1.1.6.6 Μέτρα για την ενίσχυση της ασφάλειας του συστήματος.....	31
1.1.7 Το δυναμικό της Διαχείρισης Φορτίου	31
1.2 Επικουρικές Υπηρεσίες (Ancillary Services).....	33
1.2.1 Πρωτεύουσα Ρύθμιση και Εφεδρεία.....	33
1.2.2 Δευτερεύουσα Ρύθμιση και Εύρος	34
1.2.3 Τριτεύουσα Ρύθμιση και Εφεδρεία.....	38
1.2.3.1 Στρεφόμενη Εφεδρεία	39
1.2.3.2 Μη Στρεφόμενη Εφεδρεία.....	39
1.2.4 Στατή Εφεδρεία.....	40
1.2.5 Ρύθμιση Τάσης.....	40
1.2.5.1 Χρήση Στατών Στοιχείων Αντιστάθμισης	40
1.2.5.2 Χρήση Σύγχρονων Στοιχείων Αντιστάθμισης	41
1.2.5.3 Διαχείριση Αυτομετασχηματιστών	41
1.2.5.4 Σειρά ενεργοποίησης.....	41
1.2.6 Επανεκκίνηση του Συστήματος	42
1.2.6.1 Προετοιμασία αντιμετώπισης ολικής κατάρρευσης.....	42

1.2.6.2 Ενέργειες αποκατάστασης του Συστήματος σε περίπτωση ολικής κατάρρευσης	43
1.2.7 Συμπληρωματική Ενέργεια Συστήματος (ΣΕΣ)	43
1.2.8 Υποχρεώσεις του Διαχειριστή σχετικά με τις Επικουρικές Υπηρεσίες	43
1.3 Αντικείμενο - σκοπός της εργασίας	44
1.4 Βασική δομή της εργασίας	44
2 Θεωρητικό υπόβαθρο – Μοντελοποίηση στοιχείων συστήματος.....	47
2.1 Ρύθμιση Φορτίου Συχνότητας – Ρυθμιστές Στροφών	47
2.1.1 Γενικά.....	47
2.1.2 Πρωτεύουσα και Δευτερεύουσα Ρύθμιση	48
2.1.3 Στατισμός	49
2.2 Ατμοηλεκτρικός Σταθμός.....	51
2.2.1 Ατμοπαραγωγός	51
2.2.2 Ατμοστροβίλος	53
2.2.3 Ρυθμιστής στροφών	54
2.3 Υδροηλεκτρικός Σταθμός.....	56
2.3.1 Γενική περιγραφή υδροηλεκτρικών σταθμών	56
2.3.2 Μοντέλο υδροστροβίλου	57
2.3.3 Περιγραφή ρυθμιστή στροφών υδροστροβίλου	58
2.4 Ντηζελοηλεκτρική Μονάδα	59
2.4.1 Μηχανή diesel.....	59
2.4.2 Μοντέλο ντηζελογεννήτριας.....	61
2.5 Μηχανές Επαγωγής	62
2.5.1 Εισαγωγή	62
2.5.2 Περιγραφή μοντέλου μηχανής επαγωγής με τις εξισώσεις του Park	64
2.6 Ανεμογεννήτρια.....	72
2.6.1 Αρχή λειτουργίας και βασικά υποσυστήματα	72
2.6.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών.....	73
2.6.3 Τοπολογίες ανεμογεννητριών	75
2.6.4 Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης (ΓΕΔΤ) – Doubly Fed Induction Generator (DFIG)	76
2.6.5 Μοντελοποίηση της ΓΕΔΤ (DFIG)	77
2.6.6 Έλεγχος της ΓΕΔΤ	80

2.6.6.1	Διανυσματικός Έλεγχος με Προσανατολισμό Πεδίου (Vector Control – FOC: Field Oriented Control) – Εισαγωγή.....	80
2.6.6.2	Έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος – Μοντελοποίηση	81
2.7	Θερμοστατικά Φορτία (Thermostatically Controlled Loads)	86
2.7.1	Γενικά.....	86
2.7.2	Μοντελοποίηση Θερμοστατικών Φορτίων (TCLs)	87
2.7.2.1	Integrator Windup	91
2.7.2.2	Αντιμετώπιση του Windup.....	92
3	Συμμετοχή του φορτίου Εικονικού Σταθμού Παραγωγής στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου συχνότητας.....	93
3.1	Εικονικός Σταθμός Παραγωγής (ΕιΣΠ)	93
3.1.1	Η πρόκληση για τα μελλοντικά ΣΗΕ.....	93
3.1.2	Η ιδέα του Εικονικού Σταθμού Παραγωγής.....	94
3.1.3	Το μέλλον στα ΣΗΕ και η προοπτική των ΕιΣΠ	96
3.2	Αυτορρύθμιση φορτίου	99
3.3	Συμμετοχή των θερμοστατικών φορτίων στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου συχνότητας	102
4	Θεμελίωση του προβλήματος	107
4.1	Γενική δομή του μοντέλου προσομοίωσης	107
4.2	Παράμετροι προσομοιώσεων	108
4.3	Παράμετροι στοιχείων του συστήματος.....	109
5	Προσομοιώσεις και αποτελέσματα – Σχόλια και παρατηρήσεις.....	113
5.1	Σχέση ΕιΣΠ - Συστήματος	113
5.2	Δύναμη (αδράνεια) συστήματος	118
5.3	Μέγεθος ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ΕιΣΠ	128
5.4	Κέρδος ρύθμισης ελεγχόμενου TCL ΕιΣΠ	131
5.5	Αυτορρύθμιση φορτίου ΕιΣΠ	135
5.6	Υψηλό φορτίο-Μειωμένη εφεδρεία πρωτεύουσας ρύθμισης	137
6	Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	139
6.1	Γενικά συμπεράσματα.....	139
6.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	140

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2-1: Δυνατές διαμορφώσεις του ηλεκτρικού συστήματος μιας Α/Γ.....	75
Πίνακας 3-1: Παραδείγματα παραμέτρων γεννητριών και ελεγχόμενων φορτίων με συνδυασμό των οποίων χαρακτηρίζεται ένας ΕιΣΠ.....	96
Πίνακας 3-2: Ευαισθησία διάφορων τύπων φορτίων ως προς τη συχνότητα.....	99
Πίνακας 4-1: Τιμές παραμέτρων ατμοηλεκτρικού σταθμού	109
Πίνακας 4-2: Τιμές παραμέτρων υδροηλεκτρικού σταθμού	109
Πίνακας 4-3: Τιμές παραμέτρων νηξελοηλεκτρικής μονάδας.....	110
Πίνακας 4-4: Τιμές παραμέτρων κινητήρα επαγωγής.....	110
Πίνακας 4-5: Τιμές παραμέτρων μοντέλου ΓΕΔΤ.....	111
Πίνακας 4-6: Τιμές παραμέτρων θερμοστατικού φορτίου	111
Πίνακας 4-7: Συμμετοχή στην παραγωγή ανά είδος σταθμού.....	112
Πίνακας 5-1: Διαφορά της ελάχιστης τιμής της συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ανάλογα με τη σχέση ΕιΣΠ – Συστήματος	117
Πίνακας 5-2: Διαφορά της ελάχιστης τιμής της συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ανάλογα με την αδράνεια του συστήματος.....	123
Πίνακας 5-3: Διαφορά της ελάχιστης τιμής της συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ανάλογα με τη συνολική ονομαστική παραγωγή και την αδράνεια του συστήματος.....	127
Πίνακας 5-4: Ελάχιστη τιμή της συχνότητας και μέγιστη μείωση της ισχύος του θερμοστατικού φορτίου ανάλογα με την ποσότητα του φορτίου του ΕιΣΠ και τη συμμετοχή ή μη του TCL.....	131
Πίνακας 5-5: Ελάχιστη τιμή της συχνότητας και μέγιστη μείωση της ισχύος του θερμοστατικού φορτίου ανάλογα με το κέρδος ρύθμισης του ελεγχόμενου φορτίου του ΕιΣΠ και τη συμμετοχή ή μη αυτού	134
Πίνακας 5-6: Ελάχιστη και μόνιμη τιμή της συχνότητας ανάλογα με την τιμή του συντελεστή αυτορρύθμισης φορτίου του ΕιΣΠ.....	136

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2-1: Λειτουργικό διάγραμμα ρυθμιστή στροφών.....	48
Σχήμα 2-2: Χαρακτηριστική φορτίου – συχνότητας	50
Σχήμα 2-3: Σχηματικό διάγραμμα μηχανικού – υδραυλικού ρυθμιστή στροφών ατμοστροβίλου.....	54
Σχήμα 2-4: Μοντέλο μηχανικού – υδραυλικού ρυθμιστή στροφών ατμοστροβίλου ..	55
Σχήμα 2-5: Σχηματικό διάγραμμα υδροηλεκτρικής μονάδας.....	57
Σχήμα 2-6: Διάγραμμα βαθμίδων μηχανικού – υδραυλικού ρυθμιστή στροφών υδροστροβίλου.....	58
Σχήμα 2-7: Βασικά δομικά στοιχεία μίας μηχανής diesel	60
Σχήμα 2-8: Μοντέλο προσομοίωσης ντιζελογεννήτριας.....	61
Σχήμα 2-9: Κυκλωματική παράσταση μηχανής επαγωγής.....	63
Σχήμα 2-10: Εξισώσεις τάσεως στάτη.....	66
Σχήμα 2-11: Εξισώσεις τάσεως δρομέα	67
Σχήμα 2-12: Εξισώσεις πεπλεγμένων μαγνητικών ροών	69
Σχήμα 2-13: Εξίσωση κίνησης και μοντέλο μηχανικού φορτίου	71
Σχήμα 2-14: Συνολικό μοντέλο κινητήρα επαγωγής.....	71
Σχήμα 2-15: Α/Γ Vestas V90 3 MW	72
Σχήμα 2-16: Διάταξη συστήματος Α/Γ με ΓΕΔΤ.....	77
Σχήμα 2-17: Εξισώσεις πεπλεγμένων μαγνητικών ροών	79
Σχήμα 2-18: Μοντέλο ΓΕΔΤ	80
Σχήμα 2-19: Στροφή dq πλαισίου για την υλοποίηση του διανυσματικού ελέγχου....	82
Σχήμα 2-20: Μετασχηματιστής γωνίας	82
Σχήμα 2-21: Μοντέλο συστήματος ελέγχου της ΓΕΔΤ.....	85
Σχήμα 2-22: Ένα απλό μοντέλο για θερμοστατικά φορτία	88
Σχήμα 2-23: Ένα ρεαλιστικό μοντέλο για θερμοστατικά φορτία.....	89
Σχήμα 2-24: Τελικό μοντέλο για θερμοστατικά φορτία.....	91
Σχήμα 2-25: PID ελεγκτής με anti-windup.....	92
Σχήμα 3-1: Σχηματισμός ΕιΣΠ από ομάδα μονάδων ΔΠ.....	94
Σχήμα 3-2: Σχηματική αναπαράσταση του σημερινού συστήματος και δύο πιθανά σενάρια μελλοντικής ανάπτυξης.....	97

Σχήμα 3-3: Επίδραση φορτίου στη ρύθμιση συχνότητας.....	100
Σχήμα 3-4: Σύστημα για την επίδειξη της συμβολής της αυτορρύθμισης του φορτίου στη ρύθμιση συχνότητας.....	101
Σχήμα 3-5: Μεταβολή της συχνότητας για διάφορους συντελεστές αυτορρύθμισης.....	101
Σχήμα 3-6: Ισχύς φορτίου για διάφορους συντελεστές αυτορρύθμισης	102
Σχήμα 3-7: Έλεγχος ισχύος θερμοστατικού φορτίου	102
Σχήμα 3-8: Σύστημα για την επίδειξη της απόκρισης του TCL	103
Σχήμα 3-9: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του TCL	104
Σχήμα 3-10: Θερμοκρασία αναφοράς.....	105
Σχήμα 3-11: Απορροφούμενη ισχύς από το θερμοστατικό φορτίο	105
Σχήμα 3-12: Θερμοκρασία θερμαινόμενου χώρου.....	106
Σχήμα 4-1: Μοντέλο μεταβολών ισχύος - ροπής ενός ζυγού	108
Σχήμα 5-1: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (Σύστημα = 20 x ΕιΣΠ).....	114
Σχήμα 5-2: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (Σύστημα = 10 x ΕιΣΠ).....	115
Σχήμα 5-3: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (Σύστημα = 2,5 x ΕιΣΠ).....	115
Σχήμα 5-4: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (Σύστημα = ΕιΣΠ).....	116
Σχήμα 5-5: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (ΕιΣΠ = 1,5 x Σύστημα).....	117
Σχήμα 5-6: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (H = 2 s).....	119
Σχήμα 5-7: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (H = 2,5 s).....	120
Σχήμα 5-8: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (H = 3 s).....	120
Σχήμα 5-9: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (H = 4 s).....	121
Σχήμα 5-10: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (H = 6 s).....	121
Σχήμα 5-11: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (H = 8 s).....	122

Σχήμα 5-12: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (H = 12 s).....	122
Σχήμα 5-13: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (H = 20 s).....	123
Σχήμα 5-14: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (Συνολική ονομαστική παραγωγή = 1 α.μ., H=4,5 s)	124
Σχήμα 5-15: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (Συνολική ονομαστική παραγωγή = 2 α.μ., H = 9 s)	125
Σχήμα 5-16: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (Συνολική ονομαστική παραγωγή = 4 α.μ., H=18 s)	125
Σχήμα 5-17: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (Συνολική ονομαστική παραγωγή = 6 α.μ., H=27 s)	126
Σχήμα 5-18: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (Συνολική ονομαστική παραγωγή = 8 α.μ., H=36 s)	127
Σχήμα 5-19: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας για διαφορετικές τιμές του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ.....	129
Σχήμα 5-20: Θερμοκρασία αναφοράς του θερμοστατικού φορτίου για διαφορετικές τιμές του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ.....	129
Σχήμα 5-21: Απορροφούμενη ισχύς από το θερμοστατικό φορτίο για διαφορετικές τιμές του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ.....	130
Σχήμα 5-22: Θερμοκρασία θερμαινόμενου χώρου για διαφορετικές τιμές του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ.....	130
Σχήμα 5-23: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας για διαφορετικές τιμές του κέρδους ρύθμισης του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ.....	132
Σχήμα 5-24: Θερμοκρασία αναφοράς του θερμοστατικού φορτίου για διαφορετικές τιμές του κέρδους ρύθμισης του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ.....	133
Σχήμα 5-25: Απορροφούμενη ισχύς από το θερμοστατικό φορτίο για διαφορετικές τιμές του κέρδους ρύθμισης του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ.....	133
Σχήμα 5-26: Θερμοκρασία θερμαινόμενου χώρου για διαφορετικές τιμές του κέρδους ρύθμισης του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ.....	134

Σχήμα 5-27: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αυτορρύθμισης του φορτίου του ΕιΣΠ	135
Σχήμα 5-28: Μεταβολή ισχύος φορτίου ΕιΣΠ για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αυτορρύθμισης φορτίου του ΕιΣΠ.....	136
Σχήμα 5-29: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ σε κατάσταση υψηλής φόρτισης του συστήματος και μειωμένης εφεδρείας πρωτεύουσας ρύθμισης	137
Σχήμα 5-30: Απορροφούμενη ισχύς από το θερμοστατικό φορτίο του ΕιΣΠ με και χωρίς τη συμμετοχή αυτού σε κατάσταση υψηλής φόρτισης του συστήματος και μειωμένης εφεδρείας πρωτεύουσας ρύθμισης	138

1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

1.1.1 Ιστορία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας [1]

Η ανάπτυξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας χρονολογείται στο τέλος του 19^{ου} αιώνα, όταν οι βασικές ιδέες για υποδομές παροχής ηλεκτρικής ενέργειας είχαν γίνει αντιληπτές. Η αρχή για τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας έγινε παράλληλα στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη μέσω τριών αλληλένδετων παραγόντων: μεγάλα τεχνολογικά επιτεύγματα από την πλευρά της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η εφεύρεση του δυναμό, καινούργιες ηλεκτρικές οικιακές συσκευές και μηχανές, καθώς επίσης και καινοτόμα επιχειρηματικά μοντέλα [2]. Απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας εμφανίστηκαν όταν κατασκευάστηκαν οι πρώτοι θερμικοί σταθμοί παραγωγής σε βιομηχανικά μέρη ή μικρές γειτονιές. Ύστερα από μία αρχική διαμάχη ανάμεσα στο εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) και στο συνεχές ρεύμα (DC), το AC επικράτησε και καθιερώθηκε για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα μικρά απομονωμένα δίκτυα διανομής διασυνδέονταν και συνεχώς επεκτείνονταν σε μεγαλύτερα δίκτυα, καθώς η τεχνολογία για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας εξελισσόταν και τα επίπεδα τάσης ανέβαιναν. Ο κύριος λόγος για τη διασύνδεση των δικτύων ήταν η αυξημένη αξιοπιστία, η οποία ήταν αποτέλεσμα του γεγονότος ότι ένα έλλειμμα ισχύος λόγω μίας διακοπής λειτουργίας γεννήτριας θα μπορούσε να αντισταθμιστεί από άλλες πηγές στο δίκτυο. Αυτές οι εξελίξεις λάμβαναν χώρα παράλληλα σε διάφορα σημεία του κόσμου.

Ενώ στις ΗΠΑ τα συστήματα μεταφοράς ήταν κατά κύριο λόγο περιορισμένα εντός των συνόρων της χώρας, η γεωγραφική κατάσταση στην Ευρώπη απαιτούσε διεθνή συνεργασία με σκοπό την επέκταση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα μεγάλης κλίμακας ηπειρωτικό δίκτυο. Το 1951, η Ένωση για το Συντονισμό της Παραγωγής και της Μεταφοράς της Ηλεκτρικής Ενέργειας (Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Électricité – UCPTE), η οποία αργότερα ονομάστηκε Ένωση για το Συντονισμό της Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity – UCTE), σχηματίστηκε με σκοπό να υποστηρίξει την ανάπτυξη του Ευρωπαϊκού διασυνδεδεμένου συστήματος [3]. Στο δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα, έγιναν μεγάλες επεκτάσεις του δικτύου κάτω από την επίβλεψη του UCTE. Τυποποιήθηκαν κανονισμοί για τους Διαχειριστές των Συστημάτων (Transmission System Operators – TSOs) με στόχο τη συντονισμένη λειτουργία τους. Η κυρίαρχη κατάσταση σε αυτήν την εποχή ήταν η μεταφορά μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας από τα μεγάλα κέντρα παραγωγής στην κατανάλωση μέσω μεγάλων αποστάσεων. Η παραγωγή αυτή ήταν σχεδόν εξ ολοκλήρου βασισμένη σε ορυκτά καύσιμα, υδροηλεκτρική και πυρηνική ενέργεια. Μεγάλες πτώσεις τάσης από μεγάλες ροές ισχύος, λόγω της απόστασης μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ροές ισχύος ήταν μονόδρομες, καθώς υπήρχε ελάχιστη διανεμημένη παραγωγή στα χαμηλότερα επίπεδα τάσης. Οι μονάδες παραγωγής ήταν προγραμματισμένες να ακολουθούν τη μη ελεγχόμενη ζήτηση.

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, σήμερα, υφίστανται ριζικές αλλαγές, οι οποίες ξεκίνησαν περίπου στην αρχή του 21^{ου} αιώνα. Η ανάγκη να μειώσουμε τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου μας έχει οδηγήσει σε αλλαγές στην ενεργειακή πολιτική και στη νομοθεσία με στόχο ένα πιο “πράσινο” σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) με το σύνθετο χαρακτηριστικό τους - τη μεταβλητότητα - χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικότερα στο επίπεδο της διανομής. Παράλληλα, ο τομέας της ηλεκτρικής ενέργειας απελευθερώθηκε και τώρα υπόκειται (σε διαφορετικό, βέβαια, βαθμό στην κάθε χώρα) στους κανόνες του ανταγωνισμού της ελεύθερης αγοράς σε όλες τις Ευρωπαϊκές χώρες και σε πολλές άλλες στον υπόλοιπο κόσμο. Αυτές οι εξελίξεις αυξάνουν την πολυπλοκότητα της λειτουργίας και της ανάπτυξης των διασυνδεδεμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

1.1.2 Το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής [4]

Η ανάγκη μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και των άλλων αερίων του θερμοκηπίου είναι σήμερα επιτακτική. Εάν δε μειωθούν δραστικά οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου (διοξειδίου του άνθρακα, μεθανίου, οξειδίων του αζώτου, χλωροφθορανθράκων), η αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης είναι αναπόφευκτη και η αλλαγή του κλίματος μπορεί να έχει καταστρεπτικές συνέπειες μέχρι το τέλος του 21^{ου} αιώνα. Όταν εκφράσουμε όλες τις εκπομπές σε ισοδύναμες

εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα με βάση τη συμβολή του καθενός αερίου στην αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) έχουν την κύρια ευθύνη, γιατί αποτελούν το 82% του συνόλου.

Με στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έχει αναληφθεί κοινή δράση σε διεθνές επίπεδο και σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σε διεθνές επίπεδο, αναφέρεται η πρωτοβουλία των Ηνωμένων Εθνών για τη μείωση των εκπομπών και την κλιματική αλλαγή (Πρωτόκολλο Κιότο). Τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν επικυρώσει το Πρωτόκολλο, άλλωστε, και η ίδια η Κοινότητα αποτελεί συμβαλλόμενο μέρος στο Πρωτόκολλο του Κιότο. Η Ελλάδα είχε δεσμευθεί οι συνολικές επιτρεπόμενες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά την πενταετή περίοδο 2008 – 2012 να μην υπερβούν τους 694.087.947 ισοδύναμους τόνους διοξειδίου του άνθρακα, δηλαδή να μην υπερβούν το πενταπλάσιο των εκπομπών του έτους βάσης (1990) αυξημένο κατά 25%.

Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο έχει εγκρίνει μια ολοκληρωμένη πολιτική για το κλίμα και την ενέργεια. Η πολιτική είναι φιλόδοξη και για το 2020 έχουν τεθεί οι ακόλουθοι στόχοι:

- Μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου τουλάχιστον κατά 20% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 (ακόμη και κατά 30% εάν όλες οι αναπτυγμένες χώρες δεσμευτούν για ανάλογες μειώσεις).
- Αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ώστε το 2020 να καλύπτει το 20% της συνολικής ενεργειακής παραγωγής (από 8,5% το 2007).
- Περιορισμός της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας κατά 20%, σε σχέση με τα προβλεπόμενα για το 2020 επίπεδα κατανάλωσης, μέσα από τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης.

Οι παραπάνω απαιτήσεις είναι γνωστές ως στόχοι 20 – 20 – 20.

1.1.3 Η μεταβλητότητα των ΑΠΕ

Οι πιο σημαντικές μορφές ενέργειας ανανεώσιμων πηγών είναι οι ακόλουθες:

- Αιολική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Υδροηλεκτρική ενέργεια
- Βιομάζα
- Γεωθερμική ενέργεια
- Ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων
- Κυψέλες καυσίμου

Όλες αυτές οι μορφές ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Γενικά, όσο πιο συγκεντρωμένες είναι οι μορφές ενέργειας από

ανανεώσιμες πηγές, όπως η υδροηλεκτρική και η βιομάζα, τόσο πιο εύκολο είναι να τις εκμεταλλευτούμε, σε αντίθεση με την αιολική και την ηλιακή, που είναι πιο “διασκορπισμένες”. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς για την προστασία του περιβάλλοντος, το δυναμικό χρησιμοποίησης για την ηλιακή και την αιολική ενέργεια είναι πολύ μεγαλύτερο. Συνεπώς, στο μέλλον ένα πολύ σημαντικό μέρος του συνόλου των ΑΠΕ θα προέρχεται από αυτές τις δύο πηγές, όπως άλλωστε συμβαίνει και τώρα [1].

Το κύριο θέμα των εγχύσεων ισχύος από αιολικά και φωτοβολταϊκά στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μεταβλητότητα [5]. Η αιολική ενέργεια παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από την εποχή, την ώρα της ημέρας και τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Παρατηρούνται επίσης μεταβολές σε ωριαία κλίμακα με ισχυρή αυτοσυσχέτιση, καθώς επίσης και ασυσχέτιστες μεταβολές σε χρονική κλίμακα δευτερολέπτων και λεπτών με μικρότερο πλάτος. Η χρονική κλίμακα της φωτοβολταϊκής παραγωγής είναι η ημέρα, καθώς έχουμε όμοια εικόνα για την ημερήσια παραγωγή από μέρα σε μέρα. Βεβαίως, έχουμε σημαντική εξάρτηση από την εποχή και λιγότερο σημαντική από βραχυπρόθεσμα φαινόμενα από σύννεφα και άλλα καιρικά φαινόμενα. Στην ηλιοθερμική παραγωγή, η εικόνα της ημερήσιας παραγωγής μπορεί να επηρεαστεί με τη χρήση αποθήκευσης θερμότητας [6].

Οι επιπτώσεις της διακύμανσης της ισχύος εξόδου των μονάδων ΑΠΕ στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολλαπλές: η χρονική μεταβλητότητα της παραγωγής από ΑΠΕ δημιουργεί ένα σημαντικό ζήτημα στον προγραμματισμό των συμβατικών μονάδων παραγωγής, καθώς η συνεχής μεταβολή του εναπομείναντος φορτίου (φορτίο – μεταβαλλόμενη παραγωγή) μπορεί να προκαλέσει συχνές ενάρξεις και τερματισμούς λειτουργίας μονάδων [7]. Μεγάλες μεταβολές ενεργού ισχύος προκαλούμενες από μεταβαλλόμενη παραγωγή μπορεί να είναι μεγαλύτερες από τις συνήθεις μεταβολές φορτίου και επίσης μπορεί να συμπέσουν με μεταβολές φορτίου προς την αντίθετη κατεύθυνση, όπως αναφέρεται στο [8] στην περίπτωση της αιολικής παραγωγής. Επιπλέον παρατηρείται αύξηση της απαιτούμενης ποσότητας εφεδρείας ενεργού ισχύος, καθώς αυξάνει η διείσδυση της αιολικής ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας [9]. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας είναι η αυξημένη ανάγκη μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μεγάλων αποστάσεων, αφού τα καλύτερα μέρη για εγκατάσταση ΑΠΕ είναι συνήθως μακριά από τα κέντρα κατανάλωσης.

Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι η ευελιξία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι καθοριστικής σημασίας για το κατά πόσο μπορούν να εγκατασταθούν νέες ΑΠΕ στο υπάρχον σύστημα. Στις αγορές ενέργειας, έλλειψη ευελιξίας μπορεί να οδηγήσει σε αρνητικές τιμές, καθώς μπορεί να είναι πιο οικονομικό για μία μονάδα παραγωγής να παράγει με αρνητικό έσοδο παρά να τερματίσει τη λειτουργία της ή να επωμιστεί το κόστος για τη μεταβολή της ισχύος εξόδου της [1].

Επιπλέον, έχουμε επιπτώσεις μικρής χρονικής κλίμακας στην ευστάθεια των ΣΗΕ προκαλούμενες από την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ. Στην περίπτωση

της αιολικής ενέργειας, οι γεννήτριες επαγωγής διπλής τροφοδότησης έχουν μικρή αδράνεια σε σύγκριση με τις σύγχρονες μηχανές, και οι γεννήτριες που συνδέονται στο δίκτυο μέσω αντιστροφέα δεν παρέχουν αδράνεια σε αυτό από μόνες τους. Η ικανότητα για αδιάλειπτη λειτουργία σε σφάλμα (Fault Ride Through), ειδικά στην περίπτωση των αιολικών [10], είναι πολύ σημαντική για την προστασία των ΣΗΕ σε περιπτώσεις διαταραχών. Η φωτοβολταϊκή παραγωγή μπορεί επίσης να επηρεάσει τη δυναμική συμπεριφορά των διασυνδεδεμένων δικτύων [11].

1.1.4 Διανεμημένη Παραγωγή – ΔΠ (Distributed Generation – DG)

Μαζί με τη συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ, η ποσότητα της αποκεντρωμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα δίκτυα διανομής (κυρίως αναφέρεται ως Διανεμημένη Παραγωγή (ΔΠ)) αυξάνει επίσης συνεχώς. Τα δίκτυα διανομής, αρχικά, δεν ήταν σχεδιασμένα να έχουν πολλές μονάδες παραγωγής. Έτσι, ακόμα λείπει ο κατάλληλος αυτοματισμός και παρακολούθηση, κάτι που είναι συνηθισμένο στο επίπεδο της μεταφοράς. Αν έχουμε μόνο μικρές ποσότητες από ΔΠ, τότε αυτές μπορούν να εγκατασταθούν με τη λογική “συνδέω και ξεχνάω” (“fit and forget”) και δεν είναι απαραίτητο να τις διαχειριζόμαστε ενεργά. Όμως, καθώς η διεσπαρμένη παραγωγή γίνεται ολοένα και περισσότερο εμφανής στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, η υψηλή πυκνότητα παραγωγής από τέτοιες μονάδες σε πολλά δίκτυα διανομής μπορεί να προκαλέσει καινούργια θέματα, τα οποία απαιτούν δραστικά μέτρα για την ενσωμάτωση αυτών των πηγών στο δίκτυο [12]. Ειδικότερα, στην περίπτωση της φωτοβολταϊκής παραγωγής, η οποία είναι κατά κύριο λόγο αποκεντρωμένη, καθώς επίσης και μεταβαλλόμενη, μία ενδεχόμενη μεγάλη διείσδυση σε ένα δίκτυο διανομής θα απαιτούσε μέτρα για να αποφευχθούν υπερτάσεις και υπερφορτίσεις διαφόρων στοιχείων του συστήματος [1], [13].

1.1.5 Απελευθέρωση της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σε πολλές χώρες, οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας απελευθερώθηκαν μέσα στα τελευταία 20 χρόνια. Όπως και με άλλες πολύ σημαντικές υποδομές, όπως τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών και την παροχή νερού, η νομοθεσία και το ρυθμιστικό πλαίσιο συνεχώς προσαρμοζόταν από την αποκτούμενη εμπειρία στη διάρκεια της διαδικασίας της απελευθέρωσης. Παρόλο που οι αρχικοί στόχοι της απελευθέρωσης της αγοράς, όπως αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα, χαμηλότερες τιμές και κίνητρα για προστασία του περιβάλλοντος, δεν είχαν επιτευχθεί πλήρως μετά το άνοιγμα των αγορών, η αποκτούμενη εμπειρία μπορεί να αντιμετωπίσει τα αρνητικά σημεία της απελευθέρωσης στο πέρασμα του χρόνου [14].

Σαν αποτέλεσμα του ανοίγματος των αγορών, τα συστήματα μεταφοράς χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για εμπορία ενέργειας, γεγονός που αυξάνει την ανάγκη να μεταφέρονται ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μεγάλων

αποστάσεων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει τη λειτουργία ενός ΣΗΕ πιο κοντά στα όρια ασφαλείας του [15].

Η εθνική δικαιοδοσία στην πραγματοποίηση της απελευθέρωσης της αγοράς ενέργειας, έχει οδηγήσει στην ύπαρξη πλήθους συστημάτων αγορών ενέργειας. Ειδικότερα, στις αγορές επικουρικών υπηρεσιών ο σχεδιασμός της αγοράς και η χρησιμοποιούμενη ονοματολογία μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάμεσα στις χώρες [16].

1.1.6 Ευφυή Δίκτυα (Smart Grids) [1]

Η ιδέα των Smart Grids προέκυψε σαν ένας τρόπος να χειριστούμε την αυξανόμενη πολυπλοκότητα στον τομέα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία είναι συνέπεια της εξάπλωσης των ΑΠΕ, των απαιτήσεων ενεργειακής αποδοτικότητας και της απελευθέρωσης της αγοράς ενέργειας. Παρόλο που ο όρος δεν έχει έναν επίσημο ορισμό που να είναι αποδεκτός από όλους τους ενδιαφερόμενους φορείς, αυτό που καταλαβαίνουμε σαν Smart Grid, είναι ένας συνδυασμός συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και τεχνολογίας πληροφορίας και επικοινωνιών (Information and Communication Technology – ICT), με σκοπό την υλοποίηση προχωρημένων τεχνικών για την παρακολούθηση, τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση σε όλα τα επίπεδα του δικτύου [17]. Κίνητρα για την υλοποίηση χαρακτηριστικών των Smart Grids μπορεί να είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, η βελτιωμένη ελεγχσιμότητα και ευστάθεια των ΣΗΕ, νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες στις αγορές ενέργειας και στις αγορές επικουρικών υπηρεσιών ή οικονομικά οφέλη από την πιο αποτελεσματική λειτουργία του δικτύου. Σύμφωνα με την ETP (Smart-Grids European Technology Platform [18]), ένα Smart Grid είναι:

“ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο μπορεί, έξυπνα, να ενσωματώσει τις λειτουργίες όλων των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι σε αυτό – μονάδες παραγωγής, καταναλωτές και αυτοί που κάνουν και τα δύο – με σκοπό να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια με αποδοτικό, οικονομικό, ασφαλή και όσο το δυνατόν πιο “πράσινο” τρόπο. Ένα ευφυές δίκτυο χρησιμοποιεί καινοτόμα προϊόντα και υπηρεσίες σε συνδυασμό με τεχνολογίες παρακολούθησης, ελέγχου και επικοινωνιών με σκοπό να:

- Διευκολύνει τη σύνδεση και λειτουργία γεννητριών όλων των μεγεθών και τεχνολογιών
- Επιτρέπει στους καταναλωτές να λάβουν μέρος στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος
- Παράσχει στους καταναλωτές περισσότερες πληροφορίες και δυνατότητες επιλογής του παρόχου ηλεκτρικής ενέργειας
- Μειώσει σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ολόκληρου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

- Διατηρήσει ή ακόμα και να βελτιώσει το υπάρχον υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας του συστήματος, καθώς επίσης και την ποιότητα και ασφάλεια της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας
- Διατηρήσει και να βελτιώσει τις υπάρχουσες υπηρεσίες αποτελεσματικά
- Προωθήσει την ενοποίηση της αγοράς προς μία ενοποιημένη Ευρωπαϊκή αγορά.”

Μερικά κύρια χαρακτηριστικά των Smart Grids αναλύονται παρακάτω:

1.1.6.1 Τεχνολογία Πληροφορίας και Επικοινωνιών - ΤΠΕ (Information and Communication Technology - ICT)

Η τεχνολογία που επιτρέπει την ύπαρξη των Smart Grids είναι η ΤΠΕ μαζί με την υποδομή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό περιλαμβάνει προχωρημένο έλεγχο και παρακολούθηση εξοπλισμού στο σύστημα μεταφοράς και διανομής που επιτρέπει στους διαχειριστές να έχουν πολύ καλή γνώση της λειτουργικής κατάστασης του συστήματος, καθώς επίσης και να αναλάβουν δράση σε πραγματικό χρόνο, αν χρειαστεί. Διαδικασίες επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας, όπως η χρέωση των πελατών, διευκολύνονται με τη χρήση υποδομών προχωρημένων μετρητικών διατάξεων (Advanced Metering Infrastructure – AMI). Επιπλέον, η δυνατότητα της αλληλεπίδρασης με τον τελικό καταναλωτή, όπως για παράδειγμα μέσω συστημάτων τιμολόγησης πραγματικού χρόνου, βελτιωμένων ενεργειακών υπηρεσιών και άμεσου ελέγχου του φορτίου, υπάρχει λόγω της ΤΠΕ [19]. Οι τεχνολογίες των “Έξυπνων Σπιτιών” (“Smart Homes”), οι οποίες αρχικά είχαν σχεδιαστεί για περισσότερη άνεση των χρηστών και αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα, μπορούν να ενοποιηθούν με την ΤΠΕ του δικτύου, ώστε να δοθεί η δυνατότητα για συνολική βελτιστοποίηση σύμφωνα με τοπικά κριτήρια και με στόχους που αφορούν συνολικά το δίκτυο [20].

1.1.6.2 Χαρακτηριστικά των Smart Grids σε διαφορετικά επίπεδα του δικτύου

Πολλά χαρακτηριστικά των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στο επίπεδο της μεταφοράς, τώρα αποδίδονται στο μοντέλο του Smart Grid. Αυτά όμως υπάρχουν εδώ και αρκετό καιρό, καθώς ο προηγμένος έλεγχος και η παρακολούθηση είναι μία απαίτηση που υπάρχει από παλιά στα συστήματα μεταφοράς. Αυτή η απαίτηση περιλαμβάνει: συστήματα εποπτικού ελέγχου και συλλογής πληροφοριών (Supervisory Control and Data Acquisition – SCADA) [21], Wide – Area Monitoring Systems (WAMS) [22], Dynamic Line Rating (DLR) [23], Phasor Measurement Units (PMUs) [24], καθώς επίσης και βελτιωμένο έλεγχο ροής ισχύος με ευέλικτα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Flexible Alternating Current Transmission Systems – FACTS) [25].

Αντιθέτως, η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και ο έλεγχος δεν ήταν απαραίτητα στοιχεία στην παραδοσιακή λειτουργία του συστήματος διανομής. Για οικονομικούς λόγους, τα παραδοσιακά συστήματα διανομής ήταν σχεδιασμένα

συντηρητικά λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις της αιχμής του φορτίου, εξαλείφοντας την ανάγκη για ενεργό διαχείριση σε πραγματικό χρόνο. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, αυτό θα πρέπει να αλλάξει, καθώς η διείσδυση της Διανεμημένης Παραγωγής αυξάνει ολοένα και περισσότερο. Επίσης, νέοι τύποι φορτίων, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα (Electric Vehicles – EVs) και τα υβριδικά οχήματα (Plug – In Hybrid Vehicles – PHEVs) [26], απαιτούν μία πιο πολύπλοκη και εξελιγμένη διαχείριση του συστήματος διανομής.

1.1.6.3 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας (Energy Storage)

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε μεταβαλλόμενη παραγωγή από ΑΠΕ, η ύπαρξη αποθήκευσης είναι σημαντικός παράγοντας για την αποτελεσματική ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο σύστημα. Παρόλο που η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας είναι ήδη κάτι συνηθισμένο στα σημερινά ΣΗΕ (υπάρχει κυρίως με τη μορφή υδροηλεκτρικού σταθμού με αντλησιοταμίευση – pumped hydro storage plant), χρησιμοποιείται κυρίως για τη μετακίνηση του φορτίου, από την ημέρα (ώρα αιχμής) στη νύχτα που η ζήτηση είναι χαμηλή, όπως επίσης και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που συμβάλλει στην εξομάλυνση της καμπύλης φορτίου. Μία άλλη χρήση είναι οι επικουρικές υπηρεσίες, για την παροχή των οποίων εκμεταλλευόμαστε την καταλληλότητα των υδροηλεκτρικών σταθμών για ευέλικτη λειτουργία και γρήγορη μεταβολή της ισχύος τους. Ωστόσο, η αποθήκευση δεν είναι κύρια απαίτηση για τη λειτουργία ενός ΣΗΕ, αν υπάρχει αρκετή πλήρως ελεγχόμενη διαθέσιμη ισχύς παραγωγής για την κάλυψη της αιχμής του φορτίου.

Η ύπαρξη ελεγχόμενης και μη ελεγχόμενης παραγωγής και ζήτησης σε όλα τα επίπεδα του δικτύου συμπληρώνεται από την ιδέα της “πανταχού παρούσας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας” (“ubiquitous energy storage”) [27], η οποία υποστηρίζει τη χρήση αποθήκευσης στις εγκαταστάσεις του τελικού καταναλωτή, στο δίκτυο διανομής, καθώς επίσης και με τη μορφή κεντρικών εγκαταστάσεων αποθήκευσης στο επίπεδο της μεταφοράς.

Η λειτουργία πολλών τεχνολογιών αποθήκευσης σε όλα τα επίπεδα του δικτύου απαιτεί μία πιο εξελιγμένη μεθοδολογία για τον προγραμματισμό και τη βελτιστοποίηση. Καθώς, οι ενεργειακοί περιορισμοί μπορεί να είναι πολύ πιο σημαντικοί σε διατάξεις αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας, από ότι στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, η κατάσταση φόρτισης (State of Charge – SOC) μίας μεμονωμένης διάταξης αποθήκευσης, ή μιας ομάδας αυτών, πρέπει να ληφθεί υπόψη όταν λαμβάνονται αποφάσεις για φόρτιση ή εκφόρτιση. Ο στόχος της εφαρμογής αποθήκευσης είναι καθοριστικός παράγοντας για τη στρατηγική ελέγχου. Βάσει της στρατηγικής αυτής, μπορούν να οριστούν λειτουργικοί περιορισμοί για τη διάταξη αποθήκευσης [28], που θα πρέπει να συγκριθούν με τις φυσικές ιδιότητες της συγκεκριμένης τεχνολογίας αποθήκευσης με σκοπό να αξιολογηθεί η καταλληλότητα αυτής για μία συγκεκριμένη εφαρμογή.

1.1.6.4 Το φορτίο ως ένα ενεργά ελεγχόμενο στοιχείο

Σε αντίθεση με την παραδοσιακή λειτουργία των ΣΗΕ, η ενεργός διαχείριση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, που συχνά αναφέρεται με τους όρους Demand Response (DR), Demand Side Management (DSM) και Load Management (LM), είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι της υποδομής των Smart Grids. Στα επόμενα, χρησιμοποιούμε τον όρο Διαχείριση Φορτίου για όλες τις ενέργειες που αφορούν τον ενεργό έλεγχο του φορτίου.

Οι κυριότεροι παράγοντες που οδηγούν στη διαχείριση φορτίου είναι:

- 1) Η ανάγκη για αντιστάθμιση της επιπλέον αβεβαιότητας, που προκαλείται από τη μεταβαλλόμενη παραγωγή των ΑΠΕ
- 2) Η δυνατότητα τοπικής αντίδρασης σε προβλήματα που δημιουργούνται από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο διανομής
- 3) Η έως τώρα ανεκμετάλλευτη διαθέσιμη ευελιξία από την πλευρά του φορτίου

Τα μεγαλύτερα εμπόδια είναι:

- 1) Το υψηλό κόστος της υποδομής ΤΠΕ
- 2) Η ύπαρξη ανησυχιών, όσον αφορά την προστασία των προσωπικών δεδομένων των τελικών καταναλωτών
- 3) Η τεχνική και οργανωτική πολυπλοκότητα που έχει να κάνει με τη συντονισμένη λειτουργία χιλιάδων ή πιθανώς και εκατομμυρίων διασυνδεδεμένων μικρών φορτίων.

Μεγάλες δυνατότητες για διαχείριση φορτίου παρουσιάζουν τα φορτία θέρμανσης και ψύξης, λόγω της θερμικής τους αδράνειας και της ελαστικότητας που παρουσιάζουν στην κατανάλωση ισχύος. Αυτά τα φορτία, συνήθως ελέγχονται από θερμοστάτες. Αναφερόμαστε σε αυτά τα φορτία ως Θερμοστατικά Φορτία (Thermostatically Controlled Loads – TCLs).

Οι κύριες εφαρμογές της Διαχείρισης Φορτίου είναι πιο παραδοσιακές, όπως η μείωση της αιχμής του φορτίου την ημέρα, μεταφέροντας το φορτίο αυτό τη νύχτα (peak shaving and valley filling) [29], αλλά υπάρχουν και πιο σύγχρονες εφαρμογές ελέγχου του φορτίου, όπως η εξισορρόπηση και η παροχή επικουρικών υπηρεσιών [30]. Ενώ, όμως, η πρώτη εφαρμογή μπορεί να πραγματοποιηθεί με έναν, εκ των προτέρων, προγραμματισμό της ζήτησης, οι τελευταίες απαιτούν αλληλεπίδραση με το φορτίο σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Οι μεθοδολογίες για τη διαχείριση μεγάλων πληθυσμών διεσπαρμένων φορτίων ποικίλουν ανάλογα με τη θεωρούμενη εφαρμογή. Με σκοπό να επηρεάσουμε το σχήμα της καμπύλης φορτίου σε χρονική κλίμακα ωρών, σήματα τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να μεταδίδονται στους τελικούς καταναλωτές, ώστε να δίνονται κίνητρα για επιθυμητές μεταβολές φορτίου [31]. Σε αυτήν την περίπτωση, η αντίδραση από την πλευρά του καταναλωτή μπορεί να είναι αυτόματη, καθώς επίσης και επιλογή του ιδίου. Μετρήσεις της συχνότητας του συστήματος μπορούν να

χρησιμοποιηθούν για τη βραχυπρόθεσμη αντίδραση των TCLs, με πρωταρχικό στόχο την αντικατάσταση της εφεδρείας πρωτεύουσας ρύθμισης που προέρχεται από συμβατικές μονάδες [32]. Σε αυτήν την εργασία, θεωρούμε ότι οι μεμονωμένες συσκευές (TCLs) αποτελούν μονάδες ενός μεγάλου πληθυσμού, και ότι κάθε μία από αυτές τις μονάδες είναι άμεσα ελεγχόμενη από το διαχειριστή του εικονικού σταθμού παραγωγής.

Γενικά, ο ενεργός έλεγχος του φορτίου μπορεί να συμπληρώσει ή και να αντικαταστήσει τη χρήση ευέλικτης παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας σε πολλές περιπτώσεις, παρόλο που οι χρονικές κλίμακες είναι συνήθως διαφορετικές: ενώ, δηλαδή, πολλά συστήματα αποθήκευσης μπορούν να αποθηκεύουν ενέργεια για μέρες ή και εβδομάδες χωρίς σημαντικές απώλειες και οι γεννήτριες περιορίζονται μόνο από τους περιορισμούς ισχύος, οι ενέργειες για έλεγχο του φορτίου περιορίζονται συνήθως στην κλίμακα των ωρών και κάτω.

1.1.6.5 Συγκεντρωτές (Aggregators), Εικονικοί Σταθμοί Παραγωγής (Virtual Power Plants) και Μικροδίκτυα (MicroGrids)

Για να αντιμετωπίσουμε την πρόκληση της ενσωμάτωσης, πλήθους διεσπαρμένων μονάδων, στη λειτουργία του συστήματος, καινούργιες τεχνικές και οικονομικές ιδέες αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια. Η έννοια της “συγκέντρωσης” (“aggregation”), που σημαίνει συντονισμένη διαχείριση ενός μεγάλου αριθμού από μικρές μονάδες, έχει αποκτήσει μεγάλη σημασία στον επιστημονικό λόγο [33]. Νέες οντότητες που λέγονται συγκεντρωτές (aggregators), οι οποίες ειδικεύονται στην επικοινωνία με αυτές τις ομάδες φορτίων και στη συνολική βελτιστοποίησή τους, προβλέπεται ότι θα παίζουν όλο και μεγαλύτερο ρόλο στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, τα επόμενα χρόνια. Η συγκέντρωση μπορεί να πραγματοποιηθεί από την πλευρά της αγοράς, καθώς επίσης και από την πλευρά του δικτύου.

Η -από την πλευρά της αγοράς- προσέγγιση είναι βασισμένη στο γεγονός ότι οι αγορές ενέργειας είναι σχεδιασμένες για τη συμμετοχή γεννητριών μεγάλης ισχύος, όπως είναι οι κλασικές συμβατικές μονάδες. Οι περιορισμοί για ελάχιστη προσφερόμενη ποσότητα, καθώς επίσης και η πρακτική διαδικασία της υποβολής προσφορών στις αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών, καθιστούν δύσκολη τη συμμετοχή των μικρών μονάδων (από μόνων τους), που λειτουργούν στην κλίμακα των kW, σε αυτές τις αγορές. Η ιδέα των Εικονικών Σταθμών Παραγωγής - ΕΙΣΠ (Virtual Power Plants – VPPs) [34] δημιουργήθηκε με σκοπό να συνδυάσει ένα μεγάλο αριθμό από αυτές τις μικρές μονάδες, ώστε να τις κάνει να εμφανίζονται στην αγορά ως μία ενιαία οντότητα. Οι μικρές αυτές μονάδες, μπορεί να είναι διασκορπισμένες σε διάφορα δίκτυα διανομής ή ακόμα και σε διαφορετικές περιοχές ελέγχου. Αντιθέτως, συγκέντρωση βασισμένη στην τοπολογία του δικτύου, παρακινείται από το γεγονός ότι τα περισσότερα προβλήματα που σχετίζονται με τη διανεμημένη παραγωγή εμφανίζονται στη μέση και στη χαμηλή τάση. Στην πλευρά της χαμηλής τάσης, η ιδέα του ελέγχου τμημάτων του δικτύου σαν μια ξεχωριστή

οντότητα, οδήγησε στην ιδέα των Μικροδικτύων (MicroGrids) [35]. Στην πλευρά της μέσης τάσης, συγκεντρωμένα τμήματα του δικτύου αναφέρονται συνήθως ως “cells” [36]. Τα Μικροδίκτυα, τα cells και οι Εικονικοί Σταθμοί Παραγωγής (VPPs) είναι όλα κατάλληλα για την ενσωμάτωση των ελεγχόμενων φορτίων στο σύστημα.

1.1.6.6 Μέτρα για την ενίσχυση της ασφάλειας του συστήματος

Η διατήρηση του υπάρχοντος υψηλού επιπέδου αξιοπιστίας της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψίστης σημασίας για την κοινωνία. Παρατεταμένες διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος μπορούν να προκαλέσουν καταστροφικά αποτελέσματα στην οικονομία, στην κοινωνική ζωή, στη δημόσια υγεία και ασφάλεια και στην ασφάλεια μεγάλων γεωγραφικών περιοχών [37]. Ωστόσο, αυτό το υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας διακινδυνεύεται, λόγω των σημαντικών αλλαγών που πραγματοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Black-outs και διαταραχές, όπως αυτές στις ΗΠΑ και στην Ιταλία το 2003 και στην κεντρική Ευρώπη το 2006 [38] δείχνουν το πόσο εύαλωτα είναι τα σύγχρονα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάλυση του τελευταίου γεγονότος [39] έχει δείξει ότι η μη ελεγχόμενη φύση της αποσύνδεσης και της επανασύνδεσης της διανεμημένης παραγωγής (σε αυτήν την περίπτωση, κυρίως προκλήθηκε από ανεμογεννήτριες χωρίς ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας σε σφάλμα), έχει κάνει την εκκαθάριση της διαταραχής πιο δύσκολη. Αυτό καταδεικνύει την ανάγκη για βελτίωση της ελεγχιμότητας της παραγωγής και του φορτίου, καθώς επίσης και την ανάγκη για εφαρμογή νέων στρατηγικών λειτουργίας του συστήματος τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Παραδείγματα τέτοιων στρατηγικών είναι: η λεγόμενη “ελεγχόμενη νησιδοποίηση” (“controlled islanding”) τμημάτων του δικτύου σε περίπτωση μεγάλης διαταραχής και η υιοθέτηση καινούργιων σχημάτων Αποκοπής Φορτίου λόγω Υποσυχρότητας (Under – Frequency Load Shedding – UFLS). Η προαναφερθείσα στρατηγική μπορεί να περιλαμβάνει ενεργό αποκοπή μεμονωμένων φορτίων στην πλευρά των καταναλωτών αντί για αποκοπή ολόκληρων γραμμών τροφοδοσίας (feeders). Αυτό απαιτεί υποδομή ΤΠΕ που φτάνει ως τον τελικό καταναλωτή και μία εξελιγμένη μεθοδολογία για τη σχεδίαση της επιθυμητής αποκοπής φορτίου. Μέσω ενός τέτοιου συστήματος, τα ελεγχόμενα φορτία μπορούν επίσης να συμβάλλουν στην ενίσχυση της ασφάλειας του συστήματος.

1.1.7 Το δυναμικό της Διαχείρισης Φορτίου [1]

Έχοντας τονίσει τη σημασία της Διαχείρισης Φορτίου για τις λειτουργίες των Smart Grids τόσο σε κανονικές συνθήκες, όσο και στην περίπτωση μεγάλων διαταραχών, το ερώτημα που προκύπτει, αφορά τη διαθέσιμη ποσότητα ευέλικτων φορτίων για τις θεωρούμενες εφαρμογές. Οι τιμές, σχετικά με αυτό το μέγεθος, που συναντάμε στη βιβλιογραφία διαφέρουν σημαντικά, λόγω της εξάρτησης που υπάρχει από τη θεωρούμενη χώρα, την ώρα της ημέρας, την εποχή και τον τρόπο ελέγχου του φορτίου. Επίσης, δεν υπάρχει τυποποιημένη μεθοδολογία, η οποία να υπολογίζει τη

διαθέσιμη ποσότητα του ελεγχόμενου φορτίου. Πολλές γνωστές δημοσιεύσεις εστιάζουν σε μία συγκεκριμένη ποσότητα ισχύος που μπορεί να αποκοπεί για δεδομένο χρονικό διάστημα. Άλλες λαμβάνουν υπόψη την πιθανότητα μιας ελεγχόμενης αύξησης φορτίου. Η δυνατή διάρκεια επίδρασης στην απορρόφηση ισχύος του φορτίου, συνήθως αναφέρεται ως ένα μέτρο για τη διαθέσιμη ενέργεια του φορτίου που μπορεί να μετατοπιστεί χρονικά.

Μερικές εκτιμήσεις για το δυναμικό του ελεγχόμενου φορτίου αναφέρονται παρακάτω. Στην Πρόβλεψη Επάρκειας Συστήματος του Ευρωπαϊκού Δικτύου Διαχειριστών Συστημάτων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (European Network of Transmission System Operators for Electricity – ENTSO-E System Adequacy Forecast 2009 – 2020 [40]), αναφέρεται ότι μόνο 14 GW (1,6%) της προβλεπόμενης αιχμής φορτίου (873 GW) για την ηπειρωτική Ευρώπη (ENTSO-E Continental Europe) το 2020, θα μπορούν να επηρεαστούν από μία ελεγχόμενη μείωση φορτίου (αναφέρεται ως Διαχείριση Φορτίου – Load Management). Μία πιο αισιόδοξη άποψη δίνεται στην αναφορά [41], όπου αναφέρεται μία μέγιστη μείωση φορτίου 28 – 72 GW στην Ευρώπη. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι αυτά τα νούμερα σχετίζονται με γενικές εκτιμήσεις σε ένα πλήθος διαφορετικών χωρών και ότι οι εκτιμήσεις που αφορούν το δυναμικό της Διαχείρισης Φορτίου σε μελέτες επάρκειας του συστήματος είναι γενικά χαμηλές, όπως βλέπουμε στην αναφορά [42].

Στην αναφορά [43], δίνεται μία λεπτομερής έρευνα που αφορά το δυναμικό της Διαχείρισης Φορτίου στη Γερμανία, η οποία κάνει λόγο για διαθέσιμο ευέλικτο φορτίο, κατά τη διάρκεια όλου του έτους, περίπου 3 GW στη βιομηχανία, 3 GW στον εμπορικό τομέα και 4 GW σε κατοικίες, τα οποία αθροιστικά δίνουν συνολικό ελέγξιμο φορτίο ίσο με το 13% της ετήσιας αιχμής φορτίου (συνήθως 75 – 80 GW). Επιπλέον, αναφέρονται σε εποχιακή βάση 5 GW φορτίο κλιματισμού και έως 18 GW ελέγξιμο φορτίο θέρμανσης.

Συνοψίζοντας, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σημασία του μεγέθους του ελεγχόμενου φορτίου έχει να κάνει με την εκάστοτε εφαρμογή. Ενώ, δηλαδή, για μείωση της αιχμής του φορτίου, η συνολική διαθέσιμη ισχύς ευέλικτου φορτίου, κατά τις ώρες αιχμής, είναι καθοριστικής σημασίας, άλλες εφαρμογές ακόμα και με μικρά νούμερα διαθέσιμης ποσότητας ελεγχόμενου φορτίου μπορούν να ωφελήσουν ουσιαστικά τη λειτουργία του συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η συνολική εφεδρεία ρύθμισης συχνότητας που προέρχεται από μονάδες παραγωγής συνήθως δεν είναι παραπάνω από το 10 – 15% της αιχμής φορτίου του συστήματος, ένα ποσοστό ευέλικτου φορτίου ίσο με 3% μπορεί να έχει σημαντική συνεισφορά. Επίσης, κάτι ακόμα που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι, όσον αφορά τις πιο πολύπλοκες εφαρμογές της Διαχείρισης Φορτίου, όπως είναι η εξισορρόπηση και η ρύθμιση συχνότητας, η βελτιωμένη ελεγχσιμότητα του φορτίου και το χρησιμοποιήσιμο ευέλικτο ενεργειακό περιεχόμενό του, φαίνεται να είναι πιο σημαντικά από τον αριθμό των GW καθεαυτό.

1.2 Επικουρικές Υπηρεσίες (Ancillary Services)

Στο παρόν τμήμα της εργασίας μας παραθέτουμε τον ορισμό των Επικουρικών Υπηρεσιών που ζητούνται από τον Διαχειριστή του Συστήματος μέσω μιας ανταγωνιστικής διαδικασίας προσφορών για την ομαλή λειτουργία του Συστήματος Μεταφοράς, όπως ακριβώς παρουσιάζονται από τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας της Ελλάδας (ΑΔΜΗΕ) [44].

Επικουρικές Υπηρεσίες είναι οι υπηρεσίες που απαιτούνται 1) για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του Συστήματος Μεταφοράς από τα σημεία έγχυσης στα σημεία κατανάλωσης και 2) για τη διασφάλιση της ποιότητας παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές.

Τα είδη των Επικουρικών Υπηρεσιών είναι τα ακόλουθα:

- 1) ***Πρωτεύουσα Ρύθμιση και Εφεδρεία***
- 2) ***Δευτερεύουσα Ρύθμιση και Εύρος***
- 3) ***Τριτεύουσα Ρύθμιση και Στρεφόμενη Εφεδρεία***
- 4) ***Τριτεύουσα Μη Στρεφόμενη Εφεδρεία***
- 5) ***Στατή Εφεδρεία***
- 6) ***Ρύθμιση Τάσης***
- 7) ***Επανεκκίνηση του Συστήματος***

Οι επί μέρους Επικουρικές Υπηρεσίες υπό στοιχεία (1) έως (4) αναφέρονται συνοπτικά ως Επικουρικές Υπηρεσίες Ρύθμισης Συχνότητας και Ενεργού Ισχύος και ο αναλυτικός ορισμός τους γίνεται στον πρώτο κανονισμό [45] του ENTSO-E.

1.2.1 Πρωτεύουσα Ρύθμιση και Εφεδρεία

Ως Πρωτεύουσα Ρύθμιση Συστήματος ορίζεται η συλλογική αυτόματη διορθωτική αντίδραση των Μονάδων Παραγωγής και των Φορτίων στις αποκλίσεις της πραγματικής συχνότητας του συστήματος από τη συχνότητα αναφοράς, με την οποία επιδιώκεται να εξισορροπηθεί η συνολική παραγωγή με τη συνολική απορρόφηση ενέργειας και η σταθεροποίηση της συχνότητας εντός 30 δευτερολέπτων από την εκδήλωση της διαταραχής συχνότητας. Η ρύθμιση μπορεί να μην αποκαταστήσει τη συχνότητα στα επίπεδα της συχνότητας αναφοράς. Ειδικότερα, η αυτόματη διορθωτική αντίδραση είναι το αποτέλεσμα της αυτόματης ρύθμισης της ενεργού ισχύος εξόδου των Μονάδων ανάλογα με το στατισμό του ρυθμιστή φορτίου. Το φορτίο αντιδρά στις μεταβολές της συχνότητας αυτορρυθμιζόμενο.

Η Εφεδρεία Πρωτεύουσας Ρύθμισης είναι η μεταβολή της παραγόμενης Ενεργού Ισχύος Μονάδας ως αυτόματη αντίδραση του ρυθμιστή στροφών της για μια απόκλιση συχνότητας από τη συχνότητα αναφοράς ίση με ± 200 mHz, έτσι ώστε να λάβει χώρα η Πρωτεύουσα Ρύθμιση Συστήματος. Η μεταβολή της Ενεργού Ισχύος Μονάδας πρέπει να λαμβάνει χώρα εντός 30 δευτερολέπτων από την εκδήλωση της διαταραχής της συχνότητας και το επίπεδο παραγωγής Ενεργού Ισχύος Μονάδας πρέπει να διατηρείται, ανάλογα με την τιμή της απόκλισης της συχνότητας, τουλάχιστον για 15 λεπτά.

Σημειώνεται ότι η Εφεδρεία Πρωτεύουσας Ρύθμισης που μπορεί να παρέχει μια μονάδα παραγωγής περιορίζεται από τη διαφορά της παραγόμενης ενεργού ισχύος της μονάδας, πριν από ενδεχόμενη διαταραχή, από την τρέχουσα μέγιστη ικανότητα παραγωγής της γεννήτριας.

Ως Πρωτεύουσα Εφεδρεία Συστήματος ορίζεται η συλλογική συνεισφορά των Μονάδων του Συστήματος σε Εφεδρεία Πρωτεύουσας Ρύθμισης, η οποία, συνεπικουρούμενη από τα Φορτία του Συστήματος που συμμετέχουν αυτορρυθμιζόμενα στην Επικουρική Υπηρεσία, παρέχει την Πρωτεύουσα Ρύθμιση Συστήματος.

Το ελάχιστο επίπεδο παροχής Πρωτεύουσας Εφεδρείας για κάθε Control Block του διασυνδεδεμένου συστήματος του ENTSO-E υπολογίζεται με βάση την καθαρή ετήσια παραγωγή του και τη θέσπιση του κανόνα της μη μεταβολής της συχνότητας του ENTSO-E περισσότερο από ± 200 mHz σε περιπτώσεις συμβάντων 3000MW (απώλεια παραγωγής ή φορτίου).

Ο Διαχειριστής του Συστήματος υπολογίζει το ύψος παροχής Πρωτεύουσας Εφεδρείας λαμβάνοντας υπόψη την υποχρέωσή του για το ως άνω ελάχιστο επίπεδο παροχής της, σύμφωνα και με διεθνώς αποδεκτές μεθόδους έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ποσότητα που κατ' ελάχιστον απαιτείται από τον ENTSO-E0. Η απαίτηση για Πρωτεύουσα Εφεδρεία ανά Περίοδο Κατανομής ανακοινώνεται καθημερινά στην ιστοσελίδα του Διαχειριστή του Συστήματος και λαμβάνεται υπόψη στην επίλυση του Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού και του Προγράμματος Κατανομής. Οι ωριαίες τιμές για την αμοιβή της εν λόγω υπηρεσίας προκύπτουν από την επίλυση του Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού, οι δε ποσότητες και οι μονάδες παραγωγής που τις παρέχουν προκύπτουν από την επίλυση του Προγράμματος Κατανομής (αρχικού και επικαιροποιημένου).

1.2.2 Δευτερεύουσα Ρύθμιση και Εύρος

Η Δευτερεύουσα Ρύθμιση Συστήματος (**LFC: Load Frequency Control**) διορθώνει τις αποκλίσεις μεταξύ Παραγωγής και Κατανάλωσης (Ζήτησης) εντός ενός Control Block καθώς επίσης και τις αποκλίσεις της Συχνότητας του Συστήματος εντός του Διασυνδεδεμένου Σύγχρονου Συστήματος του ENTSO-E.

Η Δευτερεύουσα Ρύθμιση Συστήματος χρησιμοποιεί το κεντρικά εγκατεστημένο σύστημα της **Αυτόματης Ρύθμισης Παραγωγής (AGC: Automatic Generation Control)** για τη συνεχή αποστολή εντολών (**set points**), με τις οποίες τηλερυθμίζεται η παραγωγή ενεργού ισχύος των μονάδων παραγωγής. Η ρύθμιση αυτή μπορεί να λάβει χώρα σε χρονικά πλαίσια από 10 δευτερόλεπτα έως 15 λεπτά από την ενεργοποίησή της ενώ ο κύκλος λειτουργίας του AGC είναι 4 δευτερόλεπτα και μπορεί να ανανεώνει τα setpoints που στέλνονται στις μονάδες κάθε 8 δευτερόλεπτα. Η ρύθμιση αυτή επιδιώκει την ελαχιστοποίηση του Σφάλματος Ρύθμισης Περιοχής (**ACE: Area Control Error**), το όριο ανοχής του οποίου καθορίζεται από το Διαχειριστή του Συστήματος. Σημειώνεται ότι η ποιότητα της ρύθμισης που επιτυγχάνει κάθε control block μέλος του ENTSO-E παρακολουθείται συστηματικά από ειδικά ομάδα εργασίας του ENTSO-E, κατόπιν στατιστικής επεξεργασίας του μεγέθους του ACE.

Ως **ACE (MW)** ορίζεται το αποτέλεσμα των αποκλίσεων που παρουσιάζει η Παραγωγή από τη ζήτηση εξαιτίας της συνεχώς μεταβαλλόμενης ζήτησης ή ενός συμβάντος εντός ενός Control Block και είναι το άθροισμα της απόκλισης των προγραμμάτων ανταλλαγών (**Po**) από τις μετρήσεις (**P**) δια μέσου των διασυνδέσεων του Control Block ($\Delta P = P - P_o$) και του σφάλματος συχνότητας (**K·Δf**), ήτοι: $ACE = \Delta P + K \cdot \Delta f$.

Ο συντελεστής **K [MW/Hz]** για κάθε Control Block του διασυνδεδεμένου συστήματος του ENTSO-E υπολογίζεται ετησίως με βάση την καθαρή ετήσια παραγωγή του και τη θεώρηση της συνολικής χαρακτηριστικής Φορτίου – Συχνότητας του διασυνδεδεμένου συστήματος του ENTSO-E. Ενδεικτικά αναφέρεται η τιμή του K για το Ευρωπαϊκό (26844 MW/Hz) και το Ελληνικό (468 MW/Hz) Σύστημα για το 2013.

Το Εύρος Δευτερεύουσας Ρύθμισης (θετική και αρνητική εφεδρεία) είναι το περιθώριο της μεταβολής της ενεργού ισχύος μίας μονάδας παραγωγής όταν αυτή συμμετέχει στην Αυτόματη Ρύθμιση Παραγωγής και ορίζεται ως η διαφορά LFCmax – LFCmin, είναι δηλαδή το εύρος μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης παραγόμενης ενεργού ισχύος μονάδας που λειτουργεί υπό τον έλεγχο του AGC.

Η θετική (εναλλακτικά αναφέρεται ως άνω) ή αρνητική (εναλλακτικά αναφέρεται ως κάτω) Εφεδρεία Δευτερεύουσας Ρύθμισης είναι τα περιθώρια αύξησης ή μείωσης αντίστοιχα της παραγόμενης ενεργού ισχύος μίας μονάδας λαμβάνοντας υπόψη το τρέχον επίπεδο παραγόμενης ενεργού ισχύος.

Αντίστοιχα προκύπτουν τα μεγέθη της θετικής και αρνητικής δευτερεύουσας εφεδρείας του Συστήματος ως άθροισμα των εκάστοτε εφεδρειών όλων των μονάδων παραγωγής που είναι συγχρονισμένες στο δίκτυο και πραγματικά παρέχουν την εν λόγω επικουρική υπηρεσία.

Το ελάχιστο μέγεθος της Δευτερεύουσας Εφεδρείας που πρέπει να διατηρεί ο Διαχειριστής του Συστήματος για την ασφαλή λειτουργία του καθορίζεται με βάση

κανόνες που περιγράφονται αναλυτικά στο 0, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες ή την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος. Οι κανόνες αυτοί είναι σε μεγάλο βαθμό εμπειρικοί και προσαρμοσμένοι στο εκάστοτε Σύστημα και την τρέχουσα ή ευλόγως αναμενόμενη κατάστασή του.

Τα βασικά κριτήρια προσδιορισμού των απαιτήσεων δευτερεύουσας εφεδρείας είναι:

- Η αναμενόμενη ζήτηση φορτίου του συστήματος
- Η εκτιμώμενη έγχυση ισχύος από ΑΠΕ στο σύστημα και στο δίκτυο
- Η τιμή ενεργού ισχύος του μεγαλύτερου στοιχείου έγχυσης ή/και απόληξης του Συστήματος (π.χ. μια εισαγωγή 500MW από κάποια διασύνδεση, ή/και εξαγωγή ενέργειας στο/από το σύστημα)
- Η τιμή ενεργού ισχύος της μεγαλύτερης μονάδας παραγωγής του Συστήματος ή/και συνδυασμού μονάδων
- Η πληροφόρηση και εκτίμηση του Διαχειριστή του Συστήματος για την αξιοπιστία της λειτουργίας των μονάδων παραγωγής και της σύνδεσης τους στο Σύστημα
- Η συνολική παραγωγή από μονάδες σε δοκιμαστική λειτουργία η οποία χαρακτηρίζεται από μειωμένη αξιοπιστία και αυξημένη πιθανότητα μη προγραμματισμένων διακοπών (forced outage rate)

Η εξασφάλιση της απαιτούμενης δευτερεύουσας εφεδρείας για τις ανάγκες ασφαλούς λειτουργίας του Συστήματος είναι από τις βασικές ευθύνες του Διαχειριστή του Συστήματος. Δεδομένου ότι αποτελεί βασικό στοιχείο ασφάλειας και ποιότητας, ο Διαχειριστής του Συστήματος δύναται στα πλαίσια αυτής, να εντέλλει τις μονάδες παραγωγής, με κατάλληλη Εντολή η οποία μπορεί να αποστέλλεται τηλεφωνικά ή ηλεκτρονικά. Η ηλεκτρονική αποστολή της Εντολής Κατανομής γίνεται μέσω εξειδικευμένου και αποκλειστικού (dedicated) συστήματος παραγωγής και μετάδοσης Εντολών Κατανομής σε πραγματικό χρόνο.

Ο Διαχειριστής του Συστήματος διαθέτει εργαλεία λογισμικού για την αυτόματη παραγωγή και έκδοση των προαναφερθεισών Εντολών Κατανομής. Η δευτερεύουσα ρύθμιση υλοποιείται αυτόματα από το Σύστημα Αυτόματης Ρύθμισης Παραγωγής (ΑΡΙΠ – AGC), το οποίο λαμβάνει ως είσοδο τις μετρήσεις συχνότητας, ροών ισχύος στις διασυνδετικές γραμμές, τις τρέχουσες παραγωγές και ικανότητες των μονάδων και στέλνει setpoints στις υπό αυτόματη ρύθμιση μονάδες. Οι τιμές των setpoints που αποστέλλονται σε κάθε μονάδα κυμαίνονται περίξ ενός αντίστοιχου σημείου βάσης (base point) ώστε με τη συνολική ρύθμιση της παραγωγής των μονάδων αυτών να γίνεται η διόρθωση του ACE. Τα αναφερθέντα base points για κάθε μονάδα προκύπτουν για κάθε μονάδα προκύπτουν ως αποτέλεσμα της επίλυσης του προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Πραγματικού Χρόνου (ΚΠΧ) που επιλύεται ανά 5 λεπτά από κατάλληλο λογισμικό του Διαχειριστή του Συστήματος. Διευκρινίζεται ότι, παρότι το σημείο βάσης ενημερώνεται περιοδικά σε κάθε πεντάλεπτο, οι Εντολές Κατανομής που προκύπτουν από το Σύστημα ΑΡΙΠ δύναται να εκδίδονται σε πολύ πιο συχνά χρονικά διαστήματα (της τάξης των 8

δευτερολέπτων) ώστε να εξασφαλίζεται η ταχεία απόκριση των μονάδων στις μεταβολές της λειτουργίας του Συστήματος.

Η αριθμητική τιμή του Αναμενόμενου Ρυθμού μεταβολής παραγωγής υπό Αυτόματη Ρύθμιση Παραγωγής (ΑΡΙΠ) ανά τεχνολογία Μονάδων καθορίζεται ετησίως από τη ΡΑΕ μετά από εισήγηση του Διαχειριστή του Συστήματος, ετησίως και πριν την έναρξη του χρόνου ισχύος τους, για έκαστη από τις εξής τεχνολογίες Μονάδων:

- Λιγνιτικές μονάδες
- Ατμοηλεκτρικές μονάδες με καύσιμο Πετρέλαιο ή Φυσικό Αέριο
- Ανθρακικές μονάδες
- Αεριοστροβιλικές μονάδες φυσικού αερίου μη συνδυασμένου κύκλου και μονάδες Μηχανών Εσωτερικής Καύσης
- Μονάδες φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου και
- Υδροηλεκτρικές μονάδες

Οι αριθμητικές τιμές του Αναμενόμενου Ρυθμού μεταβολής παραγωγής υπό ΑΡΙΠ ανά τεχνολογία μονάδων αντανακλούν το βέλτιστο ρυθμό που δύνανται να επιτύχουν μονάδες παραγωγής της αντίστοιχης τεχνολογίας οι οποίες είναι πλήρως εφοδιασμένες με τον απαιτούμενο εξοπλισμό, και υπό συνθήκες καλής συντήρησης και λειτουργίας.

Για τον έλεγχο του ρυθμού μεταβολής παραγωγής υπό ΑΡΙΠ (MW/λεπτό) που δηλώνουν οι Παραγωγοί για τις μονάδες τους, ο Διαχειριστής διεξάγει δοκιμές που συνίστανται σε αποστολή εντολών (set points) προς τις μονάδες με βήματα της τάξης 10 - 50 MW και μέτρηση της απόκρισής τους μετά από 1 - 5 λεπτά και εκτιμά από το μέσο όρο των μετρούμενων ρυθμών (MW/λεπτό) τον πραγματικό ρυθμό μεταβολής παραγωγής υπό ΑΡΙΠ.

Πέραν της απαίτησης εξασφάλισης θετικής (άνω) και αρνητικής (κάτω) δευτερεύουσας εφεδρείας, η οποία ενεργοποιείται εντός δεκαπενταλέπτου, υπάρχει και η απαίτηση εξασφάλισης του ελάχιστου ρυθμού με τον οποίο πρέπει να εκτελείται η δευτερεύουσα ρύθμιση έτσι ώστε να γίνεται γρήγορη εξάλειψη του ACE και ειδικότερα για τις περιπτώσεις σφαλμάτων, να διασφαλίζεται η γρήγορη αποκατάσταση του συστήματος. Για το λόγο αυτό θα πρέπει οπωσδήποτε να συμμετέχουν στη δευτερεύουσα ρύθμιση μονάδες με χαρακτηριστικά ταχείας απόκρισης όταν λειτουργούν σε αυτόματο έλεγχο τηλερύθμισης της ενεργού παραγωγής τους.

Όπως και η κανονική Δευτερεύουσα, η γρήγορη Δευτερεύουσα διακρίνεται σε θετική (άνω) και αρνητική (κάτω). Οι εκάστοτε απαιτήσεις του Συστήματος για γρήγορη (άνω και κάτω) Δευτερεύουσα εφεδρεία καθορίζονται καθημερινά από το Διαχειριστή του Συστήματος βάσει της αναμενόμενης Διαθεσιμότητας των Μονάδων Παραγωγής και των προβλέψεων για τις βασικές παραμέτρους λειτουργίας του Συστήματος και με τη χρήση λογισμικού ανάλυσης ασφάλειας (security analysis).

Οι απαιτήσεις γρήγορης Δευτερεύουσας Εφεδρείας καθορίζονται με βάση του τι θεωρείται μεταβολή μικρής κλίμακας στο Σύστημα. Ο Διαχειριστής του Συστήματος καθορίζει την ποσότητα ισχύος που θεωρεί ως μεταβολή μικρής κλίμακας εκτελώντας μια στατιστική επεξεργασία στη λειτουργία του Συστήματος, με έμφαση κατά πρώτο λόγο στο Σφάλμα Ελέγχου Περιοχής και δευτερευόντως στα προφίλ της κατανάλωσης και της παραγωγής ισχύος. Οι απαιτήσεις που διαμορφώνονται στοχεύουν στην εξασφάλιση γρήγορης απόκρισης σε τέτοιου είδους μεταβολές και διατήρησης του Σφάλματος Ελέγχου Περιοχής εντός χαμηλών ορίων. Στην πραγματική λειτουργία οδηγούν στη διατήρηση μίας τουλάχιστον μονάδας παραγωγής με ταχεία ανταπόκριση (υψηλό ρυθμό μεταβολής εξόδου) στο Σύστημα.

Σημειώνεται ότι οι απαιτήσεις αυτές είναι δυναμικές και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την κατάσταση του συστήματος. Κατά συνέπεια μπορεί να μεταβληθούν ανά πάσα στιγμή. Σε κάθε περίπτωση, όλες οι προαναφερθείσες απαιτήσεις Δευτερεύουσας Εφεδρείας δημοσιεύονται στην ιστοσελίδα του Διαχειριστή του Συστήματος και συμμετέχουν στην επίλυση της Κατανομής Πραγματικού Χρόνου, του Προγράμματος Κατανομής και του Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού.

Σημειώνεται ότι οι απαιτήσεις δευτερεύουσας εφεδρείας, επειδή συνδέονται άμεσα με την πραγματική λειτουργία του Συστήματος, ενδέχεται να μεταβάλλονται σε ενδοημερήσιο προφίλ, λαμβάνοντας υπόψη και τη φορά εφεδρείας, άνω και κάτω.

Οι ωριαίες τιμές για την αμοιβή της εν λόγω υπηρεσίας προκύπτουν από την επίλυση του Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού, οι δε ποσότητες και οι μονάδες παραγωγής που τις παρέχουν προκύπτουν κατά τη διάρκεια της πραγματικής λειτουργίας του συστήματος.

1.2.3 Τριτεύουσα Ρύθμιση και Εφεδρεία

Η Εφεδρεία Τριτεύουσας Ρύθμισης είναι το περιθώριο της αύξησης της παραγόμενης ενεργού ισχύος μονάδας μεταξύ 90 δευτερολέπτων και 15 λεπτών μετά από τη σχετική Εντολή Κατανομής. Η Τριτεύουσα Εφεδρεία Συστήματος είναι η συλλογική συνεισφορά όλων των μονάδων στην Εφεδρεία Τριτεύουσας Ρύθμισης.

Η ρύθμιση αφορά στη μεταβολή της ενεργού ισχύος των μονάδων παραγωγής που ο Διαχειριστής του Συστήματος εντέλλει με σχετική Εντολή Κατανομής, βασισμένης στο κριτήριο της ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους έγχυσης ενέργειας στο Σύστημα.

Η Τριτεύουσα ρύθμιση χρησιμοποιείται από το Διαχειριστή του Συστήματος ως ένα εργαλείο με διπλό στόχο:

- Διατήρηση ή επαναφορά της Πρωτεύουσας και Δευτερεύουσας Εφεδρείας του Συστήματος στις επιθυμητές τιμές τους

Κατά τη διάρκεια μίας διαταραχής ή ενός συμβάντος του Συστήματος, ο Διαχειριστής του Συστήματος έχει ως πρώτο μέλημα την εξασφάλιση της σταθερότητας του Συστήματος. Στο χρονικό διάστημα που έπεται των παραπάνω γεγονότων γίνεται χρήση της Πρωτεύουσας και Δευτερεύουσας ρύθμισης, δεδομένης της ταχείας απόκρισής τους, για να αντιμετωπισθεί η διαταραχή. Κατά συνέπεια μειώνονται οι αντίστοιχες διαθέσιμες ποσότητες εφεδρειών κάτω από τις επιθυμητές τιμές τους. Ως δεύτερο επίπεδο αντίδρασης, η τριτεύουσα ρύθμιση χρησιμοποιείται για να επαναφέρει ή να διατηρήσει τις ποσότητες αυτές στην επιθυμητή τιμή τους ώστε να είναι δυνατή η αντιμετώπιση κάποιου επόμενου συμβάντος.

- Επανακαθορισμό της παραγωγής ενεργού ισχύος των μονάδων

Η προαναφερθείσα διαταραχή ενδέχεται να έχει επιβάλλει μια νέα κατάσταση φόρτισης στο Σύστημα η οποία δεν καλύπτεται πλέον με το βέλτιστο οικονομικά τρόπο. Για το λόγο αυτό επιλύεται το πρόβλημα Κατανομής Πραγματικού Χρόνου το οποίο, λαμβάνοντας υπόψη τις οικονομικές προσφορές των μονάδων παραγωγής, υπολογίζει τη βέλτιστη παραγωγή για το σύνολο των Συγχρονισμένων στο Σύστημα μονάδων. Με τον τρόπο αυτό γίνεται χρήση της στρεφόμενης Τριτεύουσας εφεδρείας ώστε να καλυφθεί αφενός μεν η απαίτηση οικονομικής φόρτισης των μονάδων, αφετέρου δε η συμπλήρωση των απαιτούμενων εφεδρειών του Συστήματος.

Το ελάχιστο μέγεθος της Τριτεύουσας Εφεδρείας που πρέπει να διατηρεί ο Διαχειριστής του Συστήματος για την ασφαλή λειτουργία του καθορίζεται με βάση κανόνες που περιγράφονται αναλυτικά στο 0 λαμβάνοντας πάντοτε υπόψη τις ιδιαιτερότητες ή την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος.

Τα βασικά κριτήρια προσδιορισμού των απαιτήσεων τριτεύουσας εφεδρείας είναι:

- Η πρόβλεψη για την ημερήσια αιχμή του συνολικού φορτίου του Συστήματος
- Η διαθεσιμότητα των μονάδων Παραγωγής του Συστήματος
- Η κατάσταση και η αναμενόμενη φόρτιση των διασυνδέσεων
- Η συνολική παραγωγή από μονάδες σε δοκιμαστική λειτουργία η οποία χαρακτηρίζεται από μειωμένη αξιοπιστία και αυξημένη πιθανότητα μη προγραμματισμένων διακοπών (forced outage rate).

1.2.3.1 Στρεφόμενη Εφεδρεία

Ως Τριτεύουσα Στρεφόμενη Εφεδρεία Μονάδος ορίζεται η Εφεδρεία Τριτεύουσας Ρύθμισης Μονάδας, η οποία είναι συγχρονισμένη στο Σύστημα.

1.2.3.2 Μη Στρεφόμενη Εφεδρεία

Ως Τριτεύουσα Μη Στρεφόμενη Εφεδρεία Μονάδος ορίζεται η Εφεδρεία Τριτεύουσας Ρύθμισης Μονάδας, η οποία δεν είναι συγχρονισμένη στο Σύστημα.

1.2.4 Στατή Εφεδρεία

Ως Στατή Εφεδρεία Μονάδος ορίζεται η μέγιστη ποσότητα ενεργού ισχύος που μπορεί να διατεθεί στο Σύστημα από μια μη διασυνδεδεμένη μονάδα παραγωγής, εντός μιας χρονικής περιόδου από 20 λεπτά έως 4 ώρες μετά την έκδοση μιας Εντολής Κατανομής συγχρονισμού, όπως αυτό το μέγεθος ορίζεται στα Δηλωμένα Χαρακτηριστικά της Μονάδας.

Ως Στατή Εφεδρεία Συστήματος ορίζεται το άθροισμα των Στατών Εφεδρειών όλων των μονάδων παραγωγής, οι οποίες έχουν προγραμματιστεί ή μπορούν να προγραμματιστούν για να παρέχουν τέτοια υπηρεσία για κάθε Περίοδο Κατανομής. Ο προγραμματισμός για την παροχή αυτής της υπηρεσίας διενεργείται από το Διαχειριστή του Συστήματος προκειμένου να γίνεται δυνατή η Ρύθμιση Ενεργού Ισχύος και Συχνότητας ενόψει απρόβλεπτων διαταραχών της ισορροπίας φορτίου του Συστήματος σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια μιας Ημέρας Κατανομής.

1.2.5 Ρύθμιση Τάσης

Ο Διαχειριστής του Συστήματος επιτηρεί διαρκώς τα επίπεδα τάσης σε όλους τους ζυγούς του Συστήματος ώστε να εξασφαλίζει την απρόσκοπτη ροή ενέργειας στο Σύστημα. Στα πλαίσια αυτά λαμβάνει μετρήσεις τάσεως μέσω των μετρητικών διατάξεων που βρίσκονται στους κατά τόπους Υποσταθμούς και του ολοκληρωμένου Συστήματος Ελέγχου και Παρακολούθησης (SCADA) το οποίο αποτελεί τμήμα του συνολικότερου συστήματος ενεργειακής διαχείρισής του (EMS). Το σύστημα αυτό εξασφαλίζει μετρήσεις πραγματικού χρόνου που καλύπτουν όλα τα βασικά φυσικά μεγέθη του Συστήματος (Επίπεδα Τάσεων, ροές ισχύος κτλ.). Εξ αυτών, ο Διαχειριστής του Συστήματος συνθέτει την τρέχουσα εικόνα της κατάστασης του Συστήματος η οποία αποτελεί τη βάση της ακόλουθης τεχνικής ανάλυσης.

Ο Διαχειριστής του Συστήματος χρησιμοποιεί εξειδικευμένα εργαλεία λογισμικού (Έλεγχος ευστάθειας τάσεως – VSA, ανάλυση ροών φορτίου – Load Flow, κτλ) ώστε να εντοπίσει ενδεχόμενο επερχόμενο κίνδυνο για την ευστάθεια του Συστήματος και να προσδιορίσει τα αναγκαία διορθωτικά μέτρα. Οι δυνατότητες επέμβασης του Διαχειριστή αναλύονται σε:

1.2.5.1 Χρήση Στατών Στοιχείων Αντιστάθμισης

Ως στατά στοιχεία αντιστάθμισης θεωρούνται οι πυκνωτές στα επίπεδα τάσης 150kV και 20/22kV και τα πηνία (reactors) των Αυτομετασχηματιστών (ΑΜΣ). Παρότι το επίπεδο τάσης των 20/22kV είναι μέρος του Δικτύου Διανομής και κατά συνέπεια, δεν εμπίπτει άμεσα στην αρμοδιότητα του Διαχειριστή του Συστήματος, όσον αφορά την παροχή αέργων από πυκνωτές που είναι συνδεδεμένοι στο επίπεδο αυτό, ο Διαχειριστής του Συστήματος τους εντάσσει κατόπιν εντολής του Διαχειριστή του Συστήματος. Τα στατά στοιχεία εντάσσονται σε βαθμίδες, οι οποίες είναι

καθορισμένης παραγωγής αέργου ισχύος, οι οποίες καθορίζονται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους.

1.2.5.2 Χρήση Σύγχρονων Στοιχείων Αντιστάθμισης

Ως Σύγχρονα Στοιχεία Αντιστάθμισης θεωρούνται οι σύγχρονοι κινητήρες που συνδέονται στο επίπεδο των 150kV και όλες οι μονάδες παραγωγής. Σε αντίθεση με τα στατά στοιχεία, τα σύγχρονα προσφέρουν τη δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης του επιθυμητού επιπέδου τάσης, μέσω της μεταβολής της διέγερσής τους. Σε περίπτωση που επιλεγεί κάποιο σύγχρονο στοιχείο για την παροχή της εν λόγω επικουρικής υπηρεσίας ο Διαχειριστής του Συστήματος δύναται να διαμορφώσει την ανάλογη Εντολή Κατανομής προσδιορίζοντας άλλοτε την επιθυμητή έγχυση Αέργου ισχύος και άλλοτε την επιθυμητή τάση του στοιχείου στην έξοδό του. Στη συνέχεια, ο Διαχειριστής του Συστήματος παρακολουθεί την απόκριση του Στοιχείου Αντιστάθμισης στις Εντολές Κατανομής που έχει εκδώσει και αποστέλλει σε αυτό βάσει των μετρητών που λαμβάνει μέσω του Συστήματος SCADA.

1.2.5.3 Διαχείριση Αυτομετασχηματιστών

Ο Διαχειριστής του Συστήματος δύναται, κατά περίπτωση, να επιλέξει να ρυθμίσει την τάση σε ορισμένα σημεία του Συστήματος μέσω της αλλαγής των επιλογών λήψης (taps) των Αυτομετασχηματιστών του Συστήματος (ΑΜΣ 400kV/150kV).

1.2.5.4 Σειρά ενεργοποίησης

Ο Διαχειριστής του Συστήματος χρησιμοποιεί τα παραπάνω μέσα κατά κανόνα με την ακόλουθη σειρά ενεργοποίησης, εκτός αν συντρέχουν τεχνικοί λόγοι που συνδέονται με την κατάσταση του Συστήματος και την τοπολογία των διαθέσιμων μέσων αντιστάθμισης, με αποτέλεσμα να ανατρέπεται η παρακάτω σειρά:

- 1) Θέση εκτός λειτουργίας των reactors
- 2) Χρήση πυκνωτών στα 20 kV
- 3) Χρήση πυκνωτών στα 150 kV
- 4) Διαχείριση Αέργου φόρτισης των γεννητριών
- 5) Χρησιμοποίηση σύγχρονων πυκνωτών (κινητήρων)
- 6) Αλλαγή λήψης (tap) ΑΜΣ

Όλες οι παραπάνω επιλογές, πλην αυτής που σχετίζονται με μονάδες παραγωγής, υλοποιούνται με την έκδοση αντίστοιχων Εντολών προς το Διαχειριστή του Δικτύου.

1.2.6 Επανεκκίνηση του Συστήματος

Η Επικουρική Υπηρεσία Επανεκκίνησης του Συστήματος είναι η υπηρεσία που παρέχεται από τις μονάδες παραγωγής (που χαρακτηρίζονται σαν Μονάδες Επανεκκίνησης) μετά από μία γενική ή μερική διακοπή της λειτουργίας του Συστήματος. Συνίσταται στη δυνατότητα αυτών των μονάδων να εκκινούν χωρίς εξωτερική τροφοδότηση και να εγγέουν ενέργεια στο σύστημα, εντός μίας ώρας για θερμική μονάδα ή εντός 15 λεπτών για υδροηλεκτρική μονάδα.

Παρά το διαρκή έλεγχο και την εποπτεία του Συστήματος, υφίσταται πάντα η πιθανότητα ολοκληρωτικής κατάρρευσης του Συστήματος (black out). Στην περίπτωση αυτή ο Διαχειριστής του Συστήματος είναι υπεύθυνος για το σχεδιασμό και την υλοποίηση πλάνου αποκατάστασης του Συστήματος (restoration plan). Οι ενέργειες του Διαχειριστή διακρίνονται σε δύο βασικά επίπεδα χρόνου.

1.2.6.1 Προετοιμασία αντιμετώπισης ολικής κατάρρευσης

Ο Διαχειριστής του Συστήματος αναλύει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Συστήματος και εξετάζει πλάνα ενεργειών που θα ακολουθηθούν σε πιθανά σενάρια συμβάντων. Βάσει αυτών σχεδιάζει το πλάνο αποκατάστασης κατά περίπτωση. Επίσης μεριμνά για την ύπαρξη των κατάλληλων στοιχείων έναρξης της διαδικασίας αποκατάστασης του Συστήματος. Τα στοιχεία αυτά προέρχονται τόσο από εγχώρια παραγωγή όσο και από τις Διασυνδέσεις.

Όσον αφορά τις Διασυνδέσεις, ο Διαχειριστής του Συστήματος προβαίνει στη σύναψη κατάλληλων συμφωνιών με όμορους Διαχειριστές οι οποίες εξασφαλίζουν αμοιβαία υποστήριξη σε περίπτωση ολικής κατάρρευσης κάποιου συστήματος. Η υποστήριξη αυτή μπορεί να περιλαμβάνει, πέρα από την παροχή τάσεως σε προκαθορισμένο σημείο σύνδεσης και παροχή κάποιας προσυμφωνημένης ποσότητας ενεργού ισχύος.

Όσον αφορά την εγχώρια παραγωγή, ο Διαχειριστής του Συστήματος μεριμνά για τη διαθεσιμότητα των μονάδων παραγωγής με δυνατότητα εκκίνησης σε κατάσταση ολικής κατάρρευσης (black start) και την καλή λειτουργία συστημάτων επικοινωνιών των κέντρων ελέγχου ενέργειας με τις μονάδες παραγωγής. Οι μονάδες αυτές είναι κατά κανόνα υδροηλεκτρικές μονάδες που εκκινούν με ανεξάρτητο σύστημα γεννητριών diesel.

Όλες οι μονάδες που έχουν δηλώσει δυνατότητα εκκίνησης σε κατάσταση ολικής κατάρρευσης οφείλουν να διατηρούν τη δυνατότητα αυτή ανά πάσα στιγμή και, σε κάθε περίπτωση, να ενημερώνουν άμεσα το Διαχειριστή του Συστήματος σε περίπτωση που διαπιστώνουν οποιαδήποτε σχετική αδυναμία είτε αυτή σχετίζεται με την ίδια τη μονάδα είτε με τη βοηθητική γεννήτρια diesel.

1.2.6.2 Ενέργειες αποκατάστασης του Συστήματος σε περίπτωση ολικής κατάρρευσης

Σε περίπτωση ολικής κατάρρευσης, ο Διαχειριστής του Συστήματος επιλέγει κατά περίπτωση το κατάλληλο πλάνο αποκατάστασης. Τα πλάνα αποκατάστασης διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: σε αυτά που βασίζονται σε διαδοχική τροφοδότηση στοιχείων του Συστήματος και σε εκείνα που βασίζονται σε παράλληλο σχηματισμό νησίδων και επακόλουθο συγχρονισμό τους.

Σε κάθε περίπτωση, τα βήματα αποκατάστασης βασίζονται στη διατήρηση του ισοζυγίου ενέργειας και ενός ικανοποιητικού επιπέδου τάσεως. Στα πλαίσια αυτά, ο Διαχειριστής του Συστήματος δύναται να εντέλλει, κατά την κρίση του, οποιαδήποτε μονάδα παραγωγής και το Διαχειριστή του Δικτύου να προβούν στις επιθυμητές ενέργειες χορήγησης παραγωγής ή ζεύξης φορτίου ανεξάρτητα από οποιαδήποτε οικονομική επίλυση της Αγοράς και προγενέστερο προγραμματισμό.

1.2.7 Συμπληρωματική Ενέργεια Συστήματος (ΣΕΣ)

Ο Διαχειριστής του Συστήματος έχει την ευθύνη, σύμφωνα με το νόμο, να λαμβάνει όλα τα απαραίτητα μέτρα για την εξασφάλιση επαρκούς εφεδρείας και την εξισορρόπηση των αποκλίσεων Παραγωγής – Ζήτησης κατά τη λειτουργία του Συστήματος, ιδίως δε κατά τη διάρκεια των αιχμών του φορτίου του Συστήματος. Εάν ο Διαχειριστής του Συστήματος εκτιμά ότι η κάλυψη του προβλεπόμενου φορτίου του Συστήματος και των εφεδρειών δε διασφαλίζεται από τις κατανεμόμενες μονάδες προνοεί για την εξασφάλιση ενέργειας μέσω της παροχής Συμπληρωματικής Ενέργειας Συστήματος.

Η Συμπληρωματική Ενέργεια Συστήματος μπορεί να παρέχεται με ευθύνη του Διαχειριστή του Συστήματος εφόσον προέρχεται από Έκτακτες Εισαγωγές.

1.2.8 Υποχρεώσεις του Διαχειριστή σχετικά με τις Επικουρικές Υπηρεσίες

Ο Διαχειριστής του Συστήματος είναι υπεύθυνος για τον προγραμματισμό και τη διαχείριση των Επικουρικών Υπηρεσιών Συστήματος. Για το σκοπό αυτό:

- Εποπτεύει την ικανότητα των Κατανεμόμενων Μονάδων να παρέχουν Επικουρικές Υπηρεσίες σύμφωνα με τα Δηλωμένα Χαρακτηριστικά τους.
- Εφαρμόζει τις διατάξεις σχετικά με τις εξαιρέσεις και τις τεχνικές πληροφορίες των Κατανεμόμενων Μονάδων για παροχή Επικουρικών Υπηρεσιών.

Ο Διαχειριστής του Συστήματος, επίσης, εξασφαλίζει ότι όλες οι απαραίτητες Επικουρικές Υπηρεσίες είναι διαθέσιμες για την ομαλή και ασφαλή λειτουργία του Συστήματος. Για το σκοπό εποπτεύει το σύνολο των διαθέσιμων και παρεχόμενων Επικουρικών Υπηρεσιών ανά Περίοδο Κατανομής και ανά υπηρεσία.

Ο προγραμματισμός και η διαχείριση των Επικουρικών Υπηρεσιών διενεργούνται από το Διαχειριστή του Συστήματος με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι συνολικές δαπάνες από τη ζήτηση της απαιτούμενης ποσότητας αυτών των υπηρεσιών.

1.3 Αντικείμενο - σκοπός της εργασίας

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μελετάται ο τρόπος με τον οποίο το φορτίο, που συγκεντρώνεται και συντονίζεται από έναν ΕισΠ, συμμετέχει στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας και εξετάζονται τα πιθανά οφέλη από αυτό. Πιο συγκεκριμένα, μελετάμε τον τρόπο συμμετοχής των ωμικών θερμοστατικών φορτίων, που ελέγχονται από PID ελεγκτές θερμοκρασίας και μελετάμε τη σημασία της αυτορρύθμισης του φορτίου.

Για την πραγματοποίηση της μελέτης, μοντελοποιείται σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στο περιβάλλον Simulink του λογισμικού Matlab, στο οποίο διεξάγονται διάφορες προσομοιώσεις, μεταβάλλοντας τις τιμές ορισμένων παραμέτρων και θεωρώντας διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας, οι οποίες περιγράφονται στο κεφάλαιο 4. Σε κάθε περίπτωση, εξετάζεται η μεταβατική συμπεριφορά της συχνότητας, η επίδραση που έχει αυτή η μεταβολή στη θερμοκρασία αναφοράς του θερμοστατικού φορτίου και κατ' επέκταση στην απορροφούμενη ισχύ αυτού, ενώ τέλος παρατηρείται το αποτέλεσμα στη θερμοκρασία του θερμαινόμενου χώρου.

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της συμμετοχής του φορτίου στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας καθώς και η εξαγωγή ορισμένων συμπερασμάτων που αφορούν την αξία της συμμετοχής του φορτίου στη ρύθμιση συχνότητας, όταν αυτό συγκεντρώνεται και συντονίζεται από έναν ΕισΠ.

1.4 Βασική δομή της εργασίας

Η εργασία μας αποτελείται συνολικά από 6 κεφάλαια και δομείται ως ακολούθως:

Στο κεφάλαιο 2 αρχικά παρουσιάζεται το ζήτημα της ρύθμισης συχνότητας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και στη συνέχεια αναλύονται εκτενώς και μοντελοποιούνται όλοι οι συντελεστές του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται αναλυτικά οι σταθμοί παραγωγής (ατμοηλεκτρικοί, υδροηλεκτρικοί, νηξελοηλεκτρικοί και αιολικοί) και τα φορτία (κινητήρες επαγωγής και θερμοστατικά φορτία) του συστήματος που χρησιμοποιείται για τις προσομοιώσεις μας.

Στο κεφάλαιο 3 αρχικά παρουσιάζεται η ιδέα του Εικονικού Σταθμού Παραγωγής και στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο το φορτίο συμμετέχει στη ρύθμιση συχνότητας. Συγκεκριμένα, στην ενότητα 3.2 παρουσιάζεται η αυτορρύθμιση του φορτίου και στην ενότητα 3.3 εξηγείται η συμμετοχή των θερμοστατικών φορτίων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται η θεμελίωση του προβλήματος, με την παρουσίαση του συνολικού συστήματος που μοντελοποιήθηκε, τον ορισμό των παραμέτρων και των καταστάσεων που εξετάζονται και την παράθεση των τιμών των στοιχείων του συστήματος.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του αναπτυχθέντος μοντέλου και γίνεται σχολιασμός αυτών.

Στο κεφάλαιο 6 εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα από τη συνολική μελέτη και εργασία μας πάνω στο θέμα και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

2

Θεωρητικό υπόβαθρο – Μοντελοποίηση στοιχείων συστήματος

2.1 Ρύθμιση Φορτίου Συχνότητας – Ρυθμιστές Στροφών [4]

2.1.1 Γενικά

Το πρόβλημα της προσαρμογής της παραγωγής στη ζήτηση ισχύος είναι θεμελιώδες στα συστήματα μετατροπής ενέργειας. Ο J. Watt έλυσε το πρόβλημα αυτό στην ατμομηχανή του με το γνωστό φυγοκεντρικό ρυθμιστή με τις δύο σφαίρες, ο οποίος προσαρμόζει αυτόματα τη ροή του ατμού και αποτελεί ένα από τα πρώτα συστήματα αυτομάτου ελέγχου.

Η ρύθμιση της συχνότητας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας συνίσταται στη συνεχή προσαρμογή της παραγόμενης ισχύος από τις γεννήτριες προς το φορτίο του συστήματος, ώστε η συχνότητα να διατηρεί την κανονική της τιμή. Χωρίς ρύθμιση, οι γεννήτριες δε θα ήταν σε θέση να παραλάβουν μια αύξηση φορτίου, γιατί το άνοιγμα των βαλβίδων των στροβίλων θα έμενε σταθερό και θα επέτρεπε μόνο μία ορισμένη μηχανική ισχύ εισόδου στη μονάδα. Το αποτέλεσμα θα ήταν επιβράδυνση των μηχανών (για δεδομένη αύξηση φορτίου) και μείωση της συχνότητας του συστήματος.

Για την καλή λειτουργία των στροβίλων, τόσο στους ατμοηλεκτρικούς, όσο και στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς είναι απαραίτητο η ταχύτητα περιστροφής να παραμένει μέσα σε ένα πολύ στενό περιθώριο γύρω από την ονομαστική της τιμή. Για το λόγο αυτό υπάρχουν ειδικά συστήματα προστασίας υποσυχνότητας, τα οποία αποσυνδέουν τη γεννήτρια εάν η συχνότητα πέσει κάτω από ένα όριο (τυπική τιμή είναι 47 Hz για συστήματα 50 Hz), όπως και συστήματα προστασίας υπερτάχυνσης που επίσης

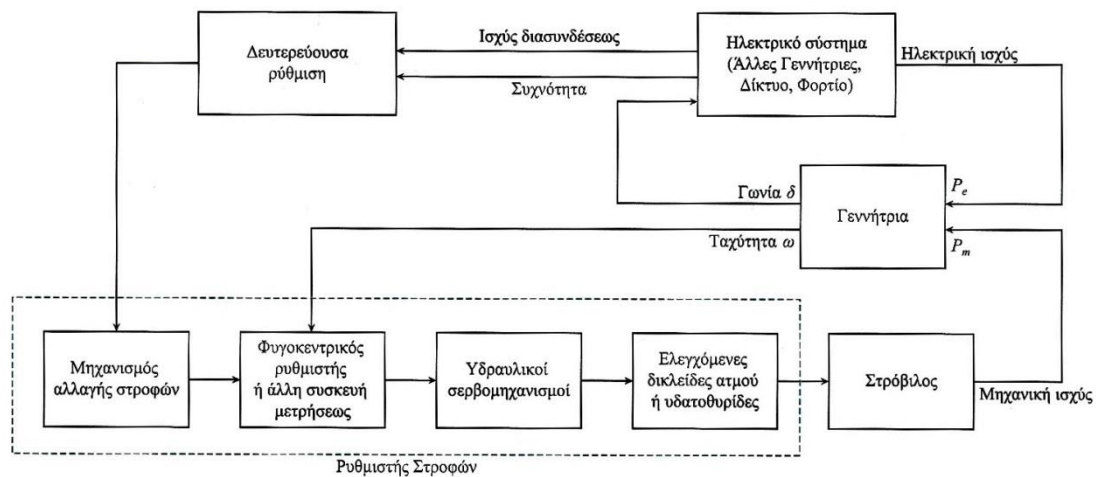
αποσυνδέουν τη γεννήτρια εάν οι στροφές αυξηθούν πάνω από την ονομαστική τιμή κατά ένα ορισμένο ποσοστό. Στους ατμοστροβίλους το όριο υπερτάχυνσης τίθεται συνήθως στην περιοχή 104% με 110% των ονομαστικών στροφών.

Η αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου τροφοδοτείται αρχικά από την κινητική ενέργεια των στρεφόμενων γεννητριών και στροβίλων. Η μείωση των στροφών των μηχανών αντιστοιχεί στο ρυθμό παροχής κινητικής ενέργειας προς το φορτίο. Έτσι, χωρίς αυτόματη ρύθμιση στροφών το ισοζύγιο παραγωγής – κατανάλωσης θα επιτυγχανόταν σε συχνότητα σημαντικά μικρότερη από την ονομαστική.

2.1.2 Πρωτεύουσα και Δευτερεύουσα Ρύθμιση

Η εξισορρόπηση παραγόμενης ισχύος και φορτίου και η διατήρηση της επιθυμητής συχνότητας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με τους ρυθμιστές στροφών των γεννητριών, οι οποίοι ελέγχουν τη μηχανική ισχύ που παράγεται από τις κινητήριες μηχανές (τους στροβίλους). Οι ρυθμιστές στροφών μπορεί να θεωρηθούν σαν μηχανισμοί ελέγχου είτε της συχνότητας, είτε της ισχύος. Αν μια γεννήτρια τροφοδοτεί ένα απομονωμένο φορτίο, ο ρυθμιστής στροφών λειτουργεί ελέγχοντας τη συχνότητα. Αν η γεννήτρια συνδέεται σε ένα μεγάλο σύστημα, η ταχύτητα περιστροφής της είναι δεσμευμένη από τη συχνότητα του συστήματος και ο ρυθμιστής στροφών ελέγχει στην πραγματικότητα την παραγόμενη ισχύ.

Το λειτουργικό διάγραμμα ενός ρυθμιστή στροφών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2-1: Λειτουργικό διάγραμμα ρυθμιστή στροφών [4]

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, ο ρυθμιστής στροφών διαθέτει δύο τύπους ρυθμίσεων:

- Μία μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας γίνεται αντιληπτή από το φυγοκεντρικό ρυθμιστή που είναι συνδεδεμένος με τον άξονά της (ή από άλλη συσκευή μέτρησης της ταχύτητας). Η μεταβολή αυτή μετατρέπεται σε σήμα – εντολή για τη μετακίνηση της δικλίδας του ατμοστροβίλου, είτε των ρυθμιστικών περυγίων του υδροστροβίλου, ώστε να προσαρμοστεί ανάλογα η μηχανική ισχύς που παράγεται από το στρόβιλο. Η διαδικασία αυτή αποτελεί την *πρωτεύουσα ρύθμιση*.
- Συμπληρωματικά μπορεί να ενεργοποιηθεί ο *μηχανισμός αλλαγής στροφών* του ρυθμιστή. Μετράται δηλαδή το σφάλμα συχνότητας του συστήματος μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση, καθώς και οι τυχόν διαφορές στη διακινούμενη ισχύ των εξωτερικών διασυνδέσεων και με μια κατάλληλη στρατηγική ελέγχου αποστέλλονται σήματα που αντιστοιχούν σε μια νέα ταχύτητα αναφοράς κάθε γεννήτριας. Αυτή είναι η *δευτερεύουσα ρύθμιση φορτίου – συχνότητας*. Η ρύθμιση αυτή μπορεί να γίνεται χειροκίνητα ή και με κεντρικό αυτόματο έλεγχο.

2.1.3 Στατισμός

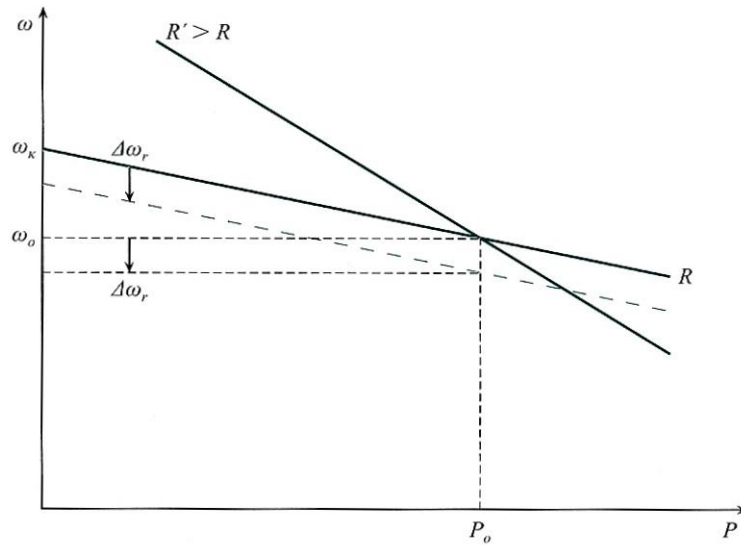
Μια ορισμένη θέση του μηχανισμού αλλαγής στροφών (δηλαδή μια δεδομένη ταχύτητα αναφοράς) αντιστοιχεί σε μια ευθύγραμμη *χαρακτηριστική φορτίου – συχνότητας* (Σχήμα 2-2), η αρνητική κλίση της οποίας ονομάζεται *στατισμός* της μονάδας (ή του ρυθμιστή στροφών). Ο στατισμός ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$R = - \frac{\Delta\omega}{\Delta P} \quad (2.1)$$

όπου:

$\Delta\omega$ = η ανά μονάδα μεταβολή της συχνότητας (ίση με την ανά μονάδα μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας) που παραμένει μετά τη λειτουργία της πρωτεύουσας ρύθμισης

ΔP = η ανά μονάδα μεταβολή του φορτίου, η οποία προκάλεσε τη μεταβολή $\Delta\omega$



Σχήμα 2-2: Χαρακτηριστική φορτίου – συχνότητας [4]

Ο στατισμός μετράται συνήθως σε ποσοστό επί τοις εκατό. Έτσι, στατισμός 4% ($R = 0,04$) αντιστοιχεί σε μόνιμη μεταβολή συχνότητας 4% (2 Hz σε σύστημα ονομαστικής συχνότητας 50 Hz) μετά από μεταβολή φορτίου ίση με την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας.

Στο Σχήμα 2-2 φαίνεται η χαρακτηριστική φορτίου – συχνότητας μιας μονάδας παραγωγής. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η κλίση της χαρακτηριστικής είναι *αρνητική*, όταν ο στατισμός είναι *θετικός*, σύμφωνα με την Εξ. (2.1). Αυτό συμβαίνει διότι παρά τη λειτουργία του ρυθμιστή στροφών, κάθε μεταβολή φορτίου αφήνει πάντα ένα *μόνιμο σφάλμα* συχνότητας. Έτσι αν η μεταβολή φορτίου ΔP είναι *θετική* (έχουμε δηλαδή *αύξηση* φορτίου), η συχνότητα θα μειωθεί, η μεταβολή $\Delta \omega$ θα είναι δηλαδή *αρνητική* (*μείωση* συχνότητας). Σημειώνεται ξανά εδώ ότι η χαρακτηριστική φορτίου – συχνότητας αναφέρεται στη *μόνιμη κατάσταση* μετά την πρωτεύουσα (και πριν τη δευτερεύουσα) ρύθμιση. Η *μεταβατική* μεταβολή της συχνότητας είναι πολύ μεγαλύτερη.

Η χαρακτηριστική φορτίου – συχνότητας μιας μονάδας μπορεί να μεταβληθεί με δύο τρόπους:

- Αν μεταβληθεί ο στατισμός R , η χαρακτηριστική φορτίου – συχνότητας στρέφεται γύρω από το σημείο λειτουργίας ω_o, P_o .
- Αν μεταβληθεί η ταχύτητα (συχνότητα) αναφοράς μέσω του μηχανισμού αλλαγής στροφών, η χαρακτηριστική μετακινείται παράλληλα διατηρώντας την κλίση της.

Οι δύο τρόποι μεταβολής της χαρακτηριστικής φορτίου – συχνότητας φαίνονται στο Σχήμα 2-2.

Αν μια μονάδα έχει μικρό στατισμό, τότε για σχετικά μικρή μεταβολή συχνότητας μεταβάλλει σημαντικά το φορτίο της. Μια τέτοια μονάδα λέγεται *ρυθμίζουσα*, γιατί συμβάλλει καθοριστικά με τη μεταβολή της παραγωγής της στη ρύθμιση της συχνότητας. Αν, αντίθετα, μια μονάδα έχει μεγάλο στατισμό, τότε μεταβάλλει ελάχιστα το φορτίο της όταν αλλάζει η συχνότητα και λέγεται *μονάδα βάσεως*.

Ο στατισμός λοιπόν διαφοροποιεί το ρόλο που παίζει κάθε μονάδα σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα. Καθορίζει επίσης τον τρόπο, με τον οποίο οι μονάδες που λειτουργούν παράλληλα μοιράζονται το κοινό τους φορτίο.

2.2 Ατμοηλεκτρικός Σταθμός [46]

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.

Στον ατμοπαραγωγό πραγματοποιείται η καύση του ορυκτού καυσίμου και η εκλύομενη θερμική ενέργεια θερμαίνει νερό για την παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης και 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.

Στο σημείο αυτό να σημειώσουμε ότι στο πλαίσιο της εργασίας μας, το μοντέλο της ατμοηλεκτρικής μονάδας αποτελείται μόνο από το ρυθμιστή στροφών και τον ατμοστρόβιλο.

Στη συνέχεια, περιγράφεται η λειτουργία του ατμοπαραγωγού, του ατμοστρόβιλου και του ρυθμιστή στροφών, ενώ παράλληλα αναπτύσσονται τα μοντέλα για το ρυθμιστή στροφών και το στρόβιλο ατμού.

2.2.1 Ατμοπαραγωγός

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 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 (ατμοπαραγωγού φυσικής κυκλοφορίας) ή μέσω αντλίας κυκλοφορίας (ατμοπαραγωγού 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 ψεκάσμο τροφοδοτικού νερού. Ακολούθως, ο ατμός υψηλής πίεσης και 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.

Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο εξασφαλίζεται η ροή του εργαζόμενου μέσου, οι ατμοπαραγωγού 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.

- Τον έλεγχο της ροής του νερού τροφοδοσίας στο τύμπανο, αφού η πιθανή υπερχειλίση 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.
- Τον έλεγχο της θερμοκρασίας του υπέρθερμου ατμού, ώστε να διατηρείται σταθερή και κατά συνέπεια να αποφεύγεται η θερμική καταπόνηση των μετάλλων του στρόβιλου. 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 της ροής του νερού τροφοδοσίας.

Η πλήρης μοντελοποίηση του ατμοπαραγωγού γίνεται στο [46] όπου παρατίθενται οι διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του.

2.2.2 Ατμοστρόβιλος

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

Μία τυπική διάταξη ατμοστρόβιλου 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 ενδιάμεσα στάδια μεταξύ των βαθμίδων, ώστε να αυξηθεί η ενθαλπία του ατμού και να εκτονωθεί ξανά στην επόμενη βαθμίδα πίεσεως. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης 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 εκτονώσεως του ατμού και δε διαθέτουν βαθμίδα αναθέρμανσης.

Στην εργασία μας χρησιμοποιήσαμε το απλοποιημένο μοντέλο του ατμοστρόβιλου, όπως δίνεται στο [47], του οποίου η συνάρτηση μεταφοράς φαίνεται παρακάτω:

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta V_{CV}} = \frac{1+sF_{HP}T_{RH}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})} \quad (2.2)$$

όπου

T_m = συνολική ροπή στροβίλου σε ανά μονάδα με βάση τη μέγιστη ισχύ στροβίλου

V_{CV} = θέση βαλβίδας ελέγχου (άνοιγμα δικλίδας)

F_{HP} = μέρος της συνολικής ισχύος του στροβίλου που παράγεται από την υψηλή πίεση

T_{RH} = σταθερά χρόνου αναθερμαντή

T_{CH} = σταθερά χρόνου αμοστροβίλου (σωληνώσεων μεταξύ δικλίδας και στροβίλου)

2.2.3 Ρυθμιστής στροφών

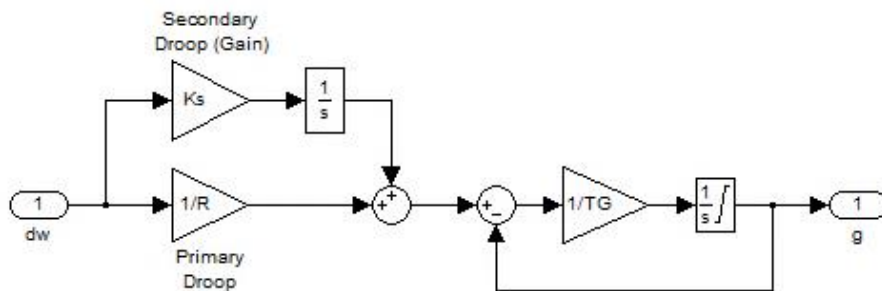
Έχοντας μιλήσει στην ενότητα 2.1 για το ρόλο των ρυθμιστών στροφών, στην παράγραφο αυτή περιγράφεται το μοντέλο ενός μηχανικού – υδραυλικού ρυθμιστή στροφών, το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μηχανικής ισχύος εξόδου ενός αμοστροβίλου. Η αρχή λειτουργίας ενός τέτοιου ρυθμιστή στροφών είναι η ίδια με την αντίστοιχη του γνωστού ρυθμιστή Watt. 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 δικλίδας αμού του αμοστροβίλου.

Στο Σχήμα 2-3 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του μηχανικού – υδραυλικού ρυθμιστή στροφών:



Σχήμα 2-3: Σχηματικό διάγραμμα μηχανικού – υδραυλικού ρυθμιστή στροφών αμοστροβίλου [46]

Τα βασικά στοιχεία της παραπάνω διάταξης είναι ο ρυθμιστής, ο υδραυλικός σερβομηχανισμός δικλίδας και η ελεγχόμενη δικλίδα.



Σχήμα 2-4: Μοντέλο μηχανικού – υδραυλικού ρυθμιστή στροφών ατμοστροβίλου

Στο Σχήμα 2-4 φαίνεται το μοντέλο του ρυθμιστή στροφών του ατμοηλεκτρικού σταθμού που χρησιμοποιούμε στην εργασία μας. Ο στατισμός της πρωτεύουσας ρύθμισης της μονάδας παριστάνεται με R , ενώ το κέρδος της δευτερεύουσας ρύθμισης με Ks . Η χρονική σταθερά T_G παριστάνει τη χρονική καθυστέρηση που εισάγει ο ρυθμιστής στην απόκριση του συστήματος και θεωρούμε ότι εμπεριέχει τη χρονική καθυστέρηση του υδραυλικού σερβομηχανισμού, μιας και παραλείπουμε την ξεχωριστή μοντελοποίηση αυτού. Όσον αφορά τον περιοριστή στον ολοκληρωτή του ρυθμιστή, αυτός περιορίζει το άνοιγμα της δικλίδας μεταξύ του πλήρους ανοίγματος ($g_{max} = 1$) και του πλήρους κλεισίματος ($g_{min} = 0$), ή εντός άλλων προκαθορισμένων ορίων ανάλογα με τη δυνατότητα φόρτισης του στροβίλου. Επίσης, όσον αφορά την ισχύ αναφοράς P_0 , η οποία είναι η αρχική φόρτιση του στροβίλου στο ανά μονάδα σύστημα αυτού, αυτή εισάγεται ως αρχική συνθήκη στους ολοκληρωτές. Τέλος, να σημειώσουμε ότι το σφάλμα συχνότητας ($\Delta\omega$ σε αμ) που χρησιμοποιούμε είναι $\omega_{ref} - \omega$, δηλαδή το αντίθετο από το συνηθισμένο σφάλμα που χρησιμοποιείται γενικά. Χρησιμοποιήσαμε αυτή τη σύμβαση με σκοπό να έχουμε θετικό πρόσημο στον αθροιστή μετά από τον ολοκληρωτή της δευτερεύουσας ρύθμισης και αυτό έγινε για να μη δημιουργείται πρόβλημα με την αρχική συνθήκη (P_0) του ολοκληρωτή αυτού. Το γεγονός αυτό εξηγεί και τα δύο θετικά πρόσημα στον αθροιστή μετά τα κέρδη των στατισμών.

Οι τιμές των παραμέτρων για τον ατμοηλεκτρικό σταθμό δίνονται στην υποενότητα **Ατμοηλεκτρικός σταθμός** της ενότητας 4.3.

2.3 Υδροηλεκτρικός Σταθμός [46]

2.3.1 Γενική περιγραφή υδροηλεκτρικών σταθμών

Οι υδροστροβίλοι 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 μιας σύγχρονης γεννήτριας.

Οι υδροστροβίλοι διαχωρίζονται σε δύο βασικούς τύπους, τους υδροστροβίλους δράσεως και αντιδράσεως. Οι υδροστροβίλοι δράσεως είναι γνωστοί ως τύπου Pelton και οι υδροστροβίλοι αντιδράσεως ως τύπου Francis. Στους τελευταίους υπάγονται και οι υδροστροβίλοι 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 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.

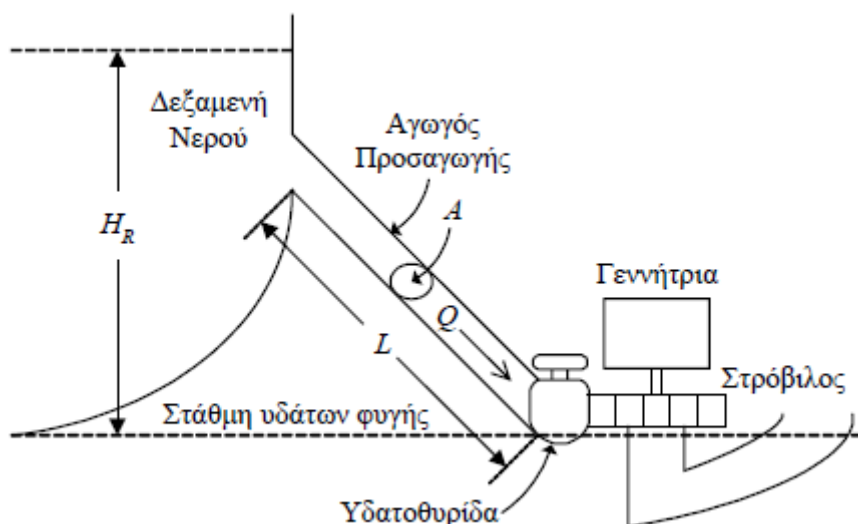
Για να περιοριστεί το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος, το οποίο είναι ανεπιθύμητο για την κανονική λειτουργία του συστήματος, οι μηχανισμοί που κινούν τις υδατοθυρίδες περιορίζονται στην κίνησή τους, ώστε να πραγματοποιούν μόνο βαθμιαίες και όχι απότομες μεταβολές. Επίσης, οι ρυθμιστές στροφών των υδροηλεκτρικών μονάδων σχεδιάζονται με μία πρόσθετη βαθμίδα μεταβατικού στατισμού, ο ρόλος της οποίας θα περιγραφεί στην παράγραφο 2.3.3. Επιπλέον, σε μερικές περιπτώσεις κατασκευάζεται κοντά στον υδροστροβίλο ένας πύργος ηρεμήςσεως ή αναπάλλσεως. Η κατασκευή του πύργου αναπάλλσεως 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 πίεσεως (συμπιεστότητα υδάτινης στήλης) και όχι σαν στερεό, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα κυματικά φαινόμενα που δημιουργούνται στον αγωγό προσαγωγής. Στην παρούσα εργασία, γίνεται η παραδοχή της “στερεάς” υδάτινης στήλης, οπότε τα προαναφερόμενα κυματικά φαινόμενα αμελούνται.

Στη συνέχεια, δίνεται το μοντέλο του υδροστροβίλου, το οποίο υιοθετείται στην παρούσα εργασία και ακολούθως, αναλύεται η σχεδίαση ενός ρυθμιστή στροφών για υδροηλεκτρική μονάδα και εξηγείται το διάγραμμα βαθμίδων του.

2.3.2 Μοντέλο υδροστροβίλου

Στο Σχήμα 2-5 φαίνεται η διάταξη μίας τυπικής υδροηλεκτρικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς πύργο αναπάλσεως.



Σχήμα 2-5: Σχηματικό διάγραμμα υδροηλεκτρικής μονάδας [46]

Η εικονιζόμενη εγκατάσταση αποτελείται από:

- Μία δεξαμενή νερού της οποίας η χωρητικότητα θεωρείται άπειρη (πρακτικά πολύ μεγάλη). Το καθαρό υδραυλικό ύψος της δεξαμενής συμβολίζεται με H_R .
- Έναν αγωγό προσαγωγής μέσου μήκους L και μέσης διατομής A , μέσω του οποίου το νερό ρέει από τη δεξαμενή προς τον υδροστροβίλο.
- Ρυθμιστικές υδατοθυρίδες το άνοιγμα των οποίων καθορίζει τη διατομή ροής προς το στρόβιλο και επομένως και τη μηχανική ισχύ εξόδου του.
- Έναν υδροστροβίλο ο οποίος μετατρέπει τη δυναμική ενέργεια του νερού σε κινητική, η οποία στη συνέχεια κινεί τη γεννήτρια του σταθμού.

Στην εργασία μας χρησιμοποιούμε το “κλασικό” μοντέλο του υδροστροβίλου, όπως δίνεται στο [47], για την εξαγωγή του οποίου έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές:

- 1) Η υδραυλική αντίσταση αμελείται.
- 2) Οι σωλήνες του αγωγού προσαγωγής είναι ανελαστικές και το νερό είναι τελείως ασυμπίεστο.

- 3) Η ταχύτητα του νερού είναι ανάλογη με το άνοιγμα των υδατοθυρίδων και με την τετραγωνική ρίζα του καθαρού μανομετρικού ύψους στο στρόβιλο.
- 4) Η μηχανική ισχύς εξόδου του στροβίλου είναι ανάλογη του γινομένου του καθαρού μανομετρικού ύψους H_R επί την παροχή νερού προς το στρόβιλο Q .

Η συνάρτηση μεταφοράς του υδροστροβίλου φαίνεται παρακάτω:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta g} = \frac{1 - T_w s}{1 + \frac{1}{2} T_w s} \quad (2.3)$$

όπου

P_m = μηχανική ισχύς στροβίλου

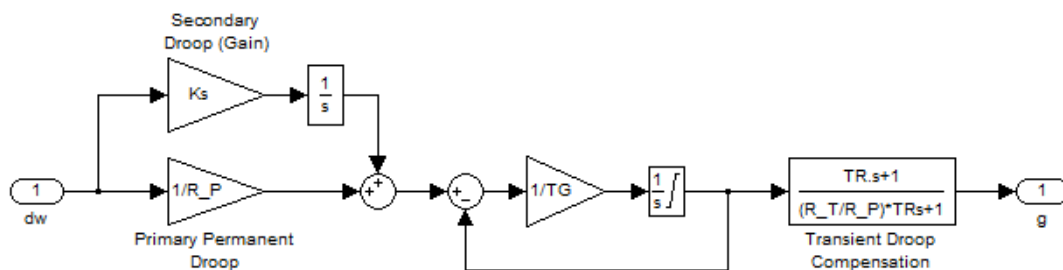
g = το άνοιγμα των υδατοθυρίδων

T_w = υδραυλική χρονική σταθερά αδρανείας του νερού (water starting time)

2.3.3 Περιγραφή ρυθμιστή στροφών υδροστροβίλου

Η ιδίομορφη 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 R_T , ο οποίος είναι αρκετά μεγαλύτερος από το μόνιμο στατισμό R_P , 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 Σχήμα 2-6 παρουσιάζουμε το διάγραμμα βαθμίδων του ρυθμιστή στροφών του υδροηλεκτρικού σταθμού που χρησιμοποιούμε στην εργασία μας [47].



Σχήμα 2-6: Διάγραμμα βαθμίδων μηχανικού – υδραυλικού ρυθμιστή στροφών υδροστροβίλου

Ο εξεταζόμενος ρυθμιστής έχει σαν εισόδους το σφάλμα συχνότητας ($\Delta\omega = \omega_{ref} - \omega$ σε αμ, το οποίο είναι το αντίθετο από το συνηθισμένο σφάλμα που χρησιμοποιείται γενικά και έχουμε εξηγήσει το λόγο για τον οποίο το κάνουμε αυτό) και την αρχική φόρτιση της μονάδας P_0 , η οποία εισάγεται ως αρχική συνθήκη στους ολοκληρωτές και στη συνάρτηση μεταφοράς. Έξοδός του είναι το άνοιγμα g της υδατοθυρίδας.

Ο μόνιμος στατισμός της πρωτεύουσας ρύθμισης της μονάδας παριστάνεται με R_P , ενώ το κέρδος της δευτερεύουσας ρύθμισης με K_S . Στη βαθμίδα του μεταβατικού στατισμού διακρίνεται εκτός του μεταβατικού στατισμού R_T και η χρονική σταθερά T_R , η οποία αποτελεί τη χρονική σταθερά επαναφοράς του μηχανισμού αυτού. Ο κύριος σερβομηχανισμός παριστάνεται από έναν ολοκληρωτή με σταθερά χρόνου T_G και έναν περιοριστή. Η σταθερά χρόνου T_G αντιπροσωπεύει την καθυστέρηση στη μεταβολή του ανοίγματος της υδατοθυρίδας από τη στιγμή που δίνεται η αντίστοιχη εντολή. Ο περιοριστής επιτρέπει στο άνοιγμα της υδατοθυρίδας να κυμαίνεται από το πλήρες κλείσιμο ($g_{min} = 0$) μέχρι το πλήρες άνοιγμα ($g_{max} = 1$).

Η σχεδίαση του ρυθμιστή στροφών υδροστροβίλου αποσκοπεί στον υπολογισμό βέλτιστων – σύμφωνα με κάποιο κριτήριο – τιμών του μεταβατικού στατισμού R_T και της χρονικής σταθεράς επαναφοράς του T_R .

Οι τιμές των παραμέτρων για τον υδροηλεκτρικό σταθμό δίνονται στην υποενότητα **Υδροηλεκτρικός σταθμός** της ενότητας 4.3.

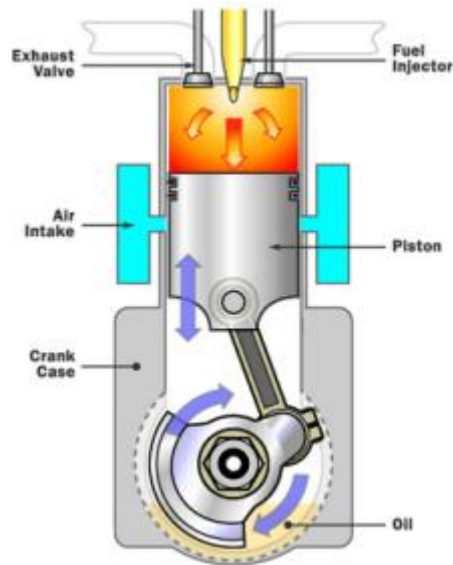
2.4 Ντηζελοηλεκτρική Μονάδα

Σε αυτόνομα δίκτυα (π.χ. νησιωτικά ΣΗΕ), οι ντηζελοηλεκτρικές μονάδες χρησιμοποιούνται ευρέως για την υποστήριξη της τοπικής συμβατικής παραγωγής.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της μηχανής diesel.

2.4.1 Μηχανή diesel [48], [49]

Η μηχανή diesel είναι μία μηχανή εσωτερικής καύσης, η οποία εκμεταλλεύεται τη θερμότητα της συμπίεσης του αέρα για την επίτευξη της ανάφλεξης του καυσίμου, το οποίο εγχέεται στο θάλαμο καύσης. Τα βασικά στοιχεία της μηχανής φαίνονται στο Σχήμα 2-7. Η αρχή λειτουργίας της μηχανής diesel παρουσιάζεται, αναλυτικότερα, παρακάτω.



Σχήμα 2-7: Βασικά δομικά στοιχεία μίας μηχανής diesel

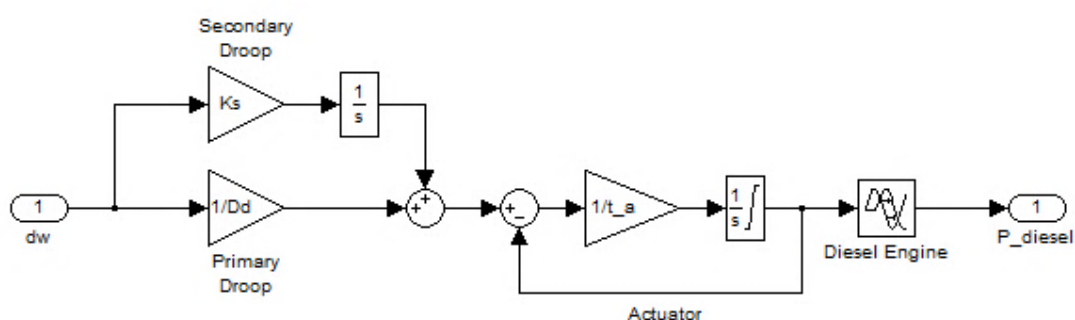
Αρχικά εισάγεται μόνο αέρας στο θάλαμο καύσης. Ο αέρας στη συνέχεια συμπιέζεται με ένα λόγο συμπίεσης με τυπική τιμή ανάμεσα σε 15:1 και 22:1, καταλήγοντας σε πίεση περίπου 40 bar. Αυτή η έντονη συμπίεση θερμαίνει τον αέρα στους 550° C. Έπειτα, εισάγεται το καύσιμο κατευθείαν μέσα στο συμπιεσμένο αέρα στο θάλαμο καύσης. Η βαλβίδα έγχυσης του καυσίμου (fuel injector) εξασφαλίζει ότι το καύσιμο πέφτει σε μικρές σταγόνες και με ομοιόμορφο τρόπο. Η θερμότητα του συμπιεσμένου αέρα προκαλεί την εξάτμιση του καυσίμου από την επιφάνεια των σταγόνων αυτών. Η ποσότητα αυτή του καυσίμου που εξατμίζεται στη συνέχεια αναφλέγεται, λόγω της θερμότητας του συμπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης. Οι σταγόνες συνεχίζουν να εξατμίζονται και να αναφλέγονται με αποτέλεσμα να γίνονται ολοένα και μικρότερες, έως ότου καεί όλη η ποσότητα του καυσίμου. Η έναρξη της εξάτμισης προκαλεί μία καθυστέρηση κατά την ανάφλεξη και έναν χαρακτηριστικό ήχο, καθώς ο ατμός φτάνει τη θερμοκρασία ανάφλεξης και προκαλεί απότομη αύξηση της πίεσης πάνω από το έμβολο (piston). Η απότομη εκτόνωση των καυσαερίων οδηγεί το έμβολο προς τα κάτω, παρέχοντας ισχύ στο στροφαλοφόρο άξονα (crankshaft).

Αφού το υψηλό επίπεδο συμπίεσης επιτρέπει να συμβεί η καύση χωρίς ξεχωριστό σύστημα ανάφλεξης, αυτό σημαίνει ότι ένας υψηλός λόγος συμπίεσης αυξάνει έντονα την απόδοση της μηχανής. Η αύξηση του λόγου συμπίεσης σε μία μηχανή με ξεχωριστό σύστημα ανάφλεξης με σπινθηριστές (π.χ. βενζινομηχανή), όπου το καύσιμο και ο αέρας αναμειγνύονται πριν την είσοδο στον κύλινδρο, είναι περιορισμένη για να αποτραπεί ενδεχόμενη πρόωρη ανάφλεξη, η οποία θα ήταν καταστροφική. Σε μία μηχανή diesel, όπου ο αέρας συμπιέζεται και το καύσιμο δεν εισέρχεται στον κύλινδρο παρά μόνο ελάχιστα πριν το έμβολο φτάσει στο άνω νεκρό σημείο (top dead center), δεν τίθεται θέμα πρόωρης ανάφλεξης και επομένως οι λόγοι συμπίεσης μπορούν να είναι σαφώς μεγαλύτεροι. Για αυτό το λόγο, καθώς και λόγω

της αυξημένης αξιοπιστίας τους, οι γεννήτριες diesel χρησιμοποιούνται ευρέως. Ωστόσο, οι εκπομπές επιβλαβών αερίων είναι σαφώς ανεπιθύμητες. Για αυτό γίνεται παγκοσμίως προσπάθεια για τη μείωση των εκπομπών αυτών από τις μηχανές diesel, αλλά και προσπάθεια για όσο το δυνατόν λιγότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τέτοιες πηγές.

2.4.2 Μοντέλο νηξελογεννήτριας [50]

Το μοντέλο της νηξελογεννήτριας που χρησιμοποιήσαμε για τις προσομοιώσεις μας παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 2-8: Μοντέλο προσομοίωσης νηξελογεννήτριας

Το παραπάνω διάγραμμα βαθμίδων έχει σαν εισόδους το σφάλμα συχνότητας ($\Delta\omega = \omega_{ref} - \omega$ σε αμ) και την αρχική φόρτιση της μονάδας P_0 (επίσης σε αμ), η οποία εισάγεται ως αρχική συνθήκη στους ολοκληρωτές και στη βαθμίδα (μπλοκ) της μηχανής diesel. Έξοδος είναι η ισχύς της κινητήριας μηχανής P_{diesel} .

Ο στατισμός της πρωτεύουσας ρύθμισης της μονάδας παριστάνεται με D_d , ενώ το κέρδος της δευτερεύουσας ρύθμισης με K_s . Η χρονική σταθερά t_a (*actuator delay*) παριστάνει τη χρονική καθυστέρηση που εισάγει ο σερβομηχανισμός της βαλβίδας καυσίμου στην απόκριση του συστήματος και t_d (*engine dead time*) είναι η αντίστοιχη χρονική καθυστέρηση που εισάγει η μηχανή. Όσον αφορά τον περιοριστή στο ρυθμιστή της βαλβίδας καυσίμου, αυτός περιορίζει την παροχή καυσίμου από τη μηδενική παροχή μέχρι αυτήν που αντιστοιχεί στην ονομαστική λειτουργία της μονάδας, ή εντός άλλων προκαθορισμένων ορίων ανάλογα με τη δυνατότητα φόρτισης της κινητήριας μηχανής.

Οι τιμές των παραμέτρων για τη νηξελοηλεκτρική μονάδα δίνονται στην υποενότητα **Νηξελοηλεκτρική μονάδα** της ενότητας 4.3.

2.5 Μηχανές Επαγωγής

2.5.1 Εισαγωγή [46]

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 μονάδων. Η κύρια χρήση των μηχανών επαγωγής για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συναντάται στα αιολικά πάρκα (ανεμογεννήτριες). Σε αυτό αναφερόμαστε στην ενότητα 2.6.

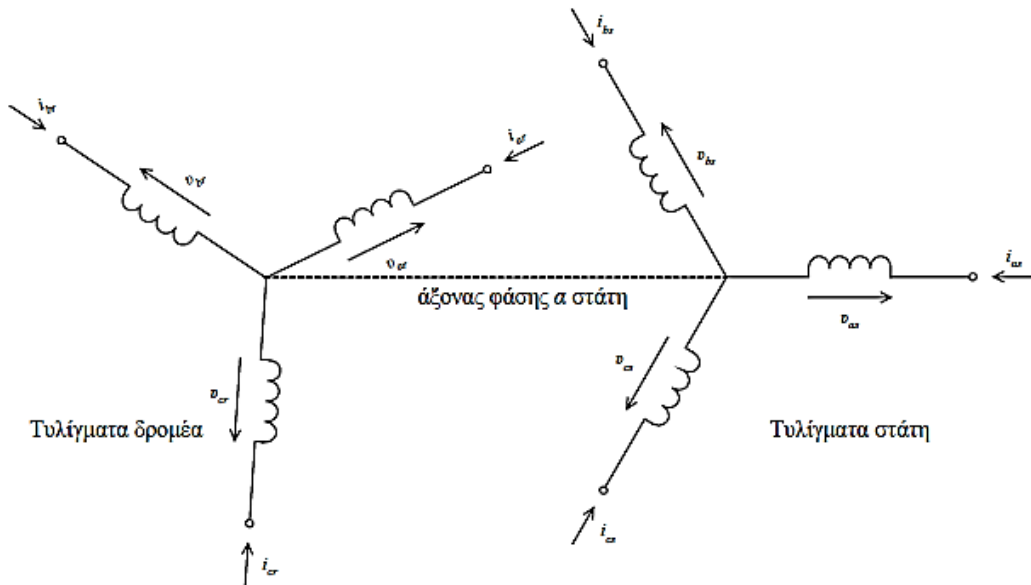
Οι μηχανές επαγωγής παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στα δυναμικά φαινόμενα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας για τους ακόλουθους λόγους:

- Έχουν γρήγορη επαναφορά ηλεκτρικής ισχύος (της τάξεως του δευτερολέπτου).
- Έχουν χαμηλό συντελεστή ισχύος και άρα μεγάλη κατανάλωση αέργου 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 αέργου 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 δε διαθέτουν τύλιγμα διεγέρσεως και επομένως δεν έχουν την ικανότητα να παράγουν την απαιτούμενη άεργο ισχύ για την εγκατάσταση του μαγνητικού 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 Σχήμα 2-9 παριστάνεται συμβολικά μία τριφασική μηχανή επαγωγής.



Σχήμα 2-9: Κυκλωματική παράσταση μηχανής επαγωγής [46]

Ο στάτης της τριφασικής ασύγχρονης μηχανής αποτελείται από τρία όμοια τυλίγματα as , bs , cs (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.

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 $\omega_e = \omega_s = 2\pi f_e$, όπου f_e η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας στο στάτη. Σημειώνεται ότι $\omega_{ms} = (2/p)\omega_s$ είναι η σύγχρονη ταχύτητα σε μηχανικά rad/s και p είναι ο αριθμός των πόλων. Ο δρομέας περιστρέφεται με ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_r (η πραγματική μηχανική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα είναι $\omega_{rm} = (2/p)\omega_r$). Υποθέτοντας ότι $\omega_r \neq \omega_s$, το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσει ρεύματα εξ επαγωγής στη συχνότητα που αντιστοιχεί στη διαφορά $\omega_s - \omega_r$. Ακολουθώς, 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 ω_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 ω_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:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_{ms} - \omega_{rm}}{\omega_{ms}} \quad (2.4)$$

Σύμφωνα με την Εξ. (2.4), η γωνιακή ταχύτητα $\omega_s - \omega_r$ των επαγόμενων ρευμάτων του δρομέα είναι ίση με $s\omega_s = s\omega_e$, 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 a_s, b_s, c_s του στάτη είναι θετικά, όταν εισέρχονται στη μηχανή.

2.5.2 Περιγραφή μοντέλου μηχανής επαγωγής με τις εξισώσεις του Park [51]

Οι εξισώσεις του Park αποτελούν το μαθηματικό εργαλείο για την περιγραφή των μηχανών επαγωγής. Τόσο το τριφασικό τύλιγμα a_s, b_s, c_s του στάτη όσο και το αντίστοιχο a_r, b_r, c_r του δρομέα αντικαθίστανται από d, q, θ τυλίγματα, τα οποία περιστρέφονται με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_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. Το τυλίγμα θ δεν είναι μαγνητικά συζευγμένο με τα άλλα δύο νέα τυλίγματα και παίζει ρόλο μόνο σε ασύμμετρες συνθήκες φόρτισης. Επειδή στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με συμμετρικές καταστάσεις, το τυλίγμα θ παραλείπεται.

Όσον αφορά τις εξισώσεις της μηχανής, έχουμε αμελήσει το μαγνητικό κορεσμό, την υστέρηση και τα δινορρεύματα. Επιπλέον έχουμε υποθέσει ότι το διάκενο της μηχανής είναι ομοιόμορφο και ότι τα κύματα μαγνητικής ροής είναι απολύτως ημιτονοειδώς κατανεμημένα.

Να σημειωθεί ότι όλα τα μεγέθη είναι εκφρασμένα ανά μονάδα.

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

- Όλα τα μεγέθη αναφέρονται στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς dq της μηχανής.
- Οι δείκτες s και r συμβολίζουν το τυλίγμα του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις για τις τάσεις του στάτη γράφονται ως εξής:

$$\tilde{v}_s = R_s \tilde{i}_s + j\omega \tilde{\lambda}_s + \frac{1}{\omega_b} p \tilde{\lambda}_s \quad (2.5)$$

όπου

\tilde{v}_s = το διάνυσμα της τάσης του στάτη

\tilde{i}_s = το διάνυσμα του ρεύματος του στάτη

$\tilde{\lambda}_s$ = το διάνυσμα της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής στάτη

R_s = η αντίσταση του τυλίγματος στάτη

ω = η γωνιακή ταχύτητα του αυθαίρετου πλαισίου αναφοράς, η οποία εδώ επιλέγεται ίση με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_e του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο που παράγεται από τα ρεύματα του στάτη (σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς)

ω_b = η βασική (ονομαστική) ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα του συστήματος σε ηλεκτρικά rad/s και είναι ίση με $2\pi f_b$, όπου f_b είναι η ονομαστική συχνότητα

p = ο τελεστής παραγωγισής ($p = d/dt$)

Αναλύοντας τα διανύσματα στις d, q συνιστώσες τους, δηλαδή,

$$\tilde{v}_s = v_{ds} + jv_{qs} \quad (2.6)$$

$$\tilde{i}_s = i_{ds} + ji_{qs} \quad (2.7)$$

$$\tilde{\lambda}_s = \lambda_{ds} + j\lambda_{qs} \quad (2.8)$$

αντικαθιστώντας τις Εξ. (2.6) – (2.8) στη (2.5) και χωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη και στα δύο μέλη, προκύπτουν οι τάσεις του στάτη στους άξονες d και q :

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + \frac{1}{\omega_b} p \lambda_{ds} \quad (2.9)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + \frac{1}{\omega_b} p \lambda_{qs} \quad (2.10)$$

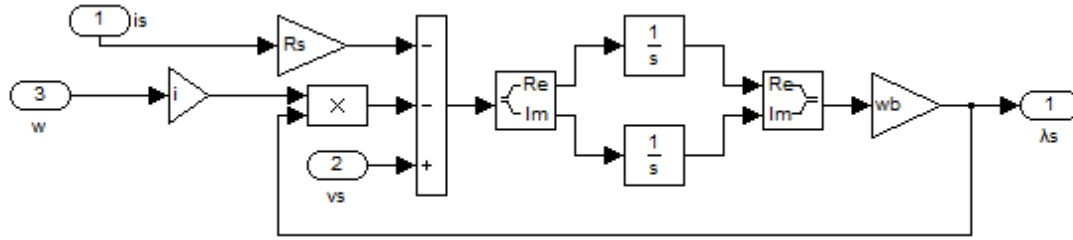
Για την ανάπτυξη του μοντέλου, λύνουμε τις εξισώσεις Εξ. (2.9), (2.10) ως προς την παράγωγο της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής για να τις φέρουμε σε μορφή ολοκληρωτή:

$$\lambda_{ds} = \omega_b \cdot \frac{1}{s} (v_{ds} - R_s i_{ds} + \omega \lambda_{qs}) \quad (2.11)$$

$$\lambda_{qs} = \omega_b \cdot \frac{1}{s} (v_{qs} - R_s i_{qs} - \omega \lambda_{ds}) \quad (2.12)$$

όπου ο τελεστής παραγωγισής p στις Εξ. (2.9), (2.10) έχει μετασχηματιστεί κατά Laplace σε s και το $1/s$ παριστάνει έναν ολοκληρωτή.

Με τις Εξ. (2.11), (2.12) ξεκινάμε την ανάπτυξη του μοντέλου της μηχανής. Στο Σχήμα 2-10 παρουσιάζουμε το μοντέλο των εξισώσεων τάσης του στάτη:



Σχήμα 2-10: Εξισώσεις τάσεως στάτη

Οι εξισώσεις για τις τάσεις του δρομέα γράφονται ως εξής:

$$\tilde{v}_r = R_r \tilde{i}_r + j(\omega - \omega_r) \tilde{\lambda}_r + \frac{1}{\omega_b} p \tilde{\lambda}_r \quad (2.13)$$

όπου

\tilde{v}_r = το διάνυσμα της τάσης του δρομέα

\tilde{i}_r = το διάνυσμα του ρεύματος του δρομέα

$\tilde{\lambda}_r$ = το διάνυσμα της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής δρομέα

R_r = η αντίσταση του τυλίγματος δρομέα

ω_r = η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα

Σημειώνεται ότι όλες οι παράμετροι και οι μεταβλητές του δρομέα, όπως R_r , L_r , \tilde{i}_r , $\tilde{\lambda}_r$ σε όλες τις εξισώσεις που εμφανίζονται, αναφέρονται στην πλευρά του στάτη. Επίσης στην περίπτωση που η μηχανή επαγωγής λειτουργεί ως κινητήρας η τάση του δρομέα \tilde{v}_r είναι μηδενική, καθώς το τύλιγμα του δρομέα είναι βραχυκυκλωμένο.

Αναλύοντας τα διανύσματα στις d, q συνιστώσες τους, δηλαδή,

$$\tilde{v}_r = v_{dr} + jv_{qr} \quad (2.14)$$

$$\tilde{i}_r = i_{dr} + ji_{qr} \quad (2.15)$$

$$\tilde{\lambda}_r = \lambda_{dr} + j\lambda_{qr} \quad (2.16)$$

και αντικαθιστώντας τις Εξ. (2.14) – (2.16) στη (2.13), προκύπτει:

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr} + \frac{1}{\omega_b} p \lambda_{dr} \quad (2.17)$$

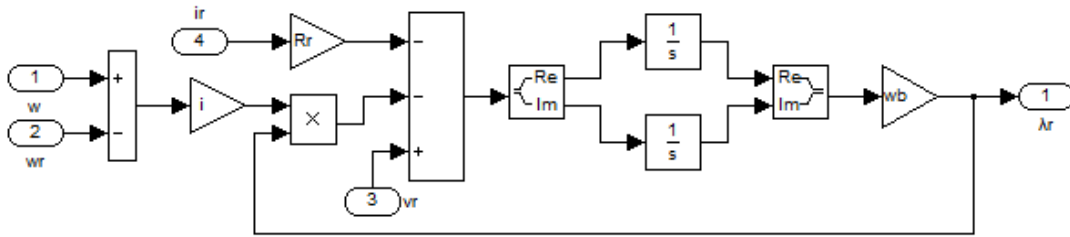
$$v_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr} + \frac{1}{\omega_b} p \lambda_{qr} \quad (2.18)$$

Λύνουμε τις εξισώσεις Εξ. (2.17), (2.18) ως προς την παράγωγο της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής για να τις φέρουμε σε μορφή ολοκληρωτή:

$$\lambda_{dr} = \omega_b \cdot \frac{1}{s} (v_{dr} - R_r i_{dr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{qr}) \quad (2.19)$$

$$\lambda_{qr} = \omega_b \cdot \frac{1}{s} (v_{qr} - R_r i_{qr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{dr}) \quad (2.20)$$

Στο Σχήμα 2-11 φαίνεται το μοντέλο των εξισώσεων τάσης του δρομέα:



Σχήμα 2-11: Εξισώσεις τάσεως δρομέα

Οι εξισώσεις για τις πεπλεγμένες μαγνητικές ροές στάτη και δρομέα γράφονται ως εξής:

$$\tilde{\lambda}_s = (L_{ls} + L_m) \tilde{i}_s + L_m \tilde{i}_r = L_s \tilde{i}_s + L_m \tilde{i}_r \quad (2.21)$$

$$\tilde{\lambda}_r = (L_{lr} + L_m) \tilde{i}_r + L_m \tilde{i}_s = L_r \tilde{i}_r + L_m \tilde{i}_s \quad (2.22)$$

όπου

$L_s = L_{ls} + L_m =$ η αυτεπαγωγή στάτη

$L_r = L_{lr} + L_m =$ η αυτεπαγωγή δρομέα

$L_{ls} =$ η αυτεπαγωγή σκέδασης στάτη

$L_{lr} =$ η αυτεπαγωγή σκέδασης δρομέα

$L_m =$ η αυτεπαγωγή μαγνήτισης

Αντικαθιστώντας τις Εξ. (2.8) και (2.16) στις (2.21) και (2.22), δηλαδή αναλύοντας τα διανύσματα των πεπλεγμένων μαγνητικών ροών $\tilde{\lambda}_s$ και $\tilde{\lambda}_r$ στις d, q συνιστώσες τους μέσα στις εξισώσεις αυτών, προκύπτει:

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (2.23)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (2.24)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (2.25)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (2.26)$$

Οι εξισώσεις των πεπλεγμένων μαγνητικών ροών (2.23) – (2.26) μπορούν να γραφούν σε μητρική μορφή:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Τα ρεύματα στάτη και δρομέα στην παραπάνω εξίσωση μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των πεπλεγμένων μαγνητικών ροών στάτη και δρομέα. Αυτό μπορεί να γίνει πολλαπλασιάζοντας από αριστερά με τον αντίστροφο πίνακα αυτεπαγωγών και τα δύο μέλη της Εξ. (2.27):

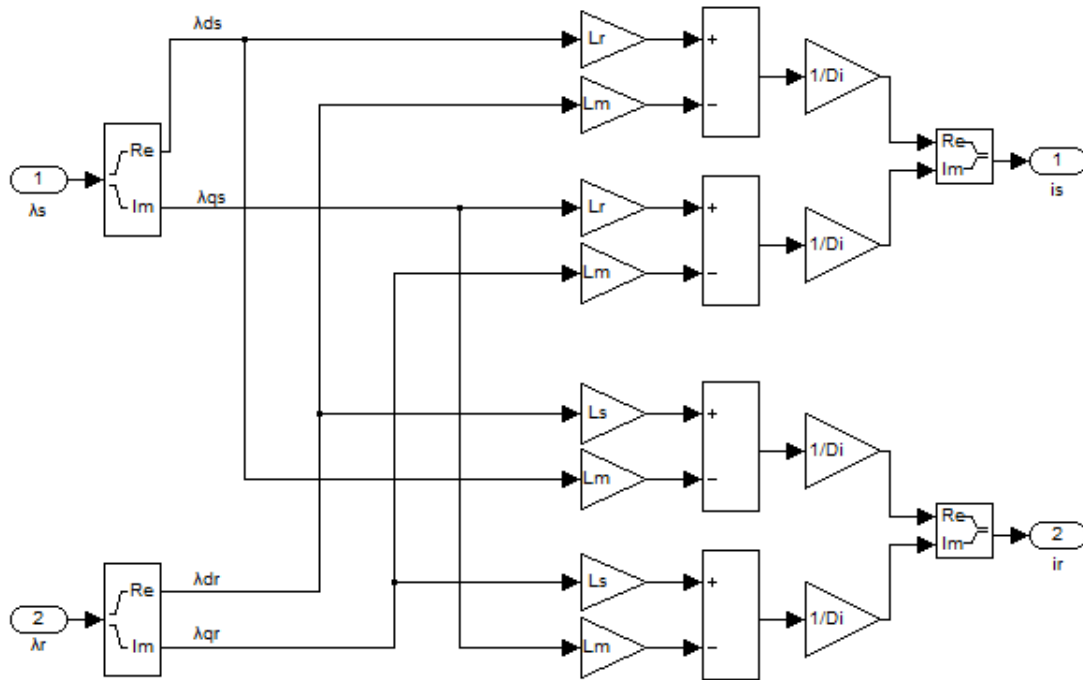
$$[\lambda] = [L][i] \Leftrightarrow [L]^{-1}[\lambda] = [L]^{-1}[L][i] \Leftrightarrow [i] = [L]^{-1}[\lambda] \quad (2.28)$$

από την οποία έχουμε

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{D_I} \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

όπου $D_I = L_s L_r - L_m^2$.

Στο Σχήμα 2-12 φαίνεται το μοντέλο των εξισώσεων πεπλεγμένων μαγνητικών ροών στάτη και δρομέα:



Σχήμα 2-12: Εξισώσεις πεπλεγμένων μαγνητικών ροών

Οι εξισώσεις ροπής και ισχύος είναι:

$$T_e = \text{Re}(j\tilde{\lambda}_s \tilde{i}_s^*) = \text{Im}(\tilde{\lambda}_s^* \tilde{i}_s) = \lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds} \quad (2.30)$$

$$\tilde{S} = P + jQ = \tilde{v}_s \tilde{i}_s^* \quad (2.31)$$

Από την τελευταία, αναλύοντας τα διανύσματα τάσεως και ρεύματος στάτη και χωρίζοντας σε πραγματικό και φανταστικό μέρος, προκύπτει:

$$P = \text{Re}(\tilde{v}_s \tilde{i}_s^*) = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (2.32)$$

$$Q = \text{Im}(\tilde{v}_s \tilde{i}_s^*) = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \quad (2.33)$$

όπου

T_e = η ηλεκτρομαγνητική ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας

\tilde{S} = η μιγαδική ισχύς που απορροφάται από τον κινητήρα

P = η καταναλισκόμενη ενεργός ισχύς

Q = η καταναλισκόμενη άεργος ισχύς

Η μοντελοποίηση του μηχανικού μέρους αποτελείται από την εξίσωση κίνησης του δρομέα και το μοντέλο του μηχανικού φορτίου, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

Η εξίσωση κίνησης είναι η εξής:

$$\omega_m = \frac{1}{2Hs} (T_e - T_m) \quad (2.34)$$

όπου

ω_m = η μηχανική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα

H = η συνδυασμένη ανηγμένη σταθερά αδρανείας του κινητήρα και του μηχανικού φορτίου

T_m = η μηχανική ροπή του φορτίου του κινητήρα

Σημειώνεται ότι $\omega_{m(pu)} = \frac{\omega_m}{\omega_{m \text{ base}}} = \frac{\omega_r(2/p)}{\omega_{\text{base}}(2/p)} = \frac{\omega_r}{\omega_{\text{base}}} = \omega_{r(pu)}$. Υπενθυμίζουμε ότι όλα τα μεγέθη στην ανάλυσή μας είναι εκφρασμένα ανά μονάδα. Έτσι μπορούμε να χρησιμοποιούμε το ω_r στη θέση του ω_m και το αντίστροφο.

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:

$$T_m = T_{m0}[(1 - \alpha_m) + \alpha_m \omega_r^m] \quad (2.35)$$

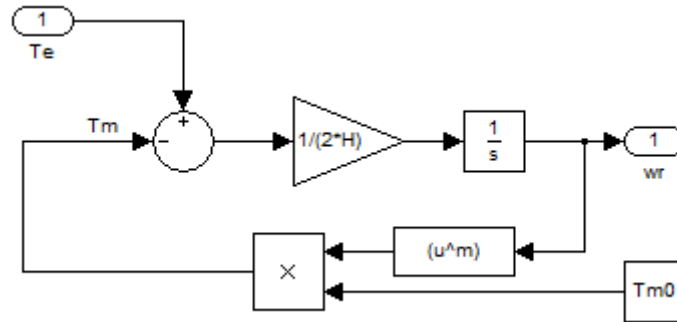
όπου T_{m0} είναι η μηχανική ροπή του φορτίου στη σύγχρονη ταχύτητα, α_m το ποσοστό του φορτίου που είναι εκθετικής μορφής και m ο εκθέτης του εκθετικού τμήματος του φορτίου. Ειδικές περιπτώσεις μηχανικού φορτίου έχουμε όταν:

- $\alpha_m = 0$, οπότε η μηχανική ροπή του φορτίου είναι ανεξάρτητη των στροφών του κινητήρα (φορτίο σταθερής ροπής).
- $\alpha_m = 1$ και $m = 2$, οπότε η μηχανική ροπή του φορτίου είναι ανάλογη με το τετράγωνο των στροφών του κινητήρα (τετραγωνικό φορτίο) [46].

Στην εργασία μας, για τη μοντελοποίηση του μηχανικού φορτίου, επιλέγουμε $\alpha_m = 1$ και $m = 2$, οπότε η μηχανική ροπή του φορτίου δίνεται από τη σχέση:

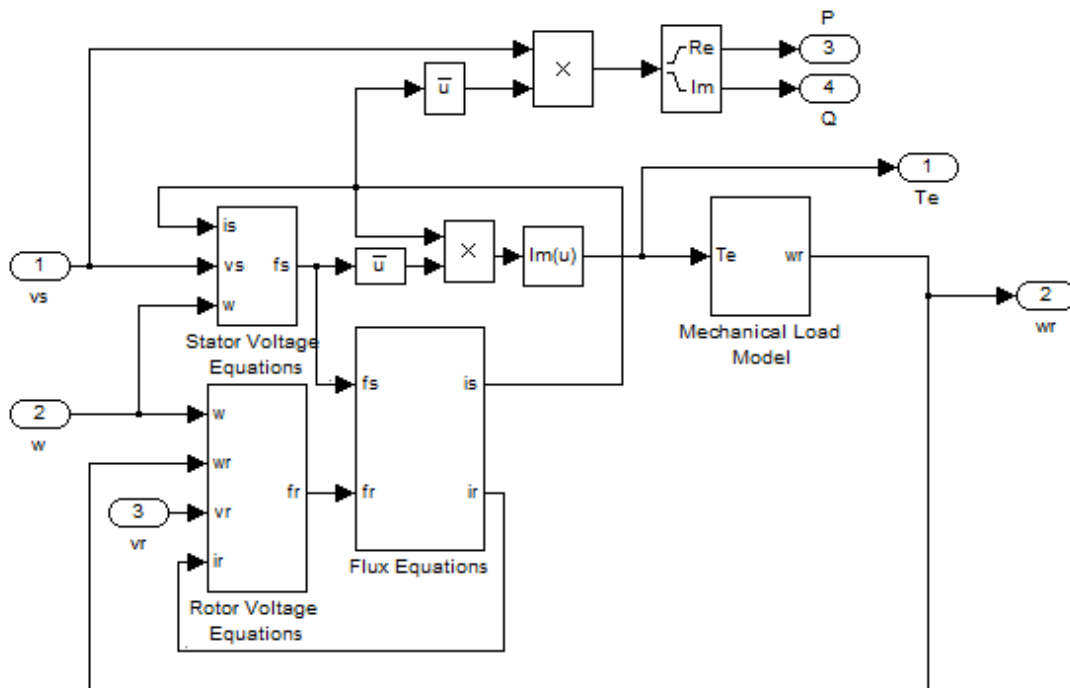
$$T_m = T_{m0} \omega_r^2 \quad (2.36)$$

Το μοντέλο του μηχανικού μέρους φαίνεται στο Σχήμα **2-13**:



Σχήμα 2-13: Εξίσωση κίνησης και μοντέλο μηχανικού φορτίου

Συνολικά το μοντέλο του κινητήρα επαγωγής, που χρησιμοποιούμε ως φορτίο στην εργασία μας, παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 2-14: Συνολικό μοντέλο κινητήρα επαγωγής

Οι τιμές των παραμέτρων για τον κινητήρα επαγωγής δίνονται στην υποενότητα **Κινητήρας επαγωγής** της ενότητας 4.3.

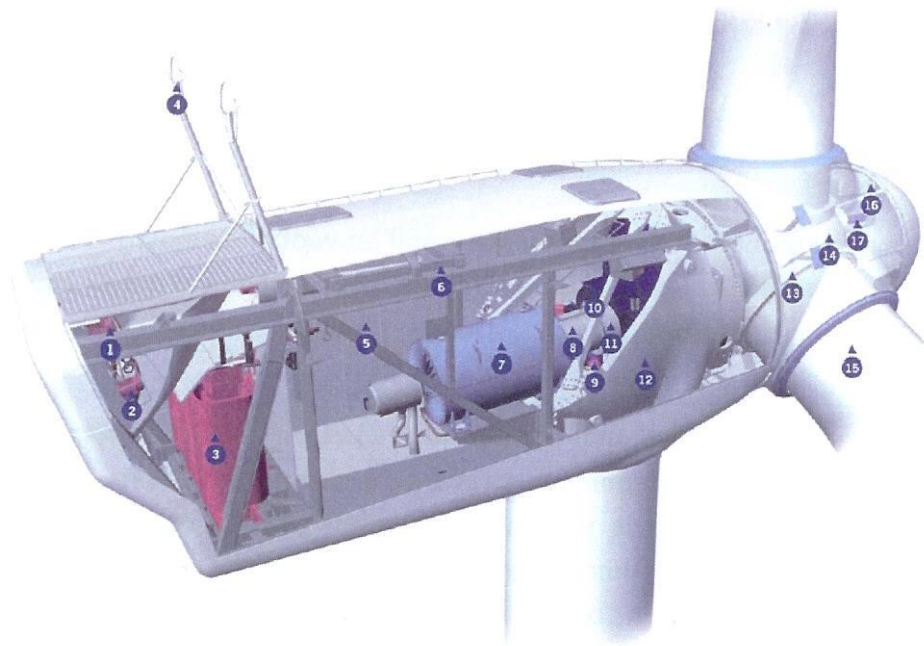
2.6 Ανεμογεννήτρια

2.6.1 Αρχή λειτουργίας και βασικά υποσυστήματα [52]

Η λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας (Α/Γ) είναι δυνατόν να διαχωριστεί σε δύο βασικά συστήματα μετατροπής ενέργειας:

- Το μηχανικό σύστημα, το οποίο μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ροπή, μέσω των πτερυγίων και
- το ηλεκτρικό σύστημα, στο οποίο η γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ροπή του δρομέα σε ηλεκτρική ενέργεια.

Πιο αναλυτικά, τα βασικά δομικά τμήματα μιας τυπικής σύγχρονης Α/Γ είναι ο πύργος, η άτρακτος (νασέλα), όπου τοποθετείται και η γεννήτρια και τα πτερύγια. Εκτός από τα βασικά της τμήματα, μια σύγχρονη Α/Γ περιέχει πλέον και πληθώρα συστημάτων ελέγχου τόσο του μηχανικού όσο και του ηλεκτρικού της τμήματος, τα κυριότερα από τα οποία περιγράφονται συνοπτικά στις επόμενες παραγράφους.



1 = ψυγείο λαδιού, 2 = ψυγείο γεννήτριας, 3 = μετασχηματιστής, 4 = υπερηχητικοί αισθητήρες ανέμου, 5 = VMP - Top Controller με αντιστροφέα, 6 = γερανός συντήρησης, 7 = γεννήτρια, 8 = σύνδεση δίσκων, 9 = σύστημα ελέγχου πλήμνης yaw, 10 = κιβώτιο ταχυτήτων, 11 = σύστημα πέδησης, 12 = θεμέλια μηχανής, 13 = τριβέας πτερυγίου, 14 = πλήμνη, 15 = πτερύγιο, 16 = σύστημα ελέγχου pitch, 17 = ελεγκτής πλήμνης

Σχήμα 2-15: Α/Γ Vestas V90 3 MW

Ο μηχανισμός περιστροφής και προσανατολισμού της ατράκτου (yaw control), με βάση την κατεύθυνση του ανέμου, περιστρέφει την άτρακτο της Α/Γ, έτσι ώστε το επίπεδο, που ορίζουν τα πτερύγια του δρομέα, να είναι συνεχώς κάθετο στην κατεύθυνση του ανέμου. Αυτό γίνεται επειδή τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων μιας Α/Γ είναι γενικά τέτοια, ώστε προκειμένου να μεγιστοποιείται η αιολική ενέργεια που απορροφάται κάθε στιγμή από την Α/Γ, πρέπει η επιφάνεια του δίσκου της έλικας να είναι συνεχώς κάθετη στη διεύθυνση του ανέμου. Από την άλλη μεριά, οι μεγάλες σταθερές αδρανείας των πτερυγίων παράγουν υψηλές γυροσκοπικές ροπές κατά την περιστροφή της ατράκτου, που συχνά προκαλούν έντονο θόρυβο. Έτσι, πολύ γρήγορος προσανατολισμός, μπορεί να δημιουργήσει θόρυβο που να υπερβαίνει τα τοπικά αποδεκτά όρια και συνεπώς η στρατηγική που ακολουθείται συνήθως, προβλέπει έναν ελεγχόμενο ρυθμό αλλαγής του προσανατολισμού της ατράκτου, με βάση περισσότερο μόνιμες και όχι στιγμιαίες αλλαγές της κατεύθυνσης του ανέμου.

Άλλος μηχανισμός ελέγχου του μηχανικού μέρους των Α/Γ είναι αυτός που ρυθμίζει τη γωνία βήματος (pitch control). Ο έλεγχος της γωνίας βήματος γίνεται είτε με βάση τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, είτε με βάση την παραγόμενη ισχύ, ή και τα δύο. Σε κάθε περίπτωση πάντως βασικός βρόχος ελέγχου είναι αυτός της ενεργού ισχύος, αφού βασική αποστολή του ελέγχου της γωνίας βήματος είναι ο περιορισμός της παραγόμενης ισχύος για υψηλό άνεμο. Το σήμα ταχύτητας και ο αντίστοιχος βρόχος ελέγχου γενικά σταθεροποιούν την ταχύτητα της Α/Γ, παρέχοντας απόσβεση στις μηχανικές ταλαντώσεις ή / και χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία εκκίνησης και στάσης της Α/Γ.

Τέλος, όσον αφορά τον έλεγχο του ηλεκτρικού μέρους μιας Α/Γ, αυτός γίνεται με τη χρησιμοποίηση ηλεκτρονικών ισχύος, τα οποία παρεμβάλλονται μεταξύ της ηλεκτρικής γεννήτριας και του δικτύου. Παράλληλα, απαραίτητες θεωρούνται συνήθως και κάποιες διατάξεις αντιστάθμισης, με σκοπό τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος, ενώ άλλες ηλεκτρονικές διατάξεις, όπως το σύστημα ομαλής εκκίνησης και ο διακόπτης αποσύνδεσης, διασφαλίζουν την ομαλή ζεύξη αλλά και απόζευξη της Α/Γ, όταν αυτό είναι απαραίτητο, όπως για παράδειγμα σε περίπτωση βραχυκυκλώματος [53].

2.6.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών [52]

Οι Α/Γ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση πολλά και διαφορετικά κριτήρια, που έχουν να κάνουν τόσο με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους, όσο και με τον τρόπο λειτουργίας τους. Έτσι, οι Α/Γ που βρίσκονται σήμερα εγκατεστημένες παγκοσμίως χωρίζονται σε [54]:

- **Α/Γ οριζόντιου και Α/Γ κατακόρυφου άξονα**, ανάλογα με τον προσανατολισμό του άξονά τους. Σήμερα, οι Α/Γ οριζόντιου άξονα έχουν κυριαρχήσει σχεδόν ολοκληρωτικά στην παγκόσμια αγορά, παρά το γεγονός ότι κατασκευαστικά είναι

σημαντικά δυσκολότερες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα σημαντικά πλεονεκτήματα που τις χαρακτηρίζουν ως προς την καλύτερη αεροδυναμική απόδοση αλλά και ποιότητα ισχύος που παρουσιάζουν σε σχέση με τις Α/Γ κατακόρυφου άξονα [53].

- **Α/Γ σταθερών και Α/Γ μεταβλητών στροφών**, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους. Οι Α/Γ σταθερών στροφών λειτουργούν σε ένα στενό εύρος ταχύτητας περιστροφής, λίγο πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα (στην περίπτωση των ασύγχρονων μηχανών), ενώ οι Α/Γ μεταβλητών στροφών λειτουργούν σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Οι Α/Γ σταθερών στροφών είναι κατασκευαστικά απλούστερες και συνεπώς αρκετά φθηνότερες από τις Α/Γ μεταβλητών στροφών και ήταν οι πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν σε ευρεία κλίμακα.. Ωστόσο, η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος έδωσε στους κατασκευαστές τη δυνατότητα απόζευξης της ταχύτητας περιστροφής από τη σταθερή συχνότητα του δικτύου, μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος που παρεμβάλλονται μεταξύ του δικτύου και της ηλεκτρικής γεννήτριας. Η εξέλιξη αυτή οδήγησε σταδιακά στο γεγονός οι Α/Γ μεταβλητών στροφών, παρά το σχετικά αυξημένο κόστος τους, να αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία των Α/Γ που εγκαθίστανται. Τα κυριότερα πλεονεκτήματά τους είναι η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης εξαιτίας της βελτιστοποίησης της ταχύτητας περιστροφής αλλά και η δυνατότητα ικανοποίησης οποιασδήποτε σχεδόν απαίτησης τεθεί από το διαχειριστή του δικτύου.
- **Α/Γ με παθητικό (passive stall control) ή με ενεργό αεροδυναμικό έλεγχο (active stall control) και Α/Γ με έλεγχο της γωνίας βήματος (pitch control)**, ανάλογα με τη δυνατότητα ελέγχου της γωνίας των πτερυγίων. Οι Α/Γ με παθητικό αεροδυναμικό έλεγχο είναι οι απλούστερες κατασκευαστικά, καθώς δεν προσφέρουν καμία δυνατότητα ελέγχου της γωνίας των πτερυγίων. Διαθέτουν πτερύγια, τα οποία είναι βιδωμένα πάνω στην πλήμνη σε συγκεκριμένα γωνία, χωρίς αυτή να μπορεί να αλλάξει. Η γεωμετρία των πτερυγίων, ωστόσο, είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο, ώστε να δημιουργούνται στροβιλισμοί στην υπήνεμη επιφάνεια του πτερυγίου, τη στιγμή που η ταχύτητα του ανέμου ξεπερνάει την ονομαστική. Το φαινόμενο αυτό (stall) μειώνει την ανυψωτική δύναμη που δέχεται το πτερύγιο με αποτέλεσμα τον περιορισμό της ισχύος και την αποφυγή υπερφόρτισης της Α/Γ. Από την άλλη πλευρά, οι Α/Γ με έλεγχο της γωνίας βήματος, διαθέτουν πτερύγια που μπορούν να περιστραφούν κατά το διαμήκη άξονά τους συνήθως από 0° μέχρι 90°, ανάλογα με την ταχύτητα του προσπίπτοντος ανέμου. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αναπτύσσονται χαμηλότερα φορτία στα πτερύγια και στο δομικό σύστημα της Α/Γ, να περιορίζεται η αεροδυναμική ισχύς χωρίς διακοπή της λειτουργίας, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται και καλύτερη ενεργειακή απόδοση σε υψηλό άνεμο. Τέλος, οι Α/Γ με ενεργό αεροδυναμικό έλεγχο προσφέρουν μια μικρή δυνατότητα αλλαγής της γωνίας των πτερυγίων τους, συνήθως σε ένα εύρος τιμών, περίπου, 0° μέχρι 4°. Στις Α/Γ αυτές όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή και η Α/Γ πρόκειται να υπερφορτιστεί, η γωνία pitch μεταβάλλεται αντίθετα (negative pitch control), ώστε να γίνει πιο έντονο το

φαινόμενο stall και να απορριφθεί με αυτόν τον τρόπο η περίσσεια αεροδυναμικής ισχύος. Πρόκειται για μια μέθοδο ελέγχου που εφαρμόζεται κυρίως σε Α/Γ με ονομαστική ισχύ μεγαλύτερη από 1 MW. Γενικά, η συντριπτική πλειοψηφία των Α/Γ που εγκαθίστανται σήμερα διαθέτει δυνατότητα ρύθμισης της γωνίας βήματος.

2.6.3 Τοπολογίες ανεμογεννητριών

Για τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους των Α/Γ έχουν προταθεί διάφορες υλοποιήσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν κυρίως σύγχρονες και ασύγχρονες γεννήτριες. Σε ορισμένες περιπτώσεις και ειδικά για Α/Γ μικρής ισχύος, έχουν προταθεί ακόμα και γεννήτριες συνεχούς ρεύματος. Σε εξαιρετικά περιορισμένη έκταση ωστόσο, κυρίως λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας και των αναγκών συντήρησής τους.

Παρακάτω, παρουσιάζονται οι δυνατές διαμορφώσεις του ηλεκτρικού συστήματος των Α/Γ [54]:

(I) ΑΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ		(II) ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	
Δρομέας κλωβού	(1) Απευθείας σύνδεση	Ηλεκτρική διέγερση	(1) Απευθείας σύνδεση
	(2) Μέσω μετατροπέα AC/DC/AC		(2) Μέσω μετατροπέα AC/DC/AC
	(3) Μέσω μετατροπέα AC/AC	Μόνιμοι μαγνήτες	(3) Μέσω μετατροπέα AC/DC/AC
(4) Με έλεγχο ολισθήσεως	(4) Μέσω μετατροπέα AC/AC		
Δρομέας με δακτυλίους	(5) Με μετατροπέα AC/DC/AC (Διπλής τροφοδότησης)	(III) ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΡ	
	(6) Με μετατροπέα AC/AC (Διπλής τροφοδότησης)	(1) Μέσω αντιστροφέα DC/AC	

Πίνακας 2-1: Δυνατές διαμορφώσεις του ηλεκτρικού συστήματος μιας Α/Γ [54]

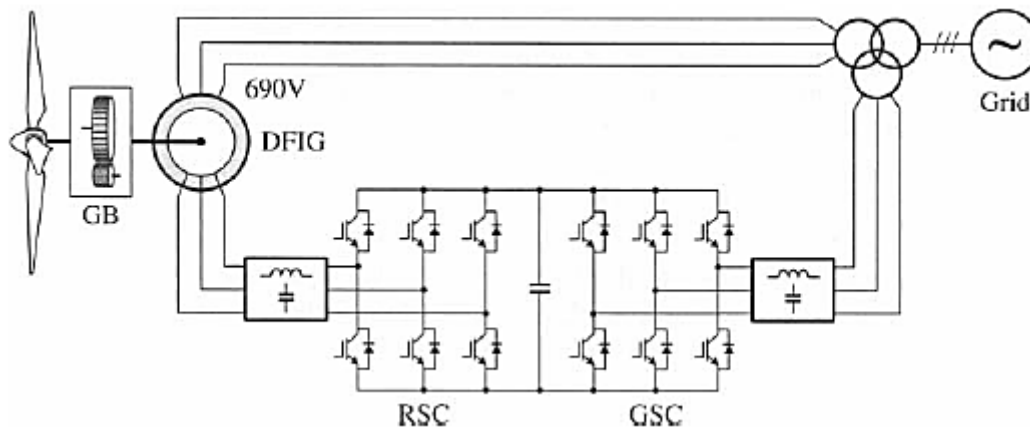
Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τύποι είναι [48]:

- Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού, απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο. Χαρακτηρίζεται από το μικρό βάρος, την απλότητα στην κατασκευή, την αξιοπιστία και το μειωμένο κόστος λόγω έλλειψης μετατροπέα. Απαιτεί σύνδεση συστοιχίας πυκνωτών για αντιστάθμιση της αέργου ισχύος.

- A/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (τυλιγμένου δρομέα) με σύστημα μετατροπών ισχύος AC/DC/AC, συνδεδεμένο στο δρομέα. Οι μετατροπές AC/DC (μετατροπέας γεννήτριας) και DC/AC (μετατροπέας δικτύου) είναι δύο όμοιοι μετατροπείς πηγής τάσης με έλεγχο PWM. Το βασικό πλεονέκτημα είναι ο -μειωμένης ικανότητας- μετατροπέας, καθώς αυτός διαχειρίζεται μόνο ένα ποσοστό της συνολικής ισχύος (συνήθως ~30%), γεγονός που μειώνει το κόστος. Το σημαντικότερο μειονέκτημα της τοπολογίας αυτής είναι η ανάγκη τακτικής συντήρησης και η ύπαρξη κιβωτίου ταχυτήτων.
- A/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη πολυπολική γεννήτρια (είτε με ηλεκτρική διέγερση, είτε με μόνιμους μαγνήτες), χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων με σύστημα μετατροπών ισχύος AC/DC/AC, συνδεδεμένο στο στάτη. Ο ανορθωτής AC/DC, συνήθως, είναι ένας απλός ανορθωτής γέφυρας (με διόδους ή θυρίστορ), ενώ ο αντιστροφέας DC/AC είναι μετατροπέας πηγής τάσης με έλεγχο PWM. Τα μειονεκτήματα της τοπολογίας αυτής είναι ότι η γεννήτρια είναι μεγάλη, βαριά και πολύπλοκη, καθώς και ότι ο μετατροπέας διαχειρίζεται το 100% της ισχύος της γεννήτριας.

2.6.4 Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης (ΓΕΔΤ) Doubly Fed Induction Generator (DFIG) [55]

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους των A/Γ έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς, διάφορες τοπολογίες που χρησιμοποιούν τόσο σύγχρονες όσο και ασύγχρονες γεννήτριες. Μία από τις πιο συνηθισμένες υλοποιήσεις, σήμερα, είναι A/Γ μεταβλητών στροφών με ΓΕΔΤ. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-16, ο στάτης συνδέεται απευθείας στο δίκτυο, ενώ ο δρομέας συνδέεται στο δίκτυο μέσω -μειωμένης ικανότητας- συστήματος ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα σύστημα μετατροπών πηγής τάσης δύο επιπέδων με IGBTs σε διάταξη back-to-back. Το όνομα της ΓΕΔΤ οφείλεται στο γεγονός ότι τόσο ο στάτης όσο και ο δρομέας μπορούν να τροφοδοτήσουν με ενέργεια το δίκτυο. Τυπική τιμή για την τάση του στάτη στις εμπορικές ΓΕΔΤ είναι τα 690 V. Η ονομαστική ισχύς τους κυμαίνεται από λίγες εκατοντάδες kW έως μερικά MW.



Σχήμα 2-16: Διάταξη συστήματος Α/Γ με ΓΕΔΤ [55]

Ο -από την πλευρά της γεννήτριας- μετατροπέας (RSC) ελέγχει τη ροπή ή την ενεργό/άεργο ισχύ της γεννήτριας, ενώ ο -από την πλευρά του δικτύου- μετατροπέας (GSC) ελέγχει την τάση του DC-link και την άεργο ισχύ της AC-πλευράς του. Αφού το σύστημα έχει τη δυνατότητα να ελέγχει την άεργο ισχύ, δε χρειάζεται εξωτερική αντιστάθμιση αέργου ισχύος.

Το εύρος που κυμαίνεται η ταχύτητα των ΓΕΔΤ είναι $\pm 30\%$ της σύγχρονης ταχύτητας. Η μέγιστη ολίσθηση καθορίζει τη μέγιστη ισχύ που διαχειρίζεται το κύκλωμα του δρομέα, η οποία είναι $\sim 30\%$ της ονομαστικής ισχύος. Επομένως, η ροή ισχύος στο κύκλωμα του δρομέα είναι αμφίδρομη: μπορεί να ρέει από το δίκτυο στο κύκλωμα του δρομέα και αντίστροφα. Το γεγονός αυτό απαιτεί σύστημα μετατροπέων τεσσάρων τεταρτημορίων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-16. Ωστόσο, το σύστημα των μετατροπέων χρειάζεται να διαχειρίζεται μόνο $\sim 30\%$ της ονομαστικής ισχύος. Η χρήση μετατροπέων μειωμένης ικανότητας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους, του βάρους, καθώς επίσης και του μεγέθους του συστήματος. Σε σύγκριση με τα συστήματα Α/Γ σταθερών στροφών, η απόδοση της μετατροπής ενέργειας των συστημάτων εφοδιασμένων με ΓΕΔΤ είναι σαφώς βελτιωμένη. Τέλος, στο Σχήμα 2-16 φαίνονται επίσης τα φίλτρα για τη μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης που προκαλείται από το σύστημα των μετατροπέων.

2.6.5 Μοντελοποίηση της ΓΕΔΤ (DFIG)

Στην παράγραφο 2.5.2 μοντελοποιήσαμε τη μηχανή επαγωγής. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε το μοντέλο της ΓΕΔΤ, το οποίο, ουσιαστικά, είναι το μοντέλο της μηχανής επαγωγής, έχοντας κάνει κάποιες τροποποιήσεις.

Έχουμε χρησιμοποιήσει ένα μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα με δύο αυτεπαγωγές (Γ ισοδύναμο κύκλωμα) [56], σε αντίθεση με το κλασικό Τ ισοδύναμο το οποίο έχει τρεις αυτεπαγωγές. Εισάγοντας τη σταθερά μετασχηματισμού

$$\gamma = \frac{L_s}{L_m} = \frac{L_{ls} + L_m}{L_m} \quad (2.37)$$

το Τ ισοδύναμο κύκλωμα μπορεί να μετασχηματιστεί στο Γ ισοδύναμο κύκλωμα ως εξής:

$$v_R = \gamma v_r \quad (2.38)$$

$$i_R = \frac{i_r}{\gamma} \quad (2.39)$$

$$\lambda_R = \gamma \lambda_r \quad (2.40)$$

$$R_R = \gamma^2 R_r \quad (2.41)$$

$$L_M = \gamma L_m = L_s \quad (2.42)$$

$$L_L = \gamma L_{ls} + \gamma^2 L_{lr} \quad (2.43)$$

όπου

v_R = η τάση δρομέα ανηγμένη στο στάτη

i_R = το ρεύμα δρομέα ανηγμένο στο στάτη

λ_R = η πεπλεγμένη μαγνητική ροή δρομέα ανηγμένη στο στάτη

R_R = η αντίσταση δρομέα ανηγμένη στο στάτη

L_L = η συνολική αυτεπαγωγή σκέδασης

Έτσι, τελικά, οι εξισώσεις της ΓΕΔΤ γράφονται ως εξής:

$$\tilde{v}_s = -R_s \tilde{i}_s - j\omega \tilde{\lambda}_s - \frac{1}{\omega_b} p \tilde{\lambda}_s \quad (2.44)$$

$$\tilde{v}_R = -R_R \tilde{i}_R - j(\omega - \omega_r) \tilde{\lambda}_R - \frac{1}{\omega_b} p \tilde{\lambda}_R \quad (2.45)$$

$$\tilde{\lambda}_s = L_M (\tilde{i}_s + \tilde{i}_R) \quad (2.46)$$

$$\tilde{\lambda}_R = \tilde{\lambda}_s + L_L \tilde{i}_R \quad (2.47)$$

Η εξίσωση ροπής δεν αλλάζει και δίνεται από την Εξ. (2.30).

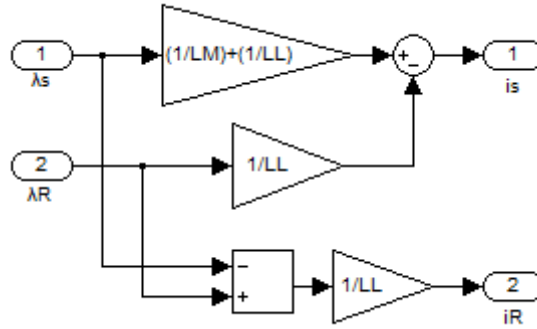
Από τις εξισώσεις (2.44), (2.45) παρατηρούμε ότι έχουμε αλλάξει σύμβαση για τα πρόσημα σε σχέση με τις εξισώσεις του κινητήρα επαγωγής.

Λύνοντας τις Εξ. (2.46), (2.47) ως προς τα ρεύματα \tilde{i}_s , \tilde{i}_R προκύπτει:

$$\tilde{i}_R = \frac{1}{L_L} (\tilde{\lambda}_R - \tilde{\lambda}_s) \quad (2.48)$$

$$\tilde{i}_s = \left(\frac{1}{L_M} + \frac{1}{L_L} \right) \tilde{\lambda}_s - \frac{1}{L_L} \tilde{\lambda}_R \quad (2.49)$$

Οι Εξ. (2.48), (2.49) δίνουν το μοντέλο για τις εξισώσεις των πεπλεγμένων μαγνητικών ροών, το οποίο φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2-17: Εξισώσεις πεπλεγμένων μαγνητικών ροών

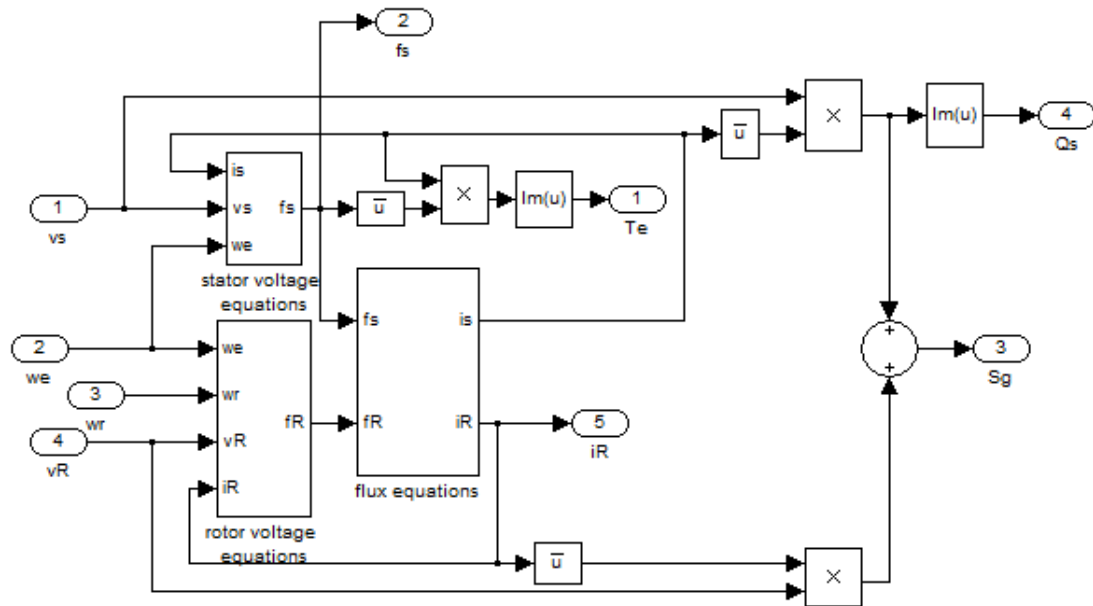
Να σημειωθεί ότι η τάση του δρομέα \tilde{v}_R στην περίπτωση της ΓΕΔΤ δεν είναι μηδενική όπως στην περίπτωση του κινητήρα επαγωγής, αλλά ελέγχεται με σκοπό τον έλεγχο της ενεργού και αέργου ισχύος, όπως εξηγείται στην παράγραφο 2.6.6.

Επίσης, στην περίπτωση της ΓΕΔΤ οι εξισώσεις της ολικής ενεργού και αέργου ισχύος έχουν ως εξής:

$$P = \text{Re}(\tilde{v}_s \tilde{i}_s^* + \tilde{v}_R \tilde{i}_R^*) = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} + v_{dR} i_{dR} + v_{qR} i_{qR} \quad (2.50)$$

$$Q = \text{Im}(\tilde{v}_s \tilde{i}_s^* + \tilde{v}_R \tilde{i}_R^*) = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} + v_{qR} i_{dR} - v_{dR} i_{qR} \quad (2.51)$$

Έτσι, το συνολικό μοντέλο της ΓΕΔΤ, που χρησιμοποιούμε στην εργασία μας ως Α/Γ, παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 2-18: Μοντέλο ΓΕΔΤ

Οι τιμές των παραμέτρων για την ΓΕΔΤ δίνονται στην υποενότητα **Ανεμογεννήτρια** της ενότητας 4.3.

2.6.6 Έλεγχος της ΓΕΔΤ

2.6.6.1 Διανυσματικός Έλεγχος με Προσανατολισμό Πεδίου (Vector Control – FOC: Field Oriented Control) – Εισαγωγή [56]

Η ιδέα του προσανατολισμού του πεδίου (Field Orientation) προτάθηκε από τους H. Hasse και F. Blaschke το 1969 και το 1972 αντίστοιχα, και αποτέλεσε επανάσταση στη θεωρία και τις εφαρμογές του ελέγχου των ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής. Στην ουσία, ο στόχος της τεχνικής του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου είναι η μηχανή επαγωγής να εξομοιωθεί στη λειτουργία της με τη μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διεγέρσεως η οποία αποτελεί σε θεωρητικό επίπεδο πρότυπη πηγή μεταβλητής ροπής. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, ο διανυσματικός έλεγχος, όπως άλλωστε και η ονομασία του υποδηλώνει, μεταχειρίζεται τα εμπλεκόμενα μεγέθη ως διανύσματα ρυθμίζοντας το μέτρο αλλά και τη φάση τους. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις αρχές του μονόμετρου ελέγχου, ο οποίος ελέγχει μόνο το πλάτος των εμπλεκόμενων μεγεθών.

Με το διανυσματικό έλεγχο μπορεί υπό κατάλληλες προϋποθέσεις να επιτευχθεί η απόζευξη των εξισώσεων της μηχανής, κάτι που αίρει όλα τα προβλήματα του μονόμετρου (βαθμωτού) ελέγχου και κάνει πράγματι τη μηχανή επαγωγής να

συμπεριφέρεται ως μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διεγέρσεως. Η άρση της σύζευξης μεταξύ διέγερσης και απόκρισης, μεταξύ δηλαδή της μαγνητικής ροής και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, είναι που κάνει το διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό πεδίου τόσο ξεχωριστό από θεωρητική όσο και πρακτική σκοπιά. Ο διανυσματικός έλεγχος έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τις αρχές της γενικευμένης θεωρίας των ηλεκτρικών μηχανών, καθώς άνοιξε το δρόμο όχι μόνο για τη θεώρηση αλλά και τον έλεγχο όλων των μηχανών μέσω ενός πρότυπου, γενικευμένου μοντέλου μηχανής.

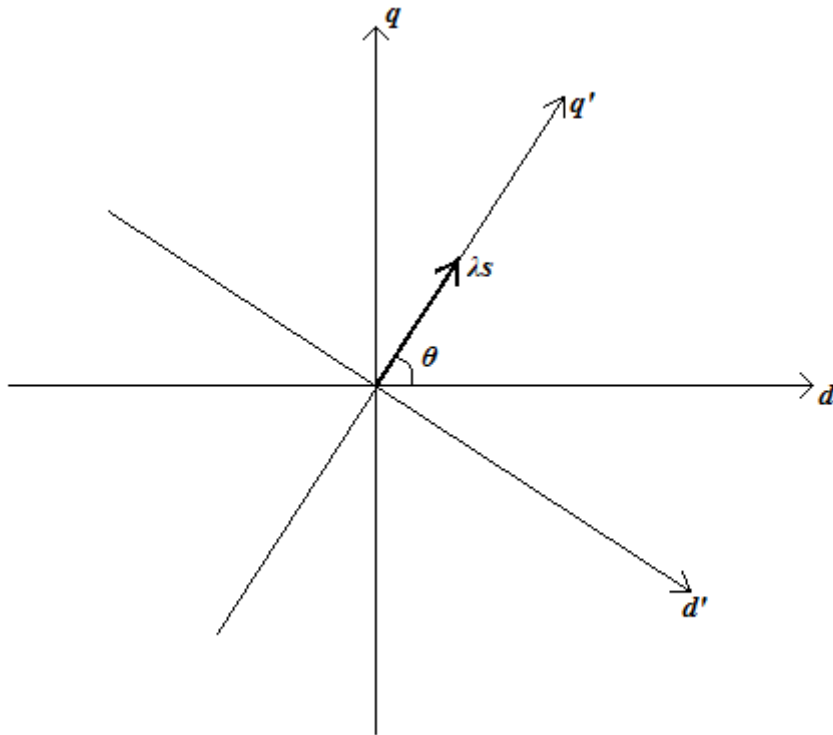
Σε μία μηχανή επαγωγής το εγγενές φαινόμενο της σύζευξης των εξισώσεων περιορίζει την απόδοση και επίδοση της μηχανής. Η χρήση κατάλληλου dq πλαισίου αναφοράς, του οποίου ο ένας άξονας παραμένει διαρκώς ευθυγραμμισμένος με το διάνυσμα της μαγνητικής ροής μπορεί να πετύχει την απόζευξη των εξισώσεων, οι οποίες καθίστανται γραμμικά ανεξάρτητες.

Ο έλεγχος με προσανατολισμό πεδίου μπορεί γενικά να κατηγοριοποιηθεί σε [55]:

- Διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό στη μαγνητική ροή του στάτη (Stator flux oriented).
- Διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό στη μαγνητική ροή του δρομέα (Rotor flux oriented).
- Διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό στη μαγνητική ροή του διακένου (Air-gap flux oriented).

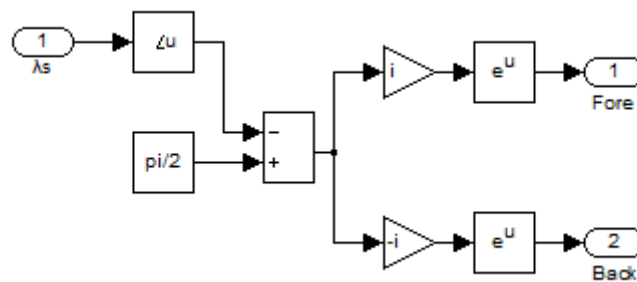
2.6.6.2 Έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος – Μοντελοποίηση [52]

Στην παρούσα εργασία, επιλέγεται η τεχνική του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό στη μαγνητική ροή του στάτη. Έτσι, το πλαίσιο αναφοράς dq στρέφεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε ο άξονας q να συμπίπτει κάθε χρονική στιγμή με την κατεύθυνση του διανύσματος της μαγνητικής ροής του στάτη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-19. Με τον τρόπο αυτό, θα επιτύχουμε αποσυσζευγμένο έλεγχο ενεργού και αέργου ισχύος.



Σχήμα 2-19: Στροφή dq πλαισίου για την υλοποίηση του διανυσματικού ελέγχου

Όπως βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα το πλαίσιο στρέφεται κατά γωνία $-(\pi/2 - \theta)$, όπου θ είναι η γωνία της μαγνητικής ροής του στάτη $\tilde{\lambda}_s$ ως προς τον άξονα d . Ο μετασχηματισμός των μεγεθών από το πλαίσιο dq στο $d'q'$ γίνεται με πολλαπλασιασμό με $\exp(j(\pi/2 - \theta))$ και η επιστροφή στο αρχικό πλαίσιο γίνεται με $\exp(-j(\pi/2 - \theta))$. Αυτός ο μετασχηματιστής φάσης μοντελοποιείται ως εξής:



Σχήμα 2-20: Μετασχηματιστής γωνίας

Στο νέο πλαίσιο αναφοράς $d'q'$ θα είναι:

$$\lambda_{d's} = 0 \quad (2.52)$$

$$\lambda_{q's} = \lambda_s = |\tilde{\lambda}_s| \quad (2.53)$$

Αντικαθιστώντας τις Εξ. (2.52), (2.53) στην (2.46), προκύπτει:

$$\lambda_{q's} = L_M i_{q's} + L_M i_{q'R} \Leftrightarrow \lambda_s = L_M i_{q's} + L_M i_{q'R} \Leftrightarrow i_{q's} = \frac{\lambda_s}{L_M} - i_{q'R} \quad (2.54)$$

$$\lambda_{d's} = L_M i_{d's} + L_M i_{d'R} \Leftrightarrow 0 = L_M i_{d's} + L_M i_{d'R} \Leftrightarrow i_{d's} = -i_{d'R} \quad (2.55)$$

Η εξίσωση τάσεως του στάτη (2.44), αμελώντας τα μεταβατικά φαινόμενα ($p\lambda_{ds} = p\lambda_{qs} = 0$) και θεωρώντας ότι η ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη είναι αρκετά μικρή, ώστε η πτώση τάσης να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, γίνεται:

$$v_{q's} = -\omega\lambda_{d's} \quad (2.56)$$

$$v_{d's} = \omega\lambda_{q's} \quad (2.57)$$

Και με αντικατάσταση των Εξ. (2.52), (2.53) στις δύο τελευταίες, προκύπτει:

$$v_{q's} = 0 \quad (2.58)$$

$$v_{d's} = \omega\lambda_s \quad (2.59)$$

Από τις τελευταίες εξισώσεις μπορούμε να δούμε ότι αμελώντας τα μεταβατικά φαινόμενα και την αντίσταση του στάτη, ο έλεγχος με προσανατολισμό στη μαγνητική ροή του στάτη συμπίπτει με έλεγχο προσανατολισμένο στην τάση του στάτη (Stator Voltage Oriented Control – SVOC). Σε συστήματα Α/Γ με ΓΕΔΤ, ο στάτης της γεννήτριας είναι απευθείας συνδεδεμένος στο δίκτυο, οπότε η τάση και η συχνότητα μπορούν να θεωρηθούν σταθερές υπό κανονικές συνθήκες. Επομένως, είναι βολικό να χρησιμοποιηθεί έλεγχος με προσανατολισμό στην τάση του στάτη. Αυτό επιτυγχάνεται ευθυγραμμίζοντας τον d -άξονα του σύγχρονα στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς με το διάνυσμα της τάσης του στάτη \tilde{v}_s . Οπότε προκύπτει $v_{q's} = 0$ και $v_{d's} = |\tilde{v}_s| = v_s$ [55].

Κάναμε μία σύντομη αναφορά στον έλεγχο με προσανατολισμό στην τάση του στάτη. Εμείς, όμως, όπως έχουμε προαναφέρει χρησιμοποιούμε διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό στη μαγνητική ροή του στάτη. Συνεχίζουμε, λοιπόν, με τον έλεγχο της ενεργού ισχύος.

Η ενεργός ισχύς που ανταλλάσσει η ΓΕΔΤ με το δίκτυο, συναρτήσσει της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, δίνεται από τον τύπο:

$$P = T_e \omega_r \quad (2.60)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας, σύμφωνα με την Εξ. (2.30), είναι:

$$T_e = \lambda_{d's} \cdot i_{q's} - \lambda_{q's} \cdot i_{d's} \quad (2.61)$$

Αντικαθιστώντας τις Εξ. (2.52), (2.53) στην τελευταία, προκύπτει:

$$T_e = -\lambda_s \cdot i_{d's} \quad (2.62)$$

Τέλος, με αντικατάσταση της (2.55) στην (2.62), προκύπτει:

$$T_e = \lambda_s \cdot i_{d'R} \quad (2.63)$$

Επομένως, θεωρώντας ότι το μέτρο της μαγνητικής ροής του στάτη λ_s παραμένει σταθερό, αφού επιβάλλεται από το δίκτυο (Εξ. (2.59)), εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας και άρα και η ενεργός ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο, μπορεί να ελεγχθεί από τη d -συνιστώσα του ρεύματος δρομέα $i_{d'R}$.

Όσον αφορά την άεργο ισχύ της γεννήτριας, με την υπόθεση ότι αυτή προέρχεται αποκλειστικά από το στάτη, δηλαδή υποθέτοντας ότι ο -από την πλευρά του δικτύου- μετατροπέας διαχειρίζεται μηδενική άεργο ισχύ, τότε με βάση την Εξ. (2.51) προκύπτει ότι:

$$Q = v_{q's} \cdot i_{d's} - v_{d's} \cdot i_{q's} \quad (2.64)$$

Με αντικατάσταση των (2.58), (2.59) στην Εξ. (2.64), προκύπτει:

$$Q = -\omega \cdot \lambda_s \cdot i_{q's} \quad (2.65)$$

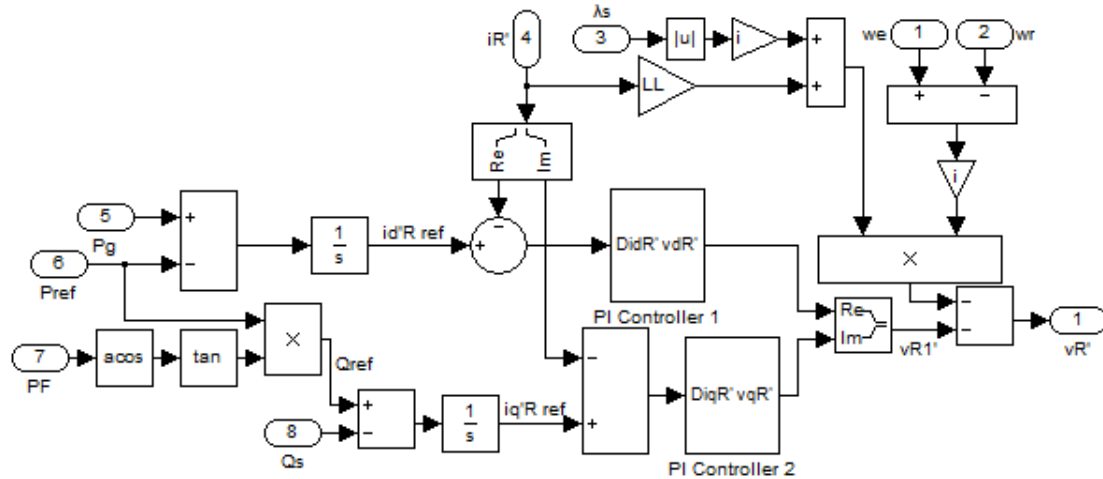
Από την παραπάνω σχέση, λαμβάνοντας υπόψη και την Εξ. (2.54), προκύπτει ότι:

$$Q = -\omega \cdot \frac{\lambda_s^2}{L_M} + \omega \cdot \lambda_s \cdot i_{q'R} = -\frac{v_{d's}^2}{\omega \cdot L_M} + v_{d's} \cdot i_{q'R} \quad (2.66)$$

Συνεπώς, αφού το μέτρο της μαγνητικής ροής του στάτη λ_s θεωρείται σταθερό ή ισοδύναμα η τάση του στάτη, αφού επιβάλλεται από το δίκτυο, τότε μπορούμε να πούμε ότι η άεργος ισχύς μπορεί να ελεγχθεί από την q -συνιστώσα του ρεύματος δρομέα $i_{q'R}$.

Έχουμε δείξει, λοιπόν, ότι μπορούμε να πετύχουμε αποσυζευγμένο έλεγχο ενεργού και άεργου ισχύος μέσω διανυσματικού ελέγχου. Η ρύθμιση της ισχύος γίνεται μέσω του ελέγχου των dq -συνιστωσών του ρεύματος δρομέα, όπως εξηγήθηκε παραπάνω.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το μοντέλο του συστήματος ελέγχου της ΓΕΔΤ.



Σχήμα 2-21: Μοντέλο συστήματος ελέγχου της ΓΕΔΤ

Αρχικά, η πραγματική τιμή της ενεργού ισχύος P_g της γεννήτριας συγκρίνεται με μία τιμή αναφοράς P_{ref} και το σφάλμα που δημιουργείται, μέσω ενός “αργού” ολοκληρωτικού ελεγκτή, μας δίνει το σήμα αναφοράς για τη d -συνιστώσα του ρεύματος δρομέα $i_{d'R ref}$. Αυτό το σήμα αναφοράς συγκρίνεται με τη σειρά του, με την πραγματική τιμή της d -συνιστώσας του ρεύματος δρομέα $i_{d'R}$ και η διαφορά που προκύπτει, καθορίζει τελικά μέσω ενός PI ελεγκτή τη d -συνιστώσα της τάσης του δρομέα.

Ο έλεγχος της αέργου ισχύος ακολουθεί την ίδια ακριβώς λογική με αυτήν του ελέγχου της ενεργού ισχύος, η οποία περιγράφηκε προηγουμένως. Διευκρινίζεται ότι η τιμή αναφοράς της αέργου ισχύος Q_{ref} προκύπτει από την τιμή αναφοράς της ενεργού ισχύος, με βάση το συντελεστή ισχύος PF . Δηλαδή, είναι:

$$Q_{ref} = P_{ref} \cdot \tan(\cos^{-1}(PF)) \quad (2.67)$$

Να σημειώσουμε ότι στις εξόδους των PI ελεγκτών δεν παίρνουμε απευθείας τις dq -συνιστώσες της τάσης του δρομέα. Για να προκύψει τελικά η τάση του δρομέα \widetilde{v}_R' από το διάνυσμα της τάσης στην έξοδο των PI ελεγκτών \widetilde{v}_{R1}' , θα πρέπει να προσθέσουμε τον όρο $-j(\omega - \omega_r)(j\lambda_s + L_L \widetilde{i}_R')$, όπως βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα. Αυτό συμβαίνει διότι ο όρος \widetilde{v}_{R1}' περιέχει μόνο τον έναν όρο της \widetilde{v}_R' και συγκεκριμένα αυτόν της πτώσης τάσης πάνω στην αντίσταση R_R , δηλαδή τον όρο $-R_R \widetilde{i}_R'$. Τώρα, αν από την Εξ. (2.45) αγνοήσουμε τα μεταβατικά φαινόμενα ($p\widetilde{\lambda}_R = 0$), προκύπτει:

$$\widetilde{v}_R' = -R_R \widetilde{i}_R' - j(\omega - \omega_r)\widetilde{\lambda}_R' \quad (2.68)$$

Η Εξ. (2.47) στο νέο πλαίσιο αναφοράς, λαμβάνοντας υπόψη και την Εξ. (2.53), γίνεται:

$$\widetilde{\lambda}_R' = j\lambda_s + L_L \widetilde{i}_R' \quad (2.69)$$

Αντικαθιστώντας την Εξ. (2.69) στην (2.68), προκύπτει:

$$\widetilde{v}_R' = -R_R \widetilde{i}_R' - j(\omega - \omega_r)(j\lambda_s + L_L \widetilde{i}_R') \quad (2.70)$$

Η Εξ. (2.70) εξηγεί την πρόσθεση του όρου που αναφέραμε παραπάνω.

Σημειώνεται ότι το ρεύμα δρομέα \widetilde{i}_R' , στο Σχήμα 2-21, έχει ήδη μετασχηματιστεί στο νέο πλαίσιο, ενώ η τάση δρομέα \widetilde{v}_R' που προκύπτει επαναφέρεται, στη συνέχεια, στο αρχικό πλαίσιο.

2.7 Θερμοστατικά Φορτία (*Thermostatically Controlled Loads*)

2.7.1 Γενικά

Τα θερμοστατικά φορτία (TCLs) εδώ και χρόνια αποτελούν αντικείμενο ενδιαφέροντος για τους ερευνητές των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Αυτού του είδους τα φορτία αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό ποσοστό του συνολικού φορτίου σε πολλά ΣΗΕ, διότι αφενός σχεδόν όλα τα φορτία θέρμανσης και ψύξης μικρής κλίμακας όπως ψυγεία, ηλεκτρικοί θερμαντήρες νερού, κλιματιστικά και αντλίες θερμότητας ελέγχονται από θερμοστάτες (με συνήθη έλεγχο θερμοκρασίας on – off) και αφετέρου πλήθος βιομηχανικών φορτίων όπως π.χ. οι βιομηχανικοί φούρνοι ελέγχονται από ελεγκτές θερμοκρασίας (κυρίως PID).

Τα θερμοστατικά φορτία λόγω της θερμικής τους αδράνειας επιτρέπουν την προσωρινή διακοπή ή μείωση της παρεχόμενης ισχύος με ελάχιστη ή και καθόλου μείωση της εξυπηρέτησης του χρήστη. Μπορούμε να ελέγξουμε την καταναλισκόμενη ισχύ των φορτίων αυτών διακόπτοντας και αποκαθιστώντας την τροφοδοσία (έλεγχος on – off) ή ρυθμίζοντας τη θερμοκρασία αναφοράς αυτών (έλεγχος PID και on – off). Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να εξασφαλίζεται η αναμενόμενη (ή σχεδόν η αναμενόμενη) εξυπηρέτηση του χρήστη. Επομένως, μπορούμε να ελέγξουμε ένα μεγάλο πληθυσμό από θερμοστατικά φορτία, έτσι ώστε η συνολική ισχύς αυτών να ακολουθεί ένα σήμα αναφοράς ή να ελαχιστοποιεί ένα κόστος. Για παράδειγμα, η συνολική ισχύς του πληθυσμού μπορεί να ακολουθεί μία επιθυμητή τροχιά, η οποία να βασίζεται στη διακύμανση της έγχυσης ισχύος από ΑΠΕ ή στη μεταβλητότητα της ζήτησης στο δίκτυο [57].

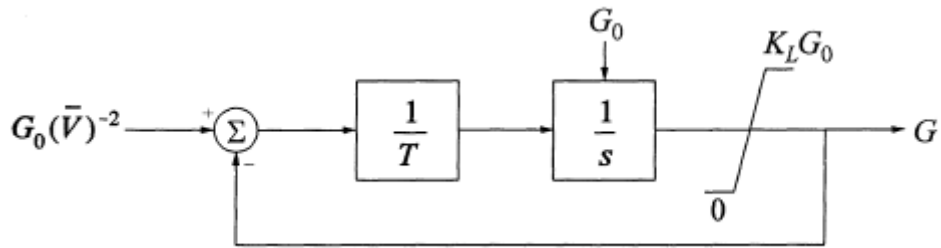
Ο έλεγχος της συνολικής απορροφούμενης ισχύος από ένα μεγάλο πληθυσμό από TCLs μπορεί να προσφέρει στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας πολλά οφέλη. Μία σημαντική αλλαγή στο δίκτυο είναι η αύξηση της έγχυσης ισχύος από ΑΠΕ, όπως αιολικά και φωτοβολταϊκά, των οποίων η ακριβής έγχυση στο δίκτυο είναι δύσκολο

να προβλεφθεί. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ανάγκη για αυξημένες απαιτήσεις επικουρικών υπηρεσιών [58], [59], όπως εφεδρεία ρύθμισης συχνότητας, η οποία σήμερα παρέχεται κυρίως από συμβατική παραγωγή. Με την υποδομή των επικοινωνιών και των αισθητήρων των ευφυών δικτύων (smart grids), ο πληθυσμός των TCLs έχει τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών ρύθμισης συχνότητας [60]. Υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα στη χρήση των TCLs για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών αυτού του είδους [61]. Πρώτον, ένα μέρος των αναγκών για επικουρικές υπηρεσίες μπορεί να παρασχεθεί τοπικά, γεγονός το οποίο μειώνει την ανάγκη για επιπρόσθετη χωρητικότητα ισχύος στις γραμμές μεταφοράς. Δεύτερον, χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο πληθυσμό από TCLs, μπορούμε να βελτιώσουμε την αξιοπιστία, αφού ακόμη και αν λίγα από αυτά αποτύχουν να προσφέρουν την απαιτούμενη επικουρική υπηρεσία, το αρνητικό αποτέλεσμα στο σύνολο θα είναι μικρό. Τρίτον, τα θερμοστατικά φορτία αποτελούν αρκετά σημαντικό κομμάτι του συνολικού φορτίου [62].

Με τον όρο της ενσωμάτωσης ομάδων TCLs στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, εννοούμε τη δυνατότητα παροχής επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο από αυτούς τους πληθυσμούς. Κατά την ενσωμάτωση αυτή, εμφανίζονται αρκετές προκλήσεις σχετικά με τη μοντελοποίηση, τον έλεγχο και την επικοινωνία που θα πρέπει να αναφερθούν. Πρώτον, παρότι υπάρχουν ακριβή μοντέλα για το TCL (τη μονάδα), η ανάπτυξη ενός ακριβούς και υπολογιστικά προσιτού μοντέλου για έναν πληθυσμό από TCLs δεν είναι εύκολη υπόθεση. Στη συνέχεια, στρατηγικές ελέγχου πρέπει να αναπτυχθούν ώστε ο συνολικός πληθυσμός να ακολουθεί ένα επιθυμητό σήμα ισχύος με την απαιτούμενη ακρίβεια ή να μπορεί να ελαχιστοποιεί μία συνάρτηση κόστους. Ο έλεγχος πρέπει να μην είναι ευαίσθητος σε αβεβαιότητες στο μοντέλο και σε εξωγενείς εισόδους, όπως ο καιρός, η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη της παραγωγής ισχύος από ΑΠΕ και η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας. Αφού ένας aggregator (στην εργασία μας το ρόλο αυτό παίζει ο Εικονικός Σταθμός Παραγωγής) θα διεξάγει την εκτίμηση και τον έλεγχο ενός πληθυσμού από TCLs, θα πρέπει να υπάρχει επικοινωνία μεταξύ κάθε μονάδας TCL και του aggregator. Ο σχεδιασμός μίας τέτοιας υποδομής για την επικοινωνία μεταξύ διαχειριστή φορτίου και φορτίου και ο συμβιβασμός μεταξύ του κόστους της και της ακρίβειας της εκτίμησης και του ελέγχου αυτής είναι αντικείμενο έρευνας [63].

2.7.2 Μοντελοποίηση Θερμοστατικών Φορτίων (TCLs) [47]

Το παρακάτω σχήμα δείχνει ένα απλό μοντέλο ενός πληθυσμού από TCLs. Σε αυτό το μοντέλο, G είναι η αγωγιμότητα του φορτίου, G_0 είναι η αρχική τιμή του G , $K_L G_0$ είναι η μέγιστη τιμή του G , η οποία αντιπροσωπεύει τη συνθήκη, στην οποία όλα τα φορτία είναι ενεργοποιημένα και T είναι μία σταθερά χρόνου. Να σημειωθεί επίσης ότι $\bar{V} = V/V_0$, όπου V είναι το μέτρο της τάσης του ζυγού και V_0 είναι η αντίστοιχη αρχική τιμή.



Σχήμα 2-22: Ένα απλό μοντέλο για θερμοστατικά φορτία [47]

Ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο για TCLs, το οποίο και χρησιμοποιούμε για την παράσταση αυτών των φορτίων στην εργασία μας, φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Η βάση για τη μοντελοποίηση αυτού του είδους των φορτίων φαίνεται παρακάτω:

Η διαφορική εξίσωση μίας συσκευής θέρμανσης μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$K \frac{d\tau_H}{dt} = P_H - P_L \quad (2.71)$$

όπου

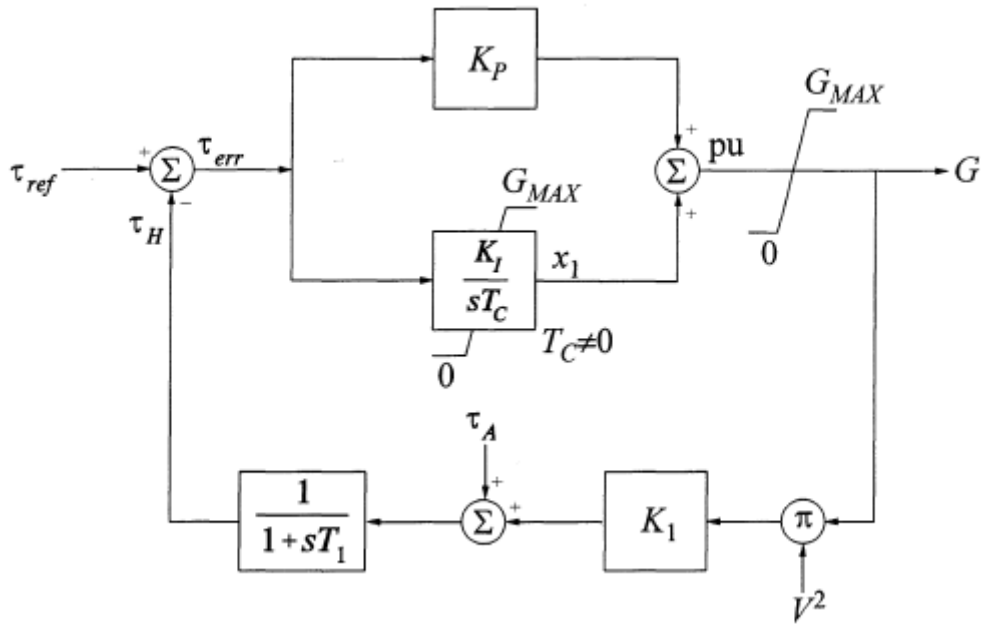
τ_H = θερμοκρασία του θερμαινόμενου χώρου

τ_A = θερμοκρασία περιβάλλοντος

P_H = παρεχόμενη ισχύς από τη συσκευή θέρμανσης = $K_H G V^2$

P_L = απώλειες θερμότητας = $K_A(\tau_H - \tau_A)$

G = αγωγιμότητα φορτίου



Σχήμα 2-23: Ένα ρεαλιστικό μοντέλο για θερμοστατικά φορτία [47]

όπου

K_P = κέρδος αναλογικού ελεγκτή

K_I = κέρδος ολοκληρωτικού ελεγκτή

T_C = σταθερά χρόνου του ολοκληρωτικού ελεγκτή

τ_{ref} = θερμοκρασία αναφοράς

τ_A = θερμοκρασία περιβάλλοντος

T_I = σταθερά χρόνου του φορτίου

K_I = κέρδος που σχετίζεται με το μοντέλο του φορτίου

G_0 = αρχική τιμή του G

G_{MAX} = μέγιστη τιμή του G

Αντικαθιστώντας τις εκφράσεις των P_H και P_L στην Εξ. (2.71), προκύπτει:

$$K \frac{d\tau_H}{dt} = K_H G V^2 - K_A (\tau_H - \tau_A) \quad (2.72)$$

Αναδιατάσσοντας, έχουμε

$$\frac{d\tau_H}{dt} = \frac{K_H}{K} G V^2 + \frac{K_A}{K} \tau_A - \frac{K_A}{K} \tau_H$$

ή

$$\frac{d\tau_H}{dt} = \frac{K_1}{T_1} GV^2 + \frac{1}{T_1} \tau_A - \frac{1}{T_1} \tau_H \quad (2.73)$$

όπου

$$T_1 = \frac{K}{K_A}$$

και

$$K_1 = \frac{K_H}{K_A}.$$

Η θερμοκρασία τ_H συγκρίνεται με τη θερμοκρασία αναφοράς και το σφάλμα που προκύπτει ελέγχει την αγωγιμότητα του φορτίου μέσω ενός αναλογικού – ολοκληρωτικού ελεγκτή.

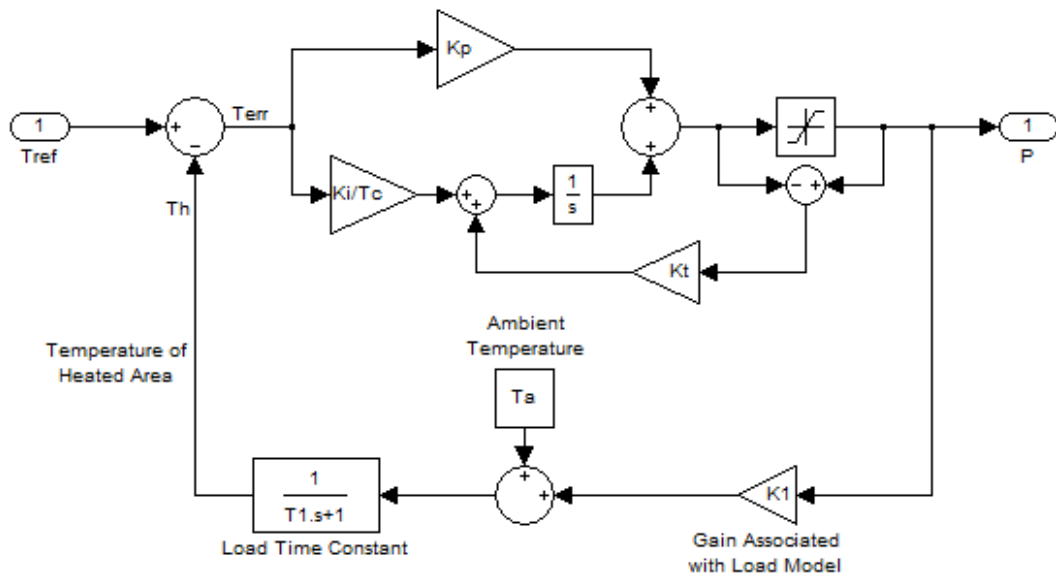
Από το Σχήμα 2-23, σε συνθήκες προ-διαταραχής η θερμοκρασία του θερμαινόμενου χώρου ισούται με τη θερμοκρασία αναφοράς. Συνεπώς,

$$\tau_{ref} = K_1 V_0^2 G_0 + \tau_A$$

ή

$$K_1 = \frac{\tau_{ref} - \tau_A}{V_0^2 G_0} \quad (2.74)$$

Στην εργασία μας δε λαμβάνουμε υπόψη μας τις μεταβολές της τάσης, καθώς ασχολούμαστε αποκλειστικά με ρύθμιση συχνότητας. Θεωρούμε, δηλαδή, σταθερή ονομαστική τάση στο φορτίο. Το τελικό μας μοντέλο για τα TCLs φαίνεται στο Σχήμα 2-24, στο οποίο έχουμε κάνει μία προσθήκη την οποία θα εξηγήσουμε στη συνέχεια:



Σχήμα 2-24: Τελικό μοντέλο για θερμοστατικά φορτία

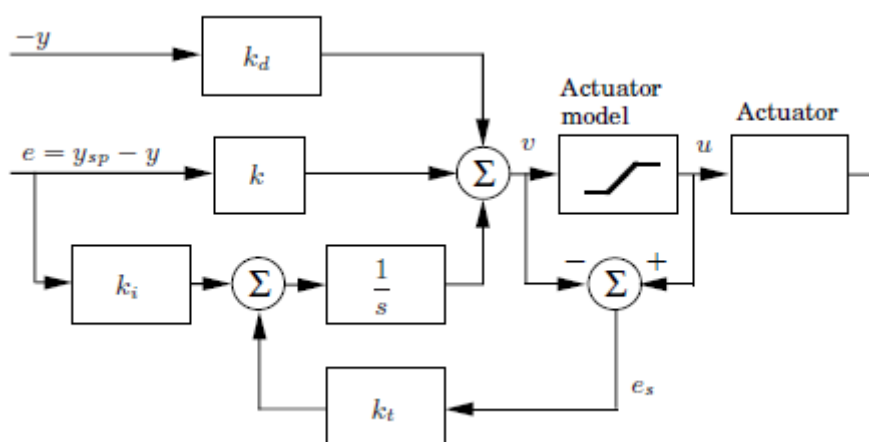
Όπως βλέπουμε και στο παραπάνω σχήμα, η προσθήκη είναι το *anti-windup* στον ελεγκτή, το οποίο αναλύουμε αμέσως παρακάτω:

2.7.2.1 Integrator Windup [64]

Πολλές πτυχές ενός συστήματος ελέγχου μπορούν να γίνουν κατανοητές μέσω γραμμικών μοντέλων. Υπάρχουν, ωστόσο, κάποια μη γραμμικά φαινόμενα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αυτά είναι κατά κανόνα περιορισμοί σε μηχανισμούς: ένας κινητήρας έχει περιορισμένη ταχύτητα, μία βαλβίδα, δικλίδα, θυρίδα δεν μπορεί να είναι περισσότερο από πλήρως ανοιχτή ή λιγότερο από τελείως κλειστή, κτλ. Σε ένα σύστημα, το οποίο λειτουργεί σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών, μπορεί κάποια μεταβλητή ελέγχου να φτάσει στα όρια του μηχανισμού της. Όταν συμβεί αυτό, ο βρόχος ανάδρασης σπάει και το σύστημα λειτουργεί σε ανοιχτό βρόχο, διότι ο μηχανισμός θα παραμείνει στο όριο του ανεξαρτήτως από την έξοδο της διαδικασίας, για όσο ο μηχανισμός παραμένει κορεσμένος. Ο ολοκληρωτικός όρος θα συσσωρεύει το σφάλμα, μέχρις ότου αυτό μηδενιστεί. Ο ολοκληρωτικός όρος και η έξοδος του ελεγκτή μπορεί τότε να έχουν πάρει πολύ μεγάλη τιμή. Το σήμα ελέγχου, σε αυτή την περίπτωση, θα παραμείνει κορεσμένο ακόμα και όταν το σφάλμα αλλάξει πρόσημο και μπορεί να πάρει αρκετό χρόνο μέχρις ότου ο ολοκληρωτής και η έξοδος του ελεγκτή να έρθουν στην περιοχή που είναι εντός των ορίων της μεταβλητής ελέγχου. Το αποτέλεσμα είναι ότι έχουμε μεταβατικά φαινόμενα μεγάλης διάρκειας. Αυτή η κατάσταση είναι γνωστή ως *integrator windup*.

2.7.2.2 Αντιμετώπιση του Windup [64]

Υπάρχουν πολλοί τρόποι να αποφύγουμε το *windup*. Μία μέθοδος φαίνεται στο Σχήμα 2-25: το σύστημα έχει μία επιπλέον ανάδραση στην είσοδο του ολοκληρωτή, στον οποίο τροφοδοτείται, μέσω ενός κέρδους k_t , το σφάλμα (e_s), που σχηματίζεται από τη διαφορά ανάμεσα στην έξοδο του ελεγκτή (v) και την έξοδο του μηχανισμού (u). Το σήμα e_s είναι μηδέν όταν δεν υπάρχει κορεσμός και σε αυτήν την περίπτωση ο επιπλέον βρόχος ανάδρασης δεν έχει επίδραση στο σύστημα. Όταν ο μηχανισμός φτάσει στο όριό του, το σήμα e_s τροφοδοτείται στον ολοκληρωτικό όρο με τέτοιο τρόπο, ώστε αυτό να μηδενιστεί. Αυτό συνεπάγεται ότι η έξοδος του ελεγκτή διατηρείται κοντά στο όριο κορεσμού. Η έξοδος του ελεγκτή, σε αυτή την περίπτωση, θα αλλάξει, όταν το σφάλμα αλλάξει πρόσημο και το *windup* αποφεύγεται.



Σχήμα 2-25: PID ελεγκτής με anti-windup [64]

Οι τιμές των παραμέτρων για το θερμοστατικό φορτίο δίνονται στην υποενότητα **Θερμοστατικό φορτίο** της ενότητας 4.3.

3

Συμμετοχή του φορτίου Εικονικού Σταθμού Παραγωγής στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου συχνότητας

3.1 Εικονικός Σταθμός Παραγωγής (ΕΙΣΠ)

3.1.1 Η πρόκληση για τα μελλοντικά ΣΗΕ

Η έως τώρα φιλοσοφία εγκατάστασης της ΔΠ ήταν προσανατολισμένη στη σύνδεση παρά στην ενσωμάτωση της ΔΠ στο δίκτυο. Γενικά, η εγκατάσταση της ΔΠ γινόταν με μία προσέγγιση “fit and forget”, η οποία βασιζόταν σε ένα παλαιού τύπου, παθητικό δίκτυο διανομής. Υπό το καθεστώς αυτό, οι μονάδες ΔΠ δεν είναι “ορατές” στο σύστημα. Έτσι, ενώ μπορούν να αντικαταστήσουν την ενέργεια που παράγεται από κεντρική παραγωγή, δεν μπορούν να αντικαταστήσουν την εγκατεστημένη ισχύ αυτής. Χωρίς ενεργό διαχείριση ή κατάλληλη αναπαράσταση στο σύστημα, οι μονάδες ΔΠ, καθότι γενικά είναι μικρής ισχύος (από μερικά kW έως μερικά MW), δεν είναι σε θέση να παράσχουν επικουρικές υπηρεσίες και να στηρίξουν το σύστημα. Έτσι, η εγκατεστημένη ισχύς της κεντρικής παραγωγής πρέπει να διατηρηθεί για την παροχή των υπηρεσιών αυτών στο σύστημα [65].

Με όλο και μεγαλύτερη πίεση για την αύξηση της διείσδυσης της ΔΠ, αυτή η παθητική προσέγγιση θα οδηγήσει σε αύξηση του κόστους επενδύσεων και λειτουργίας του συστήματος και τελικά θα έχει αρνητική επίδραση στο ρυθμό εγκατάστασης νέων μονάδων ΔΠ. Έχει προταθεί, [65], [66], [67] τα τελευταία χρόνια, ένας εναλλακτικός τρόπος, όπου οι μονάδες ΔΠ (συμπεριλαμβανομένων ελεγχόμενων και μη φορτίων) ενσωματώνονται σε ελεγχόμενους Εικονικούς

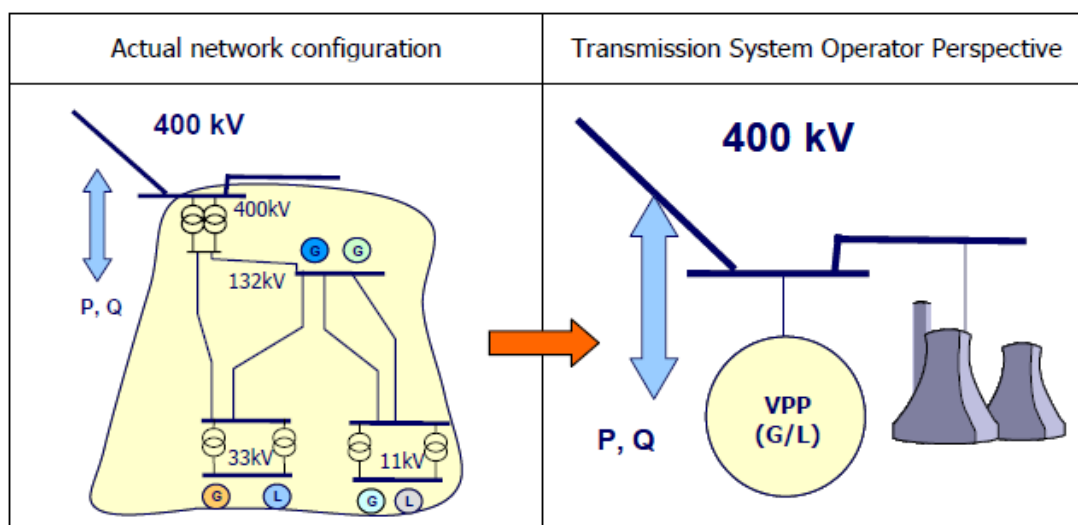
Σταθμούς Παραγωγής. Με τη δημιουργία αυτών των σταθμών, οι ομάδες μονάδων ΔΠ και φορτίων θα μπορούν να εμφανίζονται στο σύστημα και τις αγορές ως ενιαίες οντότητες και να έχουν επίδραση όμοια με αυτή των συμβατικών σταθμών που συνδέονται στο σύστημα μεταφοράς.

Μέσω της ιδέας του ΕισΠ [65]:

- Οι μονάδες ΔΠ μπορούν να αποκτήσουν πρόσβαση στις αγορές ενέργειας και να επωφεληθούν από τη διαχείριση του ΕισΠ και να μεγιστοποιήσουν τις ευκαιρίες εσόδων τους.
- Η λειτουργία του συστήματος μπορεί να επωφεληθεί από τη βέλτιστη χρήση όλης της διαθέσιμης εγκατεστημένης ισχύος και της αυξημένης λειτουργικής αποδοτικότητας.

3.1.2 Η ιδέα του Εικονικού Σταθμού Παραγωγής [65]

Στο Σχήμα 3-1, βλέπουμε έναν εικονικό σταθμό παραγωγής δίπλα σε ένα συμβατικό σταθμό παραγωγής που συνδέεται στο σύστημα μεταφοράς, από όπου φαίνεται ότι ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς “βλέπει” τον ΕισΠ και το συμβατικό σταθμό με τον ίδιο τρόπο.



Σχήμα 3-1: Σχηματισμός ΕισΠ από ομάδα μονάδων ΔΠ [65]

Ένας συμβατικός σταθμός που συνδέεται στο σύστημα μεταφοράς έχει ένα λειτουργικό προφίλ, το οποίο αποτελείται από τα χαρακτηριστικά της μονάδας. Κάποια από αυτά είναι: το πρόγραμμα παραγωγής, τα όρια της παραγωγής και τα χαρακτηριστικά του κόστους λειτουργίας. Βάσει αυτού του προφίλ, μία μονάδα παραγωγής μπορεί να αλληλεπιδράσει άμεσα με τους υπόλοιπους συμμετέχοντες στην αγορά, για να παράσχει υπηρεσίες και να συνάψει συμβόλαια. Μέσω άμεσης

επικοινωνίας με το διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς ή μέσω συναλλαγών στην αγορά, ένας συμβατικός σταθμός που συνδέεται στο σύστημα μεταφοράς μπορεί να συνεισφέρει στο σύστημα. Η παραγόμενη ενέργεια και οι επικουρικές υπηρεσίες μπορούν να πωληθούν, μέσω συναλλαγών, στη χονδρική αγορά ή με απευθείας επαφή με παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας.

Όταν οι μονάδες ΔΠ λειτουργούν μόνες τους, συνήθως δεν έχουν την απαιτούμενη ισχύ, ελεγχιμότητα και ευελιξία, ώστε να μπορούν να προσφέρουν επικουρικές υπηρεσίες στο σύστημα και να συμμετέχουν στις αγορές. Αυτό μπορεί να συμβαίνει τόσο από τεχνικής πλευράς, όσο και από πλευράς οικονομικού συμφέροντος. Ωστόσο, με το σχηματισμό ενός ΕιΣΠ από διάφορες μονάδες ΔΠ, τα θέματα αυτά αντιμετωπίζονται.

Ο Εικονικός Σταθμός Παραγωγής είναι μία ευέλικτη αναπαράσταση μίας ομάδας μονάδων ΔΠ. Ο ΕιΣΠ δε συναθροίζει μόνο την εγκατεστημένη ισχύ των διάφορων μονάδων ΔΠ, αλλά επίσης δημιουργεί ένα ενιαίο λειτουργικό προφίλ από τη σύνθεση των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την κάθε μονάδα ΔΠ και ενσωματώνει χωρικούς (δηλ. του δικτύου) περιορισμούς στην περιγραφή των δυνατοτήτων του συνδυασμού των μονάδων ΔΠ [65].

Ο ΕιΣΠ χαρακτηρίζεται από παραμέτρους που συνήθως σχετίζονται με ένα συμβατικό σταθμό παραγωγής, όπως προγραμματισμένη έξοδος μονάδας, ρυθμοί μεταβολής εξόδου, δυνατότητα ρύθμισης τάσης, εφεδρεία κτλ. Επιπλέον, καθώς ο ΕιΣΠ ενσωματώνει ελεγχόμενα φορτία, ως εκ τούτου παράμετροι όπως η ελαστικότητα της τιμής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και στρατηγικές ανάκτησης φορτίου θα χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό του ΕιΣΠ. Ο Πίνακας 3-1 αναφέρει μερικά παραδείγματα παραμέτρων πηγών και ελεγχόμενων φορτίων, οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν για ολόκληρη την ομάδα των μονάδων ΔΠ και ελεγχόμενων φορτίων και να χρησιμοποιηθούν για να χαρακτηρίσουν τον ΕιΣΠ.

Δεδομένου ότι ο ΕιΣΠ θα συγκροτείται από έναν αριθμό μονάδων ΔΠ από διάφορες τεχνολογίες με διαφορετικές μεθόδους ελέγχου, τα χαρακτηριστικά του ΕιΣΠ μπορεί να διαφέρουν σημαντικά στο χρόνο. Επίσης, καθώς οι μονάδες ΔΠ που ανήκουν στον ΕιΣΠ συνδέονται σε διάφορα σημεία σε ένα δίκτυο διανομής, τα χαρακτηριστικά του δικτύου (τοπολογία δικτύου, αντιστάσεις και αντιδράσεις, απώλειες και περιορισμοί) παίζουν ρόλο στο συνολικό χαρακτηρισμό του ΕιΣΠ.

Παράμετροι γεννητριών	Παράμετροι ελεγχόμενων φορτίων
<ul style="list-style-type: none"> • Πρόγραμμα παραγωγής • Όρια παραγόμενης ισχύος • Εγκατεστημένη ισχύς έκτακτης ανάγκης • Ικανότητα ενεργού και αέργου φόρτισης της γεννήτριας • Ρυθμοί μεταβολής της εξόδου • Χαρακτηριστική φορτίου – συχνότητας • Ικανότητα ρύθμισης τάσης • Επίπεδα σφαλμάτων • Δυνατότητα αδιάλειπτης λειτουργίας σε σφάλμα • Χαρακτηριστικά του καυσίμου • Απόδοση • Χαρακτηριστικά κόστους λειτουργίας 	<ul style="list-style-type: none"> • Προγραμματισμός παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στο φορτίο • Ελαστικότητα του φορτίου στις τιμές που διαμορφώνονται στις αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών • Ελάχιστο και μέγιστο φορτίο που μπορεί να επαναπρογραμματιστεί • Σχέδιο ανάκτησης φορτίου

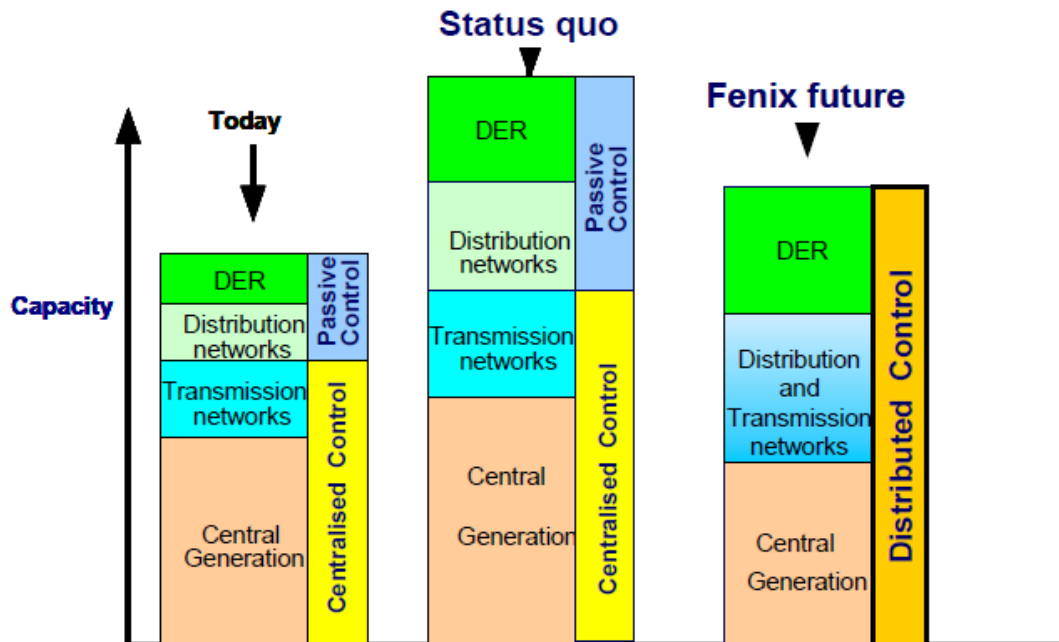
Πίνακας 3-1: Παραδείγματα παραμέτρων γεννητριών και ελεγχόμενων φορτίων με συνδυασμό των οποίων χαρακτηρίζεται ένας ΕιΣΠ [65]

Όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως, τα μειονεκτήματα των μεμονωμένων μονάδων ΔΠ αντιμετωπίζονται με τη δημιουργία εικονικών σταθμών παραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο, οι ΕιΣΠ, όπως και οι κλασικές μονάδες που συνδέονται στο σύστημα μεταφοράς, μπορούν να συμμετάσχουν στις διάφορες αγορές ενέργειας (π.χ. προθεσμιακές αγορές και χρηματιστήριο ενέργειας). Επίσης, είναι σε θέση να παράσχουν επικουρικές υπηρεσίες στο σύστημα μεταφοράς (π.χ. ρύθμιση συχνότητας, ρύθμιση τάσης κτλ) και να στηρίζουν με αυτόν τον τρόπο τη λειτουργία του συστήματος. Εκτός της δυνατότητας στήριξης του συστήματος μεταφοράς, οι ΕιΣΠ μπορούν να συμβάλλουν και στην ενεργό διαχείριση των δικτύων διανομής. Στο ερευνητικό πρόγραμμα FENIX, οι δραστηριότητες της συμμετοχής στην αγορά και της παροχής υπηρεσιών στήριξης στο σύστημα περιγράφονται αντίστοιχα σαν “εμπορικές” και “τεχνικές” δραστηριότητες, από τις οποίες απορρέουν οι ρόλοι του Εμπορικού ΕιΣΠ και του Τεχνικού ΕιΣΠ.

3.1.3 Το μέλλον στα ΣΗΕ και η προοπτική των ΕιΣΠ [65]

Στην παρούσα φάση, αρκετά ΣΗΕ στην Ευρώπη έχουν αρχίσει να αντιλαμβάνονται την ιδέα του εμπορικού ΕιΣΠ. Χαμηλό είναι το επίπεδο των μονάδων ΔΠ που έχουν ενσωματωθεί σε αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ υπάρχουν και διάφορα παραδείγματα ανάπτυξης ρόλων ΕιΣΠ με σκοπό την εμπορική ενοποίηση για τη συμμετοχή στη χονδρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και στην αγορά προγραμματισμένων επικουρικών υπηρεσιών.

Καθώς η διείσδυση της ΔΠ αυξάνει, το ερευνητικό πρόγραμμα FENIX προτείνει ότι οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να ξεκινήσουν τη μετάβαση προς μία ενοποιητική προσέγγιση που να εμπεριέχει την τεχνική δραστηριότητα του ΕιΣΠ. Συγκεκριμένα, προτείνει την πλήρη ενσωμάτωση των μονάδων ΔΠ στο σύστημα, καθώς επίσης και τη συμμετοχή αυτών στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 3-2: Σχηματική αναπαράσταση του σημερινού συστήματος και δύο πιθανά σενάρια μελλοντικής ανάπτυξης [65]

Το Σχήμα 3-2 δείχνει μία σχηματική αναπαράσταση του μεγέθους της ΔΠ, των δικτύων διανομής και μεταφοράς, καθώς επίσης και της κεντρικής (συμβατικής) παραγωγής του σημερινού συστήματος και δύο πιθανές αναπτύξεις με αυξημένη διείσδυση μονάδων ΔΠ. Το μέλλον “status quo” αναπαριστά ανάπτυξη του συστήματος με τον παραδοσιακό τρόπο λειτουργίας, που χαρακτηρίζεται από κεντρικό έλεγχο και παθητικά δίκτυα διανομής, όπως είναι -κατά κύριο λόγο- η κατάσταση σήμερα. Το εναλλακτικό μέλλον (κατά FENIX) αναπαριστά τη ΔΠ και την ελεγχόμενη ζήτηση πλήρως ενσωματωμένες στη λειτουργία του συστήματος, το οποίο ελέγχεται αποκεντρωμένα, εμπεριέχοντας την εμπορική και την τεχνική δραστηριότητα του ΕιΣΠ.

Στο μέλλον με το ισχύον καθεστώς, είναι εμφανές ότι χωρίς τεχνική ενσωμάτωση της ΔΠ στο σύστημα, η μεγάλη διείσδυση της ΔΠ θα εκτοπίσει ενέργεια παραγόμενη από συμβατικούς σταθμούς, αλλά η συμβατική παραγωγή θα συνεχίσει να χρειάζεται για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο σύστημα, οι οποίες είναι απαραίτητες για την ομαλή και ασφαλή λειτουργία του συστήματος. Επιπλέον, δεδομένου ότι ένα σημαντικό ποσοστό μονάδων ΔΠ αναμένεται να συνδεθεί στα δίκτυα διανομής, συνεχίζοντας την παραδοσιακή παθητική λειτουργία αυτών των δικτύων και

διατηρώντας κεντρικό έλεγχο, θα δημιουργηθεί η ανάγκη για αύξηση της χωρητικότητας ισχύος των δικτύων μεταφοράς και διανομής. Το γεγονός αυτό θα αυξήσει με τη σειρά του το συνολικό κόστος του συστήματος και θα μειώσει την αποδοτικότητα χρησιμοποίησης αυτού.

Από την άλλη πλευρά, ενσωματώνοντας πλήρως τη ΔΠ και την ελεγχόμενη ζήτηση στη λειτουργία του δικτύου, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του ΕιΣΠ, η ΔΠ και τα ελεγχόμενα φορτία θα πάρουν την ευθύνη της παροχής επικουρικών υπηρεσιών στο σύστημα, αναλαμβάνοντας το ρόλο της κεντρικής παραγωγής. Στην περίπτωση αυτή, η ΔΠ θα μπορέσει να εκτοπίσει, όχι μόνο, την παραγόμενη ενέργεια από κεντρική παραγωγή, αλλά και την εγκατεστημένη ισχύ αυτής, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-2. Για να επιτευχθεί αυτό, η φιλοσοφία λειτουργίας των δικτύων διανομής θα πρέπει να αλλάξει από παθητική σε ενεργά ελεγχόμενη, γεγονός που απαιτεί τη μετάβαση από την παραδοσιακή φιλοσοφία του κεντρικού ελέγχου σε ένα νέο σχήμα αποκεντρωμένου ελέγχου, εμπεριέχοντας σημαντική συνεισφορά από την πλευρά της ζήτησης, η οποία είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της δυνατότητας ελέγχου του συστήματος.

Αυτή η μετάβαση προς την πλήρη ενσωμάτωση της ΔΠ, μέσω της εμπορικής και τεχνικής δραστηριότητας των ΕιΣΠ, θα επιφέρει:

- 1) αύξηση στην πολυπλοκότητα του συστήματος και
- 2) αύξηση στην αξία του συστήματος.

Η διαχείριση του συστήματος θα γίνει πιο πολύπλοκη, καθώς πραγματοποιείται η μετάβαση προς ενεργά δίκτυα και θεσπίζονται ρυθμιστικά πλαίσια για να επιτρέψουν την ενοποιημένη αναπαράσταση των μονάδων ΔΠ και τη συμμετοχή τους στη λειτουργία του συστήματος. Οι αγορές ενέργειας και η αλληλεπίδραση με τους συμμετέχοντες στην αγορά θα γίνουν επίσης πιο πολύπλοκες, καθώς τα σχετικά ρυθμιστικά πλαίσια, οι συμφωνίες και οι απαιτήσεις μετρήσεων και τιμολόγησης, σε ολόκληρο το σύστημα, προσαρμόζονται στην ενοποιημένη αναπαράσταση των μονάδων ΔΠ και οι αγορές θα πρέπει να χειριστούν μία δραματική αύξηση στον όγκο των συναλλαγών.

Ωστόσο, αυτή η αναγκαία αύξηση της πολυπλοκότητας του συστήματος για τη διαχείριση μεγάλου πλήθους μονάδων ΔΠ μικρής κλίμακας, θα προωθήσει την αξιοποίηση των πραγματικών δυνατοτήτων της ΔΠ στο σύστημα. Επιπλέον, θα βελτιώσει την πρόσβαση των μονάδων ΔΠ στις αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών, βελτιστοποιώντας τη χρησιμοποίηση του συστήματος και την αποδοτικότητα λειτουργίας.

3.2 Αυτορρύθμιση φορτίου [4]

Το συνολικό φορτίο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της επαγωγικής συνιστώσας του (κινητήρες επαγωγής) εξαρτάται από τη συχνότητα, αυξάνοντας όταν αυξάνει αυτή και αντίστροφα. Η εξάρτηση αυτή εκφράζεται από την ευαισθησία του φορτίου ως προς τη συχνότητα ($k_{pf} = \partial P / \partial f$). Τιμές για την ευαισθησία που παρουσιάζουν τα διάφορα φορτία ως προς τη συχνότητα, δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

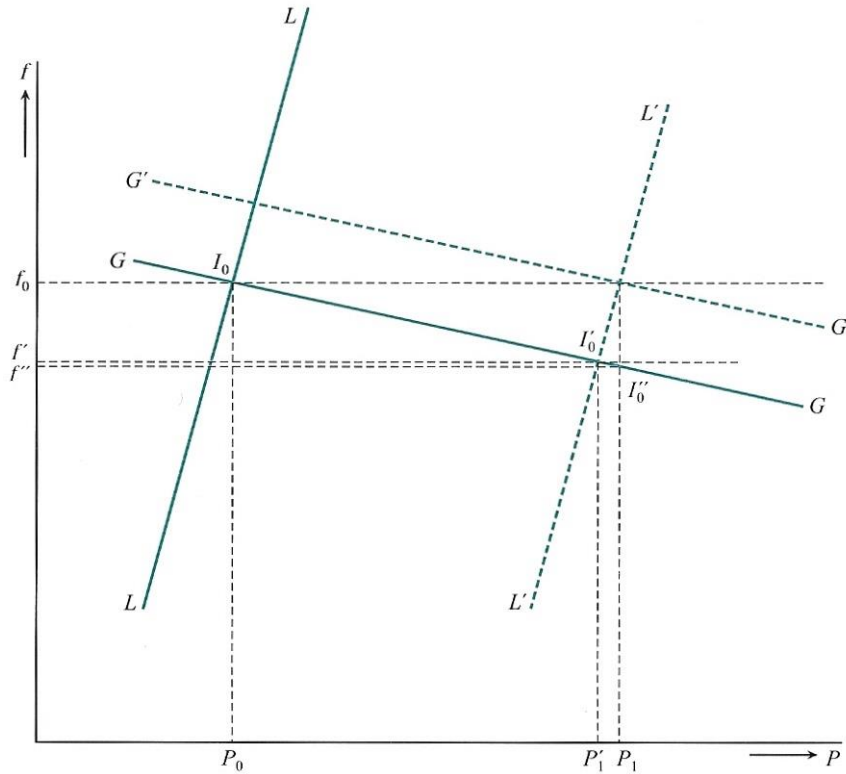
Φορτίο	$\partial P / \partial f$
Κλιματισμός	
κεντρικός (3Φ)	0,98
κεντρικός (1Φ)	0,90
τύπου παραθύρου	0,56
Θερμαντήρας νερού, θερμοσίφωνα	0
Ηλεκτρική κουζίνα, φούρνος, φριτέζα	0
Πλυντήριο πιάτων	0
Πλυντήριο ρούχων	3,0
Στεγνωτήριο ρούχων	0
Ψυγείο	0,53
Τηλεόραση	0
Λαμπτήρες πυρακτώσεως	0
Λαμπτήρες φθορισμού	1,0
Βιομηχανικοί κινητήρες	2,5
Ανεμιστήρες	2,9
Γεωργικές αντλίες	5,0
Φούρνος ηλεκτρικού τόξου	-1,0
Μετασχηματιστής (χωρίς φορτίο)	0

Πίνακας 3-2: Ευαισθησία διάφορων τύπων φορτίων ως προς τη συχνότητα [47]

Αυτή η εξάρτηση προσθέτει μια συνιστώσα αυτορρύθμισης στο σύστημα, δεδομένου ότι όταν αυξάνει το φορτίο, η μείωση της συχνότητας συνεπάγεται μια αντίστοιχη ελάττωση του φορτίου, μειώνοντας συνεπώς την ανάγκη για πρόσθετη παραγωγή.

Η εξάρτηση του φορτίου από τη συχνότητα παριστάνεται από μια αντίστοιχη χαρακτηριστική η οποία στο διάγραμμα φορτίου – συχνότητας είναι ευθεία με θετική κλίση (LL και $L'L'$, Σχήμα 3-3). Η επίδραση των χαρακτηριστικών αυτορρυθμίσεως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 3-3, ως εξής: οι αρχικές συνθήκες φορτίου και συχνότητας καθορίζονται από την τομή I_o των χαρακτηριστικών GG και LL (P_o, f_o). Έστω ότι γίνεται μία βηματική αύξηση του φορτίου σε P_1 , οπότε αυτό έχει πλέον χαρακτηριστική την $L'L'$. Η αύξηση αυτή του φορτίου θα προκαλούσε μείωση της

συχνότητας σε f'' , εάν δεν υπήρχε αυτορρύθμιση. Λόγω όμως της μείωσης της συχνότητας μειώνεται το φορτίο σε P'_1 (μικρότερο του P_1), που καθορίζεται από την τομή των $L'L'$ και GG' , οπότε η συχνότητα ισορροπεί στην τιμή f' , η οποία είναι μεγαλύτερη της f'' . Εδώ τελειώνει η πρωτεύουσα ρύθμιση με σαφή την ευνοϊκή επίδραση του φορτίου στη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας του συστήματος.



Σχήμα 3-3: Επίδραση φορτίου στη ρύθμιση συχνότητας [4]
 $GG, G'G'$: Χαρακτηριστικές φορτίου – συχνότητας γεννήτριας
 $LL, L'L'$: Χαρακτηριστικές αυτορρυθμίσεως φορτίου

Η επαναφορά της συχνότητας γίνεται πάλι με τη δευτερεύουσα ρύθμιση, με την οποία η χαρακτηριστική της γεννήτριας μετατοπίζεται στη θέση $G'G'$, οπότε η συχνότητα αποκτά την κανονική της τιμή f_0 και το φορτίο γίνεται P_1 (Σχήμα 3-3).

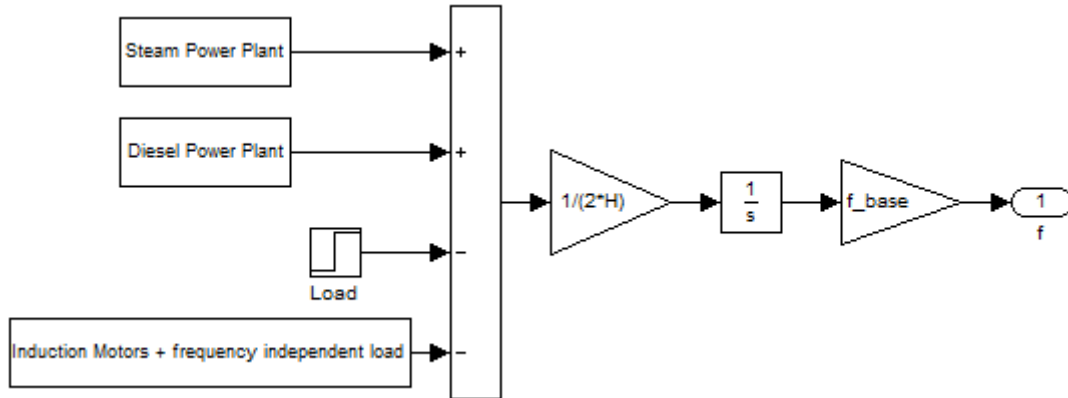
Στη σχετική ανάλυση, η αυτορρύθμιση εκφράζεται με το *συντελεστή αυτορρυθμίσεως φορτίου* D , ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$D = \frac{\Delta P}{\Delta \omega} \quad (3.1)$$

όπου ΔP και $\Delta \omega$ είναι οι ανά μονάδα μεταβολές του φορτίου και της συχνότητας αντίστοιχα. Ο συντελεστής αυτορρυθμίσεως έχει διαστάσεις αντίστροφου στατισμού.

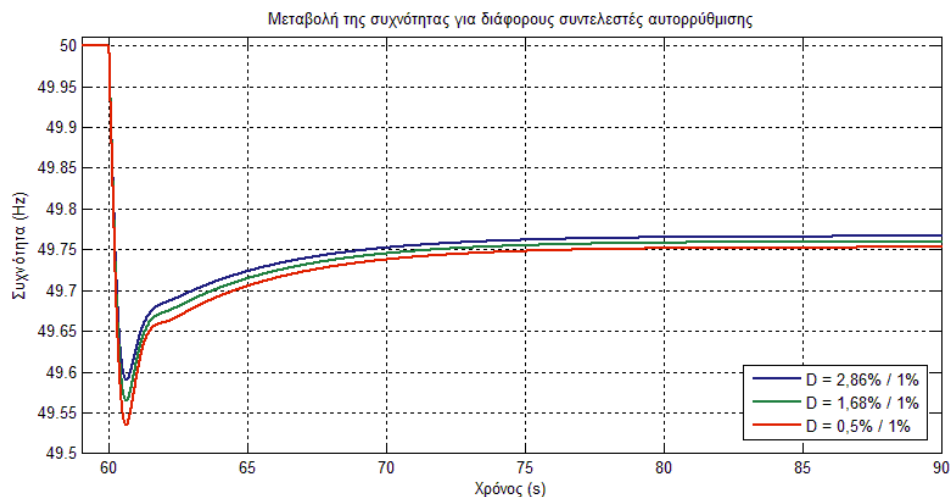
Σημειώνεται, ότι επειδή στη μεταβατική περίοδο της διαταραχής το σφάλμα της συχνότητας είναι πολύ μεγαλύτερο από εκείνο της μόνιμης κατάστασης, η

αυτορρύθμιση του φορτίου είναι αποτελεσματικότερη στο μεταβατικό στάδιο. Η αποτελεσματικότητα αυτή στη μεταβατική κατάσταση φαίνεται στις γραφικές παραστάσεις στα Σχήματα 3-5, 3-6. Το σύστημα, που χρησιμοποιούμε για να εκτελέσουμε τις προσομοιώσεις σχετικά με την αυτορρύθμιση φαίνεται παρακάτω.

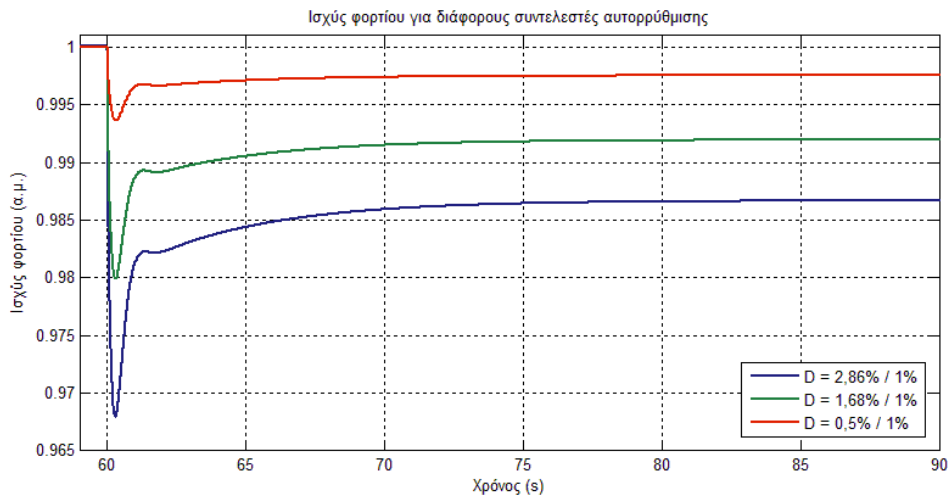


Σχήμα 3-4: Σύστημα για την επίδειξη της συμβολής της αυτορρύθμισης του φορτίου στη ρύθμιση συχνότητας

Οι συνθήκες προσομοίωσης είναι οι εξής: οι αρχικές φορτίσεις του ατμοηλεκτρικού σταθμού και της μονάδας ντήζελ είναι ίσες με 0,5 α.μ.. Το συνολικό φορτίο ισούται με 1 α.μ.. Επιτυγχάνουμε την επιθυμητή αυτορρύθμιση φορτίου με κατάλληλη συμμετοχή κινητήρων επαγωγής και φορτίου που παρουσιάζει μηδενική εξάρτηση από τη συχνότητα. Τη στιγμή $t = 60$ s, το φορτίο (Load) αυξάνεται από 0 σε 0,2 α.μ.. Σημειώνεται επίσης ότι οι μονάδες δεν εκτελούν δευτερεύουσα ρύθμιση και η αδράνεια του συστήματος έχει επιλεγθεί ίση με 4 s.



Σχήμα 3-5: Μεταβολή της συχνότητας για διάφορους συντελεστές αυτορρύθμισης

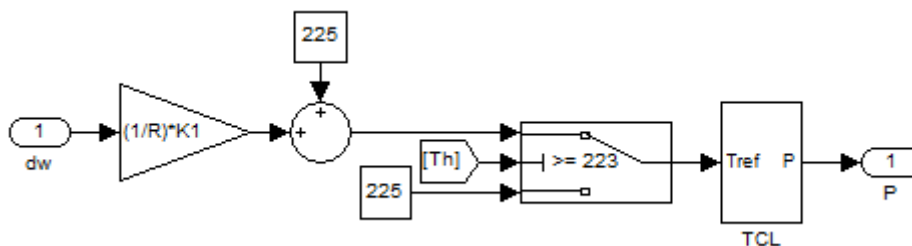


Σχήμα 3-6: Ισχύς φορτίου για διάφορους συντελεστές αυτορρύθμισης

3.3 Συμμετοχή των θερμοστατικών φορτίων στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου συχνότητας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε τον τρόπο με τον οποίο συμμετέχουν τα θερμοστατικά φορτία στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου συχνότητας.

Ένας τρόπος για τον έλεγχο της απορροφούμενης ισχύος των θερμοστατικών φορτίων είναι μέσω της ρύθμισης της θερμοκρασίας αναφοράς αυτών. Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας αναφοράς, χρησιμοποιούμε droop control, όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 3-7. Στη συνέχεια θα εξηγήσουμε τον έλεγχο του θερμοστατικού φορτίου και θα δείξουμε τον τρόπο με τον οποίο συμβάλλει το TCL στη ρύθμιση συχνότητας μέσω ενός απλού συστήματος.

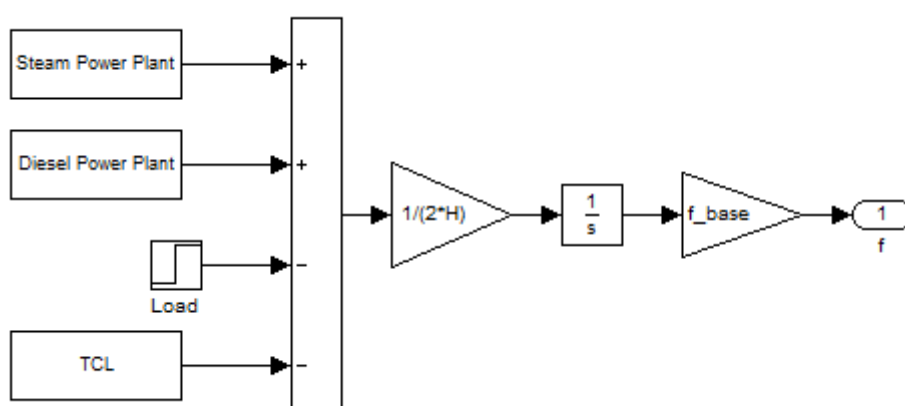


Σχήμα 3-7: Έλεγχος ισχύος θερμοστατικού φορτίου

Υποθέτουμε ότι το θερμοστατικό φορτίο μας είναι ένας βιομηχανικός φούρνος. Η επιθυμητή θερμοκρασία του θερμαινόμενου χώρου είναι 225 °C, ενώ η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 25 °C. Το κάτω όριο για τη θερμοκρασία του χώρου τίθεται στους 223 °C. Η αρχική θερμοκρασία του χώρου, υποτίθεται ότι είναι η επιθυμητή.

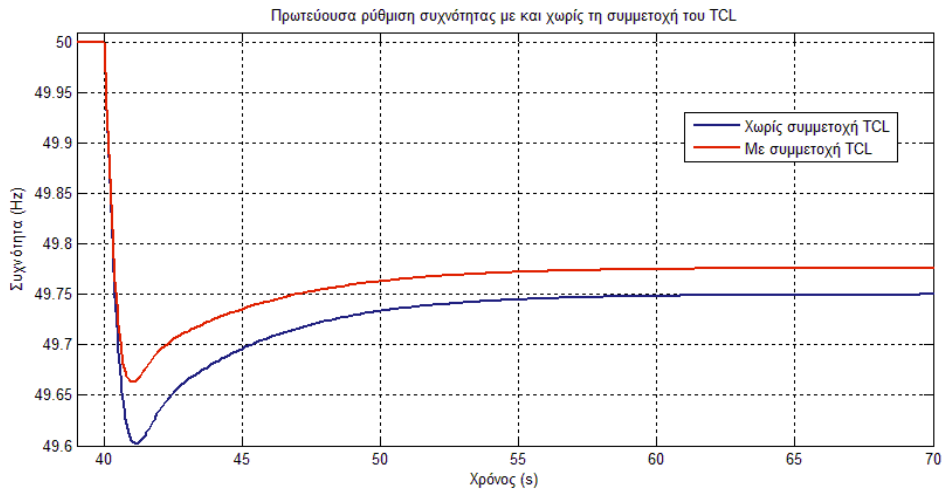
Το φορτίο συμμετέχει στη ρύθμιση συχνότητας με κέρδος $1/R$ (εδώ επιλέγεται ίσο με 5). Βέβαια το σφάλμα συχνότητας $\Delta\omega$, όπως βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα, πολλαπλασιάζεται με τον αντίστροφο στατισμό επί το κέρδος K_1 , το οποίο σχετίζεται με το μοντέλο του φορτίου και χρησιμοποιείται για να μετατρέψει την ισχύ σε θερμοκρασία. Οπότε, ανάλογα με το σφάλμα της συχνότητας μεταβάλλεται αντίστοιχα και η θερμοκρασία αναφοράς και κατ' επέκταση η καταναλισκόμενη ισχύς του φορτίου. Σημειώνεται ότι εάν η θερμοκρασία του θερμαινόμενου χώρου πέσει κάτω από $223\text{ }^\circ\text{C}$, τότε η θερμοκρασία αναφοράς τίθεται στους $225\text{ }^\circ\text{C}$, ανεξαρτήτως της συχνότητας.

Το σύστημα που χρησιμοποιούμε για την επίδειξη της συμβολής του θερμοστατικού φορτίου στη ρύθμιση συχνότητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-8.



Σχήμα 3-8: Σύστημα για την επίδειξη της απόκρισης του TCL

Οι συνθήκες προσομοίωσης είναι οι εξής: οι αρχικές φορτίσεις του ατμοηλεκτρικού σταθμού και της μονάδας ντήζελ είναι ίσες με $0,8\text{ α.μ.}$. Η απορροφούμενη ισχύς του TCL είναι $0,05\text{ α.μ.}$ και το φορτίο (Load) είναι $1,55\text{ α.μ.}$, οπότε έχουμε ισορροπία και η συχνότητα βρίσκεται στην ονομαστική της τιμή. Τη χρονική στιγμή $t = 40\text{ s}$, πραγματοποιούμε μία αύξηση του φορτίου (Load) από $1,55$ σε $1,75\text{ α.μ.}$ και εξετάζουμε τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου στη πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου συχνότητας, συγκρίνοντας τη μεταβολή της συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή αυτού. Να σημειωθεί ότι, οι μονάδες δεν εκτελούν δευτερεύουσα ρύθμιση και η αδράνεια του συστήματος έχει επιλεγεί ίση με 7 s .



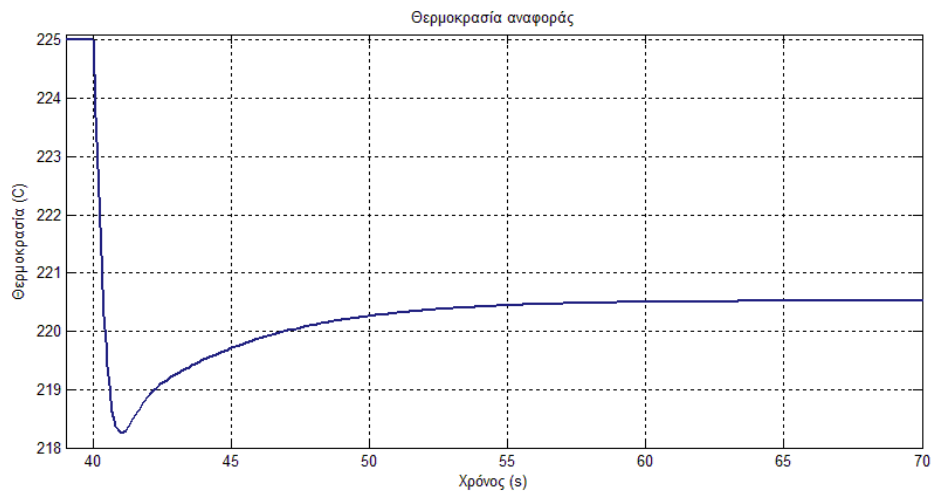
Σχήμα 3-9: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του TCL

Στο Σχήμα 3-9 φαίνεται η θετική επιρροή της συμμετοχής του TCL στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου συχνότητας. Όπως βλέπουμε, η συχνότητα παρουσιάζει μικρότερη μεταβατική πτώση σε σχέση με την περίπτωση που δε συμμετέχει το TCL. Αυτό συμβαίνει διότι το σφάλμα συχνότητας ελέγχει τη θερμοκρασία αναφοράς του θερμαινόμενου χώρου. Αμέσως μετά τη διαταραχή το σφάλμα συχνότητας απομακρύνεται γρήγορα από τη μηδενική τιμή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επίσης γρήγορη μεταβολή της θερμοκρασίας αναφοράς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-10. Η θερμοκρασία του θερμαινόμενου χώρου (Σχήμα 3-12), όμως, δε μεταβάλλεται τόσο γρήγορα. Ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται η θερμοκρασία καθορίζεται από τη σταθερά χρόνου του φορτίου T_1 , η οποία είναι αρκετά μεγάλη (έχουμε υποθέσει $T_1 = 10000$ s). Έτσι, αμέσως μετά τη διαταραχή δημιουργείται ένα σχετικά μεγάλο (αναλόγως με το κέρδος I/R) σφάλμα θερμοκρασίας, το οποίο οδηγεί σε μία γρήγορη μείωση της απορροφούμενης ισχύος (Σχήμα 3-11) από το TCL. Αυτή η μεγάλη (αναλόγως με το κέρδος Kp του ελεγκτή θερμοκρασίας του TCL) μεταβατική μείωση της απορροφούμενης ισχύος του θερμοστατικού φορτίου εξηγεί τη μείωση στη μεταβατική βύθιση της συχνότητας.

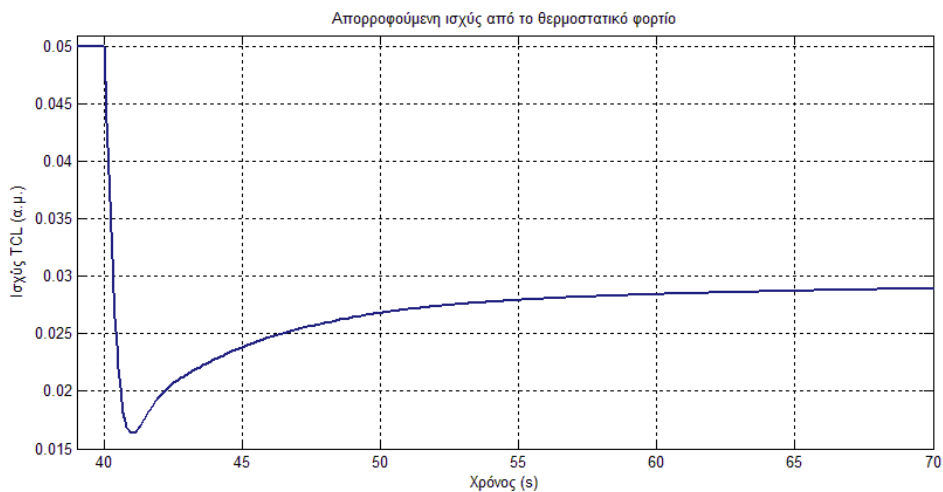
Στην περίπτωση συμμετοχής του TCL, στο τέλος της προσομοίωσης, παρατηρούμε μία αυξημένη τιμή συχνότητας, η οποία δε συνάδει με το συνολικό στατισμό του συστήματος, ο οποίος είναι σχεδόν ίσος με την περίπτωση που δε συμμετέχει το TCL. Αυτό συμβαίνει, διότι δεν έχει επιτευχθεί ακόμη μόνιμη κατάσταση. Η μόνιμη κατάσταση επιτυγχάνεται όταν η θερμοκρασία του θερμαινόμενου χώρου προσεγγίσει τη θερμοκρασία αναφοράς, το οποίο γίνεται με πολύ αργό ρυθμό, λόγω της μεγάλης σταθεράς χρόνου του φορτίου. Αν η προσομοίωση διαρκούσε πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, η μόνιμη τιμή της συχνότητας θα συνέπιπτε σχεδόν με αυτήν της περίπτωσης της μη συμμετοχής του TCL στη ρύθμιση συχνότητας και η τελική τιμή της ισχύος του θερμοστατικού φορτίου θα ήταν πολύ κοντά στην αρχική του τιμή (0,05 α.μ.) λόγω του μικρού μεγέθους του αλλά και λόγω του μικρού

κέρδους ρύθμισης. Βέβαια, 30 s μετά από τη διαταραχή ξεκινά η δευτερεύουσα ρύθμιση.

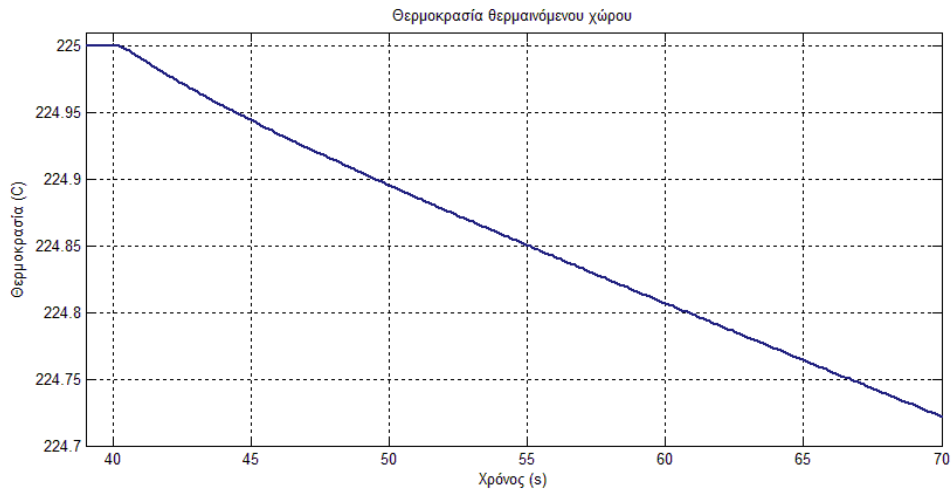
Σε κάθε περίπτωση, το φορτίο που δεν τροφοδοτήθηκε με την ενέργεια που έπρεπε, θα αναπληρώσει αυτήν την ενέργεια αργότερα. Η παροχή της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας στο θερμοστατικό φορτίο πρέπει να γίνει με ελεγχόμενο τρόπο ώστε να μη δημιουργήσει κάποια αιχμή φορτίου. Το σχέδιο παροχής της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας στο θερμοστατικό φορτίο είναι ένας σημαντικός παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, αλλά δε μελετάμε στην εργασία μας.



Σχήμα 3-10: Θερμοκρασία αναφοράς



Σχήμα 3-11: Απορροφούμενη ισχύς από το θερμοστατικό φορτίο



Σχήμα 3-12: Θερμοκρασία θερμαινόμενου χώρου

Τα θερμοστατικά φορτία, όπως έχουμε προαναφέρει, έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν ενέργεια, λόγω της θερμικής χωρητικότητάς τους. Έτσι, λοιπόν, τα TCLs έχουν το περιθώριο να μειώσουν την αποθηκευμένη ενέργειά τους αποδίδοντας με αυτόν τον τρόπο ρύθμιση συχνότητας στο δίκτυο. Η απόδοση αυτή εκδηλώνεται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Ωστόσο, αυτή η μεταβολή θερμοκρασίας, σε ένα βαθμό, μειώνει την εξυπηρέτηση του χρήστη και πρέπει, σαφώς, να ληφθεί υπόψη ώστε να είναι ανεκτή από το χρήστη. Ο λόγος αυτός θέτει περιορισμούς (π.χ. περιορισμός της μείωσης ισχύος λόγω των ορίων θερμοκρασίας) στη συμμετοχή των θερμοστατικών φορτίων στη ρύθμιση συχνότητας.

Κλείνοντας, να σημειώσουμε την πολύ γρήγορη απόκριση των ωμικών θερμοστατικών φορτίων στη μεταβολή της ισχύος τους. Τα ωμικά φορτία αντιδρούν άμεσα στις μεταβολές της εφαρμοζόμενης τάσης, οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι έχουν μηδενική καθυστέρηση, όσον αφορά τη δυναμική τους απόκριση.

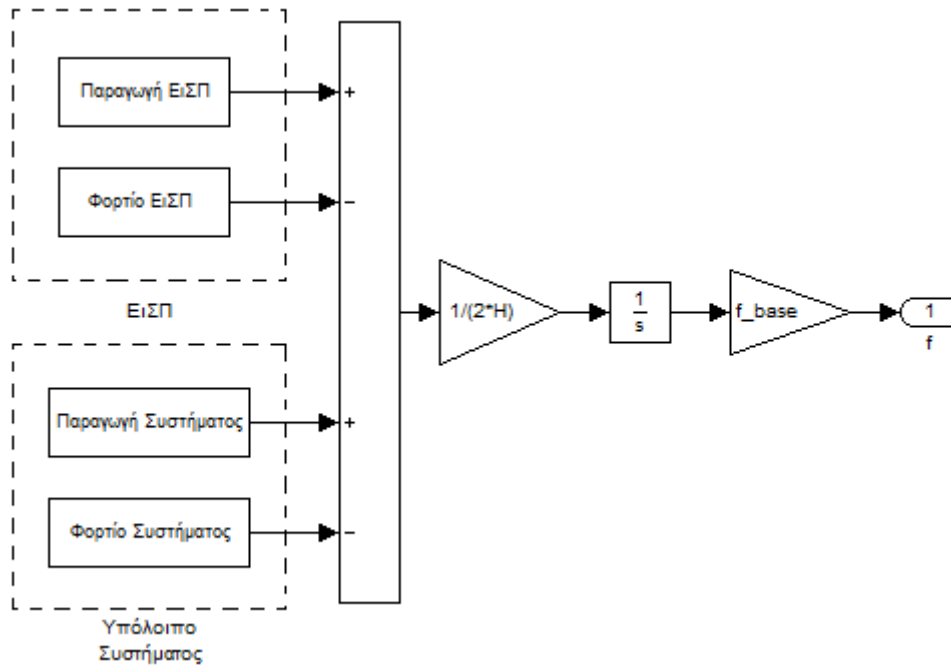
4

Θεμελίωση του προβλήματος

4.1 Γενική δομή του μοντέλου προσομοίωσης

Για την αναπαράσταση του συστήματος, που προσομοιώθηκε στην εργασία μας, χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο μεταβολών ισχύος - ροπής ενός ζυγού (single bus system). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, όλες οι γεννήτριες του συστήματος αντιπροσωπεύονται από μία ισοδύναμη γεννήτρια, η οποία έχει μία ισοδύναμη σταθερά αδρανείας ίση με το άθροισμα των σταθερών αδρανείας όλων των μονάδων παραγωγής και οδηγείται από τη συνολική μηχανική ροπή όλων των κινητήριων μηχανών, ενώ το φορτίο συγκεντρώνεται και αναπαρίσταται συνολικά ως μία αντιρροπή, η οποία αντιτίθεται στη μηχανική ροπή εισόδου των γεννητριών που παρέχεται από τις κινητήριες μηχανές [47].

Το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 4-1. Η παραγωγή τόσο του ΕιΣΠ όσο και του υπολοίπου του συστήματος αποτελείται από ατμοηλεκτρικούς, υδροηλεκτρικούς, νηξελοηλεκτρικούς σταθμούς και ανεμογεννήτριες. Σημειώνεται ότι στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας συμμετέχουν όλοι οι σταθμοί εκτός από τα αιολικά. Το φορτίο του ΕιΣΠ συνίσταται από ελεγχόμενο θερμοστατικό φορτίο και κινητήρες επαγωγής, ενώ το υπόλοιπο φορτίο αποτελείται από κινητήρες και μη ελεγχόμενο TCL.



Σχήμα 4-1: Μοντέλο μεταβολών ισχύος - ροπής ενός ζυγού

4.2 Παράμετροι προσομοιώσεων

Το μοντέλο που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα χρησιμοποιείται για να προσομοιωθεί η λειτουργία του συστήματος και να μελετηθεί η πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας για διάφορες τιμές των παραμέτρων (που αναφέρουμε παρακάτω), στην περίπτωση μίας απότομης αύξησης (+ 20%) του φορτίου του συστήματος τη χρονική στιγμή $t = 25$ s.

Οι προσομοιώσεις έγιναν στο περιβάλλον Simulink του προγράμματος Matlab (R2011a) και για τη διεξαγωγή αυτών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ode45 (Dormand-Prince).

Οι παράμετροι που εξετάζουμε είναι οι εξής:

- Σχέση ΕισΠ – συστήματος
- Δύναμη (αδράνεια) συστήματος
- Μέγεθος ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ΕισΠ
- Κέρδος ρύθμισης ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ΕισΠ
- Αυτορρύθμιση φορτίου ΕισΠ

Εξετάζουμε επίσης την περίπτωση στην οποία το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση υψηλής φόρτισης και παράλληλα η εφεδρεία πρωτεύουσας ρύθμισης βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα.

4.3 Παράμετροι στοιχείων του συστήματος

➤ Ατμοηλεκτρικός σταθμός

Μοντελοποιήθηκε ατμοηλεκτρικός σταθμός με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά, τα οποία λάβαμε από το [47]:

Παράμετρος	Τιμή
Στατισμός πρωτεύουσας ρύθμισης (R)	0,05
Κέρδος δευτερεύουσας ρύθμισης (K_s)	5
Σταθερά χρόνου ατμοστροβίλου (σωληνώσεων μεταξύ δικλίδας και στροβίλου) (T_{CH})	0,3 s
Σταθερά χρόνου αναθερμαντή (T_{RH})	7 s
Μέρος της συνολικής ισχύος του στροβίλου που παράγεται από την υψηλή πίεση (F_{HP})	0,3
Χρονική καθυστέρηση ρυθμιστή (T_G)	0,2 s

Πίνακας 4-1: Τιμές παραμέτρων ατμοηλεκτρικού σταθμού

➤ Υδροηλεκτρικός σταθμός

Μοντελοποιήθηκε υδροηλεκτρικός σταθμός με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά, τα οποία λάβαμε από το [47]:

Παράμετρος	Τιμή
Υδραυλική χρονική σταθερά αδρανείας του νερού (T_w)	1 s
Μόνιμος στατισμός πρωτεύουσας ρύθμισης (R_p)	0,05
Μεταβατικός στατισμός (R_T)	0,38
Κέρδος δευτερεύουσας ρύθμισης (K_s)	7
Χρονική σταθερά επαναφοράς (T_R)	5 s
Χρονική σταθερά κύριου σερβομηχανισμού (T_G)	0,2 s

Πίνακας 4-2: Τιμές παραμέτρων υδροηλεκτρικού σταθμού

➤ **Νηζελοηλεκτρική μονάδα**

Μοντελοποιήθηκε νηζελοηλεκτρική μονάδα με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Παράμετρος	Τιμή
Στατισμός πρωτεύουσας ρύθμισης (D_d)	0,05
Κέρδος δευτερεύουσας ρύθμισης (K_s)	7
Χρονική καθυστέρηση μηχανής (t_d)	0,15 s
Χρονική καθυστέρηση σερβομηχανισμού βαλβίδας καυσίμου (t_α)	0,05 s

Πίνακας 4-3: Τιμές παραμέτρων νηζελοηλεκτρικής μονάδας

➤ **Κινητήρας επαγωγής**

Μοντελοποιήθηκε μικρός βιομηχανικός κινητήρας επαγωγής με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [47]:

Παράμετρος	Τιμή
Αντίσταση τυλίγματος στάτη (R_s)	0,078 α.μ.
Αντίσταση τυλίγματος δρομέα (R_r)	0,044 α.μ.
Αυτεπαγωγή στάτη (L_s)	2,735 α.μ.
Αυτεπαγωγή δρομέα (L_r)	2,719 α.μ.
Αυτεπαγωγή μαγνήτισης (L_m)	2,67 α.μ.
Ανηγμένη σταθερά αδρανείας (H)	0,5 α.μ.
Εκθέτης εκθετικού τμήματος φορτίου (m)	2
Μηχανική ροπή του φορτίου στη σύγχρονη ταχύτητα (T_{m0})	1,006 α.μ.
Εξάρτηση του φορτίου από τη συχνότητα (k_{pf})	2,86% / 1%

Πίνακας 4-4: Τιμές παραμέτρων κινητήρα επαγωγής

➤ Ανεμογεννήτρια

Μοντελοποιήθηκε ΓΕΔΤ με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Παράμετρος	Τιμή
Αντίσταση τυλίγματος στάτη (R_s)	0,00462 α.μ.
Αντίσταση τυλίγματος δρομέα (μετασχηματισμένη) (R_R)	0,0038 α.μ.
Αυτεπαγωγή μαγνήτισης (μετασχηματισμένη) (L_M)	1,99 α.μ.
Συνολική αυτεπαγωγή σκέδασης (L_L)	0,11818 α.μ.

Πίνακας 4-5: Τιμές παραμέτρων μοντέλου ΓΕΔΤ

➤ Θερμοστατικό φορτίο

Μοντελοποιήθηκε ωμικό θερμοστατικό φορτίο με τα παρακάτω χαρακτηριστικά. Στην εργασία μας έχουμε υποθέσει ότι το φορτίο αυτό είναι βιομηχανικός φούρνος, αλλά θα μπορούσε να είναι κάθε ωμικό θερμοστατικό φορτίο με δυνατότητα ρύθμισης της θερμοκρασίας αναφοράς μέσω PID ελεγκτή.

Παράμετρος	Τιμή
Επιθυμητή θερμοκρασία (τ_{ref})	225 °C
Θερμοκρασία περιβάλλοντος (τ_A)	25 °C
Κάτω όριο θερμοκρασίας (τ_{lim})	223 °C
Αναλογικό κέρδος (K_p)	0,1
Ολοκληρωτικό κέρδος (K_I)	0,00001
Σταθερά χρόνου του φορτίου (T_1)	10000 s
Κέρδος που σχετίζεται με το μοντέλο του φορτίου (K_1)	200
Αρχική θερμοκρασία θερμαινόμενου χώρου (T_{h0})	225 °C
Κέρδος ρύθμισης (I/R)	5

Πίνακας 4-6: Τιμές παραμέτρων θερμοστατικού φορτίου

➤ Στοιχεία συστήματος

Οι τιμές που αφορούν την κατανομή των μονάδων παραγωγής είναι αυτές που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	Ατμοηλεκτρικοί	Υδροηλεκτρικοί	Ντήζελ	Αιολικά
ΕΙΣΠ	27%	13%	40%	20%
Υπόλοιπο συστήματος	50%	0%	50%	0%

Πίνακας 4-7: Συμμετοχή στην παραγωγή ανά είδος σταθμού

Ο συντελεστής αυτορρύθμισης του φορτίου έχει ληφθεί ίσος με την τιμή που θεωρείται από τον ENTSO-E, δηλαδή 1% / Hz, εκτός εάν σε κάποιο σημείο αναφέρεται διαφορετικά. Αυτό επιτυγχάνεται, όπως έχουμε προαναφέρει με την κατάλληλη συμμετοχή κινητήρων επαγωγής και ωμικού θερμοστατικού φορτίου που δεν παρουσιάζει εξάρτηση από τη συχνότητα.

5

Προσομοιώσεις και αποτελέσματα – Σχόλια και παρατηρήσεις

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του αναπτυχθέντος μοντέλου, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που ορίσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εξετάζουμε, λοιπόν, την κάθε παράμετρο ξεχωριστά και καταγράφουμε ορισμένα ενδιαφέροντα σχόλια και παρατηρήσεις.

Εξετάζουμε την επίδραση των εξής παραμέτρων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας:

- 1) Σχέση ΕιΣΠ - Συστήματος
- 2) Δύναμη (αδράνεια) συστήματος
- 3) Μέγεθος ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ΕιΣΠ
- 4) Κέρδος ρύθμισης ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ΕιΣΠ
- 5) Αυτορρύθμιση φορτίου ΕιΣΠ
- 6) Υψηλό φορτίο – Μειωμένη εφεδρεία πρωτεύουσας ρύθμισης

5.1 Σχέση ΕιΣΠ - Συστήματος

Διεξάγουμε μία σειρά προσομοιώσεων μεταβάλλοντας τη σχέση του μεγέθους ΕιΣΠ και συστήματος. Ξεκινάμε με τον ΕιΣΠ πολύ μικρότερο σε σχέση με το σύστημα και καταλήγουμε σε μία σχέση με τον ΕιΣΠ ελαφρώς μεγαλύτερο από το σύστημα. Τονίζουμε ότι το ελεγχόμενο θερμοστατικό φορτίο αποτελεί το 10% του συνόλου του φορτίου του ΕιΣΠ.

Σταθερές τιμές παραμέτρων σε αυτή τη σειρά προσομοιώσεων

Συνολικό φορτίο πριν τη διαταραχή = $0,75 \cdot$ (Συνολική ονομαστική παραγωγή)

Ελεγχόμενο ωμικό TCL = 10% (Συνολικό φορτίο ΕιΣΠ)

Κέρδος ρύθμισης ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ΕιΣΠ = 5

i) ΕιΣΠ \ll Συστήματος (Σύστημα 20 φορές ο ΕιΣΠ)

Ονομαστική παραγωγή ΕιΣΠ = 0,05 α.μ.

Φορτίο ΕιΣΠ = 0,0375 α.μ.

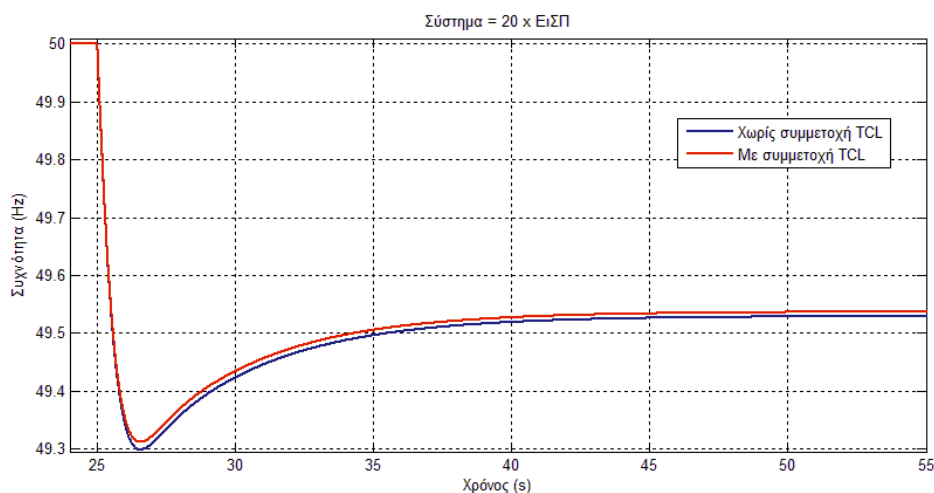
Ονομαστική παραγωγή συστήματος = 1 α.μ.

Φορτίο συστήματος = 0,75 α.μ. \rightarrow 0,95 α.μ.

Ανηγγεμένη σταθερά αδρανείας: $H = 4,725$ s

$S_B = 1000$ MVA

Διαταραχή = 0,2 α.μ. = 200 MW



Σχήμα 5-1: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (Σύστημα = 20 x ΕιΣΠ)

ii) ΕιΣΠ \ll Συστήματος (Σύστημα 10 φορές ο ΕιΣΠ)

Ονομαστική παραγωγή ΕιΣΠ = 0,1 α.μ.

Φορτίο ΕιΣΠ = 0,075 α.μ.

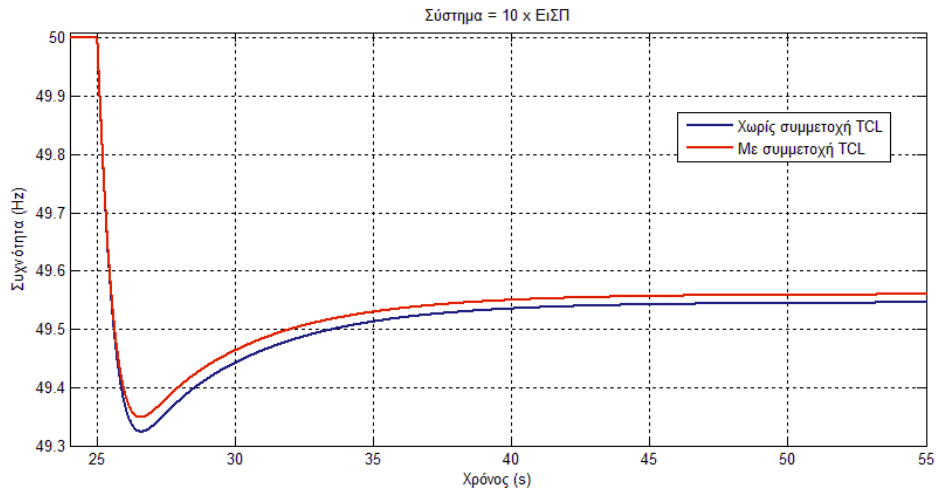
Ονομαστική παραγωγή συστήματος = 1 α.μ.

Φορτίο συστήματος = 0,75 α.μ. \rightarrow 0,95 α.μ.

Ανηγγεμένη σταθερά αδρανείας: $H = 4,95$ s

$S_B = 1000$ MVA

Διαταραχή = 0,2 α.μ. = 200 MW



Σχήμα 5-2: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕΙΣΠ (Σύστημα = 10 x ΕΙΣΠ)

iii) ΕΙΣΠ < Συστήματος (Σύστημα 2,5 φορές ο ΕΙΣΠ)

Ονομαστική παραγωγή ΕΙΣΠ = 0,4 α.μ.

Φορτίο ΕΙΣΠ = 0,3 α.μ.

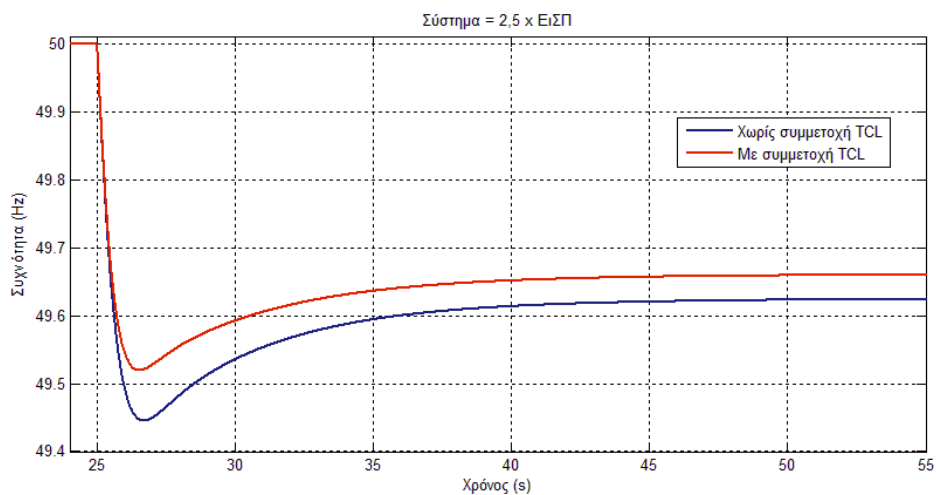
Ονομαστική παραγωγή συστήματος = 1 α.μ.

Φορτίο συστήματος = 0,75 α.μ. → 0,95 α.μ.

Ανηγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 6,3 \text{ s}$

$S_B = 100 \text{ MVA}$

Διαταραχή = 0,2 α.μ. = 20 MW



Σχήμα 5-3: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕΙΣΠ (Σύστημα = 2,5 x ΕΙΣΠ)

iv) ΕισΠ = Σύστημα (Σύστημα ίσο με ΕισΠ)

Ονομαστική παραγωγή ΕισΠ = 1 α.μ.

Φορτίο ΕισΠ 0,75 α.μ.

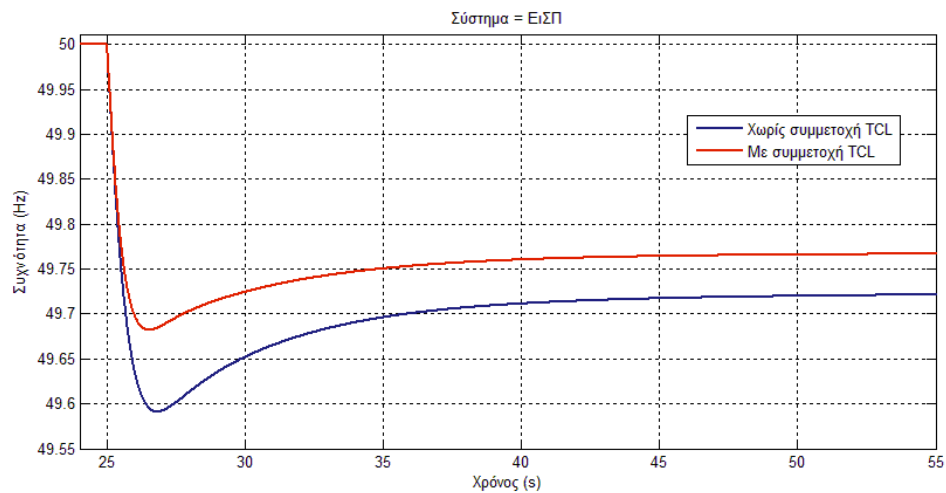
Ονομαστική παραγωγή συστήματος = 1 α.μ.

Φορτίο συστήματος = 0,75 α.μ. → 0,95 α.μ.

Ανηγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 9$ s

$S_B = 100$ MVA

Διαταραχή = 0,2 α.μ. = 20 MW



Σχήμα 5-4: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕισΠ (Σύστημα = ΕισΠ)

v) ΕισΠ > Σύστημα (ΕισΠ = 1,5 φορές το Σύστημα)

Ονομαστική παραγωγή ΕισΠ = 1,5 α.μ.

Φορτίο ΕισΠ = 1,125 α.μ.

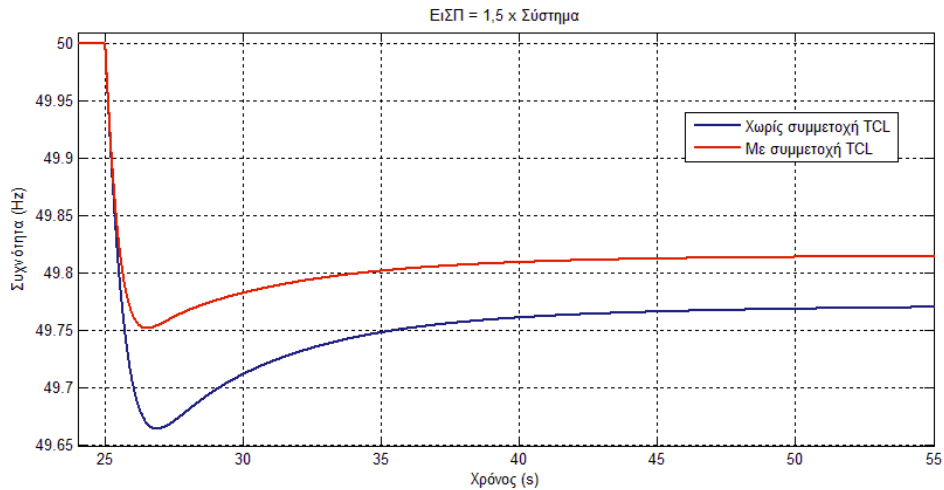
Ονομαστική παραγωγή συστήματος = 1 α.μ.

Φορτίο συστήματος = 0,75 α.μ. → 0,95 α.μ.

Ανηγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 11,25$ s

$S_B = 100$ MVA

Διαταραχή = 0,2 α.μ. = 20 MW



Σχήμα 5-5: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (ΕιΣΠ = 1,5 x Σύστημα)

Σχέση ΕιΣΠ - Συστήματος	Διαφορά της ελάχιστης τιμής της συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου
Σύστημα = 20 x ΕιΣΠ	0,0129 Hz
Σύστημα = 10 x ΕιΣΠ	0,0248 Hz
Σύστημα = 2,5 x ΕιΣΠ	0,0744 Hz
Σύστημα = ΕιΣΠ	0,0910 Hz
ΕιΣΠ = 1,5 x Σύστημα	0,0876 Hz

Πίνακας 5-1: Διαφορά της ελάχιστης τιμής της συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ανάλογα με τη σχέση ΕιΣΠ – Συστήματος

Από τις προσομοιώσεις που εκτελέσαμε, μεταβάλλοντας τη σχέση ΕιΣΠ – Συστήματος, συμπεραίνουμε ότι, καθώς το μέγεθος του ΕιΣΠ μεγαλώνει σε σχέση με αυτό του συστήματος, η επιρροή του θερμοστατικού φορτίου στη μεταβολή της συχνότητας γίνεται πιο εμφανής. Η ουσιαστική συμβολή του θερμοστατικού φορτίου έγκειται στη μείωση της μεταβατικής πτώσης της συχνότητας, λόγω της γρήγορης μείωσης της ισχύος που απορροφά. Από τα διαγράμματα μεταβολής της συχνότητας και λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση της ποσότητας των ελέγξιμων θερμοστατικών φορτίων και του συνολικού φορτίου του ΕιΣΠ, καταλαβαίνουμε ότι ακόμα και μικρή ποσότητα ελεγχόμενων TCLs, συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της μεταβατικής βύθισης της συχνότητας.

Παρατηρούμε, επίσης, ότι αυτό που παίζει σημαντικό ρόλο στη μεταβολή της συχνότητας (στη μεταβατική κατάσταση) δεν είναι μόνο η συνολική ονομαστική παραγωγή (ΕιΣΠ και συστήματος), η οποία καθορίζει το συνολικό στατισμό και την αδράνεια του συστήματος, αλλά και το μέγεθος του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ. Η παράμετρος αυτή θα μας απασχολήσει αργότερα.

5.2 Δύναμη (αδράνεια) συστήματος

Η ανηγμένη σταθερά αδρανείας του συστήματος είναι ένα μέγεθος που εκφράζει τη δύναμη αυτού, αφού η σταθερά αυτή πολλαπλασιαζόμενη με τη συνολική ονομαστική ικανότητα παραγωγής (S_N) δίνει την αποθηκευμένη κινητική ενέργεια στα στρεφόμενα μέρη των γεννητριών του συστήματος. Ύστερα από μία διαταραχή, αυτή η αποθηκευμένη κινητική ενέργεια τροφοδοτεί το έλλειμμα παραγωγής που προκύπτει. Όσο μεγαλύτερη η αδράνεια του συστήματος, τόσο δυσκολότερα μεταβάλλεται η συχνότητα αυτού. Οι σύγχρονες και οι ασύγχρονες γεννήτριες που συνδέονται απευθείας στο δίκτυο συμβάλλουν άμεσα στην αδράνεια του συστήματος, ενώ με την παρεμβολή μετατροπέων ισχύος ανάμεσα στις γεννήτριες και στο δίκτυο, μπορεί να μην έχουμε συνεισφορά αυτών στην αδράνεια του συστήματος. Αυτό συμβαίνει κυρίως με την παραγωγή από ΑΠΕ (αιολικά και φωτοβολταϊκά), όπου χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά ισχύος για τη σύνδεση των πηγών στο δίκτυο. Με την αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η αδράνεια του συστήματος είναι ένας παράγοντας που θα πρέπει να λάβουμε υπόψη.

Εκτελούμε δύο σειρές προσομοιώσεων μεταβάλλοντας τη δύναμη του συστήματος. Στην πρώτη σειρά κρατάμε σταθερή τη συνολική ονομαστική παραγωγή (ΕιΣΠ και συστήματος) και μεταβάλλουμε την αδράνεια του συστήματος. Στη σειρά των προσομοιώσεων αυτών η αδράνεια δε μεταβάλλεται με τη μεταβολή της συνολικής ονομαστικής παραγωγής, αλλά θεωρώντας διαφορετικό μείγμα παραγωγής, δηλαδή διαφορετικές μονάδες παραγωγής (με διαφορετική σταθερά αδρανείας) και διαφορετική διείσδυση ΑΠΕ στην παραγωγή. Στη σειρά αυτή, λοιπόν, πηγαίνουμε από ένα ασθενές σε ένα πιο ισχυρό σύστημα με σταθερή συνολική ονομαστική παραγωγή. Στη δεύτερη σειρά προσομοιώσεων μεταβάλλουμε τη συνολική ονομαστική παραγωγή, μεταβάλλοντας ανάλογα τη σταθερά αδρανείας του δικτύου και κρατώντας την ίδια βάση ισχύος. Επίσης και στις δύο σειρές προσομοιώσεων, σταθερό κρατείται το φορτίο του ΕιΣΠ, αλλά και η διαταραχή. Αυτό γίνεται για να παρατηρήσουμε την επιρροή του ελέγξιμου θερμοστατικού φορτίου στη μεταβολή της συχνότητας σε σχέση με τη δύναμη του δικτύου.

Σειρά 1

Σταθερές τιμές παραμέτρων σε αυτή τη σειρά προσομοιώσεων

Ελεγχόμενο ωμικό TCL = 10% (Συνολικό φορτίο ΕιΣΠ)

Κέρδος ρύθμισης ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ΕιΣΠ = 5

Ονομαστική παραγωγή ΕιΣΠ = 1 α.μ.

Φορτίο ΕιΣΠ = 0,375 α.μ.

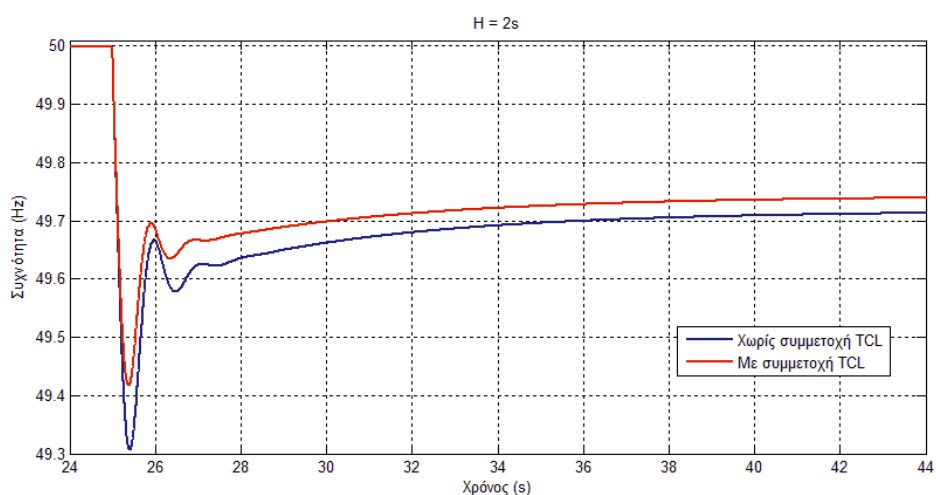
Ονομαστική παραγωγή συστήματος = 1 α.μ.

Φορτίο συστήματος = 0,75 α.μ. → 0,95 α.μ.

$S_B = 100 \text{ MVA}$

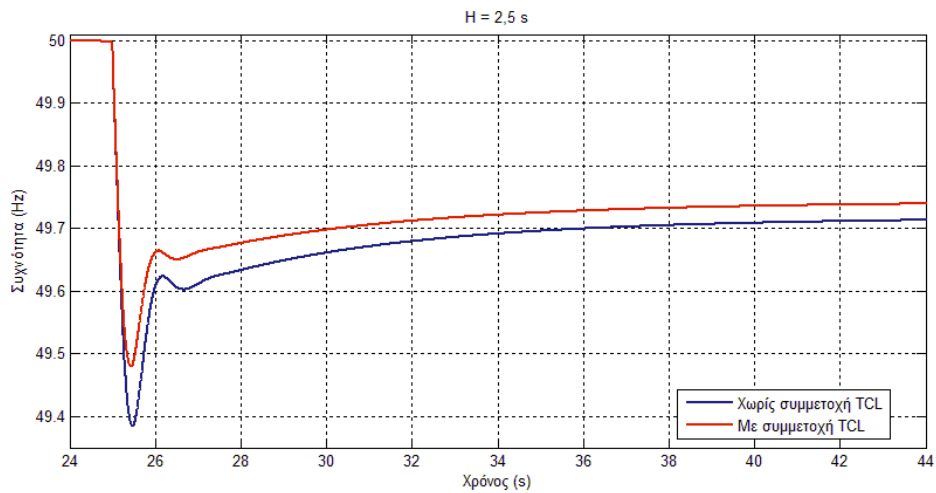
Διαταραχή = 0,2 α.μ. = 20 MW

ι) Ανηγγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 2 \text{ s}$



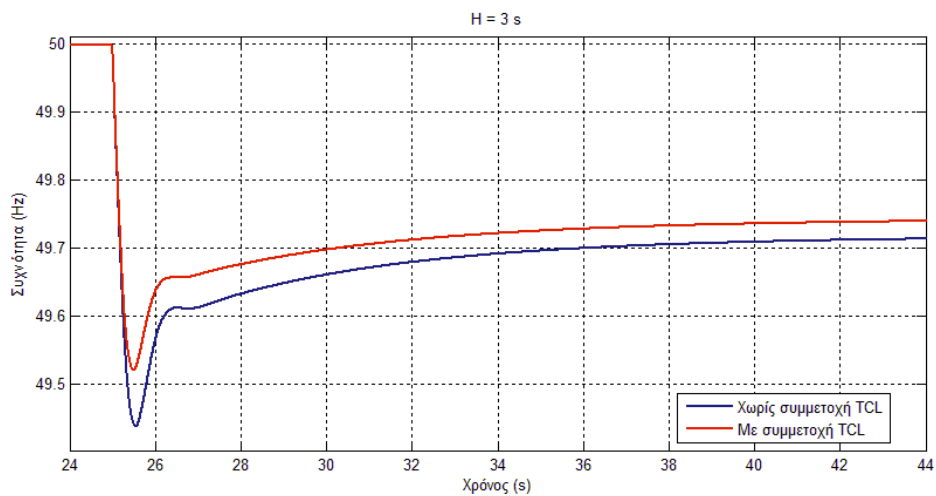
Σχήμα 5-6: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ ($H = 2 \text{ s}$)

ii) Ανηγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 2,5 \text{ s}$



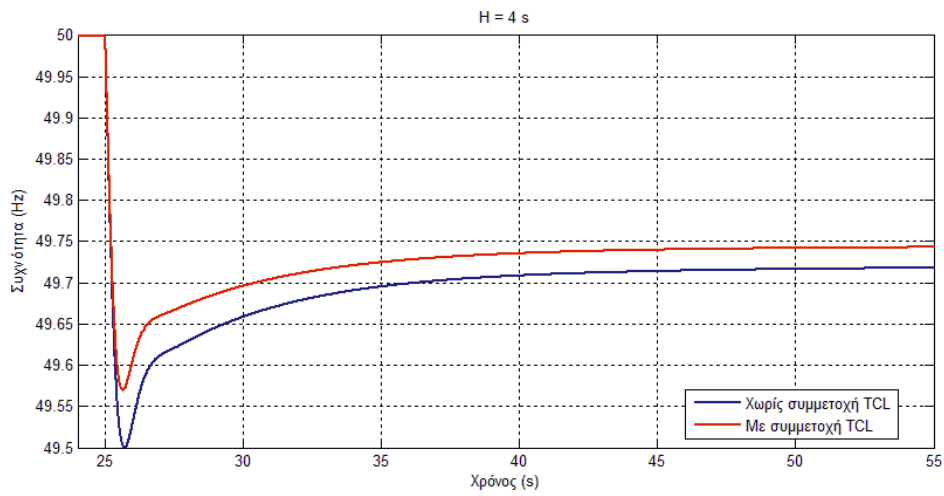
Σχήμα 5-7: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ ($H = 2,5 \text{ s}$)

iii) Ανηγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 3 \text{ s}$



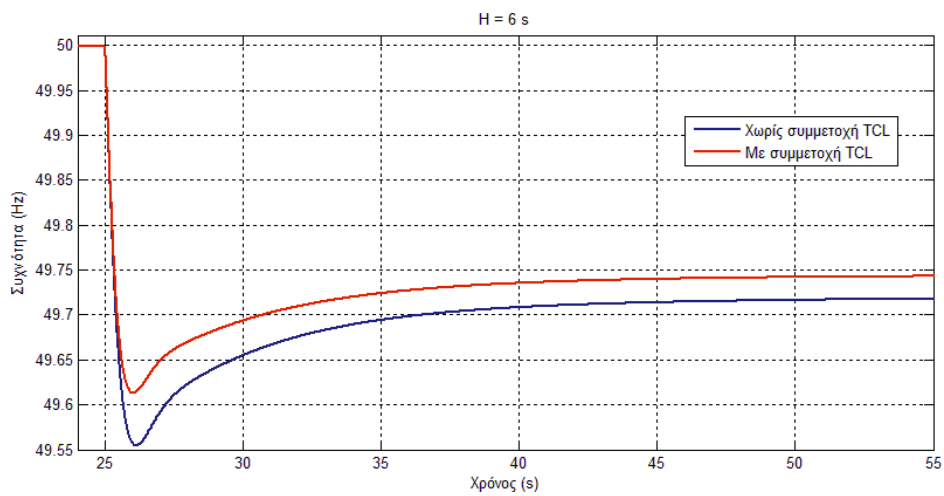
Σχήμα 5-8: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ ($H = 3 \text{ s}$)

iv) Ανηγγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 4 \text{ s}$



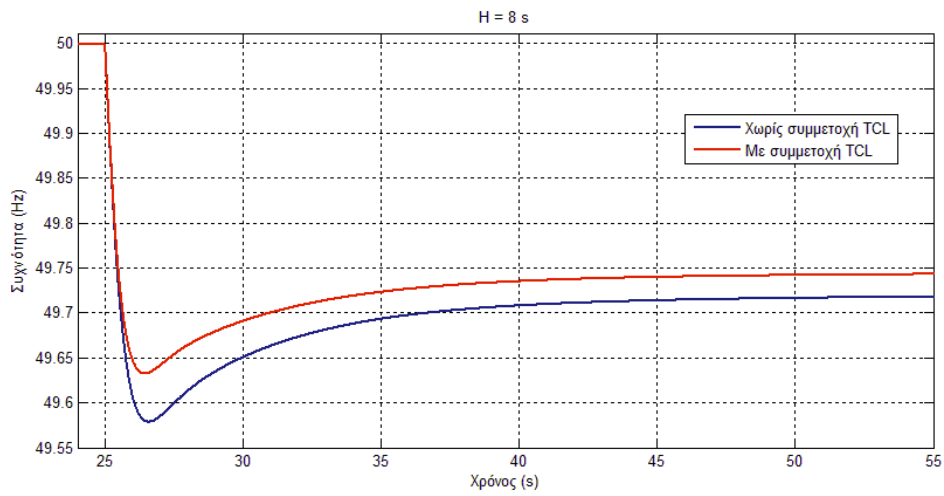
Σχήμα 5-9: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ ($H = 4 \text{ s}$)

v) Ανηγγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 6 \text{ s}$



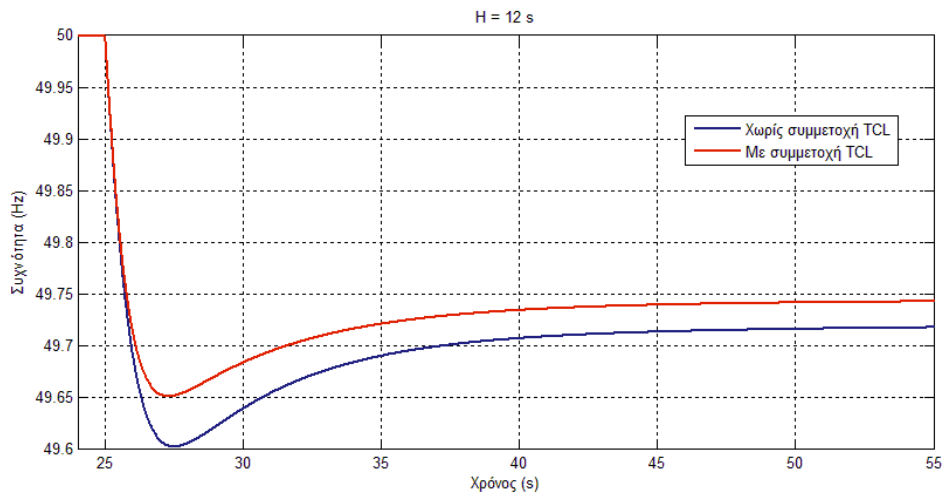
Σχήμα 5-10: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ ($H = 6 \text{ s}$)

vi) Ανηγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 8 \text{ s}$



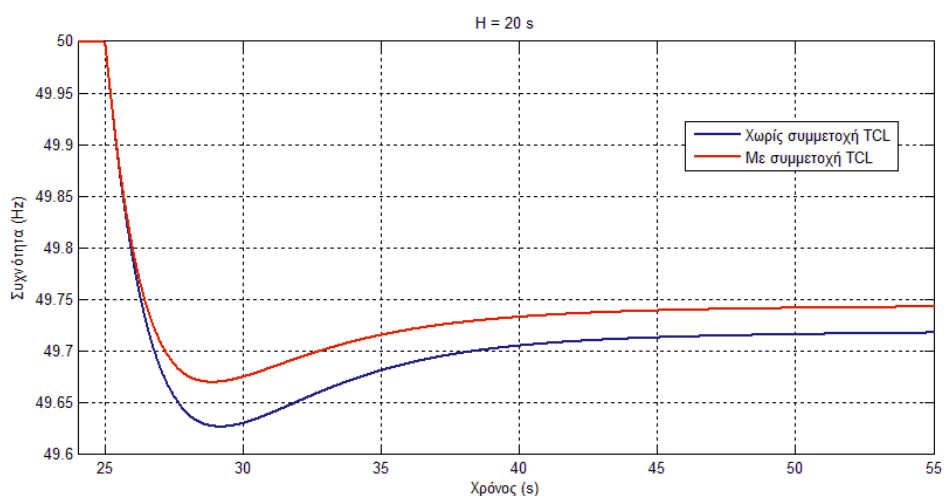
Σχήμα 5-11: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ ($H = 8 \text{ s}$)

vii) Ανηγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 12 \text{ s}$



Σχήμα 5-12: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ ($H = 12 \text{ s}$)

viii) Ανηγγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 20 \text{ s}$



Σχήμα 5-13: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ ($H = 20 \text{ s}$)

Αδράνεια συστήματος	Διαφορά της ελάχιστης τιμής της συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου
$H = 2 \text{ s}$	0,1104 Hz
$H = 2,5 \text{ s}$	0,0948 Hz
$H = 3 \text{ s}$	0,0830 Hz
$H = 4 \text{ s}$	0,0694 Hz
$H = 6 \text{ s}$	0,0586 Hz
$H = 8 \text{ s}$	0,0537 Hz
$H = 12 \text{ s}$	0,0486 Hz
$H = 20 \text{ s}$	0,0431 Hz

Πίνακας 5-2: Διαφορά της ελάχιστης τιμής της συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ανάλογα με την αδράνεια του συστήματος

Σειρά 2

Σταθερές τιμές παραμέτρων σε αυτή τη σειρά προσομοιώσεων

Συνολικό φορτίο (πριν τη διαταραχή) = 0,75 (Συνολική ονομαστική παραγωγή)

Ελεγχόμενο ωμικό TCL = 10% (Συνολικό φορτίο ΕιΣΠ)

Κέρδος ρύθμισης ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ΕιΣΠ = 5

Φορτίο ΕιΣΠ = 0,375 α.μ.

$S_B = 100 \text{ MVA}$

Διαταραχή = 0,2 α.μ. = 20 MW

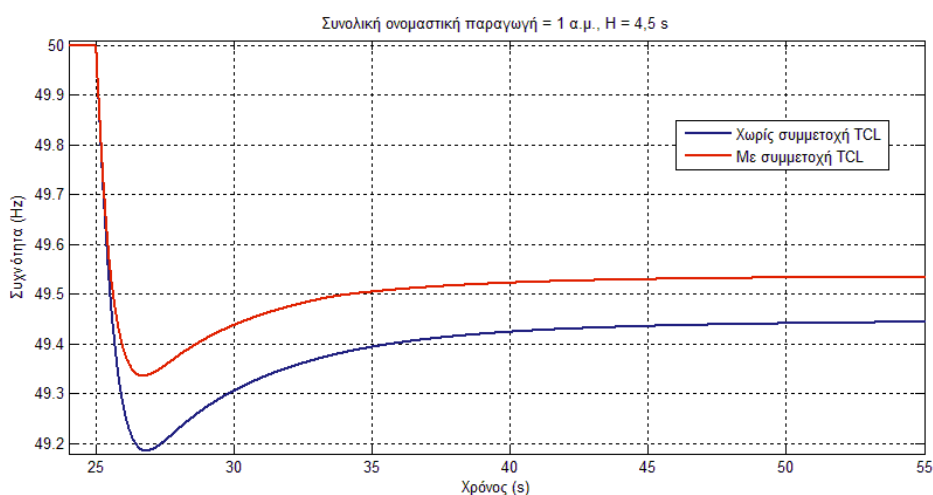
i) Συνολική ονομαστική παραγωγή = 1 α.μ.

Φορτίο συστήματος = 0,375 α.μ. → 0,575 α.μ.

Ονομαστική παραγωγή ΕιΣΠ = 0,5 α.μ.

Ονομαστική παραγωγή συστήματος = 0,5 α.μ.

Ανηγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 4,5 \text{ s}$



Σχήμα 5-14: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (Συνολική ονομαστική παραγωγή = 1 α.μ., $H = 4,5 \text{ s}$)

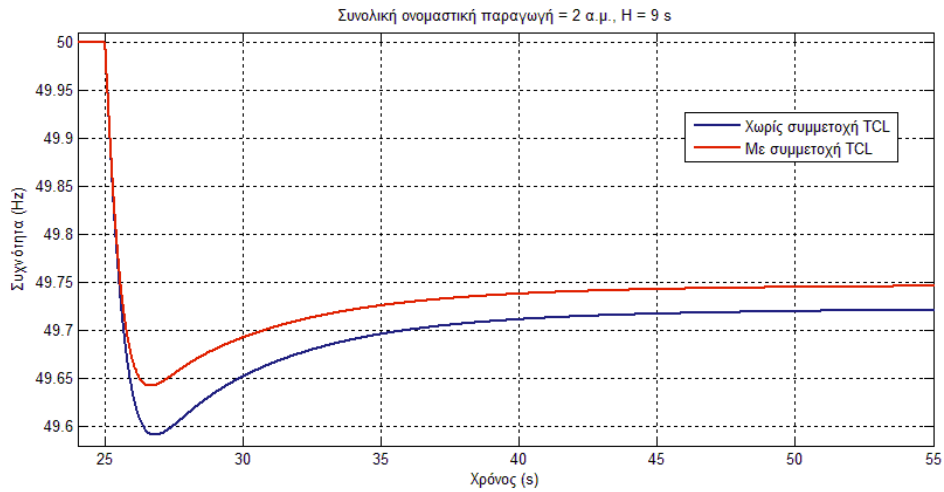
ii) Συνολική ονομαστική παραγωγή = 2 α.μ.

Φορτίο συστήματος = 1,125 α.μ. → 1,325 α.μ.

Ονομαστική παραγωγή ΕιΣΠ = 1 α.μ.

Ονομαστική παραγωγή συστήματος = 1 α.μ.

Ανηγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 9 \text{ s}$



Σχήμα 5-15: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (Συνολική ονομαστική παραγωγή = 2 α.μ., H = 9 s)

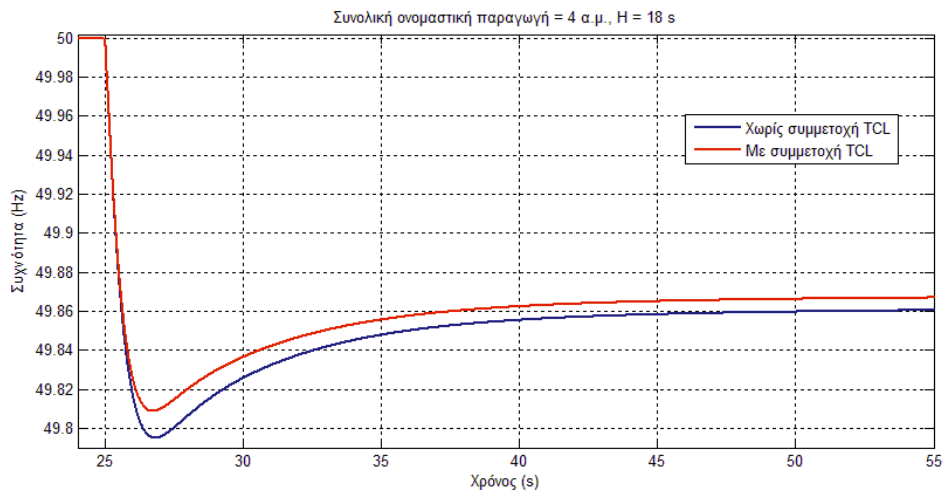
iii) Συνολική ονομαστική παραγωγή = 4 α.μ.

Φορτίο συστήματος = 2,625 α.μ. → 2,825 α.μ.

Ονομαστική παραγωγή ΕιΣΠ = 2 α.μ.

Ονομαστική παραγωγή συστήματος = 2 α.μ.

Ανηγμένη σταθερά αδρανείας: H = 18 s



Σχήμα 5-16: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (Συνολική ονομαστική παραγωγή = 4 α.μ., H = 18 s)

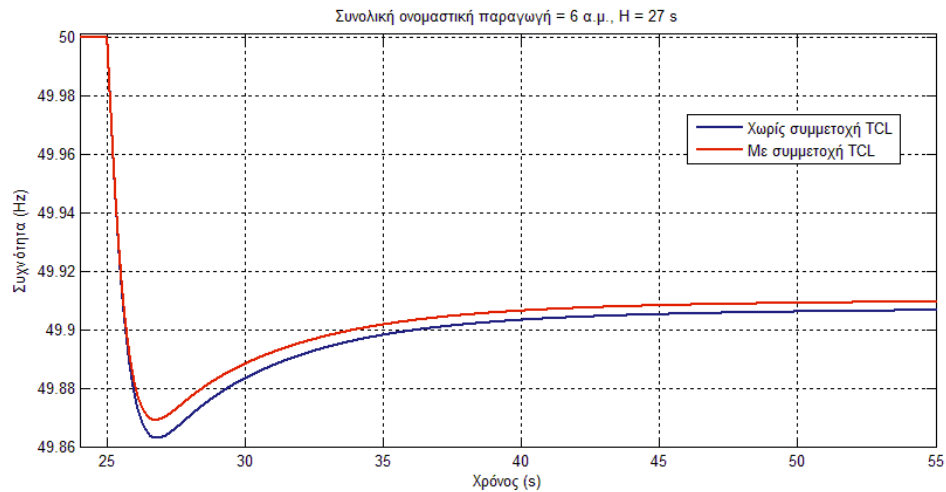
iv) Συνολική ονομαστική παραγωγή = 6 α.μ.

Φορτίο συστήματος = 4,125 α.μ. → 4,325 α.μ.

Ονομαστική παραγωγή ΕιΣΠ = 3 α.μ.

Ονομαστική παραγωγή συστήματος = 3 α.μ.

Ανηγγεμένη σταθερά αδρανείας: $H = 27$ s



Σχήμα 5-17: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (Συνολική ονομαστική παραγωγή = 6 α.μ., $H = 27$ s)

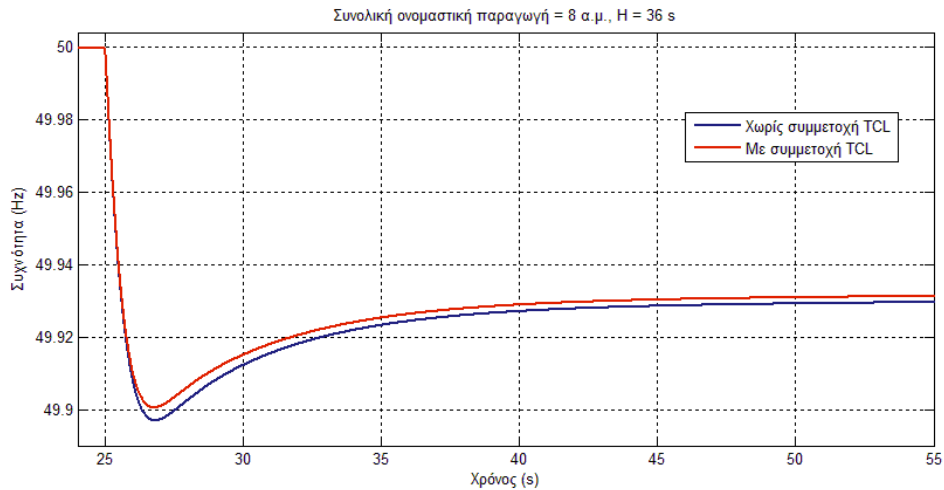
v) Συνολική ονομαστική παραγωγή = 8 α.μ.

Φορτίο συστήματος = 5,625 α.μ. → 5,825 α.μ.

Ονομαστική παραγωγή ΕιΣΠ = 4 α.μ.

Ονομαστική παραγωγή συστήματος = 4 α.μ.

Ανηγγεμένη σταθερά αδρανείας: $H = 36$ s



Σχήμα 5-18: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ (Συνολική ονομαστική παραγωγή = 8 α.μ., H = 36 s)

Συνολική ονομαστική παραγωγή, αδράνεια συστήματος	Διαφορά της ελάχιστης τιμής της συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου
1 α.μ., 4,5 s	0,1503 Hz
2 α.μ., 9 s	0,0512 Hz
4 α.μ., 18 s	0,0137 Hz
6 α.μ., 27 s	0,0062 Hz
8 α.μ., 36 s	0,0036 Hz

Πίνακας 5-3: Διαφορά της ελάχιστης τιμής της συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ανάλογα με τη συνολική ονομαστική παραγωγή και την αδράνεια του συστήματος

Από τις δύο σειρές προσομοιώσεων που αφορούν τη δύναμη του συστήματος καταλαβαίνουμε ότι καθώς το σύστημα γίνεται πιο ισχυρό, η επιρροή της συμμετοχής του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου στη ρύθμιση συχνότητας γίνεται λιγότερο αισθητή. Αυτό συμβαίνει λόγω της αύξησης της σταθεράς αδρανείας του δικτύου (με σταθερή συνολική ονομαστική παραγωγή) στην πρώτη σειρά προσομοιώσεων και λόγω της αύξησης της ρυθμίζουσας ενέργειας, αλλά και της αύξησης της σταθεράς αδρανείας του δικτύου στη δεύτερη (λόγω της αύξησης της συνολικής ονομαστικής παραγωγής).

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι σε ασθενή συστήματα (π.χ. μη διασυνδεδεμένα νησιά) η συμμετοχή του φορτίου στη ρύθμιση συχνότητας θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση της μεταβατικής πτώσης της συχνότητας και αυτό θα μπορούσε να αποτρέψει ενδεχόμενη αποκοπή φορτίου λόγω υποσυχνότητας. Η αποκοπή φορτίου γίνεται με τη διακοπή ολόκληρης γραμμής διανομής, γεγονός που σημαίνει ότι εκτός από φορτίο αποκόπτεται και κάποια ποσότητα ΔΠ. Επομένως, η αποφυγή της αποκοπής φορτίου λόγω υποσυχνότητας είναι ιδιαίτερα σημαντική. Βεβαίως, το μέγεθος της συνεισφοράς του ελεγχόμενου φορτίου στη ρύθμιση συχνότητας έχει να κάνει σαφώς με την ποσότητα αυτού σε σχέση με τη διαταραχή που θεωρούμε.

5.3 Μέγεθος ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ΕιΣΠ

Σε αυτή τη σειρά προσομοιώσεων, θεωρούμε ότι ολόκληρο το φορτίο του ΕιΣΠ είναι ελεγχόμενο ωμικό TCL. Θέλουμε να εξετάσουμε την επίδραση της ποσότητας του φορτίου αυτού στη ρύθμιση συχνότητας σε σχέση με τη διαταραχή. Μεταβάλλουμε, λοιπόν, την ποσότητα του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου κρατώντας σταθερό το μέγεθος της διαταραχής.

Σταθερές τιμές παραμέτρων σε αυτή τη σειρά προσομοιώσεων

Ελεγχόμενο ωμικό θερμοστατικό φορτίο = 100% (Συνολικό φορτίο ΕιΣΠ)

Ονομαστική παραγωγή ΕιΣΠ = 0,5 α.μ.

Ονομαστική παραγωγή συστήματος = 0,5 α.μ.

Φορτίο συστήματος = 0,55 α.μ. → 0,75 α.μ.

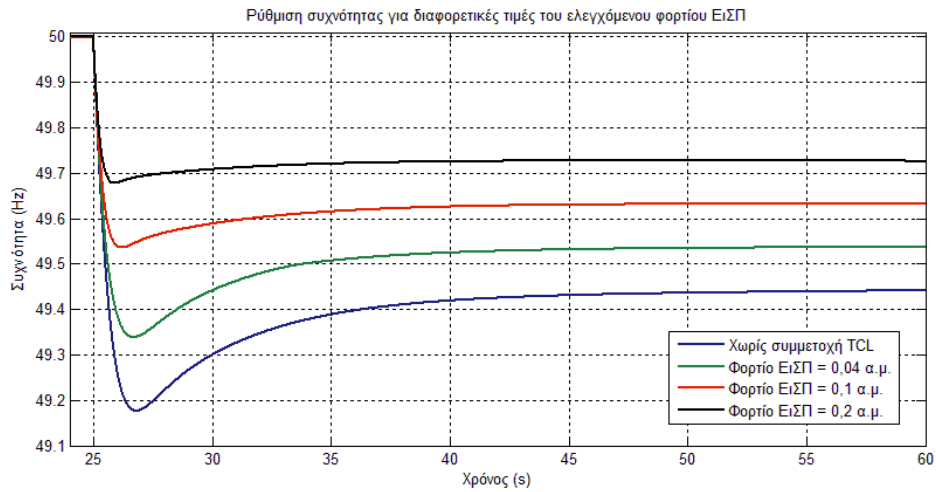
Κέρδος ρύθμισης ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ΕιΣΠ = 5

Ανηγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 4,5 \text{ s}$

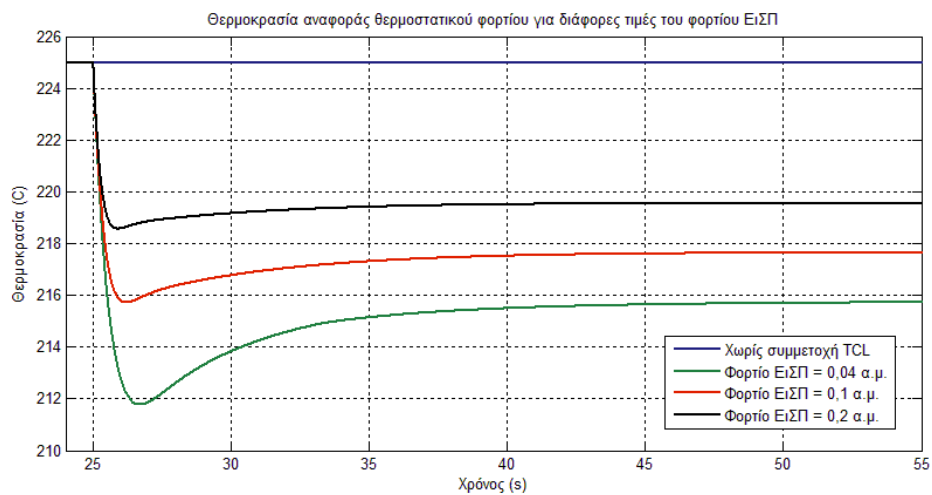
$S_B = 100 \text{ MVA}$

Διαταραχή = 0,2 α.μ. = 20 MW

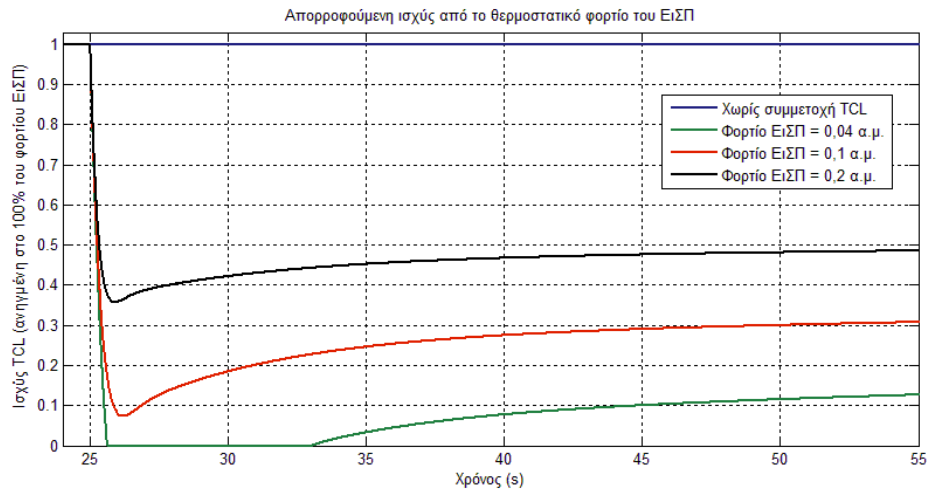
Εκτελούμε όλες τις προσομοιώσεις και παραθέτουμε, σε κοινά διαγράμματα, τις γραφικές παραστάσεις της συχνότητας, της θερμοκρασίας αναφοράς, της απορροφούμενης ισχύος από το θερμοστατικό φορτίο του ΕιΣΠ και της θερμοκρασίας του θερμαινόμενου χώρου.



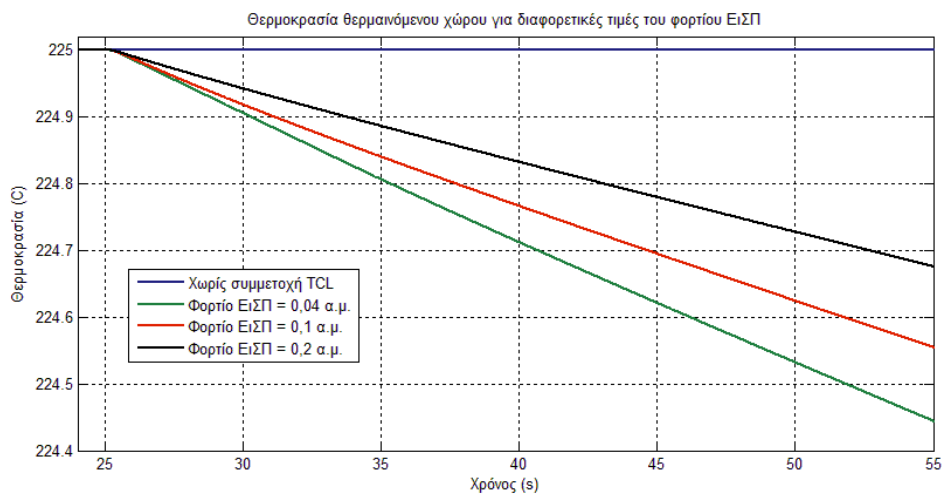
Σχήμα 5-19: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας για διαφορετικές τιμές του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕΙΣΠ



Σχήμα 5-20: Θερμοκρασία αναφοράς του θερμοστατικού φορτίου για διαφορετικές τιμές του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕΙΣΠ



Σχήμα 5-21: Απορροφούμενη ισχύς από το θερμοστατικό φορτίο για διαφορετικές τιμές του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕΙΣΠ



Σχήμα 5-22: Θερμοκρασία θερμαινόμενου χώρου για διαφορετικές τιμές του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕΙΣΠ

Φορτίο ΕιΣΠ	Συμμετοχή TCL	Ελάχιστη τιμή της συχνότητας	Μέγιστη μεταβολή ισχύος TCL
για όλα τα φορτία	όχι	49,1773 Hz	0 α.μ.
0,04 α.μ.	ναι	49,3386 Hz	-0,04 α.μ.
0,1 α.μ.	ναι	49,5359 Hz	-0,0927 α.μ.
0,2 α.μ.	ναι	49,6783 Hz	-0,1285 α.μ.

Πίνακας 5-4: Ελάχιστη τιμή της συχνότητας και μέγιστη μείωση της ισχύος του θερμοστατικού φορτίου ανάλογα με την ποσότητα του φορτίου του ΕιΣΠ και τη συμμετοχή ή μη του TCL

Είναι σαφές ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου, τόσο πιο αισθητή είναι η συμμετοχή του φορτίου στη μεταβολή της συχνότητας. Ακόμη και στην περίπτωση που το φορτίο αυτό αποτελεί ένα μικρό μόνο μέρος της διαταραχής, η συμβολή του στο γρήγορο “μάζεμα” της συχνότητας είναι σημαντική. Το ωμικό θερμοστατικό φορτίο, λόγω της δυνατότητας που έχει για ταχεία απόκριση, μπορεί να μειώσει πολύ γρήγορα την ισχύ του στο μεταβατικό στάδιο (αναλόγως, πάντα, με το κέρδος ρύθμισης) και με αυτόν τον τρόπο να επιτευχθεί πιο γρήγορη εξισορρόπηση παραγωγής – ζήτησης.

Η ρύθμιση συχνότητας που προσφέρουν τα θερμοστατικά φορτία, δηλαδή η μείωση της απορροφούμενης ισχύος αυτών, εκδηλώνεται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας τους, γεγονός που σημαίνει μείωση της αποθηκευμένης θερμικής τους ενέργειας. Οι γραφικές παραστάσεις της θερμοκρασίας του θερμαινόμενου χώρου φαίνονται στο Σχήμα 5-22. Η κατάσταση αυτή παρουσιάζει ομοιότητες με τις διατάξεις αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (όπως π.χ. ηλεκτρικοί συσσωρευτές).

5.4 Κέρδος ρύθμισης ελεγχόμενου TCL ΕιΣΠ

Σε αυτή τη σειρά προσομοιώσεων, θεωρούμε και πάλι ότι ολόκληρο το φορτίο του ΕιΣΠ είναι ελεγχόμενο ωμικό TCL. Σκοπός μας είναι να μελετήσουμε την επίδραση του κέρδους, με το οποίο το φορτίο συμμετέχει στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας.

Σταθερές τιμές παραμέτρων σε αυτή τη σειρά προσομοιώσεων

Ελεγχόμενο ωμικό θερμοστατικό φορτίο = 100% (Συνολικό φορτίο ΕιΣΠ)

Ονομαστική παραγωγή ΕιΣΠ = 0,5 α.μ.

Φορτίο ΕιΣΠ = 0,1 α.μ.

Ονομαστική παραγωγή συστήματος = 0,5 α.μ.

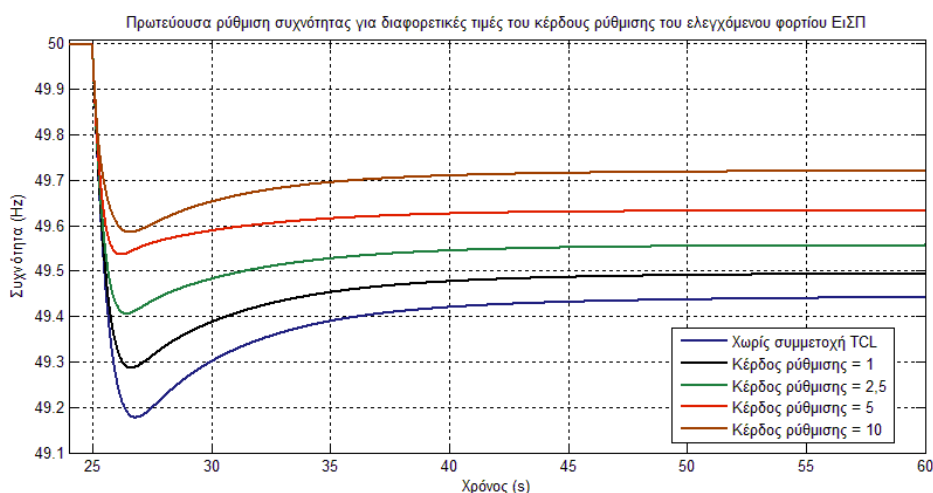
Φορτίο συστήματος = 0,55 α.μ. → 0,75 α.μ.

Ανηγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 4,5 \text{ s}$

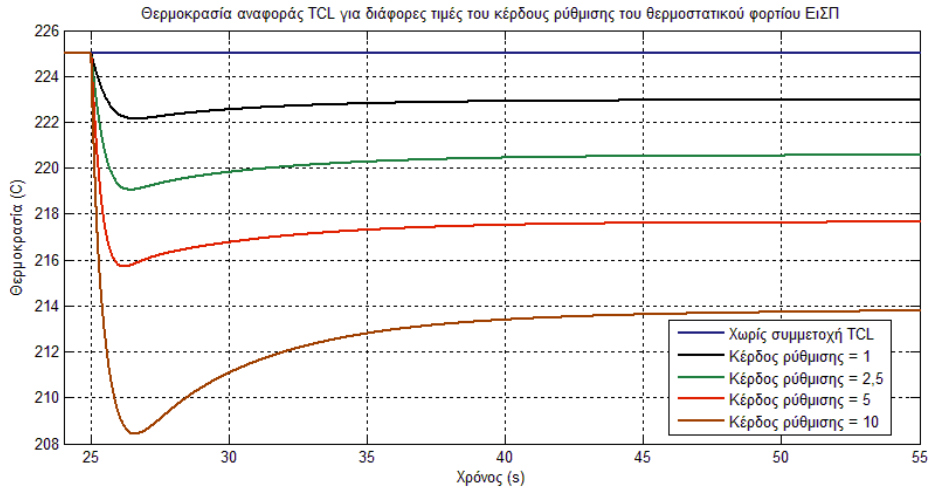
$S_B = 100 \text{ MVA}$

Διαταραχή = 0,2 α.μ. = 20 MW

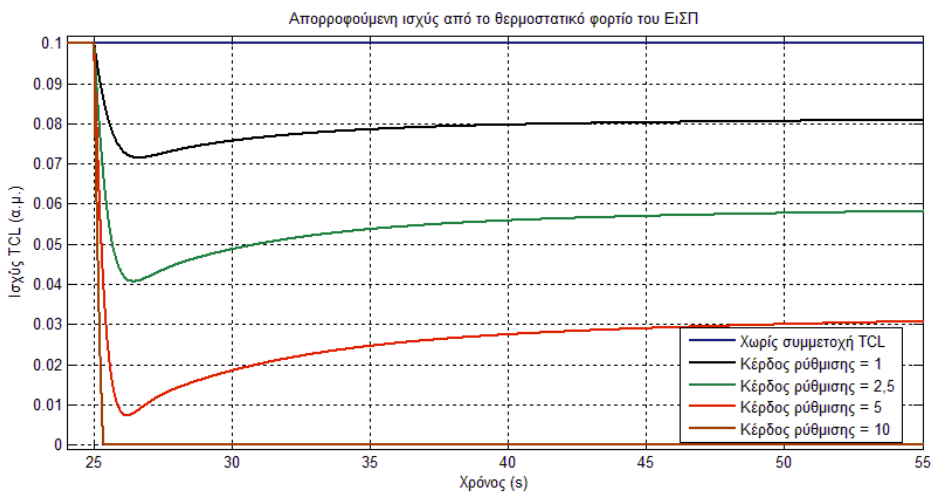
Μεταβάλλουμε, λοιπόν, το κέρδος ρύθμισης του θερμοστατικού φορτίου και εκτελούμε τις προσομοιώσεις. Στη συνέχεια παραθέτουμε, σε κοινά διαγράμματα, τις γραφικές παραστάσεις της συχνότητας, της θερμοκρασίας αναφοράς, της απορροφούμενης ισχύος από το θερμοστατικό φορτίο του ΕιΣΠ και της θερμοκρασίας του θερμαινόμενου χώρου.



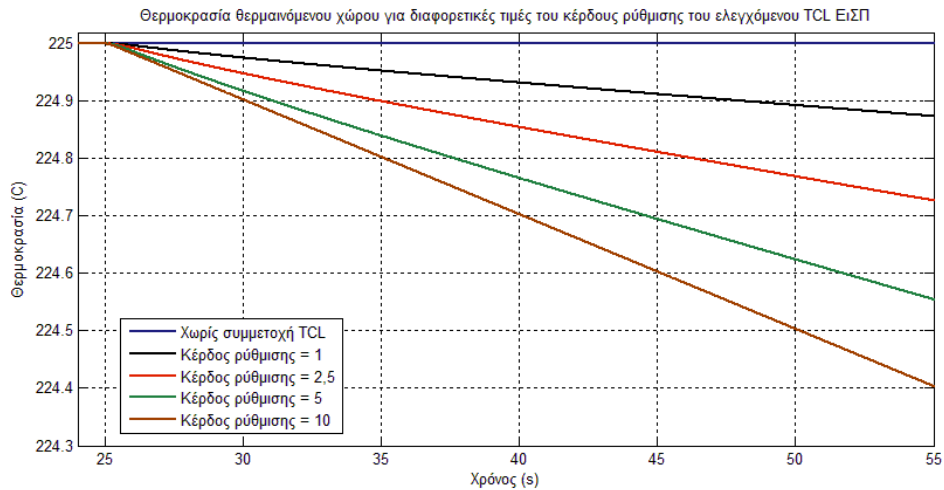
Σχήμα 5-23: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας για διαφορετικές τιμές του κέρδους ρύθμισης του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ



Σχήμα 5-24: Θερμοκρασία αναφοράς του θερμοστατικού φορτίου για διαφορετικές τιμές του κέρδους ρύθμισης του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ



Σχήμα 5-25: Απορροφούμενη ισχύς από το θερμοστατικό φορτίο για διαφορετικές τιμές του κέρδους ρύθμισης του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ



Σχήμα 5-26: Θερμοκρασία θερμαινόμενου χώρου για διαφορετικές τιμές του κέρδους ρύθμισης του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ

Συμμετοχή TCL	Κέρδος ρύθμισης	Ελάχιστη τιμή της συχνότητας	Μέγιστη μεταβολή ισχύος TCL	
όχι	-	49,1773 Hz	0 α.μ.	-0%
ναι	1	49,2866 Hz	-0,0285 α.μ.	-28,5%
ναι	2,5	49,4058 Hz	-0,0593 α.μ.	-59,3%
ναι	5	49,5359 Hz	-0,0927 α.μ.	-92,7%
ναι	10	49,5856 Hz	-0,1 α.μ.	-100%

Πίνακας 5-5: Ελάχιστη τιμή της συχνότητας και μέγιστη μείωση της ισχύος του θερμοστατικού φορτίου ανάλογα με το κέρδος ρύθμισης του ελεγχόμενου φορτίου του ΕιΣΠ και τη συμμετοχή ή μη αυτού

Από τις διεξαχθείσες προσομοιώσεις, μπορούμε να δούμε ότι καθώς το κέρδος ρύθμισης του ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ αυξάνει, η συμμετοχή του στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας γίνεται πιο έντονη, με την έννοια ότι μειώνει περισσότερο και πιο γρήγορα την ισχύ του.

Αναλόγως, λοιπόν, το κέρδος ρύθμισης του φορτίου, μεταβάλλεται και η συμμετοχή αυτού στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Βάσει αυτού, μπορούμε να θέσουμε διαφορετικό κέρδος ρύθμισης σε κάθε φορτίο, ανάλογα με τις δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά του. Δηλαδή, εάν θέλουμε να προστατέψουμε ένα ευαίσθητο φορτίο από μεγάλες μεταβολές στην παρεχόμενη ισχύ του ή εάν το φορτίο δεν επιτρέπει μεγάλες μεταβολές στη θερμοκρασία, τότε πρέπει να θέσουμε μικρό κέρδος ρύθμισης σε αυτό το φορτίο.

5.5 Αυτορρύθμιση φορτίου ΕιΣΠ

Εκτελούμε μία σειρά προσομοιώσεων μεταβάλλοντας την αυτορρύθμιση του φορτίου του ΕιΣΠ με σκοπό να παρατηρήσουμε τη συμβολή της αυτορρύθμισης στη ρύθμιση συχνότητας. Η αυτορρύθμιση μεταβάλλεται με την κατάλληλη συμμετοχή επαγωγικών κινητήρων και ωμικού θερμοστατικού φορτίου, το οποίο δεν παρουσιάζει εξάρτηση από τη συχνότητα. Καθώς, η συμμετοχή των επαγωγικών κινητήρων στο συνολικό φορτίο αυξάνει, η αυτορρύθμιση αυτού επίσης αυξάνει, μέχρι το σημείο, όπου το σύνολο του φορτίου αποτελείται μόνο από κινητήρες. Στην περίπτωση αυτή, ο συντελεστής αυτορρύθμισης του φορτίου του ΕιΣΠ ισούται με 2,86% / 1%. Σημειώνουμε ότι ο συντελεστής αυτορρύθμισης που θεωρεί ο ENTSO-E για το συνολικό φορτίο είναι ίσος με 1% / Hz, δηλαδή ίσος με 0,5% / 1%.

Τιμές παραμέτρων

Ονομαστική παραγωγή ΕιΣΠ = 1 α.μ.

Φορτίο ΕιΣΠ = 1 α.μ.

Ονομαστική παραγωγή συστήματος = 1 α.μ.

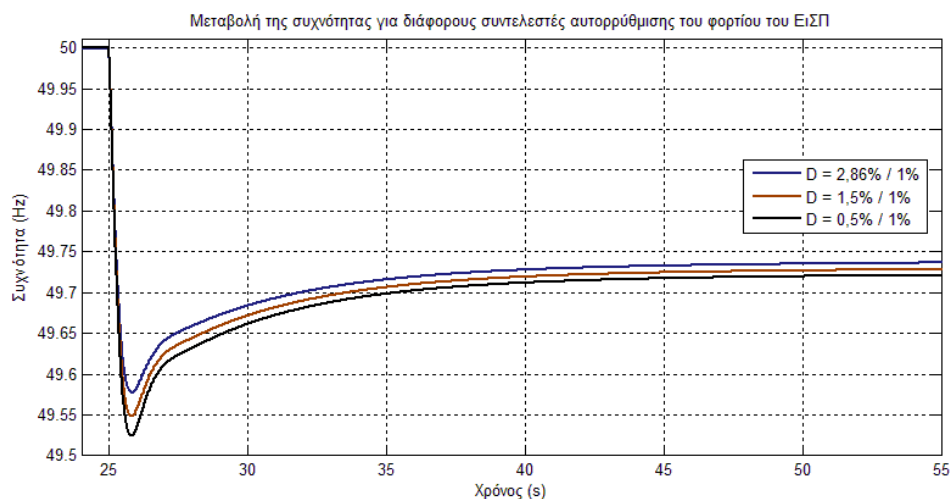
Φορτίο συστήματος = 0,5 α.μ. → 0,7 α.μ.

Τα θερμοστατικά φορτία δε συμμετέχουν στη ρύθμιση συχνότητας.

Ανηγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 4,5 \text{ s}$

$S_B = 100 \text{ MVA}$

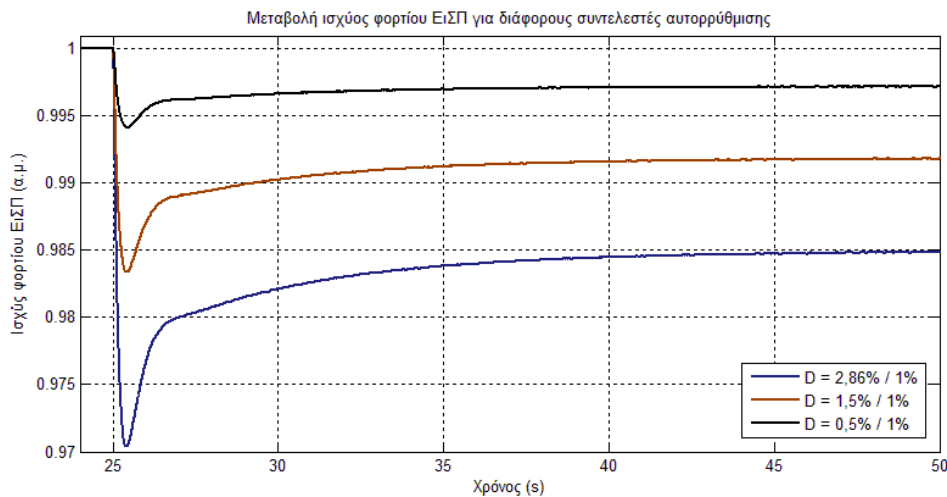
Διαταραχή = 0,2 α.μ. = 20 MW



Σχήμα 5-27: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αυτορρύθμισης του φορτίου του ΕιΣΠ

Αυτορρύθμιση φορτίου ΕιΣΠ	Ελάχιστη τιμή της συχνότητας	Μόνιμη τιμή της συχνότητας
D = 2,86% / 1%	49,5771 Hz	49,7375 Hz
D = 2% / 1%	49,5598 Hz	49,7328 Hz
D = 1,5% / 1%	49,5487 Hz	49,7294 Hz
D = 1% / 1%	49,5370 Hz	49,7260 Hz
D = 0,5% / 1%	49,5246 Hz	49,7224 Hz

Πίνακας 5-6: Ελάχιστη και μόνιμη τιμή της συχνότητας ανάλογα με την τιμή του συντελεστή αυτορρύθμισης φορτίου του ΕιΣΠ



Σχήμα 5-28: Μεταβολή ισχύος φορτίου ΕιΣΠ για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αυτορρύθμισης φορτίου του ΕιΣΠ

Από τις παραπάνω προσομοιώσεις, μπορούμε να δούμε τη θετική συμβολή της αυτορρύθμισης του φορτίου στη ρύθμιση συχνότητας, η οποία μάλιστα είναι πιο αισθητή στη μεταβατική κατάσταση.

Αξίζει να αναφέρουμε την προοπτική της συγκέντρωσης μεγάλης ποσότητας φορτίου, το οποίο παρουσιάζει υψηλή εξάρτηση από τη συχνότητα, από έναν ΕιΣΠ, με σκοπό αυτός να προσφέρει ένα μικρό μέρος της πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας από την αυτορρύθμιση του φορτίου του. Με αυτόν τον τρόπο ο ΕιΣΠ μπορεί να εκμεταλλευτεί την αυτορρύθμιση που παρουσιάζουν όλα τα μεμονωμένα φορτία, τα οποία από μόνα τους δε θα ήταν σε θέση να προσφέρουν την εν λόγω επικουρική υπηρεσία, διότι το μέγεθος της προσφοράς τους θα ήταν πολύ μικρό και άρα μη αποδεκτό. Ωστόσο, καθώς ο ΕιΣΠ συνδυάζει διάφορες πηγές και φορτία και έχει αρκετά μεγάλο μέγεθος, ώστε να μπορεί να εμφανίζεται στις αγορές ενέργειας και

επικουρικών υπηρεσιών σαν ισοδύναμος συμβατικός σταθμός παραγωγής, είναι σε θέση να κάνει προσφορές για ρύθμιση συχνότητας, οι οποίες είναι αποδεκτές από το διαχειριστή του συστήματος.

5.6 Υψηλό φορτίο-Μειωμένη εφεδρεία πρωτεύουσας ρύθμισης

Στην προσομοίωση αυτή, θεωρούμε την περίπτωση ενός αυτόνομου συστήματος, όπου έχουμε υψηλή φόρτιση του συστήματος και μειωμένη εφεδρεία πρωτεύουσας ρύθμισης. Θέλουμε να τονίσουμε τη σημασία της ύπαρξης ελεγχόμενου φορτίου σε μία τέτοια περίπτωση, ειδικά σε ένα ασθενές σύστημα.

Τιμές παραμέτρων

Ελεγχόμενο θερμοστατικό φορτίο = 100% (Συνολικό φορτίο ΕιΣΠ)

Ονομαστική παραγωγή ΕιΣΠ = 0,5 α.μ.

Φορτίο ΕιΣΠ = 0,1 α.μ.

Κέρδος ρύθμισης ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου ΕιΣΠ = 5

Ονομαστική παραγωγή συστήματος = 0,5 α.μ.

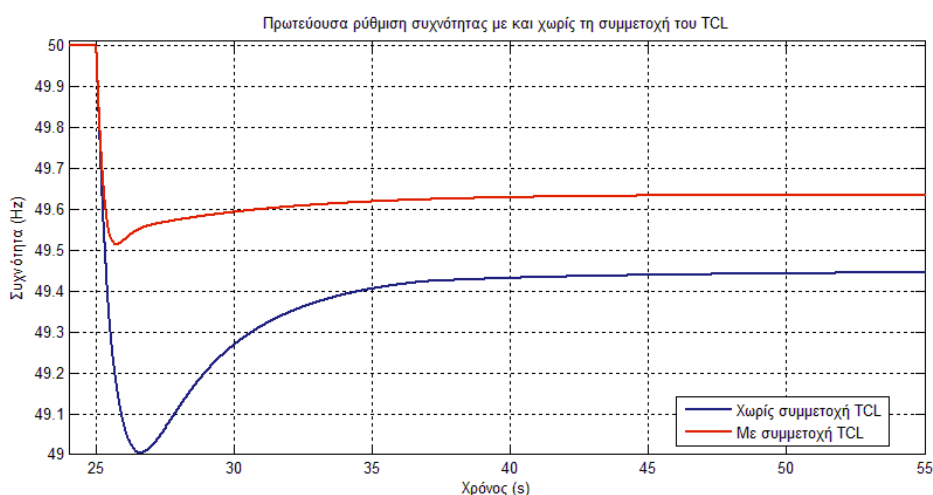
Φορτίο συστήματος = 0,7 α.μ. → 0,9 α.μ.

Μέγιστη ισχύς εξόδου μονάδων = 110% της ονομαστικής

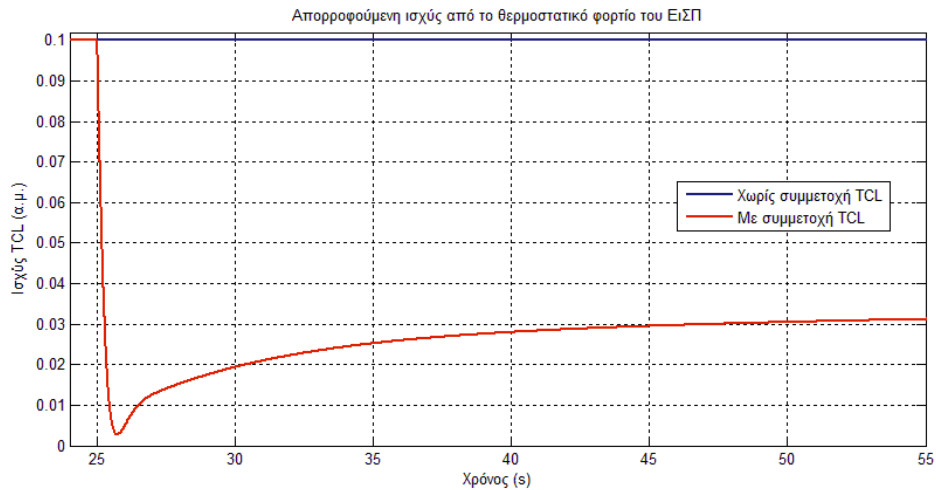
Ανηγμένη σταθερά αδρανείας: $H = 3$ s

$S_B = 100$ MVA

Διαταραχή = 0,2 α.μ. = 20 MW



Σχήμα 5-29: Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με και χωρίς τη συμμετοχή του θερμοστατικού φορτίου του ΕιΣΠ σε κατάσταση υψηλής φόρτισης του συστήματος και μειωμένης εφεδρείας πρωτεύουσας ρύθμισης



Σχήμα 5-30: Απορροφούμενη ισχύς από το θερμοστατικό φορτίο του ΕιΣΠ με και χωρίς τη συμμετοχή αυτού σε κατάσταση υψηλής φόρτισης του συστήματος και μειωμένης εφεδρείας πρωτεύουσας ρύθμισης

Στην περίπτωση που έχουμε μειωμένη εφεδρεία πρωτεύουσας ρύθμισης, μία διαταραχή μπορεί να προκαλέσει πολύ μεγάλη μεταβατική πτώση συχνότητας. Το γεγονός αυτό θα προκαλέσει με τη σειρά του αποκοπή φορτίου λόγω υποσυχνότητας αποσυνδέοντας ολόκληρους feeders, στους οποίους συνδέονται και μονάδες ΔΠ εκτός από φορτίο. Με την παρουσία ελεγχόμενου θερμοστατικού φορτίου μία τέτοια κατάσταση θα μπορούσε να αποφευχθεί. Έχοντας ελεγχόμενο φορτίο στη διάθεσή μας, θα μπορούσαμε, επίσης, να εφαρμόσουμε μία μέθοδο ελεγχόμενης αποκοπής φορτίου λόγω υποσυχνότητας, διακόπτοντας την τροφοδοσία σε φορτία τα οποία δεν είναι τόσο ευαίσθητα στην αρχή και προχωρώντας σε περισσότερα ευαίσθητα αν χρειάζεται. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσαμε να αποφύγουμε την αποκοπή των μονάδων ΔΠ και την αποκοπή φορτίου, το οποίο ενδεχομένως είναι αρκετά σημαντικό.

6

Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

6.1 Γενικά συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήσαμε τον τρόπο και την επίδραση της συμμετοχής του φορτίου στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, μέσω των Εικονικών Σταθμών Παραγωγής και παρατηρήσαμε την αξία αυτής. Πιο συγκεκριμένα, ασχοληθήκαμε με ωμικά θερμοστατικά φορτία, τα οποία ελέγχονται από PID ελεγκτές και εξετάσαμε τη σημασία της αυτορρύθμισης του φορτίου.

Συνοπτικά, από την εργασία μας πάνω στο συγκεκριμένο θέμα, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Ο ΕιΣΠ συνδυάζει διάφορες μονάδες παραγωγής και φορτία και έχει το μέγεθος, ώστε να εμφανίζεται στο δίκτυο σαν συμβατικός σταθμός παραγωγής και να είναι σε θέση να κάνει προσφορές στις αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών. Λόγω του γεγονότος αυτού, ο ΕιΣΠ μπορεί να εκμεταλλευτεί ακόμα και την (ενδεχομένως) πολύ μικρή συνεισφορά από την πλευρά του φορτίου στη ρύθμιση συχνότητας, με την έννοια ότι αυτή η μικρή ποσότητα που προσφέρεται από το φορτίο συμπληρώνεται από ρύθμιση που προέρχεται από πηγές και έτσι μπορεί να πραγματοποιηθεί μία -αποδεκτή από το διαχειριστή- προσφορά. Στο σημείο αυτό, να αναφέρουμε και πάλι, την ενδιαφέρουσα προοπτική της συγκέντρωσης, από έναν ΕιΣΠ, μεγάλης ποσότητας φορτίου, το οποίο παρουσιάζει υψηλή εξάρτηση από τη συχνότητα, με σκοπό ο ΕιΣΠ να προσφέρει ένα μικρό μέρος της πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας από την αυτορρύθμιση του φορτίου του. Επίσης, το ελεγχόμενο θερμοστατικό φορτίο του ΕιΣΠ δίνει τη δυνατότητα στον ΕιΣΠ να είναι σε θέση να εγγυηθεί μία συνολική προσφορά ποσότητας ενέργειας

ή επικουρικής υπηρεσίας (π.χ. πρωτεύουσας ρύθμισης). Δηλαδή, το ευέλικτο φορτίο του ΕιΣΠ, μπορεί να μειώσει την αβεβαιότητα, σε ένα βαθμό, που προκαλείται από τις ΑΠΕ, οι οποίες παρουσιάζουν έντονα στοχαστικό χαρακτήρα.

- Όπως διαπιστώσαμε από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, το ωμικό θερμοστατικό φορτίο, λόγω της δυνατότητας που έχει για ταχεία απόκριση, μπορεί να μειώσει πολύ γρήγορα την ισχύ του στο μεταβατικό στάδιο και με αυτόν τον τρόπο να επιτευχθεί πιο γρήγορη εξισορρόπηση παραγωγής – ζήτησης και άρα μικρότερη μεταβατική πτώση της συχνότητας σε σχέση με την περίπτωση που αυτό δε συμμετέχει. Για αυτό το λόγο, η συμμετοχή του φορτίου στη ρύθμιση συχνότητας θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη, όπως είδαμε, σε ασθενή συστήματα (π.χ. μη διασυνδεδεμένα νησιά), ειδικά σε περίπτωση μειωμένης εφεδρείας πρωτεύουσας ρύθμισης, καθώς θα μπορούσε να αποτρέψει μία ενδεχόμενη αποκοπή φορτίου λόγω υποσυχνότητας. Η αποκοπή φορτίου γίνεται με την αποσύνδεση ολόκληρων feeders, γεγονός που σημαίνει ότι εκτός από φορτίο αποκόπτεται και κάποια ποσότητα ΔΠ. Επομένως, η αποφυγή της αποκοπής φορτίου λόγω υποσυχνότητας είναι ιδιαίτερα σημαντική και το ελεγχόμενο φορτίο μπορεί να συμβάλλει ουσιαστικά σε αυτό.
- Τα θερμοστατικά φορτία λόγω της θερμικής τους αδράνειας επιτρέπουν την προσωρινή διακοπή ή μείωση της παρεχόμενης ισχύος με κάποια, μικρή βεβαίως, μείωση της εξυπηρέτησης του χρήστη. Ο διαχειριστής του ΕιΣΠ έχει τη δυνατότητα, δίνοντας σε κάθε ομάδα φορτίων διαφορετική συμμετοχή στη ρύθμιση συχνότητας ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της, να πετύχει την επιθυμητή συνολική ρύθμιση, επιτυγχάνοντας μία καλή ισορροπία ανάμεσα στο μέγεθος της μείωσης της απορροφούμενης ισχύος από το φορτίο και στην προστασία του φορτίου από μεγάλες και συχνές μεταβολές στην παρεχόμενη ισχύ του ή σε μεγάλες μεταβολές θερμοκρασίας.

6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Όσον αφορά τις προτάσεις για περαιτέρω μελέτη προτείνουμε τα ακόλουθα:

- Στην εργασία μας δε λάβαμε υπόψη μας τις μεταβολές της τάσης που είναι σημαντικό στοιχείο για τη συμπεριφορά των θερμοστατικών φορτίων. Επίσης για τη μοντελοποίηση του δικτύου επιλέξαμε το μοντέλο ισχύος - ροπής ενός ζυγού. Επομένως, είναι λογικό να προτείνουμε μία αναλυτικότερη μελέτη σε ένα αρκετά μεγάλο δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις μεταβολές της τάσης όσο και τους περιορισμούς που τίθενται από την τοπολογία του δικτύου.

- Η μελέτη μας περιορίστηκε σε ωμικά θερμοστατικά φορτία, τα οποία ελέγχονται από PID ελεγκτές θερμοκρασίας. Η μελέτη θα μπορούσε να επεκταθεί και σε άλλα θερμοστατικά φορτία όπως για παράδειγμα αντλίες θερμότητας. Επιπλέον, σημαντικό κομμάτι στην έρευνα αποτελεί η μεθοδολογία ελέγχου των θερμοστατικών φορτίων για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών, όπου και υπάρχει μεγάλο περιθώριο για μελέτη και εργασία.
- Τέλος, όπως είναι αναμενόμενο, προτείνουμε τη σύγκριση της οικονομικής απόδοσης προσφορών ρύθμισης συχνότητας από έναν ΕισΠ, οι οποίες προέρχονται από διάφορους συνδυασμούς μονάδων ΔΠ και ελεγχόμενων φορτίων σε σχέση με προσφορές, που αφορούν την ίδια υπηρεσία από συμβατικούς σταθμούς.

Βιβλιογραφία

- [1] S. Koch, “Demand Response Methods for Ancillary Services and Renewable Energy Integration in Electric Power Systems”, Ph.D. Dissertation, ETH, Zurich 2012.
- [2] L. Philipson and H. L. Willis, “A history of the electric power industry,” in *Understanding Electric Utilities and De-Regulation*. CRC Press, 2005, pp. 71 - 102.
- [3] UCTE. (2011) UCPTe/UCTE - The 50 year success story - Evolution of a European interconnected grid. [Online]. Available: <http://www.entsoe.eu>
- [4] Κ. Βουρνάς, Β. Κ. Παπαδιάς, Κ. Ντελκής, “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας - Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2011.
- [5] International Energy Agency. (2005) Variability of wind power and other renewables - Management options and strategies. [Online]. Available: <http://www.iea.org>
- [6] R. Baxter, “Energy storage: How solar can always meet demand,” *Renewable Energy World*, October 2008. [Online]. Available: <http://www.renewableenergyworld.com>
- [7] C. Ziems, S. Meinke, H. Weber, E. Hassel, and J. Nocke, “Influence of intermittent wind and photovoltaic power production onto thermal power plans in Germany until 2020,” in *Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Stockholm, Sweden, August 2011.
- [8] B. Kirby and M. Milligan, “Examination of capacity and ramping impacts of wind energy on power systems,” National Renewable Energy Laboratory, USA, Tech. Rep. NREL/TP-500-42872, July 2008.
- [9] H. Holttinen, P. Meibom, A. Orths, B. Lange, M. O'Malley, J. O. Tande, A. Estanqueiro, E. Gomez, L. Söder, G. Strbac, J. C. Smith, and F. van Hulle, “Impacts of large amounts of wind power on design and operation of power systems, results of IEA collaboration,” *Wind Energy*, vol. 14, no. 2, pp. 179 - 192, March 2011.

- [10] C. Rahmann, H.-J. Haubrich, A. Moser, R. Palma-Behnke, L. Vargas, and M. Salles, "Justified fault-ride-through requirements for wind turbines in power systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 3, pp. 1555 - 1563, August 2011.
- [11] S. Achilles, S. Schramm, and J. Bebic, "Transmission system performance analysis for high-penetration photovoltaics," GE Global Research Niskayuna, New York, National Renewable Energy Laboratory, USA. Subcontract Report NREL/SR-581-42300, February 2008.
- [12] E. Coster, J. Myrzik, B. Kruimer, and W. Kling, "Integration issues of distributed generation in distribution grids," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 28 - 39, January 2011.
- [13] J. Enslin, "Network impacts of high penetration of photovoltaic solar power systems," in *Power and Energy Society General Meeting 2010 IEEE*, July 2010.
- [14] P. L. Joskow, "Lessons learned from electricity market liberalization," *The Energy Journal*, vol. 29, pp. 9 - 42, 2008.
- [15] R. Belmans, "Liberalized markets and technical boundary conditions," *The Belgian energy policy towards 2030 within a European framework*, 2007. [Online]. Available: <http://www.ce2030.be>
- [16] Y. G. Rebours, D. S. Kirschen, M. Trotignon, and S. Rossignol, "A survey of frequency and voltage control ancillary services - Part II: Economic features," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 1, pp. 358 - 366, February 2007.
- [17] E. F. Camacho, T. Samad, M. Garcia-Sanz, and I. Hiskens, "Control for renewable energy and smart grids," in *The Impact of Control Technology*, T. Samad and A. Annaswamy, Eds., February 2011. [Online]. Available: <http://www.ieeecss.org>
- [18] Smart Grids European Technology Platform. Official website. [Online]. Available: <http://www.smartgrids.eu>
- [19] European Commission. (2009, July) ICT for a low-carbon economy - Smart electricity distribution networks. Directorate- General Information Society and Media, ICT for Sustainable Growth Unit. [Online]. Available: <http://ec.europa.eu>
- [20] Y. He, N. Jenkins, J. Wu, and M. Eltayeb, "ICT infrastructure for smart distribution networks," in *Power Line Communications and its Applications, IEEE International Symposium on*, March 2010.
- [21] F. Wu, K. Moslehi, and A. Bose, "Power system control centers: Past, present, and future," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 11, pp. 1890 - 1908, November 2005.

- [22] D. Novosel, V. Madani, B. Bhargava, K. Vu, and J. Cole, "Dawn of the grid synchronization," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 6, no. 1, pp. 49 - 60, January/February 2008.
- [23] T. Ringelband, M. Lange, M. Dietrich, and H.-J. Haubrich, "Potential of improved wind integration by dynamic thermal rating of overhead lines," in *PowerTech*, 2009 IEEE Bucharest, July 2009.
- [24] J. De La Ree, V. Centeno, J. Thorp, and A. Phadke, "Synchronized phasor measurement applications in power systems," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 1, no. 1, pp. 20 - 27, June 2010.
- [25] G. Hug-Glanzmann and G. Andersson, "Decentralized optimal power flow control for overlapping areas in power systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 1, pp. 327 - 336, February 2009.
- [26] European Technology Platform on Smart Systems Integration. (2009, October) European Roadmap Electrification of Road Transport, Version 3.5. [Online]. Available: <http://www.smart-systems-integration.org>
- [27] C. Foote, A. Roscoe, R. Currie, G. Ault, and J. McDonald, "Ubiquitous energy storage," in *Future Power Systems*, 2005 International Conference on, November 2005.
- [28] W. Steely. (2011, November) Functional requirements for electric energy storage applications on the power system grid: What storage has to do to make sense. Electric Power Research Institute. Technical Update. [Online]. Available: <http://www.epri.com>
- [29] S. Shao, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "An approach for demand response to alleviate power system stress conditions," in *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, July 2011.
- [30] G. Hefner, C. Goldman, B. Kirby, and M. Kintner-Meyer, "Loads providing ancillary services: Review of international experience," U.S. Department of Energy, Ernesto Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Tech. Rep. LBNL-62701, ORNL/TM- 2007/060, PNNL-16618, May 2007.
- [31] A. Esser, A. Kamper, M. Franke, D. Möst, and O. Rentz, "Scheduling of electrical household appliances with price signals," in *Operations Research Proceedings 2006*, K.-H. Waldmann and U. M. Stocker, Eds. Springer Science+Business Media, 2006, pp. 253 - 258.
- [32] F. Schweppe, R. Tabors, J. Kirtley, H. Outhred, F. Pickel, and A. Cox, "Homeostatic utility control," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-99, no. 3, pp. 1151 - 1163, May/June 1980.

- [33] M. Braun and P. Strauss, "A review on aggregation approaches of controllable distributed energy units in electrical power systems," *Distributed Energy Resources, International Journal of*, vol. 4, no. 4, pp. 297 - 319, 2008.
- [34] D. Pudjianto, C. Ramsay, and G. Strbac, "Virtual power plant and system integration of distributed energy resources," *IET Renewable Power Generation*, vol. 1, no. 1, pp. 10 - 16, March 2007.
- [35] N. Hatziaargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 5, no. 4, pp. 78 - 94, July/August 2007.
- [36] A. Krkoleva, M. Kayikci, J. V. Milanovic, and V. Borozan, "Characteristic responses of distribution network cell: The effect of cell structure and configuration," in *Electricity Distribution, CIRED 19th International Conference on*, May 2007.
- [37] T. Petermann, H. Bradke, A. Lüllmann, M. Poetzsch, and U. Riehm, "What happens during a blackout - Consequences of a prolonged and wide-ranging power outage," Office of Technology Assessment at the German Bundestag, Tech. Rep., April 2011.
- [38] J. Bialek, "Why has it happened again? Comparison between the UCTE blackout in 2006 and the blackouts of 2003," in *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, July 2007.
- [39] UCTE. (2007, January) Final Report - System Disturbance on 4 November 2006. [Online]. Available: <https://www.entsoe.eu>
- [40] European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E). Official website. [Online]. Available: <http://www.entsoe.eu>
- [41] Capgemini. (2008, June) Demand Response: A decisive breakthrough for Europe. [Online]. Available: <http://www.capgemini.com>
- [42] J. Torriti, M. G. Hassan, and M. Leach, "Demand response experience in Europe: Policies, programmes and implementation," *Energy*, vol. 35, no. 4, pp. 1575 - 1583, April 2010.
- [43] M. Klobasa, "Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten," Diss. ETH No. 17324, Power Systems Laboratory, ETH Zurich, Switzerland, 2007, in German.
- [44] ΑΔΜΗΕ, Εγχειρίδιο Κατανομής v3.1, 2012.
- [45] ENTSO-E, "P1 – Policy 1: Load-Frequency Control and Performance [C]", Operation Handbook, 2009.

- [46] Ε. Γ. Ποταμιανάκης, “Προσομοίωση και Γραμμικοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας για την Ανάλυση Βραχυπρόθεσμης Ευστάθειας Τάσης”, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2006.
- [47] P. Kundur, “Power System Stability and Control”, ser. The EPRI Power System Engineering Series. McGraw-Hill, New York 1994.
- [48] Μ. Κατσαμπάνη, “Υβριδική Υποστήριξη Ρύθμισης Φορτίου – Συχνότητας από Ανεμογεννήτρια και Υδροηλεκτρικό Σταθμό”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2010.
- [49] Wikipedia contributors, “Diesel engine,” Wikipedia, The Free Encyclopedia, September 2013. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_engine
- [50] G.S. Stavrakakis and G.N. Kariniotakis, “A general simulation algorithm for the accurate assessment of isolated diesel – wind turbines systems interaction. I. A general multimachine power system model,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 3, pp. 577 – 583, September 1995.
- [51] P.C. Krause, O. Wasynczuk and S.D. Sudhoff, “Analysis of electric machinery and Drive Systems”, Second Edition, ser. The IEEE Press Series on Power Engineering. Wiley-Interscience, 2002.
- [52] Ε. Ταξείδης, “Υβριδική Πρωτεύουσα Ρύθμιση Φορτίου Συχνότητας από Α/Γ & Συστοιχία Συσσωρευτών σε μικρό Αυτόνομο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2010.
- [53] Μ. Π. Παπαδόπουλος, “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές”, ΕΜΠ, Αθήνα 1997.
- [54] Σ. Παπαθανασίου, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”, Σημειώσεις Παραδόσεων, ΕΜΠ, Αθήνα 2008.
- [55] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari and S. Kouro, “Power Conversion and Control of Wind Energy Systems”, ser. The IEEE Press Series on Power Engineering. John Wiley & Sons, 2011.
- [56] Ε. Μ. Τσαμπούρης, “Έλεγχος κινητήρων επαγωγής με κριτήρια ελαχιστοποίησης απωλειών”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2008.
- [57] M. Kamgarpour, C. Ellen, S. Esmail, Z. Soudjani, S. Gerwinn, J. L. Mathieu, M. Nils, A. Abate, D. S. Callaway, and M. Fr., “Modeling Options for Demand Side Participation of Thermostatically Controlled Loads”, IREP Symposium - Bulk Power System Dynamics and Control – IX, pp. 1–15, 2013.

- [58] Y.V. Makarov, C. Loutan, J. Ma, and P. De Mello, “Operational impacts of wind generation on California power systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(2):1039–1050, 2009.
- [59] D.A. Halamay, T.K.A. Brekken, A. Simmons, and S. McArthur, “Reserve requirement impacts of large-scale integration of wind, solar, and ocean wave power generation,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2(3):321–328, Jul. 2011.
- [60] D.S. Callaway and I.A. Hiskens, “Achieving controllability of electric loads,” *Proceedings of the IEEE*, 99(1):184–199, 2011.
- [61] D.S. Callaway, “Can smaller loads be profitably engaged in power system services?,” In *Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, 2011.
- [62] J.L. Mathieu, M. Dyson, and D.S. Callaway, “Using residential electric loads for fast demand response: The potential resource and revenues, the costs, and policy recommendations,” In *Proceedings of the ACEEE Summer Study on Buildings*, Pacific Grove, CA, August 2012.
- [63] J.L. Mathieu, S. Koch, and D.S. Callaway, “State estimation and control of electric loads to manage real-time energy imbalance,” *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(1):430–440, 2013.
- [64] D. Honeywell, “Chapter 10 PID Control”, Caltech, 2000. [Online]. Available: <https://www.cds.caltech.edu>
- [65] D. Pudjianto, C. Ramsay, G. Strbac, The FENIX vision: The Virtual Power Plant and system integration of distributed energy resources, FENIX project deliverable report, London, Δεκέμβριος 2006.
- [66] P. Strauss, T. Meyer, T. Erge, T. Degner, DISPOWER - distributed generation with high penetration of renewable energy sources, Integration of Renewable Energy Sources and Distributed Energy Resources, International Conference on the, 2004, Brussels, 1-3 Δεκεμβρίου 2004, Σελίδες 54-62.
- [67] G.J. Schaeffer, H. Akkermans, CRISP – Distributed Intelligence in Critical Infrastructures for Sustainable Power – Final Summary Report, Ολλανδία, 2006.