



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

**Σχεδίαση εξομοιωτή αδράνειας για ανεμογεννήτριες  
μεταβλητών στροφών - Εφαρμογή στο αυτόνομο σύστημα  
της Ρόδου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Λάμπρος Ν. Παπαγγελής**

**Επιβλέπων:** Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013





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

**Σχεδίαση εξομοιωτή αδράνειας για ανεμογεννήτριες  
μεταβλητών στροφών- Εφαρμογή στο αυτόνομο σύστημα  
της Ρόδου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Λάμπρος Ν. Παπαγγελής**

**Επιβλέπων :** Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 28η Μαρτίου 2013

.....  
Κ.Βουρνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Σ. Παπαθανασίου  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Π.Γεωργιάκης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

.....

Λάμπρος Ν. Παπαγγελής

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

Copyright © Λάμπρος Ν. Παπαγγελής, 2013

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.

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση και σχεδίαση ενός εξομοιωτή αδράνειας για ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών. Η ανάγκη για σχεδίαση του εν λόγω σχήματος ελέγχου προέκυψε από τα προβλήματα που προκάλεσε στην ευστάθεια συχνότητας των αυτόνομων ΣΗΕ η αύξηση της αιολικής διείσδυσης.

Για το σκοπό αυτό διεξάγονται προσομοιώσεις σε περιβάλλον MATLAB/Simulink. Η πλειοψηφία των προσομοιώσεων διεξάγονται χρησιμοποιώντας το εκπαιδευτικό πρόγραμμα WHSSP που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ και είναι κατάλληλο για δυναμικές προσομοιώσεις και μελέτες ευστάθειας διασυνδεδεμένων ή αυτόνομων συστημάτων στα οποία έχουν διεισδύσει μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και κυρίως αιολικά πάρκα. Στη βιβλιοθήκη του WHSSP περιλαμβάνονται τα δύο μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στα οποία εφαρμόζεται ο εξομοιωτής αδράνειας, καθώς και τα διάφορα μοντέλα των συνιστωσών ΣΗΕ τα οποία χρησιμοποιούνται σε αυτή την εργασία.

Αρχικά, περιγράφεται η λειτουργία που πρέπει να τελεί ο εξομοιωτής αδράνεια και δίνονται τα χαρακτηριστικά του. Για την περιγραφή της αρχής σχεδίασης χρησιμοποιείται ένα απλοποιημένο μοντέλο ανάλυσης ευστάθειας συχνότητας. Η συγκεκριμένη αρχή σχεδίασης εφαρμόζεται στη συνέχεια σε δύο απλά συστήματα (αργό και γρήγορο σύστημα) αγνοώντας τη δυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας.

Στη συνέχεια, εισάγονται στα ίδια συστήματα τα δύο μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών και εξετάζεται η επίδραση της δυναμικής συμπεριφοράς τους στο τελικό αποτέλεσμα. Προσομοιώνονται δύο διαφορετικά σημεία λειτουργίας για κάθε μοντέλο ανεμογεννήτριας (μερικό και ολικό φορτίο), ενώ προσδιορίζονται αλλαγές που πρέπει να γίνουν στις ρυθμίσεις τους ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη συνεργασία μεταξύ των διαφόρων σχημάτων ελέγχου κι εντέλει καλύτερο αποτέλεσμα.

Τέλος, εξετάζεται η απόκριση της συχνότητας ενός αυτόνομου συστήματος που βασίζεται στα χαρακτηριστικά της Ρόδου μετά από μια μεγάλη διαταραχή. Συγκεκριμένα προσομοιώνονται δύο σενάρια με διαφορετική κατανομή παραγωγής και υψηλή αιολική διείσδυση. Η διαταραχή είναι η απώλεια της μεγαλύτερης μονάδας παραγωγής και για τα δύο σενάρια. Πρώτα, διαπιστώνεται η ανάγκη για συμμετοχή των ανεμογεννητριών στην αδρανειακή απόκριση του συστήματος. Στη συνέχεια, ο εξομοιωτής αδράνειας εφαρμόζεται και στα αιολικά πάρκα με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών ώστε να εξεταστεί η επίδρασή του στο σύστημα. Επιπλέον, συγκρίνονται τα αποτελέσματα για επιλογή διαφορετικών τιμών για τις παραμέτρους του εξομοιωτή αδράνειας.

## Λέξεις Κλειδιά

Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, εξομοιωτής αδράνειας, ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης, ανεμογεννήτρια πλήρους μετατροπέα, αυτόνομο σύστημα, ευστάθεια συχνότητας, αδρανειακή απόκριση, έλεγχος στροφών, έλεγχος γωνίας πτερυγίων, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

## Abstract

The subject of the present diploma thesis is the analysis and design of an inertia emulator for variable-speed wind turbines. The need for the designing of this control loop occurred due to the problems caused to frequency stability of autonomous power systems by the increase of wind energy penetration.

For this purpose, simulations are carried out in MATLAB/Simulink environment. The majority of the simulations is carried out by using the simulation software WHSSP, which was developed in the Power Systems Laboratory of NTUA and is suitable for dynamic simulations and stability studies of interconnected or autonomous systems in which distributed generation units, mostly wind parks, have penetrated. The two variable-speed wind turbine models, on which the inertia emulator is applied, are included in the model library of WHSSP, as well as the various power system components that are used in this thesis.

At first, the function of the inertia emulator and its characteristics are described. The design principle is presented using a simplified frequency stability analysis model. This design principle is then applied on two simple systems (fast and slow system) ignoring the dynamic behavior of wind turbine generators.

Next, the two variable-speed wind turbine models are inserted in the same simple systems and the effect of their dynamic behavior on the final result is examined. Two different operation points are tested for each wind turbine (partial and full load) and changes to their control loop settings are determined in order to achieve better cooperation between the various control loops and, ultimately, better results.

Finally, the frequency dynamics of the autonomous power system of the island of Rhodes after a large disturbance is simulated. More specifically, two scenarios of high wind penetration and different dispatch of system load among the conventional generator units are examined. The disturbance for both scenarios is the loss of the biggest conventional unit of the island. The need for the wind turbine generators to provide inertial response to the system is demonstrated. Then, the inertia emulator is applied on the wind parks with variable-speed wind turbines for both scenarios and its impact on the system response and frequency stability is examined. The results for two different selections of the inertia emulator parameters are compared.

## **Keywords**

Variable-speed wind turbines, inertia emulator, doubly fed asynchronous generator, full converter wind turbine, autonomous system, frequency stability, inertia response, speed control, pitch control, renewable energy sources



## Πρόλογος

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον καθηγητή ΕΜΠ κ. Κωνσταντίνο Βουρνά υπό την επίβλεψη του οποίου πραγματοποιήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία. Η καθοδήγηση που μου προσέφερε, καθώς και οι συμβουλές και οι υποδείξεις του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στο αποτέλεσμα. Τον ευχαριστώ επίσης για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, για την άριστη συνεργασία που είχαμε και για την τυπικότητά του κατά τη διάρκεια των πολλών συναντήσεών μας.

Ευχαριστώ ακόμα τον διδάκτορα ΕΜΠ κ. Γεώργιο Τσουράκη για τον χρόνο που αφιέρωσε και τη συνεργασία που είχαμε κυρίως στα πρώτα στάδια της διπλωματικής.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και όλους τους ανθρώπους που μου συμπαραστάθηκαν και με στήριξαν κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου στο ΕΜΠ.



## **Περιεχόμενα**

<b>Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή</b> .....	15
1.1. Αιολική ενέργεια – Ανεμογεννήτριες .....	15
1.2. Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών .....	16
1.3. Έννοιες αυτομάτου ελέγχου – Γραμμικοποίηση .....	19
1.3.1. Σημεία ισοροπίας – Ευστάθεια Lyapunov – Γραμμικοποίηση .....	19
1.3.2. Ιδιοδιανύσματα – Ρυθμοί – Συντελεστές συμμετοχής .....	22
1.4. Ρύθμιση συχνότητας ΣΗΕ .....	24
1.4.1. Γενικά για ρύθμιση συχνότητας .....	24
1.4.2. Ρύθμιση συχνότητας σε αυτόνομο σύστημα – Η σημασία της αδράνειας .....	26
1.5. Αρχή λειτουργίας εξομοιωτή αδράνειας .....	28
1.6. Επισκόπηση βιβλιογραφίας .....	29
1.7. Αντικείμενο και δομή της διπλωματικής .....	30
<b>Κεφάλαιο 2 - Περιγραφή περιβάλλοντος προσομοίωσης και μοντέλων συνιστωσών</b> .....	33
2.1. Περιβάλλον WHSSP .....	33
2.1.1. Γενικά .....	33
2.1.2. Αλγεβρικές εξισώσεις δικτύου .....	35
2.2. Γενική δομή μοντέλων στο Simulink .....	40
2.2.1. Δομή διατάξεων ΣΗΕ .....	40
2.2.2. Δομή μοντέλου επίλυσης των εξισώσεων του δικτύου .....	41
2.3. Μοντέλα συνιστωσών .....	44
2.3.1. Σύγχρονη γεννήτρια .....	44
2.3.2. Τριφασική μηχανή επαγωγής .....	47
2.3.3. Αυτόματος ρυθμιστής τάσης (APT) .....	48
2.3.4. Στρόβιλοι και ρυθμιστές στροφών .....	49
2.3.5. Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με μηχανή επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα (Τύπος Α) .....	51
2.3.6. Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (Τύπος Γ) .....	52
2.3.7. Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών πλήρους μετατροπέα ισχύος (Τύπος Δ) .....	61
<b>Κεφάλαιο 3 - Αρχή Σχεδίασης Εξομοιωτή Αδράνειας κι Εφαρμογή σε απλά συστήματα</b> .....	67

3.1.Γενικό σύστημα.....	67
3.2. Σχεδίαση για σύστημα Ατμοστρόβιλου –Απομονωμένου φορτίου.....	75
3.2.1.Εφαρμογή ιδανικού εξομοιωτή αδράνειας σε σύστημα με ατμοστρόβιλο μιας βαθμίδας .....	75
3.2.1.1. Δεδομένα συστήματος – Γραμμική ανάλυση.....	75
3.2.1.2. Βηματική αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου κατά 10%.....	79
3.2.1.3. Βηματική αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου κατά 20% .....	81
3.2.2. Εφαρμογή ιδανικού εξομοιωτή αδράνειας σε σύστημα με ατμοστρόβιλο τριών βαθμίδων .....	83
3.2.2.1. Δεδομένα συστήματος – Γραμμική ανάλυση.....	84
3.2.2.2. Βηματική αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου κατά 20% .....	87
<b>Κεφάλαιο 4 - Εφαρμογή Εξομοιωτή αδράνειας σε Μοντέλα Ανεμογεννητριών – Εφαρμογή σε απλά συστήματα .....</b>	<b>91</b>
4.1. Γενικά.....	91
4.2. Υλοποίηση εξομοιωτή αδράνειας για ανεμογεννήτριες .....	91
4.3. Εφαρμογή για μοντέλο Α/Γ πλήρους μετατροπέα .....	93
4.3.1. Εφαρμογή σε σύστημα ατμοστροβίλου μίας βαθμίδας και ΑΓΠΜ	94
4.3.2. Εφαρμογή σε σύστημα ατμοστροβίλου τριών βαθμίδων και ΑΓΠΜ .	99
4.3.3. Τροποποίηση ελέγχου στροφών ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα.....	102
4.3.4. Επίδραση ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων στην αδρανειακή απόκριση της ΑΓΠΜ .....	106
4.4. Εφαρμογή για μοντέλο ΑΓΔΤ .....	111
4.4.1. Εφαρμογή σε σύστημα ατμοστροβίλου μίας βαθμίδας και ΑΓΔΤ	111
4.4.2. Εφαρμογή σε σύστημα ατμοστροβίλου τριών βαθμίδων και ΑΓΔΤ ..	116
4.4.3. Τροποποίηση ελέγχου στροφών ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης .....	119
4.4.4. Επίδραση ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων στην αδρανειακή απόκριση της ΑΓΔΤ.....	126
<b>Κεφάλαιο 5 - Εφαρμογή εξομοιωτή αδράνειας στο αυτόνομο σύστημα της Ρόδου .....</b>	<b>141</b>
5.1. Περιγραφή αυτόνομου συστήματος Ρόδου.....	141
5.2. Προσομοίωση και ανάλυση Σεναρίου Ι.....	152
5.3. Εισαγωγή εξομοιωτή αδράνειας στο Σενάριο Ι .....	157

5.4. Προσομοίωση και ανάλυση Σεναρίου II.....	161
5.5. Εισαγωγή εξομοιωτή αδράνειας στο Σενάριο II – Σύγκριση αποκρίσεων για διαφορετική επιλογή παραμέτρων .....	163
5.6. Γραμμικοποίηση συστήματος Ρόδου .....	168
5.7. Συμπεράσματα για το σύστημα της Ρόδου .....	169
<b>Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα – Μελλοντικές Προοπτικές .....</b>	<b>171</b>
6.1. Συμπεράσματα .....	171
6.2. Μελλοντικές προοπτικές.....	172
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>175</b>



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1. Αιολική ενέργεια – Ανεμογεννήτριες

Η αιολική ενέργεια είναι η πιο διαδεδομένη και χρησιμοποιούμενη από όλες τις μορφές ΑΠΕ παγκοσμίως. Αυτό οφείλεται κυρίως στη συνεχή βελτίωση της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών, που έχει οδηγήσει σε μείωση του κόστους τους ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας σε τιμές συγκρίσιμες με αυτές των συμβατικών μονάδων παραγωγής, κάτι που δεν ισχύει προς το παρόν για τις υπόλοιπες μορφές ΑΠΕ.

Περιβαλλοντικοί και πολιτικοί παράγοντες, όπως η υπογραφή του πρωτοκόλλου του Κιότο καθώς και η Ευρωπαϊκή πολιτική με το ενεργειακό πακέτο 20-20-20, επιβάλλουν την περαιτέρω αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ και, κατ' επέκταση, της αιολικής ενέργειας στα ΣΗΕ. Ήδη, στη Δανία περίπου το 20% της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από ανεμογεννήτριες, στη Γερμανία το 7%, στην Ισπανία και την Πορτογαλία το 11% και στο αυτόνομο σύστημα της Ιρλανδίας το 9%. Στην Ελλάδα το ποσοστό αιολικής διείσδυσης παραμένει χαμηλό στον ηπειρωτικό κορμό, αλλά στα νησιωτικά δίκτυα έχουν σημειωθεί αρκετά υψηλά ποσοστά διείσδυσης όπως π.χ. 14% στην Κρήτη το 2010.

Όπως κάθε πηγή ενέργειας, η αιολική έχει ιδιαιτερότητες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την εισαγωγή τους σε μεγάλη κλίμακα στα ΣΗΕ καθώς επιφέρουν αλλαγές σε πολλά θέματα όπως ο σχεδιασμός ανάπτυξης του ΣΗΕ ή η οικονομική κατανομή της παραγωγής. Χαρακτηριστική ιδιαιτερότητα είναι, για παράδειγμα, η μη δυνατότητα αποθήκευσης του ανέμου, δηλαδή της πρωτογενούς πηγής ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ανεμογεννήτριες να αντικαθιστούν κυρίως ενέργεια και λιγότερο εγκατεστημένη ισχύ. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται διαφορετικά συστήματα ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας από τις σύγχρονες μηχανές που επί δεκαετίες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας από τις συμβατικές μονάδες.

Η κατάλληλη αναπαράσταση των ανεμογεννητριών είναι απαραίτητη για τη μελέτη ευστάθειας και για τη διερεύνηση των επιπτώσεών της στην ασφάλεια των συστημάτων και απαιτείται στη διαδικασία αύξησης της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στα ΣΗΕ. Είναι σημαντικό, μάλιστα, να τονιστεί ότι η επίπτωση της αιολικής παραγωγής στην ασφάλεια και στη λειτουργία των ΣΗΕ δεν είναι μια στατική και μονόδρομη διαδικασία, αλλά μια δυναμική και αμφίδρομη [9].

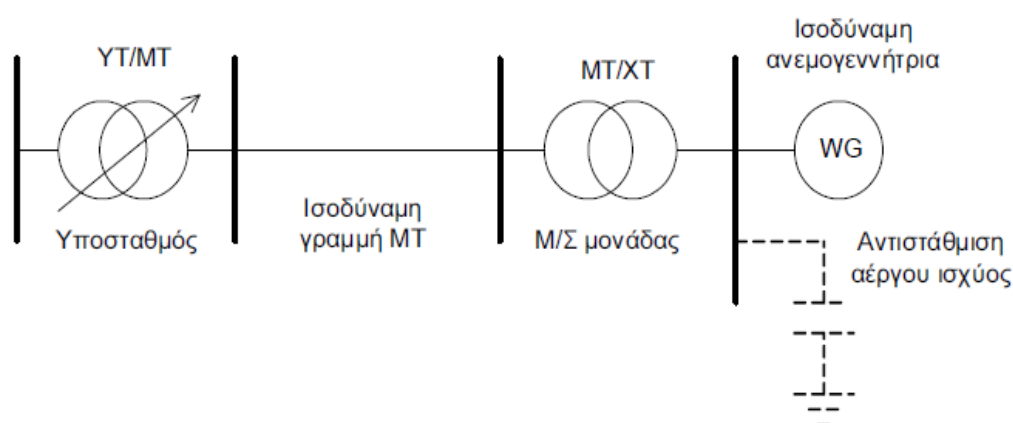
Χαρακτηριστικό είναι ότι στα πρώτα στάδια της ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες αντιμετωπίζονταν αποκλειστικά σαν «αρνητικά φορτία». Αυτό συνεπαγόταν πως ακολουθούσαν τους ίδιους κανονισμούς με του καταναλωτές χωρίς να χρειάζεται να προσφέρουν περαιτέρω υπηρεσίες στο δίκτυο, όπως η ρύθμιση τάσης. Ωστόσο, με την αύξηση της διείσδυσης έγινε αντιληπτό ότι

είναι απαραίτητο οι ανεμογεννήτριες να παρέχουν διάφορες υπηρεσίες ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλής και αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου. Γι' αυτό το λόγο, ξεκίνησε μια αλληλεπίδραση μεταξύ των ΣΗΕ, των κανονισμών για τα αιολικά πάρκα που εκδίδονται από τους διαχειριστές των δικτύων και των κατασκευαστών ανεμογεννητριών. Αποτέλεσμα ήταν η ανάπτυξη της κατάλληλης τεχνολογίας για την αντιμετώπιση τέτοιων αρνητικών φαινομένων με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη δημιουργία κανονισμού για την αδιάλειπτη λειτουργία των ανεμογεννητριών σε συνθήκες βύθισης τάσεως [31], ώστε να αποφεύγεται η αποσύνδεση μεγάλης ποσότητας αιολικής ισχύος που επιδείνωνε το φαινόμενο [18].

## 1.2. Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται και συνδέονται στο δίκτυο με τη μορφή αιολικών πάρκων. Η ονομαστική ισχύς μιας τυπικής σύγχρονης ανεμογεννήτριας κυμαίνεται από 850kW έως και 5 MW, ενώ τα αιολικά πάρκα που υπάρχουν ή σχεδιάζονται στην Ελλάδα κυμαίνονται από 5 έως 50MW. Υπάρχουν επίσης σχέδια για ακόμα μεγαλύτερα υπεράκτια αιολικά πάρκα των οποίων η ισχύς θα φτάνει μερικές εκατοντάδες MW.

Συνήθως, κατά τις μελέτες σε επίπεδο συστήματος, οι ανεμογεννήτριες με παρόμοια τεχνικά χαρακτηριστικά («συναφείς») ομαδοποιούνται και αναπαριστώνται από μια ισοδύναμη ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος ίσης με το άθροισμα των επιμέρους ανεμογεννητριών. Η ομαδοποίηση συνήθως γίνεται σε επίπεδο ενός ή περισσότερων γειτονικών αιολικών πάρκων.



Σχ. 1.1. Τυπική αναπαράσταση A/Π σε ροή φορτίου

Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται μια τυπική αναπαράσταση ενός A/Π σε ροή φορτίου. Ανάλογα με τον τύπο της ανεμογεννήτριας, ενδέχεται να χρειάζεται αντιστάθμιση άεργου ισχύος με χρήση πυκνωτών. Η ισοδύναμη ανεμογεννήτρια συνδέεται στο μετασχηματιστή χαμηλής τάσης όπως και κάθε επιμέρους ανεμογεννήτρια, ενώ η γραμμή μέσης τάσης περιλαμβάνει το δίκτυο μέσης τάσης εντός και εκτός του αιολικού πάρκου μέχρι και τον υποσταθμό μέσης/υψηλής τάσης.



Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες: Σταθερών και μεταβλητών στροφών. Αυτή η διάκριση αφορά τη δυνατότητα να ρυθμίζεται η ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου κι επιτυγχάνεται με διαφορετική διαμόρφωση του συστήματος ηλεκτρομηχανικής μετατροπής. Στις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών χρησιμοποιείται απλή γεννήτρια επαγωγής με δρομέα κλωβού, η οποία συνδέεται απευθείας στο δίκτυο. Η ολίσθηση της μηχανής είναι πολύ μικρή σε ονομαστική λειτουργία και συνεπώς η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι πρακτικά σταθερή. Στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών επιτυγχάνεται με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος η απόξευξη της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα από τη συχνότητα του συστήματος.

Πλεονέκτημα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών είναι η καλύτερη ενεργειακή απόδοση, καθώς η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ρυθμίζεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου εξασφαλίζοντας βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή. Επίσης, μειώνεται η μηχανική καταπόνηση σε σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών, στις οποίες οι μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου μετατρέπονται σε ανάλογες μεταβολές στη μηχανική ροπή. Επιπλέον, προσφέρουν αυξημένες δυνατότητες ελέγχου, όπως ρύθμιση τάσης και συντελεστή ισχύος, και καλύτερη ποιότητα ισχύος ικανοποιώντας έτσι τις απαιτήσεις που τίθενται από τους διαχειριστές δικτύων.

Περαιτέρω διάκριση των ανεμογεννητριών μπορεί να γίνει με βάση τον τρόπο περιορισμού της ισχύος στην ονομαστική τιμή της για υψηλές ταχύτητες ανέμου. Οι παλαιότερες κυρίως ανεμογεννήτριες (σταθερών στροφών) δεν διαθέτουν έλεγχο μεταβολής της γωνίας των πτερυγίων και περιορίζονται σε παθητικό αεροδυναμικό έλεγχο, δηλαδή στο φαινόμενο απώλειας στήριξης (stall effect), για περιορισμό της ισχύος. Οι ανεμογεννήτριες νεότερης τεχνολογίας χρησιμοποιούν τον έλεγχο γωνίας βήματος (pitch control). Για μεγάλες ταχύτητες ανέμου η γωνία των πτερυγίων αυξάνεται, μειώνοντας έτσι τον αεροδυναμικό συντελεστή και, συνεπώς, τη μηχανική ισχύ που λαμβάνεται από τον άνεμο. Τέλος, υπάρχει κυρίως για ανεμογεννήτριες με απλή μηχανή επαγωγής, ο ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης (active stall control), κατά τον οποίο η γωνία βήματος των πτερυγίων μειώνεται ώστε να περιοριστεί η ισχύς με την εμφάνιση του φαινομένου απώλειας στήριξης.

Οι κατηγορίες των ανεμογεννητριών με βάση τη διαμόρφωση του συστήματος ηλεκτρομηχανικής μετατροπής είναι οι παρακάτω, όπου στην παρένθεση σημειώνεται και η εκτίμηση του μεριδίου στην παγκόσμια αγορά το 2005:

- Σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα ή τύπου Α (30%)
- Ημι-μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής και μεταβλητή αντίσταση δρομέα ή τύπου Β (10%)
- Μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης ή τύπου Γ (45%)
- Μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ή τύπου Δ (15%)

Η πρώτη κατηγορία είναι και η παλαιότερη τεχνολογία ανεμογεννητριών. Το ηλεκτρομηχανικό της κομμάτι αποτελείται από μια μηχανή επαγωγής, συνήθως κλωβού και συνδέεται απευθείας στο δίκτυο. Λόγω της απευθείας σύνδεσης, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα μεταβάλλεται πολύ λίγο και είναι πάντα κοντά στη σύγχρονη. Υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων επειδή η ταχύτητα περιστροφής της πτερωτής είναι σχετικά χαμηλή. Για καλύτερη ενεργειακή απόδοση και μείωση θορύβου στη χαμηλή ταχύτητα ανέμου, η μηχανή λειτουργεί σε δύο ταχύτητες. Κατά τη λειτουργία της μηχανής επαγωγής καταναλώνεται άεργος ισχύς. Συνεπώς, απαιτούνται κατάλληλες διατάξεις αντιστάθμισης, όπως πυκνωτές, για τη ρύθμιση του συντελεστή ισχύος στα όρια που έχουν τεθεί από το διαχειριστή δικτύου.

Η δεύτερη κατηγορία είναι μια παραλλαγή της πρώτης, όπου χρησιμοποιείται τυλιγμένος δρομέας με μεταβλητή αντίσταση. Η μεταβολή της αντίστασης επιτρέπει τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής σε ένα μικρό διάστημα, περίπου  $\pm 10\%$  γύρω από τη σύγχρονη.

Η τρίτη κατηγορία είναι και αυτή που χρησιμοποιείται περισσότερο σήμερα. Χρησιμοποιείται ασύγχρονη μηχανή τυλιγμένου δρομέα, της οποίας ο στάτης και ο δρομέας συνδέονται στο δίκτυο. Ο μεν στάτης απευθείας, ο δε δρομέας μέσω ψυκτρών και ενός μετατροπέα συχνότητας. Ο μετατροπέας συχνότητας αποτελείται από δυο μετατροπείς πηγής τάσης με διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation - PWM) και κοινή DC πλευρά. Η λειτουργία μεταβλητών στροφών επιτυγχάνεται λειτουργώντας το κύκλωμα του δρομέα σε μεταβλητή συχνότητα. Η συνολική ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο είναι ίση με το άθροισμα της ισχύος από το στάτη και το δρομέα. Επειδή η ισχύς του δρομέα εξαρτάται από την ολίσθηση που λειτουργεί η ασύγχρονη γεννήτρια, η ονομαστική ισχύς του μετατροπέα είναι μέρος της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας (περίπου 30%) και το κόστος του είναι σημαντικά μικρότερο από το κόστος ενός πλήρους μετατροπέα. Επιπλέον, η ύπαρξη του μετατροπέα παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου του ενεργού κι άεργου ρεύματος που εγχέεται στο δίκτυο.

Η τέταρτη κατηγορία χρησιμοποιεί μετατροπέα πλήρους ισχύος. Η πιο συνήθης διαμόρφωση του ηλεκτρομηχανικού μέρους της είναι με σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών ή με τύλιγμα διέγερσης. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ανορθωτής με διόδους στην πλευρά της γεννήτριας. Ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και γεννήτρια επαγωγής αν χρησιμοποιηθεί PWM μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας. Η χρησιμοποίηση σύγχρονης γεννήτριας με μεγάλο αριθμό πόλων και μεγάλη διάμετρο επιτρέπει την αφαίρεση του κιβωτίου ταχυτήτων. Ο έλεγχος στροφών γίνεται μέσω του μετατροπέα πλευράς δικτύου, ο οποίος ρυθμίζει την έγχυση της ενεργού και άεργου ισχύος στο δίκτυο.

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών (τύπου Γ και Δ) έχουν πλέον κυριαρχήσει στην αγορά και η συντριπτική πλειοψηφία των νέων αιολικών πάρκων αποτελείται από ανεμογεννήτριες αυτών των τύπων.

## 1.3. Έννοιες αυτομάτου ελέγχου – Γραμμικοποίηση

### 1.3.1. Σημεία ισορροπίας – Ευστάθεια Lyapunov – Γραμμικοποίηση

Σε αυτή την ενότητα θα δοθεί συνοπτικά η μαθηματική θεωρία που θα χρησιμοποιηθεί για τα μη γραμμικά συστήματα όπως τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που εξετάζουμε [7]. Τα συνεχή δυναμικά συστήματα [4] μπορούν να περιγραφούν χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από  $N$  συνήθεις δυναμικές εξισώσεις οι οποίες μπορεί να γραφούν σε μορφή πινάκων ως εξής:

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

όπου  $\mathbf{x}$  είναι το  $N \times 1$  διάνυσμα κατάστασης και κάθε συνάρτηση  $f_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) είναι στη γενική περίπτωση μια μη γραμμική συνάρτηση όλων των μεταβλητών κατάστασης.

Ως σημείο ισορροπίας ορίζεται κάθε σημείο  $\bar{\mathbf{x}}$  για το οποίο ισχύει:

$$\mathbf{f}(\bar{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \quad (1.2)$$

Τα σημεία ισορροπίας κατηγοριοποιούνται με βάση την ευστάθειά τους κατά Lyapunov ως εξής [4]:

- Ένα σημείο ισορροπίας  $\bar{\mathbf{x}}$  είναι ευσταθές, αν για κάθε  $V$  του  $\bar{\mathbf{x}}$ , μπορεί να βρεθεί μια περιοχή  $V_1$  του  $\bar{\mathbf{x}}$ , τέτοια ώστε για όλα τα  $\mathbf{x}_0$  τα οποία ανήκουν στη  $V_1$ , υπάρχει λύση  $\mathbf{x}(t)$  και βρίσκεται εντός της περιοχής  $V$  για κάθε χρονική στιγμή  $t > 0$ .
- Ένα σημείο ισορροπίας  $\bar{\mathbf{x}}$  είναι ασυμπτωτικά ευσταθές, εάν όλες οι τροχιές του συστήματος με αρχική συνθήκη  $\mathbf{x}_0$  εντός της περιοχής  $V_1$  τείνουν στο  $\bar{\mathbf{x}}$ , καθώς ο χρόνος τείνει στο άπειρο.
- Σε περίπτωση που το σημείο  $\bar{\mathbf{x}}$  δεν είναι ευσταθές, τότε καλείται ασταθές.

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

Η μεγαλύτερη περιοχή  $A$ , τέτοια ώστε οι τροχιές του συστήματος με αρχικές συνθήκες  $\mathbf{x}_0 \in A$  να τείνουν σε ένα ασυμπτωτικά ευσταθές σημείο ισορροπίας  $\bar{\mathbf{x}}$ , καλείται περιοχή έλξης του  $\bar{\mathbf{x}}$ .

Στα γραμμικά συστήματα όπως αυτό της μορφής:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (1.3)$$

η ευστάθεια του σημείου ισορροπίας (εδώ μόνο το  $\bar{\mathbf{x}} = 0$ ) καθορίζεται από τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης  $\mathbf{A}$ . Οι ιδιοτιμές δίνονται από τις τιμές της βαθμωτής παραμέτρου  $\lambda$  για τις οποίες υπάρχουν μη τετριμμένες λύσεις της εξίσωσης:

$$\mathbf{A}\mathbf{v}_i = \lambda\mathbf{v}_i \quad (1.4)$$

όπου  $\mathbf{v}_i$  το άγνωστο  $N \times 1$  διάνυσμα. Με τον όρο μη τετριμμένες λύσεις, εννοούνται διάφορες της μηδενικής, δηλαδή  $\mathbf{v}_i \neq 0$ . Η ύπαρξη μη τετριμμένων λύσεων προϋποθέτει ότι:

$$\det(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}_N) = 0 \quad (1.5)$$

Από την ανάπτυξη της παραπάνω ορίζουσας προκύπτει το χαρακτηριστικό πολυώνυμο του πίνακα  $\mathbf{A}$  του οποίου οι  $N$  λύσεις ( $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ ) ορίζουν τις ιδιοτιμές του θεωρούμενου πίνακα. Οι ιδιοτιμές μπορεί να είναι είτε πραγματικές είτε μιγαδικές. Στην περίπτωση που ο πίνακας  $\mathbf{A}$  είναι πραγματικός (κάτι που ισχύει στα ΣΗΕ), οι μιγαδικές ιδιοτιμές εμφανίζονται πάντα σε συζυγή ζεύγη.

Το πρόσημο των ιδιοτιμών καθορίζει και την ευστάθεια του εκάστοτε σημείου ισορροπίας. Αν όλες οι ιδιοτιμές βρίσκονται στο αριστερό ημιεπίπεδο, δηλαδή έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος, τότε το σημείο είναι ασυμπτωτικά ευσταθές. Αν μια ή περισσότερες έχουν θετικό πραγματικό μέρος, το σημείο είναι ασταθές. Σημειώνεται ότι στα γραμμικά συστήματα η περιοχή έλξης ενός ασυμπτωτικά ευσταθούς σημείου ισορροπίας είναι όλος ο χώρος των καταστάσεων [3], [4].

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

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

$$\Delta\mathbf{x} = \mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}} \quad (1.6)$$

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

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x} \quad (1.7)$$

όπου ο πίνακας  $\mathbf{A}$  σε αυτή την περίπτωση είναι ο Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} \right|_{x=\bar{x}} & \dots & \left. \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_N} \right|_{x=\bar{x}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_N(x)}{\partial x_1} \right|_{x=\bar{x}} & \dots & \left. \frac{\partial f_N(x)}{\partial x_N} \right|_{x=\bar{x}} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

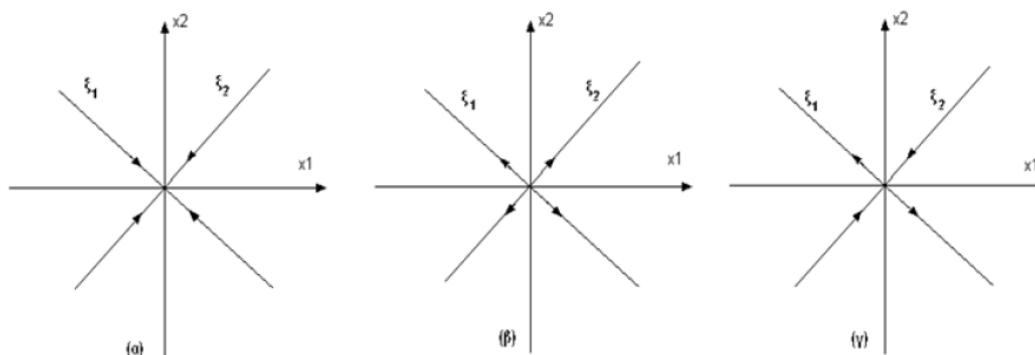
Με τον τρόπο αυτό, η μελέτη ευστάθειας των σημείων ισορροπίας του μη γραμμικού συστήματος ανάγεται στη μελέτη ευστάθειας του γραμμικοποιημένου συστήματος γύρω από κάθε σημείο ισορροπίας, δηλαδή στον υπολογισμό των ιδιοτιμών του πίνακα  $\mathbf{A}$ .

Ένα σημείο ισορροπίας  $\bar{x}$  του συστήματος (1.1) ονομάζεται υπερβολικό όταν ο Ιακωβιανός Πίνακας (1.8) δεν έχει καμία ιδιοτιμή με μηδενικό πραγματικό μέρος. Ως τύπος ενός υπερβολικού σημείου ισορροπίας ορίζεται ο αριθμός των ιδιοτιμών του Ιακωβιανού Πίνακα με θετικό πραγματικό μέρος.

Τα ασυμπτωτικά ευσταθή σημεία ισορροπίας ενός μη γραμμικού συστήματος ονομάζονται ευσταθείς κόμβοι. Τα ασταθή σημεία ισορροπίας που έχουν όλες τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης με θετικά πραγματικά μέρη, ονομάζονται πηγές ή ασταθείς κόμβοι. Τα ασταθή σημεία ισορροπίας, που έχουν μερικές ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης με θετικά πραγματικά μέρη και όλες τις υπόλοιπες με αρνητικά ονομάζονται σαγματικά σημεία ή διάσελα.

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

Στο Σχήμα 1.2 παρατίθεται κάποια πορτραίτα φάσεων για ένα γραμμικό σύστημα δεύτερης τάξης, όπου φαίνονται τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα του σημείου ισορροπίας  $\bar{x} = \mathbf{0}$ :



Σχ. 1.2 (α) Ασυμπτωτικά ευσταθής κόμβος, (β) Ασταθής κόμβος, (γ) Σαγματικό σημείο

Ένας συγκεκριμένος τύπος μη υπερβολικού σημείου ισορροπίας είναι ο σαγματικός κόμβος, ο οποίος συναντάται συχνά στα ΣΗΕ. Η διακλάδωση σαγματικού

κόμβου παρουσιάζεται με την εξαφάνιση ή την εμφάνιση ενός ζεύγους σημείων ισορροπίας (συνήθως ενός ευσταθούς και ενός ασταθούς) ως συνέπεια μιας μικρής μεταβολή των παραμέτρων του συστήματος. Επομένως, στα σημεία διακλάδωσης σαγματικού κόμβου ο Ιακωβιανός Πίνακας δεν είναι αντιστρέψιμος. Η χαρακτηριστική ιδιότητα ενός σαγματικού κόμβου, όπως φαίνεται από το Σχήμα 1.2, είναι ότι υπάρχει μια κατεύθυνση στο χώρο των καταστάσεων, τέτοια ώστε οι τροχιές με αρχικές συνθήκες από τη μια μεριά του σημείου ισορροπίας να συγκλίνουν σε αυτό, ενώ από την άλλη μεριά να αποκλίνουν από αυτό. Σημειώνεται ότι μολονότι η διακλάδωση σαγματικού κόμβου είναι μη γραμμικό φαινόμενο, μπορεί να εντοπιστεί από τη γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από το σημείο διακλάδωσης όπου ο Ιακωβιανός Πίνακας του γραμμικοποιημένου συστήματος έχει απλή μηδενική τιμή και η ορίζουσά του μηδενίζεται.

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

### 1.3.2. Ιδιοδιανύσματα – Ρυθμοί – Συντελεστές συμμετοχής

Για κάθε ιδιοτιμή  $\lambda_i$ , το άγνωστο  $N \times 1$  διάνυσμα  $\mathbf{v}_i$  που ικανοποιεί την (1.4) ονομάζεται δεξί ιδιοδιάνυσμα του πίνακα  $\mathbf{A}$  που σχετίζεται με την ιδιοτιμή  $\lambda_i$ . Το ιδιοδιάνυσμα έχει την εξής μορφή:

$$\mathbf{v}_i = [v_{1i} \ v_{2i} \ \dots \ v_{Ni}]^T \quad (1.9)$$

Όμοια με το δεξί ιδιοδιάνυσμα, το  $N \times 1$  ιδιοδιάνυσμα  $\mathbf{w}_i$ , που ικανοποιεί τη σχέση για  $i = 1, \dots, N$ :

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{A} = \lambda_i \mathbf{w}_i^T \quad (1.10)$$

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

Συνηθίζεται τα δεξιά κι αριστερά ιδιοδιανύσματα να κανονικοποιούνται. Ακόμη, τα δεξιά κι αριστερά ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν σε διαφορετικές ιδιοτιμές, είναι ορθογώνια μεταξύ τους και, συνεπώς, ισχύει:

$$\mathbf{w}_j^T \mathbf{v}_i = \mathbf{0}, \quad i \neq j \quad (1.11)$$

$$\mathbf{w}_j^T \mathbf{v}_i = \mathbf{1}, \quad i = j \quad (1.12)$$

Από τα ιδιοδιανύσματα  $\mathbf{w}_i$  και  $\mathbf{v}_i$  ορίζουμε τους πίνακες:

$$\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_N] \quad (1.13)$$

$$\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_N] \quad (1.14)$$

Θεωρούμε ένα νέο διάνυσμα κατάστασης  $\xi(t)$ , το οποίο ονομάζουμε διάνυσμα ρυθμών, και το οποίο ορίζεται μέσω του ακόλουθου μετασχηματισμού:

$$\mathbf{x} = \mathbf{V}\xi \quad (1.14)$$

Αποδεικνύεται εύκολα ότι η αναλυτική έκφραση των  $n$  ρυθμών απόκρισης του συστήματος είναι για  $k = 1, \dots, N$ :

$$\xi_k = \mathbf{w}_k^T \mathbf{x}_0 e^{\lambda_k t} \quad (1.15)$$

Οι σχέσεις (1.14) και (1.15) φανερώνουν τη σημασία των δεξιών και αριστερών ιδιοδιανυσμάτων. Από την πρώτη συμπεραίνουμε ότι ο  $k$  ρυθμός εμφανίζεται σε κάθε μία από τις μεταβλητές κατάστασης  $x_i$  με μέγεθος ανάλογο προς το στοιχείο  $i$  του αντίστοιχου δεξιού ιδιοδιανύσματος  $\mathbf{v}_k$ . Αντίστροφα, το στοιχείο  $i$  του αριστερού ιδιοδιανύσματος  $\mathbf{w}_k$ , δείχνει το πόσο επηρεάζει η μεταβλητή κατάστασης  $x_i$  την εμφάνιση του ρυθμού  $k$ , με άλλα λόγια πόσο συντελεί η μεταβλητή κατάστασης  $x_i$  στη διέγερση του ρυθμού  $k$  [1].

Ένα σημαντικό μειονέκτημα στο να χρησιμοποιούνται ξεχωριστά τα δεξιά από τα αριστερά ιδιοδιανύσματα για την εξακρίβωση της σχέσης μεταξύ μεταβλητών κατάστασης και ρυθμών είναι η εξάρτηση των στοιχείων των ιδιοδιανυσμάτων από τις μονάδες μέτρησης των μεταβλητών κατάστασης. Αυτό το πρόβλημα επιλύεται με τον χρησιμοποίηση των συντελεστών συμμετοχής. Οι συντελεστές συμμετοχής (participation factors) ορίζονται ως εξής:

$$\mathbf{p}_i = [p_{1i} \ p_{2i} \ \dots \ p_{Ni}]^T = [\mathbf{v}_{1i}^T \mathbf{w}_{i1} \ \mathbf{v}_{2i}^T \mathbf{w}_{i2} \ \dots \ \mathbf{v}_{Ni}^T \mathbf{w}_{iN}]^T \quad (1.16)$$

όπου το στοιχείο  $v_{ki}$  (ή  $w_{ki}$ ) είναι το  $k$  στοιχείο του δεξιού (ή αριστερού) ιδιοδιανύσματος που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή  $\lambda_i$ .

Το στοιχείο  $p_{ki}$  ορίζεται ως συντελεστής συμμετοχής και αποτελεί ένα μέτρο της σχετικής συμμετοχής της  $k$  μεταβλητής κατάστασης στη διέγερση του  $i$  ρυθμού και αντίστροφα. Έχει το πλεονέκτημα ότι, για κανονικοποιημένα ιδιοδιανύσματα, είναι αδιάστατο μέγεθος και δεν εξαρτάται από την επιλογή των μονάδων μέτρησης. Επιπλέον, το άθροισμα των συντελεστών συμμετοχής που σχετίζονται με έναν ρυθμό ή με μια μεταβλητή κατάστασης είναι ίσο με 1.

Σε γενικές γραμμές, οι συντελεστές συμμετοχής είναι ενδεικτικοί του ποσοστού συμμετοχής των σχετικών μεταβλητών κατάστασης στη διέγερση των αντίστοιχων ρυθμών. Η ανάλυσή τους είναι χρήσιμη στα ΣΗΕ για την ερμηνεία της συμπεριφοράς τους και τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στις διάφορες συνιστώσες.

## 1.4. Ρύθμιση συχνότητας ΣΗΕ

### 1.4.1. Γενικά για ρύθμιση συχνότητας

Στο δρομέα μιας γεννήτριας ασκούνται η μηχανική ροπή από τον κινητήρα – στρόβιλο και η ηλεκτρομαγνητική ροπή από το ηλεκτρικό φορτίου που τροφοδοτεί η γεννήτρια. Η μηχανική ροπή τείνει να επιταχύνει το δρομέα της γεννήτριας, ενώ η ηλεκτρική ροπή τείνει να τον επιβραδύνει. Η συχνότητα ενός ΣΗΕ καθορίζεται, συνεπώς, από το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο και από τη συνολική μηχανική ισχύ που παράγουν οι διατάξεις στροβίλων των επιμέρους γεννητριών [1], [3].

Όταν ένα σύστημα βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση, το ισοζύγιο μεταξύ παραγόμενης μηχανικής και καταναλισκόμενης ηλεκτρικής είναι ισοσκελισμένο και η συχνότητα του συστήματος είναι σταθερή και ίση με την ονομαστική.

Ωστόσο, στην περίπτωση διαταραχής στο δίκτυο, όπως η αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου ή η απώλεια ενός μέρους της παραγωγής, το ισοζύγιο μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος διαταράσσεται. Αυτό οδηγεί σε διακυμάνσεις στη συχνότητα του συστήματος, οι οποίες πρέπει να κυμαίνονται σε συγκεκριμένο εύρος τιμών για την αξιόπιστη λειτουργία και την ασφάλεια των στοιχείων του συστήματος.

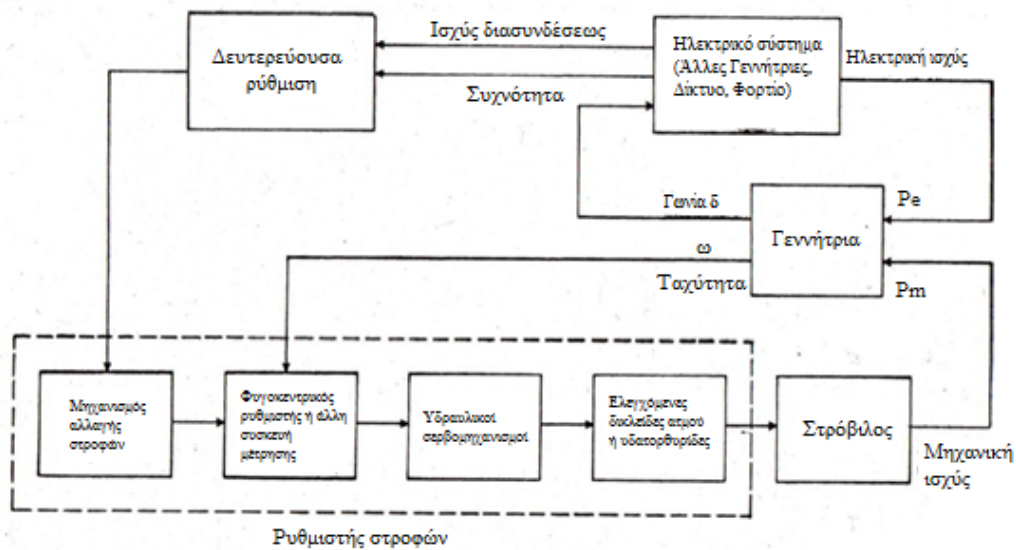
Η ευστάθεια συχνότητας, συνεπώς, συνίσταται στην ικανότητα του ΣΗΕ να ανιχνεύει τη διακύμανση της συχνότητας και να αποκαθιστά το ισοζύγιο παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος πριν η τιμή της συχνότητας βγει έξω από ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών. Αν η τιμή της συχνότητας βγει έξω από αυτό το εύρος τιμών, τότε το ΣΗΕ προχωρά σε απόρριψη φορτίου ή μονάδων παραγωγής στην προσπάθειά του να ισοσκελίσει το ισοζύγιο παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος. Η αστάθεια συχνότητας εκδηλώνεται με τη μορφή συνεχών ταλαντώσεων στη συχνότητα του συστήματος οι οποίες οδηγούν σε διαδοχική απόρριψη των μονάδων παραγωγής και των φορτίων του ΣΗΕ μέχρι την ολική σβέση του.

Για την αποφυγή του παραπάνω φαινομένου απαιτείται κατάλληλη κατανομή των μονάδων παραγωγής του ΣΗΕ. Πιο συγκεκριμένα, οι μονάδες παραγωγής δεν λειτουργούν στο μέγιστο σημείο λειτουργίας τους, αλλά διαθέτουν επαρκή στρεφόμενη εφεδρεία ώστε να ανταπεξέλθουν σε πιθανή αύξηση ζήτησης ή απώλεια παραγωγής.

Η ρύθμιση της συχνότητας διακρίνεται σε *πρωτεύουσα* και σε *δευτερεύουσα*. Στο Σχήμα 1.3 φαίνονται οι διατάξεις που συμμετέχουν στη ρύθμιση της συχνότητας [1].

Η πρωτεύουσα ρύθμιση γίνεται σε κάθε μονάδα ξεχωριστά και αφορά κυρίως τη βραχυχρόνια ρύθμιση της συχνότητας. Ο ρυθμιστής στροφών της κάθε μονάδας ανιχνεύει τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της (ή συχνότητας), η οποία έχει προκληθεί από κάποια διαταραχή του ισοζυγίου μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος του συστήματος, και προσαρμόζει τη μηχανική ισχύ του στρόβιλου ώστε να σταθεροποιηθεί η συχνότητα.





Σχ. 1.3 Μπλοκ διάγραμμα ρύθμισης συχνότητας

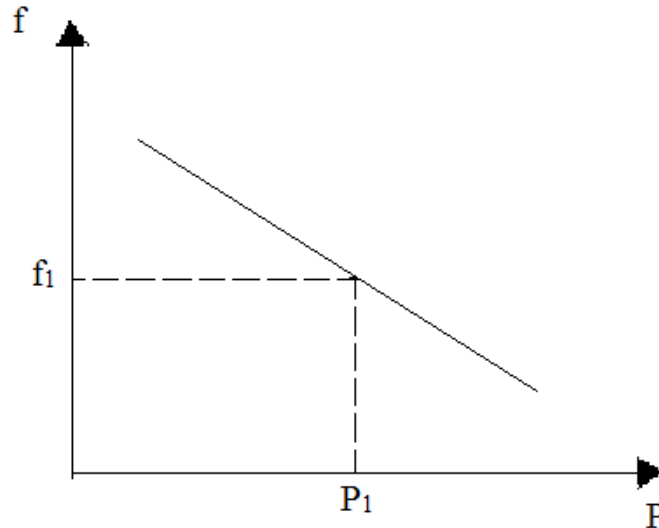
Ο ρυθμιστής στροφών κάθε μονάδας συμμετέχει, όπως αναφέρθηκε, στην πρωτεύουσα ρύθμιση ανιχνεύοντας το σφάλμα συχνότητας και προσαρμόζοντας την παραγωγή της μονάδας. Διαφέρει από μονάδα σε μονάδα ανάλογα με το στοιχείο που χρησιμοποιείται ως καύσιμο ή ως κινητήρια δύναμη του στρόβιλου. Για παράδειγμα, σε μια ατμοηλεκτρική μονάδα χρησιμοποιείται η βαλβίδα παροχής ατμού στο στρόβιλο για ρύθμιση της παραγωγής. Αντίστοιχα, σε μια νηξελογεννήτρια, η μηχανική ισχύς ρυθμίζεται από τη βαλβίδα που ορίζει τη ροή Ντήζελ στο θάλαμο καύσης. Η ταχύτητα απόκρισης και ο ρυθμός αύξησης της μηχανικής ισχύος καθορίζονται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις μηχανικές αντοχές της κάθε μονάδας παραγωγής. Επιπλέον, κάθε μονάδα αντιλαμβάνεται διαφορετικά το μέγεθος της μεταβολής και παρουσιάζει διαφορετική ευαισθησία στην εκάστοτε μεταβολή της συχνότητας. Αυτό καθορίζεται από το *στατισμό* της κάθε μονάδας παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, ως στατισμός ορίζεται η κλίση της χαρακτηριστικής ευθείας φορτίου – συχνότητας που διέπει κάθε μονάδα παραγωγής. Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη φορτίου συχνότητας [1].

Ο στατισμός δίνεται από τη σχέση:

$$R = -\frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (1.17)$$

και εκφράζει το ποσοστό της μεταβολής του φορτίου που θα παραμείνει ως σφάλμα στη συχνότητα στη μόνιμη κατάσταση.

Ο στατισμός καθορίζει, επίσης, το πώς θα κατανομηθεί η παραγωγή μεταξύ των διαφορετικών μονάδων παραγωγής μετά από μια διαταραχή. Σε σύστημα με περισσότερες από μια μονάδες παραγωγής με διαφορετικό στατισμό, αυτές με το μικρότερο στατισμό αναλαμβάνουν μεγαλύτερο ποσοστό της διαταραχής, ενώ οι μονάδες με το μεγαλύτερο στατισμό μεταβάλλουν λιγότερο την παραγωγή τους.



Σχ. 1.4 Καμπύλη ρύθμισης φορτίου – συχνότητας

Η εξάλειψη του μονίμου σφάλματος στη συχνότητα είναι αντικείμενο της δευτερεύουσας ρύθμισης, η οποία λαμβάνει χώρα μετά το τέλος της πρωτεύουσας ρύθμισης. Η δευτερεύουσα ρύθμιση αναλαμβάνει να δώσει κατάλληλη εντολή στους μηχανισμούς αλλαγής στροφών που υπάρχουν στους ρυθμιστές στροφών των μονάδων, ώστε να μετατοπίσουν την καμπύλη ρύθμισης φορτίου συχνότητας.

#### 1.4.2. Ρύθμιση συχνότητας σε αυτόνομο σύστημα – Η σημασία της αδράνειας

Στα μεγάλα διασυνδεδεμένα δίκτυα το πρόβλημα της αστάθειας συχνότητας δεν είναι τόσο συχνό, κυρίως γιατί τα μικρότερα δίκτυα μπορούν να βασιστούν σε ένα μεγαλύτερο για να εξασφαλίσουν το ισοζύγιο ισχύος. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει για τα μικρά αυτόνομα δίκτυα, στα οποία οι ανάγκες καλύπτονται από μικρές μονάδες παραγωγής και πολλές φορές με περιορισμένη στρεφόμενη εφεδρεία. Έτσι, η διακύμανση της συχνότητας θα είναι εντονότερη στα αυτόνομα συστήματα, όπως αυτά που ικανοποιούν τις ανάγκες των νησιών. Σε περίπτωση μιας σοβαρής διαταραχής, η οποία είναι πιο συχνά η απώλεια κάποιας από τις μονάδες παραγωγής του δικτύου, οι μονάδες παραγωγής που απομένουν πρέπει να προσαρμόσουν κατάλληλα την παραγωγή τους ώστε να εξισορροπήσουν το ισοζύγιο ισχύος. Όπως προαναφέρθηκε, αυτό εξαρτάται από το στατισμό και τις χρονικές σταθερές που διέπουν τους ρυθμιστές στροφών των μονάδων. Να σημειωθεί εδώ ότι σε ένα αυτόνομο δίκτυο, ως συχνότητα του συστήματος λαμβάνεται ο σταθμισμένος μέσος όρος των γωνιακών ταχυτήτων των σύγχρονων γεννητριών του συστήματος ή αλλιώς αδρανειακό κέντρο βάρους, δηλαδή [5]:

$$\omega_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^{NG} H_i \omega_i}{\sum_{i=1}^{NG} H_i} \quad (1.18)$$

όπου NG το πλήθος των γεννητριών, και H η ανά μονάδα τιμή της αδράνειας της κάθε γεννήτριας.

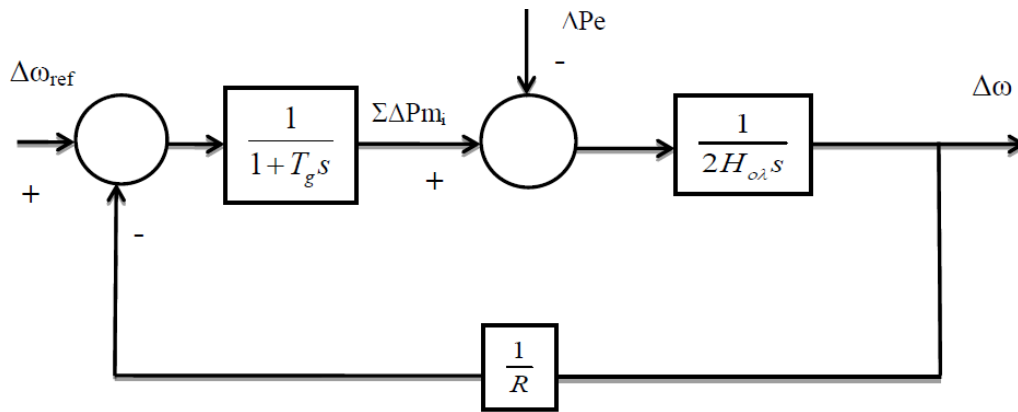
Εξαιτίας των χρονικών σταθερών που χαρακτηρίζουν την απόκριση των ρυθμιστών στροφών, υπάρχει καθυστέρηση στην προσαρμογή της παραγωγής των μονάδων μετά τη διαταραχή. Έτσι, σε περίπτωση π.χ. απώλειας μιας μονάδας παραγωγής, θα έχουμε βύθιση της συχνότητας, η οποία θα πρέπει να παραμείνει μέσα σε κάποια όρια ώστε να μην ενεργοποιηθούν οι διατάξεις ασφαλείας και προστασίας του ΣΗΕ και να διασφαλιστεί η ασφαλής και αξιόπιστη λειτουργία του. Τα χαρακτηριστικά της μεταβατικής αυτής βύθισης εξαρτώνται κυρίως από τη δυναμική των σύγχρονων γεννητριών που παραμένουν συνδεδεμένες στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, η απόκριση της συχνότητας αμέσως μετά τη διαταραχή κυριαρχείται από την αδράνεια των συμβατικών μονάδων. Η *αδράνεια* μας δείχνει την κινητική ενέργεια που είναι συσσωρευμένη στους άξονες των γεννητριών και μπορεί να αντληθεί ώστε να περιορίσει το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα. Η ανά μονάδα τιμή της αδράνειας είναι ίση με το χρονικό διάστημα που μπορεί η γεννήτρια να παράγει την ονομαστική της ισχύ χωρίς να την κινεί κάποιος στρόβιλος μέχρι την ακινητοποίησή της. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αδράνεια του συστήματος, τόσο βραδύτερη γίνεται η μεταβολή της συχνότητας μέχρι να μπορέσουν οι εναπομένουσες μονάδες να ρυθμίσουν την παραγωγή τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι ως αδράνεια του συστήματος θεωρείται ο παρονομαστής του κλάσματος της εξίσωσης (1.18)

Η *εξίσωση κίνησης* μιας γεννήτριας μετά από γραμμικοποίηση κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα είναι η:

$$\Delta P_m - \Delta P_e = 2H\Delta\dot{\omega} \quad (1.19)$$

Στην παραπάνω σχέση οι ροπές έχουν υποθεθεί περίπου ίσες με τις αντίστοιχες ισχείς και με  $\Delta$  συμβολίζεται η μεταβολή από το αρχικό σημείο λειτουργίας. Από τη σχέση (1.19) συμπεραίνεται αμέσως ότι σε περίπτωση διαταραχής του ισοζυγίου, ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας είναι ανάλογος του μεγέθους της μεταβολής και αντιστρόφως ανάλογος της σταθεράς αδρανείας της γεννήτριας.

Αν σε ένα αυτόνομο σύστημα γίνει η παραδοχή ότι όλες οι μονάδες είναι πανομοιότυπες και συνδέονται στον ίδιο ζυγό, τότε, με βάση τη σχέση (1.19), μπορεί το αυτόνομο σύστημα να αναπαρασταθεί από μια ισοδύναμη γεννήτρια και το ρυθμιστή στροφών της όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5. Με  $H_{ολ}$  συμβολίζεται η αδράνεια του συστήματος, με  $\Sigma \Delta P_{mi}$  η συνολική ισχύς από τις γεννήτριες του συστήματος, με  $R$  ο στατισμός και με  $T_g$  η χρονική σταθερά του ρυθμιστή στροφών της ισοδύναμης γεννήτριας. Το σήμα  $\Delta\omega_{ref}$  είναι μηδενικό κατά τη διάρκεια της πρωτεύουσας ρύθμισης.



Σχ. 1.5 Απλοποιημένο μοντέλο ρύθμισης συχνότητας αυτόνομου συστήματος

## 1.5. Αρχή λειτουργίας εξομοιωτή αδράνειας

Από την ανάλυση της προηγούμενης ενότητας έγινε αντιληπτό ότι η αδράνεια είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αξιόπιστη λειτουργία ενός αυτόνομου ΣΗΕ. Η σημασία της έγινε περισσότερο αισθητή με την αύξηση της αιολικής διείδυσης στα αυτόνομα συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, συμβατικές μονάδες παραγωγής, που συμμετείχαν στη ρύθμιση της συχνότητας και προσέθεταν αδράνεια στο σύστημα, αντικαταστήθηκαν από ανεμογεννήτριες οι οποίες δεν συμμετέχουν στη ρύθμιση της συχνότητας και οι οποίες πολλές φορές είναι συζευγμένες ασύγχρονα στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της αδράνειας που «βλέπει» το σύστημα συνδεδεμένη στο δίκτυο και η αύξηση του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας σε περίπτωση διαταραχής του ισοζυγίου ισχύος. Ωστόσο, στους άξονες των ανεμογεννητριών υπάρχει συσσωρευμένη σημαντική ποσότητα κινητικής ενέργειας, η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την υποβοήθηση των συμβατικών μονάδων κατά τη διάρκεια μιας διαταραχής στο ΣΗΕ.

Για τον παραπάνω λόγο θεωρήθηκε αναγκαία η ανάπτυξη τεχνολογίας για τη συμμετοχή των ανεμογεννητριών στην αδρανειακή απόκριση του συστήματος μειώνοντας έτσι το ρυθμό πτώσης της συχνότητας και καθιστώντας λιγότερη έντονη τη μεταβατική βύθιση. Αυτό είναι εφικτό μόνο στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, απελευθερώνοντας μέρος της κινητικής ενέργειας που είναι συσσωρευμένη στον άξονα της ανεμογεννήτριας, επιβραδύνοντας με αυτό τον τρόπο το δρομέα της. Αυτή η μεταβατική αύξηση της ισχύος επιτυγχάνεται με την προσαρμογή στην ανεμογεννήτρια ενός κατάλληλα διαμορφωμένου *εξομοιωτή αδράνειας*. Ο εξομοιωτής αδράνειας ανιχνεύει τη μεταβολή της συχνότητας και δίνει εντολή για αύξηση της εγχεόμενης ισχύος από την ανεμογεννήτρια. Με αυτό τον τρόπο, καλύπτεται ένα μέρος της ζητούμενης ηλεκτρικής ισχύος από τις ανεμογεννήτριες και μειώνεται ο ρυθμός πτώσης της συχνότητας μέχρι να αποκριθούν οι ρυθμιστές στροφών των συμβατικών μονάδων. Στη συνέχεια, οι ανεμογεννήτριες πρέπει να επιστρέφουν στο αρχικό σημείο λειτουργίας που χαρακτηρίζεται από τη στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος από τον άνεμο τους και να μην επηρεάζονται από το

σφάλμα μόνιμης κατάστασης στη συχνότητα. Συνεπώς, η έξοδος του εξομοιωτή αδράνειας πρέπει να είναι μηδενική στη μόνιμη κατάσταση, ενώ σε περίπτωση πτώσης της συχνότητας να οδηγεί σε αύξηση της εγχεόμενης ισχύος στο δίκτυο. Στο Κεφάλαιο 3 θα περιγραφεί η συνάρτηση μεταφοράς και η προτεινόμενη αρχή σχεδίασης που θα ακολουθηθεί στη διπλωματική.

## 1.6. Επισκόπηση βιβλιογραφίας

Όπως αναφέρθηκε, η τροποποίηση των χαρακτηριστικών των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής για τη συνεισφορά τους στην διασφάλιση της σταθερότητας του δικτύου έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας τα τελευταία χρόνια.

Αρχικά, στα [1] - [5] μπορούν να αναζητηθούν οι βασικές αρχές γύρω από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την ευστάθεια των συστημάτων. Στα [10] και [12] δίνονται οι αρχές της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, με έμφαση στην αιολική ενέργεια και τις ανεμογεννήτριες.

Στη διδακτορική διατριβή [7] περιγράφεται το λογισμικό πακέτο WHSSP που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική για την αναπαράσταση και προσομοίωση ενός ΣΗΕ. Σε αυτό και στα [8], [9], [14]-[15] και [17] μπορούν να αναζητηθούν τα διάφορα μοντέλα συνιστωσών ΣΗΕ που εμφανίζονται στην παρούσα διπλωματική. Συγκεκριμένα, στο [7] περιγράφηκαν τα μοντέλα της σύγχρονης μηχανής, της μηχανής επαγωγής, του αυτόματου ρυθμιστή τάσης, του ατμοστρόβιλου και της νηξελογεννήτριας. Στη μεταπτυχιακή εργασία [8] παρουσιάζεται το μοντέλο της ανεμογεννήτριας με γεννήτρια επαγωγής. Στη διατριβή [9] σχεδιάστηκε το μοντέλο της ανεμογεννήτριας με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης και στο [15] το μοντέλο ανεμογεννήτριας με πλήρη μετατροπέα. Στη διπλωματική εργασία [17] αναπτύχθηκε το μοντέλο του αεριοστρόβιλου. Στο [14] τα παραπάνω μοντέλα οργανώθηκαν στη βιβλιοθήκη του WHSSP. Στα [20]-[22] γίνεται η μοντελοποίηση του μοντέλου ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης συγκεκριμένης κατασκευαστικής εταιρείας (General Electric), του οποίου ο σχεδιασμός αποτέλεσε βάση για το μοντέλο της ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική.

Η επίδραση των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής στη λειτουργία ενός ΣΗΕ και στην ευστάθειά του έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας στη βιβλιογραφία. Στο [18] γίνεται αναφορά στις τεχνολογικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν καθώς αυξάνεται η διείσδυση των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής. Στα [9], [26] και [27] έχει περιγραφεί η επίδραση των αιολικών πάρκων, κυρίως με ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης, στην ευστάθεια ταλαντώσεων των ΣΗΕ και έγινε σχεδίαση ένας αιολικού σταθεροποιητή ΣΗΕ.

Στο [37] παρουσιάζεται η επίδραση της αύξησης της αιολικής διείσδυσης στην απόκριση της συχνότητας ενός αυτόνομου συστήματος (εν προκειμένω της Ιρλανδίας), ενώ στα [36] και [38] γίνεται σύγκριση της αδρανειακής απόκρισης μεταξύ ανεμογεννητριών σταθερών και μεταβλητών στροφών. Η συμμετοχή των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών είτε στην αδρανειακή απόκριση, που

αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, είτε στην πρωτεύουσα ρύθμιση έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης στα [33], [36], [38]-[48]. Μια αρχική προσέγγιση της συμπεριφοράς του εξομοιωτή αδράνειας για το αυτόνομο σύστημα της Ρόδου γίνεται και στο [14].

## 1.7. Αντικείμενο και δομή της διπλωματικής

Αντικείμενο της διπλωματικής αποτελεί η σχεδίαση και ανάλυση ενός εξομοιωτή αδράνειας για τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με σκοπό τη συμμετοχή τους στην αδρανειακή απόκριση του συστήματος και τη βελτίωση των χαρακτηριστικών της απόκρισης της συχνότητας.

Συγκεκριμένα, αφού περιγράφεται η λειτουργία και η χρησιμότητα του εξομοιωτή αδράνειας, εξετάζεται η βασική συμβολή του σε ένα απλοποιημένο μοντέλο ανάλυσης ευστάθειας συχνότητας. Με βάση απλές αρχές επιλέγεται μια μέθοδος για την επιλογή της χρονικής σταθεράς του εξομοιωτή αδράνειας. Η συγκεκριμένη μέθοδος λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά του συστήματος και πιο συγκεκριμένα την ταχύτητα με την οποία εξασφαλίζει το ισοζύγιο μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος μετά από μια διαταραχή. Έχοντας κάνει την επιλογή για τη χρονική σταθερά του εξομοιωτή, ακολουθούν προσομοιώσεις για την επιλογή του κέρδους του ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα με βάση κάποιους περιορισμούς.

Ο εξομοιωτής αδράνειας εφαρμόζεται στη συνέχεια σε δύο λεπτομερή μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών (διπλής τροφοδότησης και πλήρους μετατροπέα) κι εξετάζεται η επίδραση της δυναμικής συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας στο αποτέλεσμα. Προσδιορίζονται οι αλλαγές που πρέπει να γίνουν στις ρυθμίσεις των ανεμογεννητριών ώστε να επιτευχθεί καλύτερη συνεργασία μεταξύ των διαφόρων σχημάτων ελέγχου και τελικά γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφόρων μοντέλων. Στη συνέχεια, ο εξομοιωτής αδράνειας εφαρμόζεται σε ένα αυτόνομο νησιωτικό σύστημα που βασίζεται στα χαρακτηριστικά της Ρόδου.

Η διπλωματική εργασία διαρθρώνεται ως εξής. Στο Κεφάλαιο 1 έγινε μια εισαγωγή στην αιολική ενέργεια και περιγράφηκαν τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων ανεμογεννητριών. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες βασικές έννοιες αυτομάτου ελέγχου που είναι απαραίτητα για την κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός ΣΗΕ και χρησιμοποιούνται και στην παρούσα εργασία. Δίνεται ιδιαίτερη σημασία στο θέμα της ρύθμισης συχνότητας ενός αυτόνομου δικτύου και περιγράφεται το πρόβλημα που προκύπτει από την υψηλή αιολική διείδυση. Τέλος, παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας του εξομοιωτή αδράνειας ως τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος ρύθμισης συχνότητας.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται το υπολογιστικό πακέτο WHSSP. Συγκεκριμένα, επεξηγείται ο τρόπος υλοποίησης του πακέτου προσομοίωσης στο περιβάλλον του

MATLAB/Simulink μέσω της περιγραφής της γενικής δομής των διατάξεων ΣΗΕ και του μοντέλου επίλυσης των εξισώσεων του δικτύου, των οποίων γίνεται μια σύντομη περιγραφή. Επιπλέον, παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των μπλοκ των συνιστωσών του ΣΗΕ που χρησιμοποιούνται σε αυτή την εργασία. Εξαιρέση αποτελούν τα μοντέλα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, των οποίων η μοντελοποίηση περιγράφεται αναλυτικά, καθώς αποτελούν αντικείμενο ανάλυσης και τροποποίησης στα επόμενα κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η αρχή σχεδίασης για τον εξομοιωτή αδράνειας που ακολουθείται στην παρούσα διπλωματική. Υποθέτοντας ιδανικό εξομοιωτή αδράνειας, δηλαδή αμελώντας τη δυναμική συμπεριφορά των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, η συγκεκριμένη αρχή σχεδίασης εφαρμόζεται αρχικά στο γενικό σύστημα του Σχήματος 1.5, ενώ στη συνέχεια, εξετάζεται σε δύο απλά συστήματα που αποτελούνται από έναν ατμοστρόβιλο μίας ή τριών βαθμίδων και ένα ηλεκτρικό φορτίο σταθερής ισχύος. Σε κάθε περίπτωση γίνεται ανάλυση της επίδρασης στην ιδιοτιμή που σχετίζεται με τη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος και προσομοίωση μιας διαταραχής στο ισοζύγιο μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος.

Στο Κεφάλαιο 4 ο εξομοιωτής αδράνειας εφαρμόζεται στα μοντέλα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών του δεύτερου κεφαλαίου. Εισάγονται περαιτέρω περιορισμοί και εξετάζεται η επίδραση του εξομοιωτή αδράνειας στα μεγέθη της ανεμογεννήτριας, καθώς και η επίδραση της δυναμικής της συμπεριφοράς στο τελικό αποτέλεσμα. Η ανάλυση γίνεται στα δύο συστήματα που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3 και για τους δύο τύπους ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών. Η προσομοίωση συνοδεύεται από γραμμικοποίηση και ανάλυση των ιδιοτιμών του συστήματος. Επιπλέον, εξετάζεται η επίδραση των εσωτερικών βρόχου ελέγχου της ανεμογεννήτριας στην τελική απόκριση του συστήματος, ενώ επιχειρείται τροποποίησή τους σε περίπτωση που δεν παρουσιάζουν επιθυμητή συμπεριφορά.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται το αυτόνομο σύστημα της Ρόδου και τα σενάρια κατανομής παραγωγής που προσομοιώνονται. Και τα δύο σενάρια χαρακτηρίζονται από μέγιστη αιολική διείσδυση. Η προσομοίωση γίνεται αρχικά χωρίς τον εξομοιωτή αδράνειας και αναφέρονται τα προβλήματα που παρουσιάζονται. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο εξομοιωτής αδράνειας και αναλύεται η επίδρασή του στην απόκριση του δικτύου. Μετά την προσομοίωση, εξετάζεται η επίδραση του εξομοιωτή αδράνειας στο γραμμικοποιημένο σύστημα μέσω της ανάλυσης των ιδιοτιμών του.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των προηγούμενων κεφαλαίων και αναφέρονται περαιτέρω ζητήματα που σχετίζονται με την παρούσα διπλωματική και θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.





## Κεφάλαιο 2

### Περιγραφή περιβάλλοντος προσομοίωσης και μοντέλων συνιστωσών

#### 2.1. Περιβάλλον WHSSP

##### 2.1.1. Γενικά

Το λογισμικό πακέτο WHSSP (Wind Hybrid System Simulation Package) έχει υλοποιηθεί σε περιβάλλον MATLAB – Simulink στα πλαίσια συνεργασίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και του Πανεπιστημίου της Λιέγης [6]. Αναπτύχθηκε στο εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής ως εκπαιδευτικό εργαλείο κατάλληλο για δυναμικές προσομοιώσεις και μελέτες ευστάθειας για μικρά έως μεσαία διασυνδεδεμένα ή αυτόνομα συστήματα με αυξημένη αιολική διείσδυση. Η ανάλυση που ακολουθεί βασίζεται στα [7], [14].

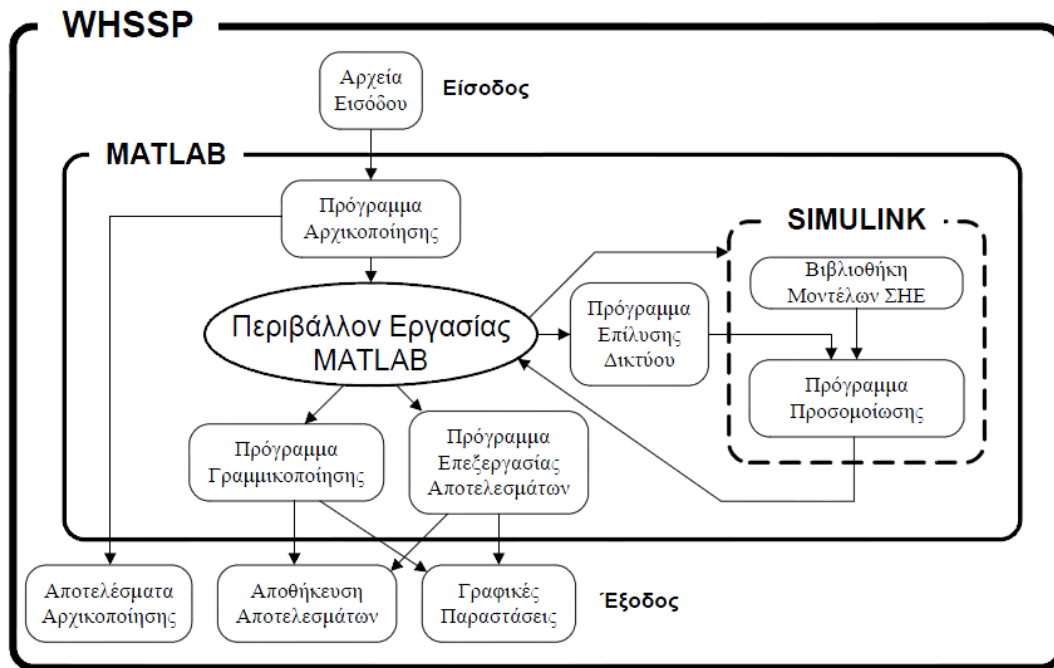
Βασικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου εργαλείου είναι ο εκπαιδευτικός του χαρακτήρας, καθώς αναπτύχθηκε σε περιβάλλον προσιτό στους φοιτητές και παράλληλα ευρέως διαδεδομένο στην επιστήμη του μηχανικού. Χαρακτηρίζεται από ένα φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον, εύκολη εξοικείωση χωρίς την απαίτηση ιδιαίτερων προγραμματιστικών γνώσεων, αλλά και τη δυνατότητα χρήσης μεγάλης ποικιλίας έτοιμων ρουτινών και συναρτήσεων που ενυπάρχουν στο περιβάλλον της MATLAB. Λόγω της ευελιξίας στην ανάπτυξη και επέκτασή του, προσφέρεται για τη μελέτη ενός μεγάλου φάσματος φαινομένων που σχετίζονται με τη λειτουργία ενός ΣΗΕ.

Η γενική δομή του πακέτου WHSSP περιγράφεται στο Σχήμα 2.1, όπου διακρίνονται τα βασικά δομικά χαρακτηριστικά του:

- Αρχεία εισόδου και εξόδου
- Μοντέλο αναπαράστασης του συστήματος σε Simulink.
- Προγράμματα αρχικοποίησης, επίλυσης δικτύου, γραμμικοποίησης και επεξεργασίας αποτελεσμάτων σε MATLAB.

Τα αρχεία εισόδου περιλαμβάνουν τα βασικά δεδομένα περιγραφής του συστήματος που επιθυμεί να εξετάσει ο χρήστης. Περιέχονται δηλαδή τα στοιχεία των συνιστωσών του δικτύου και πιο συγκεκριμένα των ζυγών, των σύγχρονων γεννητριών, των μηχανών επαγωγής, των μετασχηματιστών και των γραμμών μεταφοράς. Αυτά τα στοιχεία χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για να επιλύσει το πρόβλημα της ροής φορτίου στο αρχικό σημείο λειτουργίας, ενώ παράλληλα είναι απαραίτητα για την ανάθεση τιμών στις παραμέτρους των διαφόρων μοντέλων που

χρησιμοποιούνται καθώς και για την κατάστρωση του πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου. Τα αρχεία εξόδου μπορεί να είναι αρχεία κειμένου ή αρχεία αποθήκευσης αποτελεσμάτων (της μορφής .dat) και αφορούν αποτελέσματα αρχικοποίησης και γραμμικοποίησης ή γραφικές παραστάσεις σημαντικών μεγεθών.



Σχ. 2.1 Γενική δομή πακέτου WHSSP

Το πρόγραμμα αρχικοποίησης επιλύει το πρόβλημα ροής φορτίου για το αρχικό σημείο ισορροπίας και φροντίζει μέσω του περιβάλλοντος εργασίας (Workspace) για την αντιστοίχιση των κατάλληλων τιμών από τα αρχεία εισόδου στο μοντέλο του συστήματος στο Simulink. Σε αυτό μπορεί να καθορίζεται το επιθυμητό σενάριο διαταραχών (π.χ. βραχυκύκλωμα σε ζυγό ή γραμμή μεταφοράς), αλλά και τα χαρακτηριστικά του (σημείο βραχυκυκλώματος, χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος, τοπολογία του δικτύου πριν, κατά και μετά το σφάλμα). Τέλος, δηλώνονται σε αυτό τα βασικά χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου ΣΗΕ, όπως η συχνότητα και η βάση ισχύος.

Τη βασικότερη συνιστώσα του WHSSP αποτελεί το μοντέλο αναπαράστασης του συστήματος σε Simulink μέσω της παράστασης στο περιβάλλον αυτό όλων των δυναμικών διατάξεων ενός ΣΗΕ (σύγχρονες γεννήτριες, ανεμογεννήτριες κτλ). Το περιβάλλον προσομοίωσης παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα για την ανάπτυξη των επιθυμητών μοντέλων με τη μορφή διαγραμμάτων βαθμίδων σε ένα γραφικό παράθυρο επικοινωνίας (Graphical User Interface), επιλέγοντας βαθμίδες από τις έτοιμες βιβλιοθήκες του Simulink.

Οι δυναμικές διατάξεις που προαναφέρθηκαν (γεννήτριες, ανεμογεννήτριες κτλ) καθώς και άλλες διατάξεις ελέγχου (ρυθμιστές στροφών, αυτόματοι ρυθμιστές τάσης κτλ) μοντελοποιούνται μέσω των αντίστοιχων διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά τους. Επιπλέον, ισχύουν η Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας και οι νόμοι του Kirchhoff από τους οποίους προκύπτουν αλγεβρικές εξισώσεις που διέπουν το δίκτυο και εκφράζουν το ισοζύγιο ενεργού –

άεργου ισχύος σε όλους τους ζυγούς. Από τα παραπάνω καθορίζεται κάθε φορά η χρονική απόκριση του δικτύου.

### 2.1.2. Αλγεβρικές εξισώσεις δικτύου

Στη συνέχεια παρατίθενται οι αλγεβρικές εξισώσεις που διέπουν το δίκτυο. Γι' αυτό το λόγο θεωρείται διασυνδεδεμένο ΣΗΕ με  $N$  ζυγούς,  $G$  γεννήτριες,  $M$  μηχανές επαγωγής και  $NI$  ζυγούς διασύνδεσης με εξωτερικά συστήματα (από  $N+1$  έως  $N+NI$ ), οι οποίοι θεωρούνται σταθερής τάσης κατά μέτρο και γωνία (άπειροι ζυγοί).

Έστω  $xy$  το κοινό ορθογώνιο πλαίσιο στο οποίο ανάγονται τα μεγέθη του στάτη όλων των σύγχρονων γεννητριών του συστήματος και το οποίο θεωρούμε ότι περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα του συστήματος  $\omega_{sys}$ , όπως λαμβάνεται από τη σχέση (1.2). Ο άξονας  $x$  του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς του συστήματος θεωρείται ότι αποτελεί τον άξονα αναφοράς όλων των γωνιών, ενώ ο άξονας  $y$  προπορεύεται κατά  $90^\circ$ .

Αν  $v_N, v_I$ , τα διανύσματα των προβολών των τάσεων του συστήματος στο  $xy$  σύστημα αναφοράς για τους ζυγούς του δικτύου και τους ζυγούς διασύνδεσης αντίστοιχα και  $i_N, i_I$ , τα αντίστοιχα διανύσματα για τα εγχεόμενα ρεύματα, σύμφωνα με το Νόμο του Ohm θα ισχύει:

$$\begin{bmatrix} i_N \\ i_I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_N & Y_{NI} \\ Y_{IN} & Y_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_N \\ v_I \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{2(N+NI) \times 1} \quad (2.1)$$

όπου:

- $Y_N, Y_{NI}, Y_{IN}, Y_I$  είναι πραγματικοί πίνακες αγωγιμοτήτων διαστάσεων  $2N \times 2N, 2N \times 2NI, 2NI \times 2N$  και  $2NI \times 2NI$  αντίστοιχα.
- $\mathbf{0}_{2(N+NI) \times 1}$  είναι το μηδενικό διάνυσμα.

Ο ισοδύναμος πίνακας αγωγιμοτήτων της σχέσης (2.1) αποτελείται από υποπίνακες  $y_{ij}$  διαστάσεων  $2 \times 2$ , οι οποίοι έχουν την εξής μορφή:

$$y_{ij} = \begin{bmatrix} g_{ij} & -b_{ij} \\ b_{ij} & g_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Έτσι, με βάση τις σχέσεις (2.1), (2.2) και από τις σχέσεις:

$$v_N = [[v_{x1} \quad v_{y1}] \dots [v_{xN} \quad v_{yN}]]^T \quad (2.3a)$$

$$i_N = [[i_{x1} \quad i_{y1}] \dots [i_{xN} \quad i_{yN}]]^T \quad (2.3b)$$

το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων που περιγράφουν το δίκτυο στην περίπτωση αυτόνομου δικτύου ( $NI = 0$ ), μπορεί να γραφεί σε διανυσματική μορφή ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_{x1} \\ \mathbf{i}_{y1} \\ \vdots \\ \mathbf{i}_{xN} \\ \mathbf{i}_{yN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{11} & -\mathbf{b}_{11} \\ \mathbf{b}_{11} & \mathbf{g}_{11} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{1N} & -\mathbf{b}_{1N} \\ \mathbf{b}_{1N} & \mathbf{g}_{1N} \end{bmatrix} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{N1} & -\mathbf{b}_{N1} \\ \mathbf{b}_{N1} & \mathbf{g}_{N1} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{NN} & -\mathbf{b}_{NN} \\ \mathbf{b}_{NN} & \mathbf{g}_{NN} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{x1} \\ \mathbf{v}_{y1} \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{xN} \\ \mathbf{v}_{yN} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Ο ισοδύναμος πραγματικός πίνακας αγωγιμοτήτων στην περίπτωση διασυνδεδεμένου δικτύου με σταθερή τοπολογία αποτελείται από ένα σταθερό και ένα μεταβαλλόμενο κομμάτι. Το σταθερό κομμάτι υπολογίζεται από το πρόγραμμα αρχικοποίησης και περιλαμβάνει την επίδραση στο δίκτυο α) των γραμμών μεταφοράς και διανομής, β) των μετασχηματιστών με σταθερό λόγο μετασχηματισμού, γ) των φορτίων σταθερής αγωγιμότητας. Το μεταβαλλόμενο μέρος του πίνακα προσομοίωσης, μπορεί να υπολογίζεται από το πρόγραμμα επίλυσης δικτύου σε κάθε χρονική στιγμή προσομοίωσης λαμβάνοντας υπόψη α) τα δυναμικά αυτορρυθμιζόμενα φορτία, β) τους μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ, γ) τους αυτόματους μηχανισμούς ζεύξης – απόζευξης στατών πυκνωτών και δ) τα στατά συστήματα έργου αντιστάθμισης.

Επειδή το διάνυσμα  $\mathbf{v}_I$  των τάσεων στους ζυγούς διασύνδεσης θεωρείται γνωστό, διατηρούνται οι πρώτες  $2N$  εξισώσεις της σχέσης (2.1). Οπότε, το άγνωστο  $2N \times 1$  διάνυσμα  $\mathbf{v}_N$  των  $N$  τάσεων του δικτύου θα προκύψει από την επίλυση του συστήματος:

$$\mathbf{i}_N - \mathbf{Y}_N \mathbf{v}_N - \mathbf{Y}_{NI} \mathbf{v}_I = \mathbf{0}_{2N \times 1} \quad (2.5)$$

Προκειμένου να επιλυθεί το σύστημα (2.5), το διάνυσμα  $\mathbf{i}_N$  των προβολών των εγγεόμενων ρευμάτων πρέπει να εκφραστεί συναρτήσει του αγνώστου διανύσματος  $\mathbf{v}_N$ .

Στη γενική περίπτωση, η έγχυση ρεύματος σε ένα ζυγό μπορεί να προκύψει από την ταυτόχρονη παρουσία μιας σύγχρονης γεννήτριας, μιας μηχανής επαγωγής κι ενός στατικού μη γραμμικού φορτίου, το οποίο δεν περιλαμβάνεται στον πίνακα αγωγιμοτήτων. Οπότε, το διάνυσμα  $\mathbf{i}_N$  προκύπτει από το παρακάτω άθροισμα:

$$\mathbf{i}_N = \mathbf{i}_G + \mathbf{i}_M + \mathbf{i}_{NI} \quad (2.6)$$

στο οποίο τα ρεύματα του δεύτερου σκέλους είναι τα διανύσματα των προβολών στο  $xy$  πλαίσιο των εγγεόμενων ρευμάτων εξαιτίας των σύγχρονων γεννητριών, των μηχανών επαγωγής και των στατικών μη γραμμικών φορτίων αντίστοιχα.

Τα εγγεόμενα ρεύματα στο δίκτυο λόγω των σύγχρονων γεννητριών και των μηχανών επαγωγής δίνονται συναρτήσει της τάσεως από τις σχέσεις [7]:

$$\mathbf{i}_G = \mathbf{Y}_G \mathbf{v}_N + \mathbf{b}_G \quad (2.7)$$

$$\mathbf{i}_M = \mathbf{Y}_M \mathbf{v}_N + \mathbf{b}_M \quad (2.8)$$

ενώ για το εγγεόμενο ρεύμα σε ένα ζυγό  $i$  του εξεταζόμενου συστήματος ισχύει αντίστοιχα:

$$\mathbf{i}_{Gi} = \mathbf{Y}_{Gi} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{xi} \\ \mathbf{v}_{yi} \end{bmatrix} + \mathbf{b}_{Gi} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{i}_{Mi} = \mathbf{Y}_{Mi} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{xi} \\ \mathbf{v}_{yi} \end{bmatrix} + \mathbf{b}_{Mi} \quad (2.10)$$

Οι διδιάστατοι πίνακες  $\mathbf{Y}_{Gi}$ ,  $\mathbf{Y}_{Mi}$  και τα διανύσματα  $\mathbf{b}_{Gi}$ ,  $\mathbf{b}_{Mi}$  εξαρτώνται αποκλειστικά και μόνο από τις παραμέτρους και τις μεταβλητές κατάστασης της γεννήτριας και της μηχανής επαγωγής αντίστοιχα. Με βάση τις σχέσεις (2.9) και (2.10) βλέπουμε ότι το διάνυσμα των εγγεόμενων ρευμάτων στο δίκτυο λόγω των μηχανών είναι γραμμική συνάρτηση των προβολών των τερματικών τους τάσεων στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς  $xy$  του συστήματος. Κάτι τέτοιο όντως ισχύει όταν αμελείται το φαινόμενο του κορεσμού των μαγνητικών κυκλωμάτων, δηλαδή αυτά θεωρούνται γραμμικά.

Στο σημείο αυτό ορίζεται ο τελεστής:

$$[\mathbf{diag}_{i=1}^N(\mathbf{a}_i)] = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 & \mathbf{0} & \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & & \mathbf{a}_N \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

ο οποίος δημιουργεί έναν πίνακα, στον οποίο τα μόνα μη μηδενικά στοιχεία είναι αυτά της κύριας διαγωνίου. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στη σχέση (2.11), το στοιχείο  $(i,i)$  είναι ίσο με  $\mathbf{a}_i$ . Το στοιχείο  $\mathbf{a}_i$  μπορεί να είναι είτε βαθμωτό μέγεθος είτε διάνυσμα είτε πίνακας. Εάν οι διαστάσεις του είναι  $M_1 \times M_2$ , τότε ο πίνακας που ορίζεται από παραπάνω τελεστή θα είναι διαστάσεων  $NM_1 \times NM_2$ , ο οποίος δεν θα είναι τετραγωνικός όταν  $M_1 \neq M_2$ .

Από τα παραπάνω έχουμε για τον διαστάσεων  $2N \times 2N$  πίνακα  $\mathbf{Y}_G$  και το  $2N \times 1$  διάνυσμα  $\mathbf{b}_G$  της σχέσης (2.7):

$$\mathbf{Y}_G = [\mathbf{diag}_{i=1}^N(\mathbf{Y}_{G,i})] \quad (2.12\alpha)$$

$$\mathbf{b}_G = [\mathbf{b}_{G,1}^T \dots \mathbf{b}_{G,N}^T]^T \quad (2.12\beta)$$

Σημειώνεται ότι στο εξεταζόμενο δίκτυο των  $G$  σύγχρονων γεννητριών, τόσο ο πίνακας  $\mathbf{Y}_G$  όσο και το διάνυσμα  $\mathbf{b}_G$  αποτελούνται αντίστοιχα από  $G$  μη μηδενικούς υποπίνακες  $\mathbf{Y}_{G,i}$  και  $G$  μη μηδενικά ιδιοδιανύσματα  $\mathbf{b}_{G,i}$ .

Αντίστοιχα στη (2.8) για τον πίνακα  $\mathbf{Y}_M$  διαστάσεων  $2N \times 2N$  και το  $2N \times 1$  διάνυσμα  $\mathbf{b}_M$  έχουμε:

$$\mathbf{Y}_M = [\mathbf{diag}_{i=1}^N(\mathbf{Y}_{M,i})] \quad (2.13\alpha)$$

$$\mathbf{b}_M = [\mathbf{b}_{M,1}^T \dots \mathbf{b}_{M,N}^T]^T \quad (2.13\beta)$$

Επειδή θεωρήθηκε ότι το πλήθος των μηχανών επαγωγής στο εξεταζόμενο ΣΗΕ είναι ίσο με  $M$ , τόσο ο πίνακας  $\mathbf{Y}_M$  όσο και το διάνυσμα  $\mathbf{b}_M$  αποτελούνται αντίστοιχα από  $M$  μη μηδενικούς υποπίνακες  $\mathbf{Y}_{M,i}$  και  $G$  μη μηδενικά ιδιοδιανύσματα  $\mathbf{b}_{M,i}$ .

Το διάνυσμα  $\mathbf{i}_{NL}$  των εγχεόμενων ρευμάτων λόγω στατικών μη γραμμικών φορτίων που δεν περιλαμβάνονται στη μήτρα αγωγιμοτήτων θα είναι:

$$\mathbf{i}_{NL}(\mathbf{v}_N) = [\mathbf{i}_{NL,1}^T(\mathbf{v}_{x1}, \mathbf{v}_{y1}) \dots \mathbf{i}_{NL,N}^T(\mathbf{v}_{xN}, \mathbf{v}_{yN})]^T \quad (2.14)$$

όπου το κάθε υποδιάνυσμα δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{i}_{NL,i}(\mathbf{v}_{xi}, \mathbf{v}_{yi}) = -\mathbf{z}_{NL,i} \begin{bmatrix} \frac{P_{Li}(V_i)v_{xi} + Q_{Li}(V_i)v_{yi}}{v_{xi}^2 + v_{yi}^2} \\ \frac{P_{Li}(V_i) - Q_{Li}(V_i)v_{yi}}{v_{xi}^2 + v_{yi}^2} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

με  $\mathbf{z}_{NL,i} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$  ανάλογα με το εάν υπάρχει ή όχι μη γραμμικό φορτίο στο ζυγό  $i$ ,  $P_L$ ,  $Q_L$  οι αντίστοιχες καταναλώσεις του φορτίου σε ενεργό κι άεργο ισχύ και γραμμικές συναρτήσεις της  $V_i$  που είναι ίση με το μέτρο της τάσης στο ζυγό  $i$ :

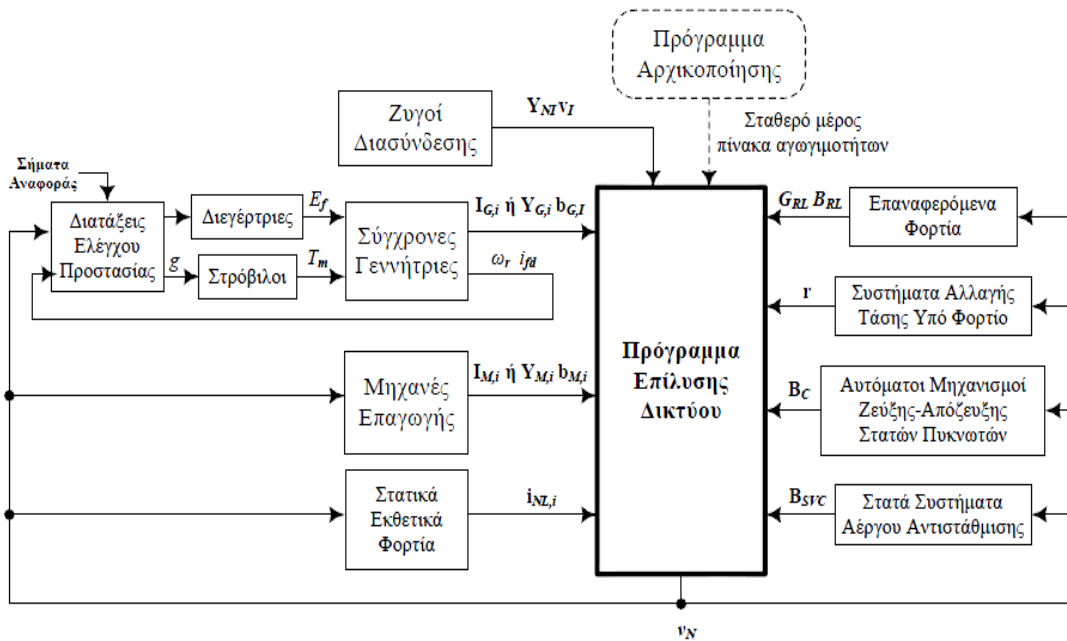
$$V_i = \sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2} \quad (2.16)$$

Αντικαθιστώντας τις (2.6), (2.7), (2.8) στη (2.5) προκύπτει:

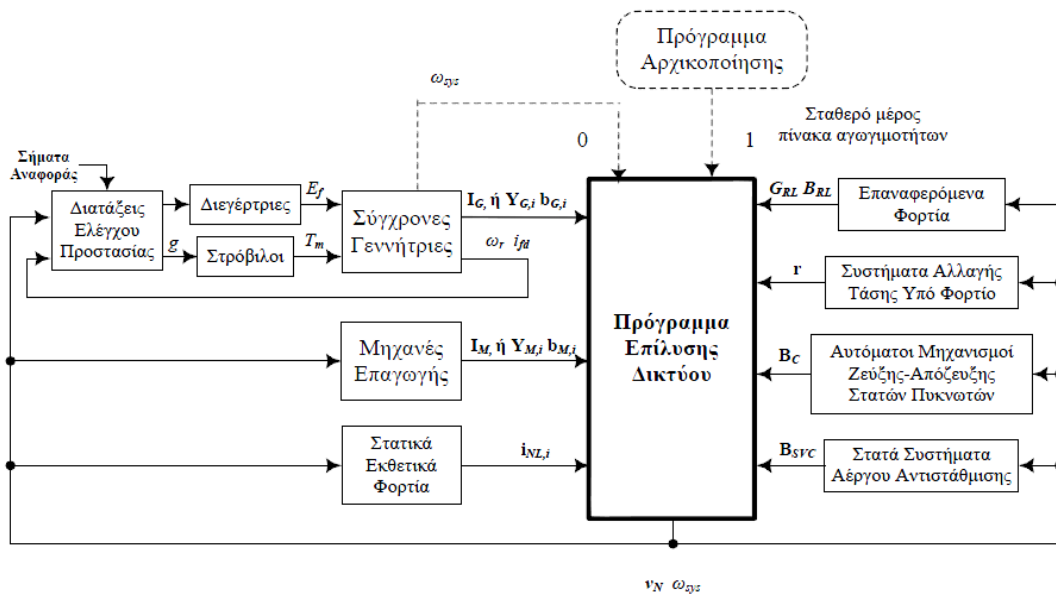
$$\mathbf{Y}_G \mathbf{v}_N + \mathbf{b}_G + \mathbf{Y}_M \mathbf{v}_N + \mathbf{b}_M + \mathbf{i}_{NL}(\mathbf{v}_N) - \mathbf{Y}_N \mathbf{v}_N - \mathbf{Y}_{NI} \mathbf{v}_i = \mathbf{0}_{2N \times 1} \quad (2.17)$$

το οποίο είναι εν γένει ένα μη γραμμικό σύστημα  $2N$  αλγεβρικών εξισώσεων και για την επίλυση του οποίου χρησιμοποιείται συνήθως η αριθμητική μέθοδος Newton – Raphson.

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης στη γενική του μορφή για την περίπτωση διασυνδεδεμένου και αυτόνομου δικτύου παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.2 και 2.3 αντίστοιχα [7]. Όπως φαίνεται σε αυτά, υπάρχουν δύο επιλογές για τις εισόδους που λαμβάνει το πρόγραμμα επίλυσης του δικτύου και προέρχονται από τις σύγχρονες γεννήτριες και τις μηχανές επαγωγής. Συγκεκριμένα, λαμβάνονται είτε τα εγχεόμενα ρεύματα  $i_{G,i}$ ,  $i_{M,i}$  είτε οι διδιάστατοι πίνακες  $\mathbf{Y}_{G,i}$ ,  $\mathbf{Y}_{M,i}$  και τα διανύσματα  $\mathbf{b}_{G,i}$ ,  $\mathbf{b}_{M,i}$  ανάλογα με τον τρόπο επίλυσης των αλγεβρικών εξισώσεων του δικτύου. Έτσι, στην πρώτη περίπτωση η επίλυση γίνεται βάσει της εξίσωσης (2.5), ενώ στη δεύτερη βάσει της (2.17).



Σχ. 2.2 Αλγόριθμος προσομοίωσης διασυνδεδεμένου δικτύου



Σχ. 2.3 Αλγόριθμος προσομοίωσης αυτόνομου δικτύου

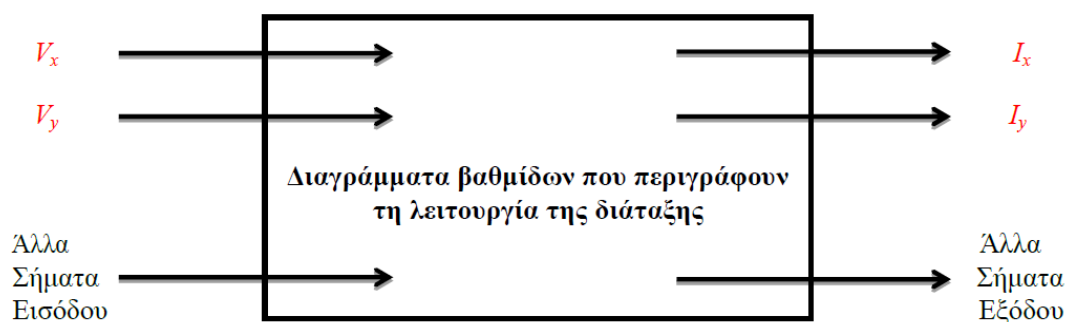
Όταν μελετάται κάποιο αυτόνομο δίκτυο δεν υπάρχουν ζυγοί διασύνδεσης κάτι που συντελεί σε μια απλοποίηση του προς επίλυση συστήματος. Ωστόσο, η μήτρα αγωγιμοτήτων μπορεί να υπολογίζεται σε κάθε βήμα της προσομοίωσης (επιλογή 0 στο Σχ. 2.3) επειδή η συχνότητα του συστήματος δεν παραμένει κατανάγκη σταθερή όπως στο διασυνδεδεμένο δίκτυο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μεταβάλλονται ευθέως ανάλογα οι τιμές των επαγωγικών αντιδράσεων και των χωρητικοτήτων των επιμέρους διατάξεων. Ο υπολογισμός του πίνακα αγωγιμοτήτων σε κάθε βήμα αυξάνει πολύ, όμως, το υπολογιστικό κόστος και γι' αυτό θεωρείται προτιμότερη η

προσέγγιση της μήτρας αγωγιμοτήτων ως μη επηρεαζόμενη από τυχόν μεταβολές της συχνότητας (επιλογή 1).

## 2.2. Γενική δομή μοντέλων στο Simulink

### 2.2.1. Δομή διατάξεων ΣΗΕ

Η γενική δομή των διατάξεων στις οποίες οφείλεται η έγχυση ρεύματος στους ζυγούς (σύγχρονες γεννήτριες, μηχανές επαγωγής, μη γραμμικά φορτία, ανεμογεννήτριες), όπως αυτή αναπτύσσεται στα πλαίσια του WHSSP, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4:



Σχ. 2.4 Γενικό μοντέλο διατάξεων

Όπως φαίνεται παραπάνω, οι διατάξεις αυτές δέχονται ως είσοδο τις συνιστώσες του διανύσματος της τάσης ( $V_x$ ,  $V_y$ ) του ζυγού στον οποίο συνδέονται, εκφρασμένες στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος. Επιπλέον, μπορεί να δέχονται κι άλλα σήματα εισόδου απαραίτητα για τη λειτουργία τους, όπως σήματα αναφοράς προερχόμενο από άλλες συνεργαζόμενες διατάξεις (π.χ. διεγέρτριες, στρόβιλοι). Το εγχεόμενο ρεύμα ( $I_x$ ,  $I_y$ ) αποτελεί τη βασική έξοδο, εκφρασμένο κι αυτό στο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος. Ταυτόχρονα μπορεί να υπάρχουν κι άλλες εξόδου, οι οποίες μπορεί να αφορούν α) σημαντικά μεγέθη που επιθυμεί να προβάλλονται ο χρήστης μέσω κάποιου καταγραφέα (score), β) σήματα αναφοράς που καταλήγουν ως είσοδοι σε άλλες διατάξεις και γ) συνιστώσες (όπως τα διανύσματα  $b_G$ ,  $b_M$ ) που σχετίζονται με την επίλυση του δικτύου. Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση διατάξεων ελέγχου (π.χ. ρυθμιστές στροφών, ΣΑΤΥΦ), η δομή αυτή απλοποιείται καθώς αυτές δεν εγχέουν ρεύμα στο δίκτυο.

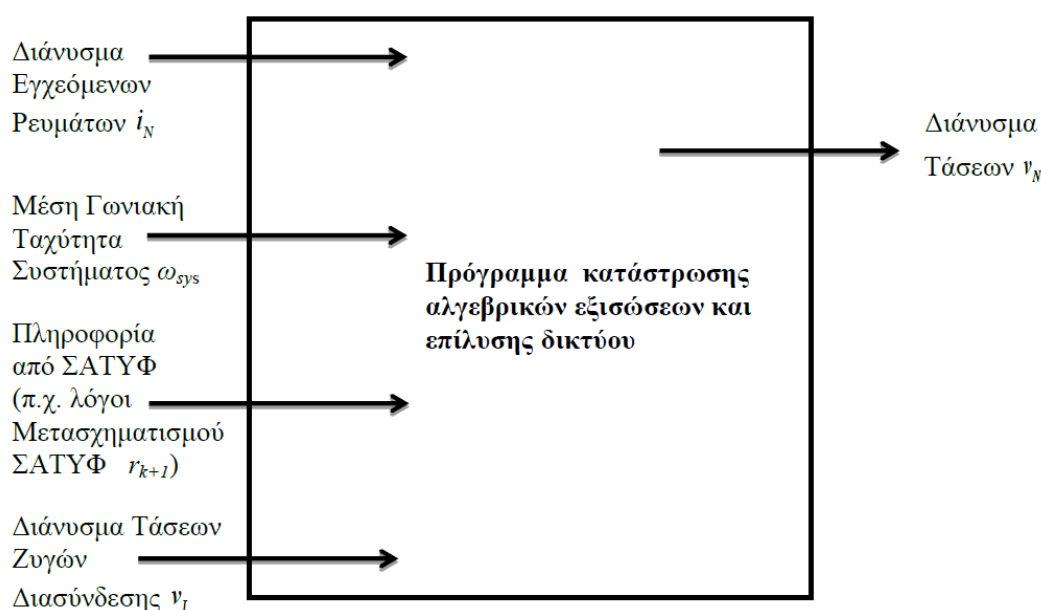
Το μοντέλο αναπαράστασης της κάθε διάταξης αποτελεί ένα αυτόνομο υποσύστημα (subsystem), εσωτερικά του οποίου υλοποιείται το διάγραμμα βαθμίδων που περιγράφει τη λειτουργία της διάταξης. Κάθε τέτοιο υποσύστημα συνοδεύεται από το παράθυρο δεδομένων του (block parameters). Ο χρήστης δηλώνει σε αυτό τις τιμές που λαμβάνουν οι διάφορες παράμετροι που σχετίζονται με τη λειτουργία του



(π.χ. κέρδη, χρονικές σταθερές). Επίσης, στη μάσκα του κάθε υποσυστήματος υλοποιούνται οι απαραίτητες διαδικασίες για την ορθή αντιστοίχιση των τιμών αυτών αλλά και την αρχικοποίηση των μεταβλητών κατάστασης που αυτό περιέχει.

### 2.2.2. Δομή μοντέλου επίλυσης των εξισώσεων του δικτύου

Η γενική δομή του μοντέλου επίλυσης των αλγεβρικών εξισώσεων του δικτύου, ώστε να προκύψει το διάνυσμα των τάσεων του ζυγού του συστήματος δίνεται στο Σχήμα 2.5. Σύμφωνα με την απλοποιημένη αυτή σχηματική παράσταση θεωρούμε ότι το δίκτυο δεν περιλαμβάνει αυτόματους μηχανισμούς ζεύξης – απόζεύξης, στατών πυκνωτών και στατά συστήματα άεργου αντιστάθμισης.

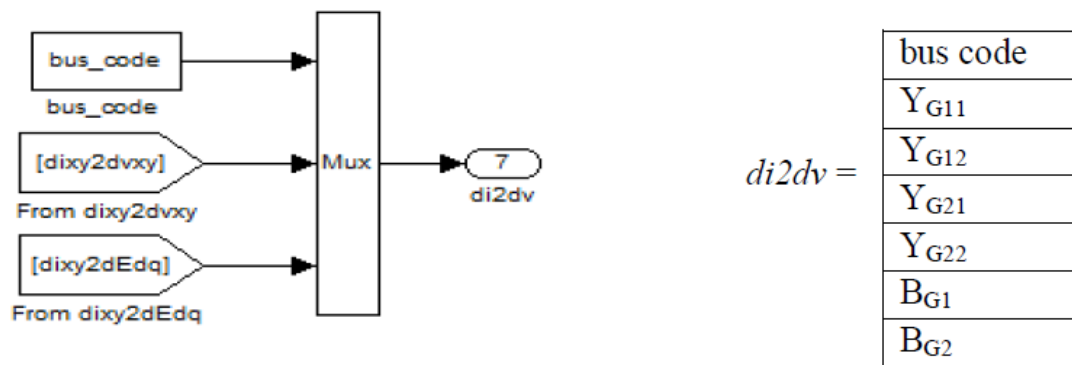


Σχ. 2.2 Γενικό μοντέλο επίλυσης δικτύου

Έτσι, για κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης, το πρόγραμμα επίλυσης του δικτύου δέχεται ως εισόδους τα εγγεόμενα ρεύματα σε κάθε ζυγό  $i_N$  ανηγμένα στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς, τη γωνιακή ταχύτητα  $\omega_{sys}$ , αν πρόκειται για αυτόνομο ΣΗΕ, αλλά και πληροφορία που σχετίζεται με τη δράση των ΣΑΤΥΦ ώστε να καταστρωθεί το αντίστοιχο μεταβλητό κομμάτι του πίνακα αγωγιμοτήτων. Επίσης, λαμβάνει ως είσοδο το διάνυσμα τάσεων  $v_l$  στην περίπτωση διασυνδεδεμένου συστήματος. Στη συνέχεια, το πρόγραμμα επίλυσης τροφοδοτεί το σύστημα με το νέο διάνυσμα των τάσεων  $v_N$ . Με γνωστό πλέον το διάνυσμα αυτό προχωράει στον υπολογισμό των παραγώγων των μεταβλητών κατάστασης και ακολούθως στο επόμενο βήμα ολοκλήρωσης για να συνεχιστεί η διαδικασία προσομοίωσης. Στην παρούσα διπλωματική γίνεται η παραδοχή ότι απουσιάζουν τα μη γραμμικά φορτία. Με αυτή την παραδοχή η μητρική εξίσωση (2.17) γίνεται γραμμική. Φυσικά, για να επιτευχθεί αυτό, έχει προηγηθεί η ανάλυση των εγγεόμενων ρευμάτων από τις διάφορες διατάξεις (σύγχρονες μηχανές, μηχανές επαγωγής, ανεμογεννήτριες) σε δύο

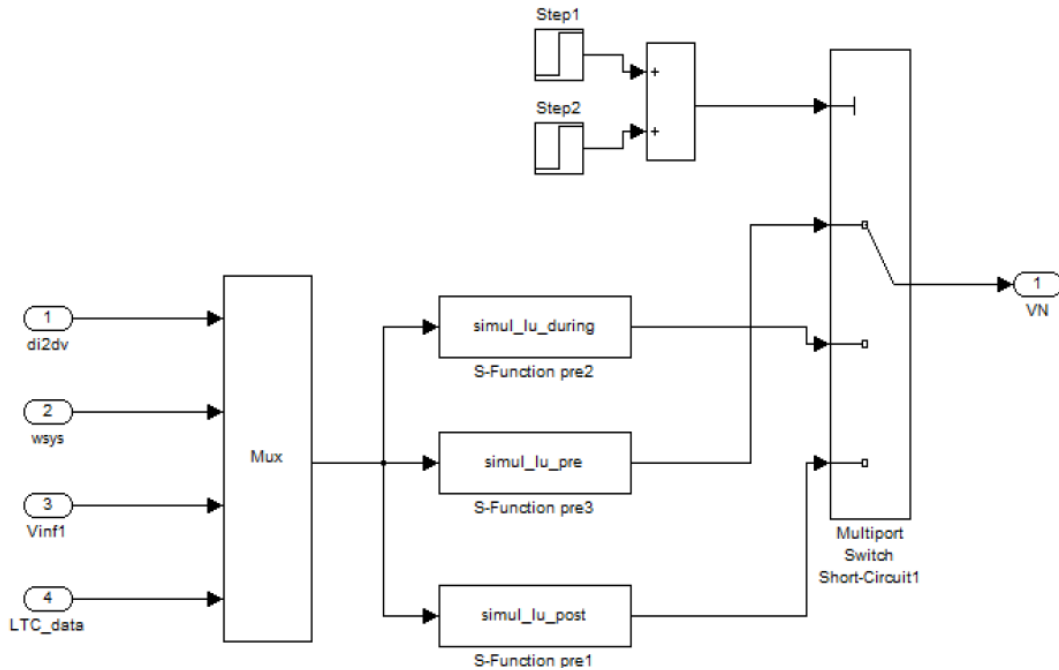
βασικές συνιστώσες. Μια συνιστώσα γραμμικώς εξαρτώμενη από την τάση, όπως αυτή προκύπτει από τις εξισώσεις του εκάστοτε υποσυστήματος και μία συνιστώσα που εξαρτάται πλήρως από την τρέχουσα τιμή των μεταβλητών κατάστασης του κάθε υποσυστήματος. Με αυτό τον τρόπο, για παράδειγμα, το εγχεόμενο ρεύμα των σύγχρονων γεννητριών και των μηχανών επαγωγής εκφράζεται στη μορφή των σχέσεων (2.9), (2.10).

Στην έξοδο του κάθε υποσυστήματος, λοιπόν, λαμβάνεται ένας διδιάστατος πίνακας (όπως οι  $Y_{G,i}$  και  $Y_{M,i}$  που παριστά τη γραμμική εξάρτηση του ρεύματος από την τάση και ένα διδιάστατο διάνυσμα (όπως τα  $b_{G,i}$  και  $b_{M,i}$ ) που παριστά τη μη εξαρτώμενη από την τάση ποσότητα έγχυσης στους άξονες ου σύγχρονου πλαισίου αναφοράς. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, οι επιπλέον έξοδοι της κάθε διάταξης μοντελοποιούνται ως ένα ενιαίο διάνυσμα με έξι συνιστώσες, στις οποίες προστίθεται και ο κωδικός αριθμός του ζυγού σύνδεσης της διάταξης (bus code), και συμβολίζεται με την ονομασία  $di2dv$ . Δίνεται στο Σχήμα 2.3 ως χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της μοντελοποίησης το μπλοκ διάγραμμα που υλοποιεί το συγκεκριμένο διάνυσμα στην περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας, αλλά και ο τρόπος που διατάσσονται τα στοιχεία του διανύσματος.



Σχ. 2.3 Υλοποίηση και επεξήγηση  $di2dv$

Έτσι, η συνιστώσα  $dixy2dvxy$  παριστά τις παραμέτρους γραμμικής εξάρτησης από την τερματική τάση και η συνιστώσα  $dixy2dEdq$  την έγχυση που οφείλεται στις μεταβλητές κατάστασης και συγκεκριμένα στις μεταβατικές ΗΕΔ ευθέος και εγκάρσιου άξονα για την περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας. Φυσικά απαραίτητος είναι και ο κωδικός αριθμησης του ζυγού που συνδέεται για την ορθή κατάσταση των εξισώσεων. Στο Σχήμα 2.4 παρατίθεται το διάγραμμα βαθμίδων που χρησιμοποιείται στο Simulink για την επίλυση του δικτύου. Το διάνυσμα  $di2dv$  περιέχει όλα τα διανύσματα  $di2dv$  των επιμέρους διατάξεων που προκαλούν την έγχυση ρεύματος στους ζυγούς του συστήματος και τροφοδοτείται στις S-functions, οι οποίες καλούν τις αντίστοιχες εκτελέσιμες συναρτήσεις (.m files)  $simul\_lu\_pre$ ,  $simul\_lu\_during$  και  $simul\_lu\_post$ . Σε αυτές τις συναρτήσεις ενημερώνονται τα στοιχεία του πραγματικού πίνακα αγωγιμοτήτων, αν μεταβάλλονται, και παράλληλα καταστρώνεται η μητρική εξίσωση (2.17) από την οποία απουσιάζει ο όρος  $i_{NL}(V_n)$ , καθώς θεωρούμε ότι στο δίκτυο δεν υπάρχουν μη γραμμικά φορτία.



Σχ. 2.4 Υλοποίηση επίλυσης δικτύου στο Simulink

Για να επιλυθεί η (2.17), γράφεται στην ακόλουθη μορφή:

$$(\mathbf{Y}_G + \mathbf{Y}_M - \mathbf{Y}_N)\mathbf{v}_N = \mathbf{Y}_{NI}\mathbf{v}_I - \mathbf{b}_G - \mathbf{b}_M \quad (2.18)$$

όπου αν θέσουμε:

$$\mathbf{Y}_{total} = \mathbf{Y}_G + \mathbf{Y}_M - \mathbf{Y}_N \quad (2.19\alpha)$$

$$\mathbf{B}_{total} = \mathbf{Y}_{NI}\mathbf{v}_I - \mathbf{b}_G - \mathbf{b}_M \quad (2.19\beta)$$

καταλήγουμε στο ακόλουθο γραμμικό σύστημα εκφρασμένο σε μητρική μορφή:

$$\mathbf{Y}_{total}\mathbf{v}_N = \mathbf{B}_{total} \quad (2.20)$$

Δηλαδή, καταστρώνονται σε κάθε βήμα της προσομοίωσης οι επαυξημένοι πίνακες  $\mathbf{Y}_{total}$  και  $\mathbf{B}_{total}$ , ώστε να προκύψει το απλό γραμμικό σύστημα της σχέσης (2.20). Σύμφωνα με τη θεωρία της τριγωνικής παραγοντοποίησης, κάθε αντιστρέψιμος πίνακας μπορεί να γραφεί σαν γινόμενο δύο τριγωνικών πινάκων  $\mathbf{L}$  και  $\mathbf{U}$ , όπου ο  $\mathbf{L}$  είναι κάτω τριγωνικός πίνακας και ο  $\mathbf{U}$  άνω τριγωνικός. Σημειώνεται εδώ ότι η τριγωνική παραγοντοποίηση πραγματοποιείται με την τυποποιημένη εντολή της MATLAB lu (εξού και η ονομασία των S- functions). Έτσι, το σύστημα επιλύεται με τριγωνική παραγοντοποίηση του  $\mathbf{Y}_{total}$  και στη συνέχεια, με εφαρμογή της ευθείας και αντιστροφού αντικαταστάσεως.

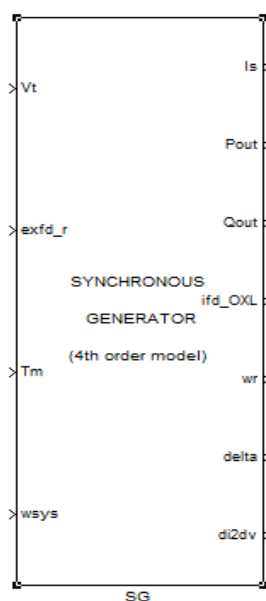
## 2.3. Μοντέλα συνιστωσών

### 2.3.1. Σύγχρονη γεννήτρια

Το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας αποτελεί την υλοποίηση μιας συμμετρικής τριφασικής γεννήτριας τέταρτης τάξης που περιγράφεται από τις εξισώσεις του Park [3]. Βρίσκεται στη βιβλιοθήκη που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας [14] στο αρχείο Synchronous\_Generator κι έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές [3]:

- i. Τα τυλίγματα του στάτη έχουν ημιτονοειδή κατανομή κατά μήκος του διακένου.
- ii. Οι αύλακες του στάτη δεν προκαλούν σημαντική μεταβολή των αυτεπαγωγών και των αλληλεπαγωγών λόγω της θέσης του δρομέα.
- iii. Το φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης αμελείται.
- iv. Η συνεισφορά του μαγνητικού κορεσμού αμελείται και υπάρχουν μόνο γραμμικά συζευγμένα μαγνητικά κυκλώματα, γεγονός που εξυπηρετεί την ευκολία της ανάλυσης.
- v. Αμελούνται τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα του τυλίγματος του στάτη που εξελίσσονται σε χρονικό διάστημα μικρό σε σχέση με το διάστημα ενδιαφέροντος για τις μελέτες ευστάθειας.

Οι αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις που διέπουν τη δυναμική συμπεριφορά του συγκεκριμένου μπλοκ δίνονται στη διδακτορική διατριβή [7], στα πλαίσια της οποίας έγινε και η υλοποίησή του. Το μπλοκ φαίνεται στο Σχήμα 2.5:



Σχ. 2.5 Μπλοκ σύγχρονης γεννήτριας στο περιβάλλον Simulink

Οι τέσσερις εισοδοί που δέχεται είναι οι εξής:

- i. Το διάνυσμα  $(v_x, v_y)$  της τερματικής τάσης της γεννήτριας  $V_t$  (αμ), ανηγμένο στη σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος.
- ii. Η τάση του τυλίγματος διέγερσης του δρομέα  $exfd\_r$  (αμ) στα ονομαστικά μεγέθη της γεννήτριας, που προέρχεται από το μοντέλο του αυτόματου ρυθμιστή τάσης της γεννήτριας.
- iii. Η μηχανική ροπή  $T_m$  (αμ) στη βάση του συστήματος, που προέρχεται από το μοντέλο του ρυθμιστή στροφών της γεννήτριας.
- iv. Η γωνιακή ταχύτητα του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς  $w_{sys}$  (αμ), η οποία είναι σταθερή και ίση με τη μονάδα για διασυνδεδεμένο σύστημα ή προκύπτει από τη σχέση (1.18).

Οι επτά έξοδοι του μοντέλου είναι οι παρακάτω:

- i. Το διάνυσμα  $(i_x, i_y)$  του εγχεόμενου ρεύματος της γεννήτριας  $I_s$  (αμ) στη βάση του συστήματος και ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.
- ii. Η εγχεόμενη ενεργός ισχύς  $P_{out}$  (αμ) στη βάση του συστήματος.
- iii. Η εγχεόμενη άεργος ισχύς  $Q_{out}$  (αμ) στη βάση του συστήματος.
- iv. Το ρεύμα του πεδίου διέγερσης  $ifd\_OXL$  (αμ) στα ονομαστικά μεγέθη της γεννήτριας.
- v. Η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας  $w_r$  (αμ)
- vi. Η γωνία  $delta$  ( $\delta$ ) σε μοίρες ανάμεσα στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος  $xy$  και το σύγχρονο πλαίσιο της γεννήτριας  $dq$ .
- vii. Το διάνυσμα  $di2dv$  για την επίλυση του δικτύου.

Το διάνυσμα  $di2dv$  αναλύεται σε:

$$di2dv = [(bus\ code) \ Y_{G11} \ Y_{G12} \ Y_{G21} \ Y_{G22} \ B_{G1} \ B_{G2}]^T \quad (2.21)$$

όπου:

$$Y_G = \begin{bmatrix} Y_{G11} & Y_{G12} \\ Y_{G21} & Y_{G22} \end{bmatrix} = -\frac{1}{r_s^2 + \lambda_\omega^2 X'_d X'_q} T \begin{bmatrix} r_s & \lambda_\omega X'_q \\ -\lambda_\omega X'_d & r_s \end{bmatrix} T^{-1} \quad (2.22)$$

$$B_G = \begin{bmatrix} B_{G1} \\ B_{G2} \end{bmatrix} = -\frac{\lambda_\omega}{r_s^2 + \lambda_\omega^2 X'_d X'_q} T \begin{bmatrix} r_s & \lambda_\omega X'_q \\ -\lambda_\omega X'_d & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

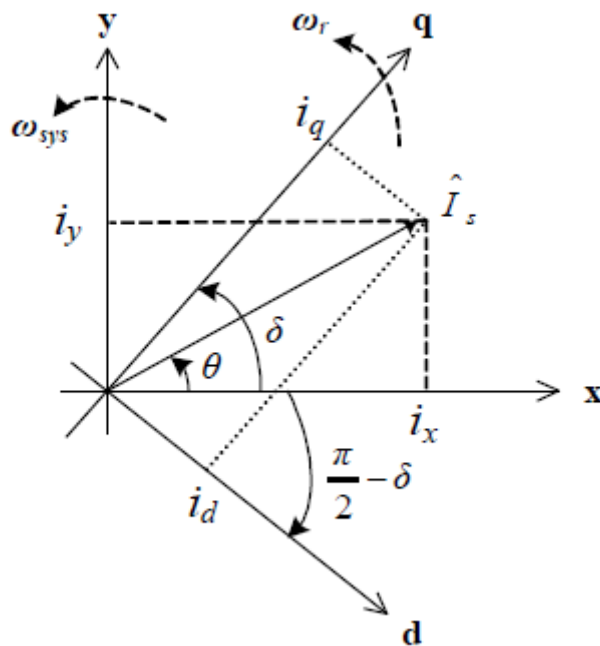
$$T = \begin{bmatrix} \sin\delta & \cos\delta \\ -\cos\delta & \sin\delta \end{bmatrix} \text{ και } T^{-1} = \begin{bmatrix} \sin\delta & -\cos\delta \\ \cos\delta & \sin\delta \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Όσον αφορά τα μεγέθη που εμφανίζονται στους πίνακες ισχύει:

$$\lambda_\omega = \frac{\omega_{sys}}{\omega_b} \quad (2.25)$$

όπου  $\omega_b$  είναι η ονομαστική συχνότητα του συστήματος. Με  $E'_d, E'_q$  συμβολίζονται οι μεταβατικές ΗΕΔ κατά τον ευθύ (d) και εγκάρσιο (q) άξονα του dq πλαισίου και με  $X'_d, X'_q$  οι αντίστοιχες μεταβατικές αντιδράσεις του κάθε άξονα. Με  $r_s$  συμβολίζεται η ωμική αντίσταση του στάτη. Τέλος, ο πίνακας  $\mathbf{T}$  ονομάζεται πίνακας μετασχηματισμού και αντιστοιχεί στον στροφέα  $e^{j(\frac{\pi}{2}-\delta)}$ , όπου  $\delta$  η γωνία ανάμεσα στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος xy και το σύγχρονο πλαίσιο της γεννήτριας dq, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6:

Οι μεταβλητές κατάστασης του μοντέλου είναι οι πεπλεγμένες ροές ευθέος κι εγκάρσιου άξονα ( $yfd\_r$  και  $ykq\_r$  αντίστοιχα), η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα ( $SG\_wr$ ) και η γωνία ανάμεσα στα πλαίσια dq και xy ( $SG\_delta$ ). Η αρχικοποίησή τους και η απόδοση τιμών στις  $X'_d, X'_q$  λαμβάνει χώρα στη διαδικασία αρχικοποίησης που ορίζεται από τη μάσκα του μοντέλου με βάση τις αρχικές συνθήκες και τιμές των διαφόρων παραμέτρων, που, όπως προαναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, προκύπτουν από την επίλυση της αρχικής ροής φορτίου στη ρουτίνα αρχικοποίησης του δικτύου.



Σχ. 2.6 Ορθογώνια πλαίσια αναφοράς συστήματος και σύγχρονης γεννήτριας

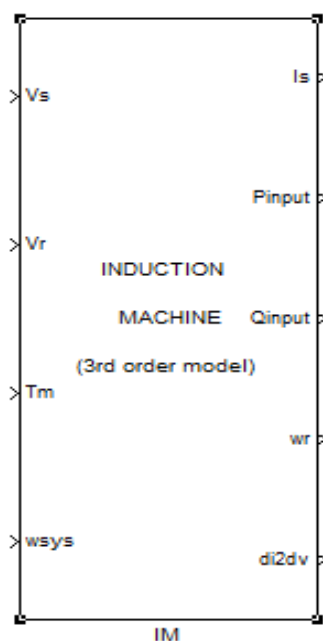
### 2.3.2. Τριφασική μηχανή επαγωγής

Η υλοποίηση του μπλοκ της μηχανής επαγωγής έγινε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής [7], στην οποία δίνονται το σύνολο των διαφορικών κι αλγεβρικών εξισώσεων που χαρακτηρίζουν τη δυναμική συμπεριφορά του. Βρίσκεται στο αρχείο Induction\_Machine της βιβλιοθήκης που αναπτύχθηκε στο [14] και αποτελεί τη μοντελοποίηση μιας συμμετρικής τριφασικής μηχανής επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα, που περιγράφεται από τις εξισώσεις του Park και αποτελεί μοντέλο τρίτης τάξης.

Οι παραδοχές που έγιναν για λόγους απλοποίησης των εξισώσεων είναι οι ακόλουθες:

- i. Το φαινόμενο του μαγνητικού κορεσμού αμελείται.
- ii. Η ωμική αντίσταση του δρομέα θεωρείται σταθερή.
- iii. Αμελούνται τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα του τυλίγματος του στάτη όπως και στην περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας.

Το μπλοκ της μηχανής επαγωγής στο περιβάλλον του Simulink φαίνεται στο Σχήμα 2.7:



Σχ. 2.7 Μπλοκ μηχανής επαγωγής στο περιβάλλον Simulink

Διακρίνονται τέσσερις εισόδους στο μπλοκ, οι οποίες είναι:

- i. Το διάνυσμα  $(v_x, v_y)$  της τερματικής τάσης της μηχανής επαγωγής (τύλιγμα στάτη)  $V_s$  (αμ), ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος, το οποίο εδώ ταυτίζεται με αυτό της μηχανής.
- ii. Το διάνυσμα της τάσης του τυλίγματος δρομέα  $V_r$  (αμ), το οποίο είναι μηδενικό για την περίπτωση βραχυκυκλωμένου δρομέα.

- iii. Η μηχανική ροπή  $T_m$  (αμ) στη βάση του συστήματος, η οποία μπορεί να είναι σταθερά για φορτίο σταθερής ροπής ή να προκύπτει συναρτήσει των στροφών (π.χ. τετραγωνικό φορτίο).
- iv. Η γωνιακή ταχύτητα του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς  $w_{sys}$  (αμ).

Οι πέντε έξοδοι του μπλοκ είναι οι εξής:

- i. Το διάνυσμα  $(i_x, i_y)$  του απορροφούμενου (σύμβαση κινητήρα) ρεύματος της μηχανής  $I_s$  (αμ) στη βάση του συστήματος και ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.
- ii. Η απορροφούμενη (σύμβαση κινητήρα) ενεργός ισχύ  $P_{input}$  (αμ) στη βάση του συστήματος.
- iii. Η απορροφούμενη (σύμβαση κινητήρα) άεργος ισχύ  $Q_{input}$  (αμ) στη βάση του συστήματος.
- iv. Η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας  $w_r$  (αμ).
- v. Το διάνυσμα  $di2dv$  για την επίλυση του δικτύου.

Το διάνυσμα  $di2dv$  σε αυτή την περίπτωση είναι:

$$di2dv = [(bus\ code)\ Y_{M11}\ Y_{M12}\ Y_{M21}\ Y_{M22}\ B_{M1}\ B_{M2}]^T \quad (2.26)$$

όπου:

$$Y_M = \begin{bmatrix} Y_{M11} & Y_{M12} \\ Y_{M21} & Y_{M22} \end{bmatrix} = -\frac{1}{r_s^2 + \lambda_\omega^2 X'_d X'_q} \begin{bmatrix} r_s & \lambda_\omega X'_q \\ -\lambda_\omega X'_d & r_s \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$B_M = \begin{bmatrix} B_{M1} \\ B_{M2} \end{bmatrix} = -\frac{\lambda_\omega}{r_s^2 + \lambda_\omega^2 X'_d X'_q} T \begin{bmatrix} r_s & \lambda_\omega X'_q \\ -\lambda_\omega X'_d & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

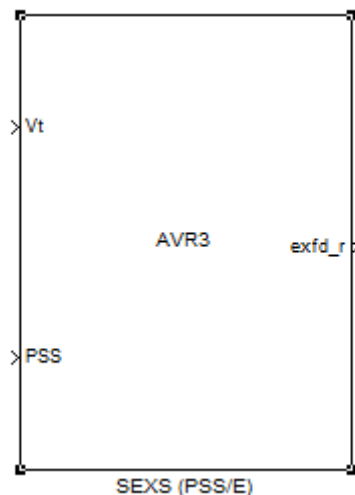
Με  $E'_d, E'_q$  συμβολίζονται οι μεταβατικές ΗΕΔ κατά τον ευθύ (d) και εγκάρσιο (q) άξονα του dq πλαισίου και με  $X'_d, X'_q$  οι αντίστοιχες μεταβατικές αντιδράσεις του κάθε άξονα. Με  $r_s$  συμβολίζεται η ωμική αντίσταση του στάτη.

Οι μεταβλητές κατάστασης είναι οι πεπλεγμένες ροές ευθέος και εγκάρσιου άξονα του σύγχρονου πλαισίου της μηχανής ( $ydr_e$  και  $yqr_e$  αντίστοιχα) και η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα ( $IM_w$ ). Η αρχικοποίηση λαμβάνει χώρα στη μάσκα όπως και στη σύγχρονη γεννήτρια.

### 2.3.3. Αυτόματος ρυθμιστής τάσης (APT)

Το μπλοκ του αυτομάτου ρυθμιστή τάσης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία και βρίσκεται στη βιβλιοθήκη του WHSSP αναπτύχθηκε στο [7] με το όνομα AVR3. Είναι τύπου AC4A κατά IEEE. Το μπλοκ φαίνεται στο Σχήμα 2.8:





Σχ. 2.8 Μπλοκ τύπου AC4A κατά IEEE στο περιβάλλον Simulink

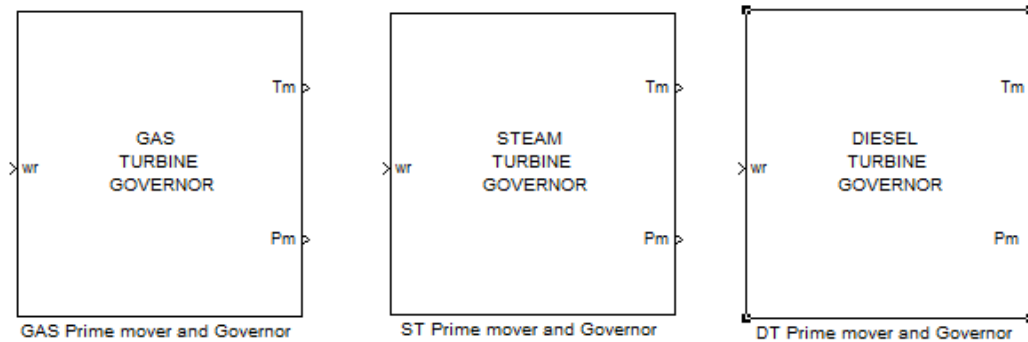
Ως εισόδους δέχεται:

- i. Το διάνυσμα της τερματικής τάσης της σύγχρονης γεννήτριας  $V_t$  (αμ) ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος xy.
- ii. Το βοηθητικό σήμα PSS που προέρχεται από το σταθεροποιητή ισχύος, αλλά στην παρούσα εργασία δεν υπάρχει.

Η μοναδική έξοδος είναι η τάση του κυκλώματος διέγερσης  $exfd_r$ , που τροφοδοτεί τη γεννήτρια (αμ στα ονομαστικά της μεγέθη) και αποτελεί τη μία από τις δύο μεταβλητές κατάστασης του μοντέλου. Η δεύτερη συνδέεται με το φίλτρο μεταπορείας που υπάρχει στον APT για λόγους ευστάθειας.

#### 2.3.4. Στρόβιλοι και ρυθμιστές στροφών

Κάθε σύγχρονη γεννήτρια συνοδεύεται από την κατάλληλη διάταξη που περιγράφει τη λειτουργία του στροβίλου για την απόδοση μηχανικής ροπής στον άξονά της και τον κατάλληλο ρυθμιστή στροφών. Αυτά τα υποσυστήματα έχουν μοντελοποιηθεί στο [7] ως ενοποιημένες μονάδες και ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την κατάλληλη από το SG\_Prime\_movers\_and\_Governors [14]. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιούνται μόνο τα μοντέλα του ατμοστροβίλου, του αεριοστροβίλου και της μονάδας με νηζελοκινητήρα. Στο Σχήμα 2.9 βρίσκονται τα μπλοκ των μοντέλων στροβίλων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική:



Σχ. 2.9 Μπλοκ μοντέλων στροβίλων στο περιβάλλον Simulink

Σε κάθε περίπτωση, το μπλοκ δέχεται ως είσοδο τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας  $w_r$  (αμ) και αποδίδει στην έξοδο τη μηχανική ισχύ  $P_m$  και τη μηχανική ροπή  $T_m$  (αμ στη βάση του συστήματος), που εισέρχεται στη συνέχεια ως είσοδος στο μπλοκ της σύγχρονης γεννήτριας.

Το **μοντέλο ατμοστροβίλου** είναι τριών βαθμίδων (υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης) και συνοδεύεται από ένα κλασικό μηχανικό-υδραυλικό ρυθμιστή στροφών, ο οποίος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μηχανικής ισχύος στην έξοδό του. Παρουσιάζει τις εξής τέσσερις μεταβλητές κατάστασης:

- i. Τη ροή ατμού  $dhp$  στις σωληνώσεις εξόδου.
- ii. Τη ροή ατμού  $dmp$  στην έξοδο της βαθμίδας αναθέρμανσης (μέσης πίεσης).
- iii. Τη ροή ατμού  $dbp$  στη σταυροειδή σωλήνωση που συνδέει τις βαθμίδες μέσης και χαμηλής πίεσης.
- iv. Το άνοιγμα  $g$  της κύριας δικλείδας ελέγχου του ατμού.

Το **μοντέλο νηξελογεννήτριας** χαρακτηρίζεται από γρήγορη απόκριση ισχύος και θεωρείται ότι η μόνη σημαντική χρονική καθυστέρηση στη μεταβατική του απόκριση εισάγεται από το ρυθμιστή στροφών. Για το λόγο αυτό αμελείται το κομμάτι που αφορά την κινητήρια μηχανή. Συνεπώς, αποτελεί μια απλοποιημένη εκδοχή και η μόνη μεταβλητή κατάσταση είναι η αποδιδόμενη μηχανική ισχύς, η οποία ταυτίζεται πρακτικά με το άνοιγμα της βαλβίδας καυσίμου.

Το **μοντέλο αεριοστροβίλου** αναπτύχθηκε στο [17] κι αποτελεί ένα αναλυτικό μοντέλο με αρκετές επιμέρους βαθμίδες. Γι' αυτό το λόγο, δεν θα γίνει αναφορά στις μεταβλητές κατάστασής του.

Σε όλα τα μοντέλα η αρχικοποίηση των μεταβλητών κατάστασης γίνεται κατά τη διάρκεια της ρουτίνας αρχικοποίησης στη μάσκα, ενώ στο μοντέλο αεριοστροβίλου χρησιμοποιούνται και επιπλέον βοηθητικές ρουτίνες (prog1.m, prog2.m και prog3.m) που βρίσκονται στο μοντέλο που περιλαμβάνει το συγκεκριμένο μπλοκ.

### 2.3.5. Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με μηχανή επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα (Τύπος A)

Η ανάλυση και περιγραφή του μοντέλου μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία [8]. Συνοπτικά, η αναπαράσταση του ηλεκτρικού μέρους αυτού του μοντέλου γίνεται χρησιμοποιώντας το γνωστό μοντέλο της μηχανής επαγωγής τρίτης τάξης, που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα. Για την αναπαράσταση του μηχανικού μέρους χρησιμοποιείται το μηχανικό μοντέλο 2 μαζών κι ο έλεγχος αεροδυναμικής ισχύος γίνεται μέσω του φαινομένου της παθητικής απώλειας στήριξης.

Το μπλοκ, που υλοποιήθηκε σε περιβάλλον Simulink [8] και περιλαμβάνεται στη βιβλιοθήκη του WHSSP ως `Induction_Machine_Wind_Generator.mdl`, φαίνεται στο Σχήμα 2.10, στο οποίο διακρίνονται οι πέντε είσοδοι:

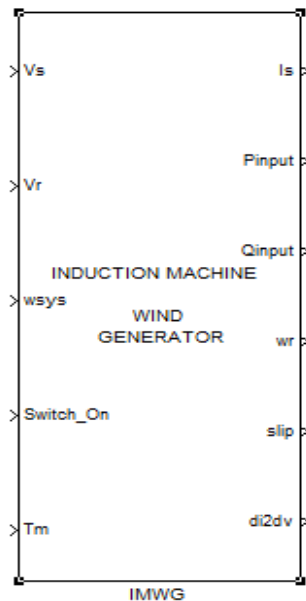
- i. Το διάνυσμα  $(v_x, v_y)$  της τερματικής τάσης της γεννήτριας επαγωγής (τύλιγμα στάτη)  $V_s$  (αμ) ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος το οποίο εδώ ταυτίζεται με της μηχανής.
- ii. Το διάνυσμα της τάσης του τυλίγματος δρομέα  $V_r$  (αμ), το οποίο είναι μηδενικό για την περίπτωση βραχυκυκλωμένου δρομέα, η οποία αποτελεί και τη συνηθέστερη διαμόρφωση για ανεμογεννήτρια τύπου A.
- iii. Η γωνιακή ταχύτητα του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς  $\omega_{sys}$  (αμ).
- iv. Το σήμα *switch on* που αποτελεί ένδειξη για το αν είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο η ανεμογεννήτρια και μπορεί να προέρχεται από κάποια διάταξη προστασίας που την αποσυνδέει σε μεγάλες διαταραχές (trip).
- v. Η μηχανική ροπή  $T_m$  (αμ) ανηγμένη στη βάση ισχύος του συστήματος για την περίπτωση που αμελούμε αεροδυναμική συμπεριφορά.

Οι έξι έξοδοι του μοντέλου είναι οι παρακάτω:

- i. Το διάνυσμα  $(i_x, i_y)$  του απορροφούμενου (σύμβαση κινητήρα) ρεύματος της μηχανής  $I_s$  (αμ) στη βάση του συστήματος κι ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.
- ii. Η απορροφούμενη (σύμβαση κινητήρα) ενεργός ισχύ  $P_{input}$  (αμ) στη βάση του συστήματος.
- iii. Η απορροφούμενη (σύμβαση κινητήρα) άεργος ισχύ  $Q_{input}$  (αμ) στη βάση του συστήματος.
- iv. Η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας  $\omega_r$  (αμ).
- v. Η τιμή της ολίσθησης *slip* (%).
- vi. Το διάνυσμα  $di2dv$  για την επίλυση του δικτύου (ίδιο με της μηχανής επαγωγής).

Οι μεταβλητές κατάστασης του μοντέλου αποτελούνται από τις πεπλεγμένες ροές ευθείας κι εγκάρσιου άξονα του σύγχρονου πλαισίου της μηχανής ( $ydr\_e$  και  $yqr\_e$ ),

τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας και του ανεμοκινητήρα ( $WG\_wr$  και  $WG\_wl$ ) καθώς και τη γωνιακή παραμόρφωση του άξονα  $theta$ , ενώ η διαδικασία αρχικοποίησής τους καθορίζεται στη μάσκα του μοντέλου.



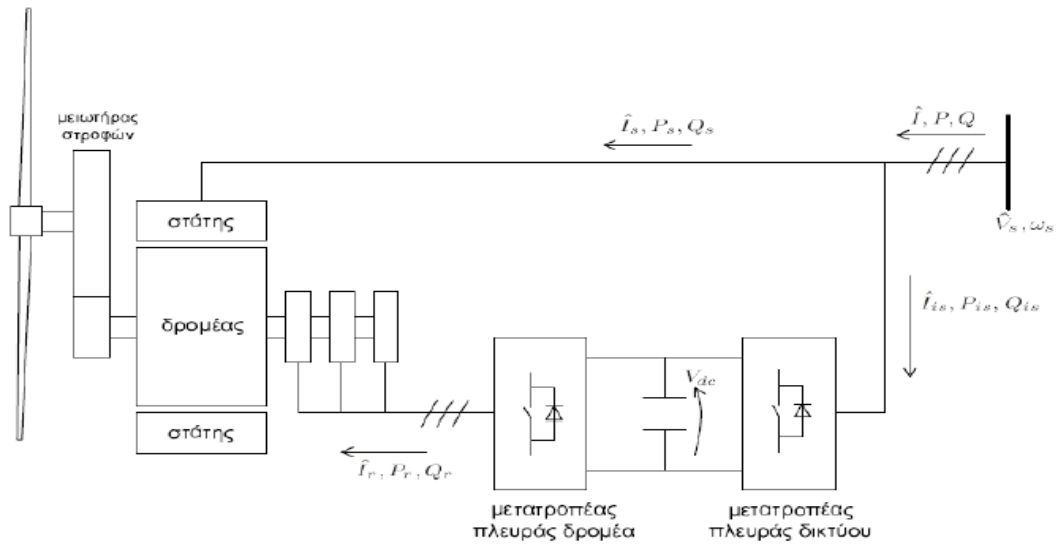
Σχ. 2.10 Μπλοκ ανεμογεννήτριας με ασύγχρονη μηχανή επαγωγής στο Simulink

### 2.3.6. Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (Τύπος Γ)

Το μοντέλο της ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης καθώς και της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα στη συνέχεια, θα περιγραφεί αναλυτικά. Πιο συγκεκριμένα, θα περιγραφούν οι διάφορες διατάξεις που περιγράφουν τη δυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας και τα διάφορα συστήματα ελέγχου. Αυτό γίνεται ώστε να κατανοηθεί καλύτερα η επίδραση της εφαρμογής του εξομοιωτή αδράνειας στη δυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας.

Στην παράγραφο 1.2 περιγράφηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης και ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται λειτουργία μεταβλητών στροφών.

Στο Σχήμα 2.11 φαίνεται η βασική διάταξη της ΑΓΔΤ με τους δείκτες  $s$  και  $r$  να συμβολίζουν μεγέθη στάτη και δρομέα αντίστοιχα. Σημειώνεται, επίσης, ότι ανάμεσα στο μετατροπέα πλευράς δικτύου και τον τερματικό ζυγό της μηχανής, ενδέχεται να υπάρχει και μετασχηματιστής, ο οποίος δεν απεικονίζεται στο Σχήμα 2.11.



Σχ. 2.11 Βασική διάταξη ΑΓΔΤ

Το μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε για το περιβάλλον του WHSSP στο [9] είναι κατάλληλο για την αναπαράσταση ενός αιολικού πάρκου αποτελούμενο από ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης κι ακολουθεί το παράρτημα Β της αναφοράς [23]. Χαρακτηρίζεται από λεπτομερείς βρόχους ελέγχου αφού περιλαμβάνει λεπτομερή παράσταση των ελεγκτών ενεργού κι άεργου ισχύος, με βάση το σχεδιασμό συγκεκριμένου κατασκευαστή (GE) [20]. Ωστόσο, μπορεί να χαρακτηριστεί και ως γενικευμένο μοντέλο (generic model) υπό την έννοια ότι περιγράφει σε γενικά πλαίσια τη δυναμική των ΑΓΔΤ για τους σκοπούς των μελετών ευστάθειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Εξάλλου το γενικευμένο μοντέλο που προτείνεται [19] είναι ισοδύναμο με το μοντέλο της GE, εφόσον χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλες παράμετροι.

Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να αναφερθούν οι έννοιες και οι σχέσεις που αφορούν την αεροδυναμική συμπεριφορά του ανεμοκινητήρα [12]. Η βασική σχέση που εκφράζει την αεροδυναμική ισχύ μιας οποιασδήποτε Α/Γ είναι η εξής:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) V_w^3 \quad (2.29)$$

όπου:

- $P_m$  η μηχανική ισχύς στον άξονα του ανεμοκινητήρα (W)
- $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα ( $\approx 1,225 \text{ kg/m}^3$ )
- $A$  η επιφάνεια που διαγράφει η έλικα ( $\text{m}^2$ )
- $V_w$  η ταχύτητα του ανέμου (m/s)
- $C_p$  ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

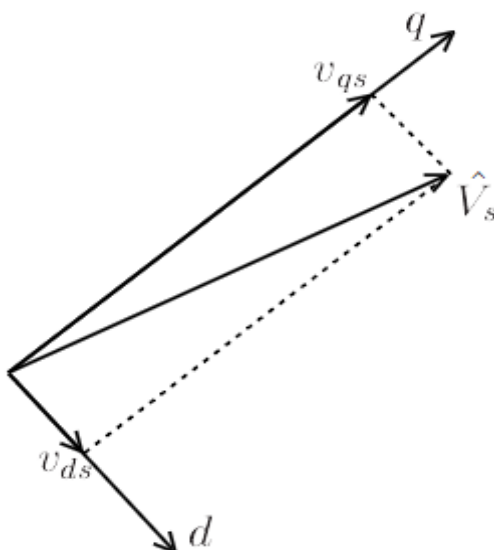
Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος είναι συνάρτηση της γωνιακή ταχύτητας του ανεμοκινητήρα και της ταχύτητας του ανέμου, τα οποία συνδέονται μέσω του

λόγου ακροπερυγίου  $\lambda$  (tip speed ratio), και της γωνίας βήματος των περυγίων  $\beta$ . Για το  $\lambda$  ισχύει:

$$\lambda = \frac{\omega_l R}{V_w} \quad (2.30)$$

όπου  $R$  είναι η ακτίνα της έλικας και  $\omega_l$  η ταχύτητα περιστροφής του ανεμοκινητήρα (rad/s). Η τιμή του  $C_p$  κυμαίνεται συνήθως από 0,4 – 0,5, με θεωρητικά μέγιστο όριο την τιμή 0,593, που ονομάζεται και όριο Betz. Στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών η τιμή του  $\lambda$  διατηρείται σταθερή και ίση με τη βέλτιστη για ένα εύρος ταχυτήτων ανέμου και για παραγόμενη ισχύ μικρότερη της ονομαστικής, μεταβάλλοντας αντίστοιχα την ταχύτητα περιστροφής του ανεμοκινητήρα. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται βέλτιστο  $C_p$  σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων ανέμου και συνεπώς, καλύτερη ενεργειακή απόδοση. Για παραγόμενη ισχύ ίση με την ονομαστική χρησιμοποιείται ο έλεγχος της γωνίας περυγίων  $\beta$  ώστε να μειωθεί η τιμή του  $C_p$  και να περιοριστεί με αυτό τον τρόπο η ισχύς στην ονομαστική.

Ο συνήθης τρόπος ελέγχου στις ΑΓΔΤ είναι ο διανυσματικός έλεγχος όπου το πλαίσιο για την εφαρμογή του ελέγχου είναι ευθυγραμμισμένο με την πεπλεγμένη μαγνητική ροή του στάτη επιτρέποντας έτσι ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και άεργου ισχύος μέσω της ρύθμισης των αντίστοιχων συνιστωσών του ρεύματος του δρομέα. Αμελώντας μάλιστα τα μεταβατικά του στάτη και την ωμική αντίστασή του, το πλαίσιο αυτό ταυτίζεται με αυτό της τερματικής τάσης της μηχανής. Θεωρώντας λοιπόν ότι ο άξονας  $d$  του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς της μηχανής βρίσκεται επί του διανύσματος της πεπλεγμένης ροής του στάτη  $\vec{\Psi}_s$ , ο άξονας  $q$  συμπίπτει με το διάνυσμα της τερματικής τάσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12:



Σχ. 2.12 Σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς

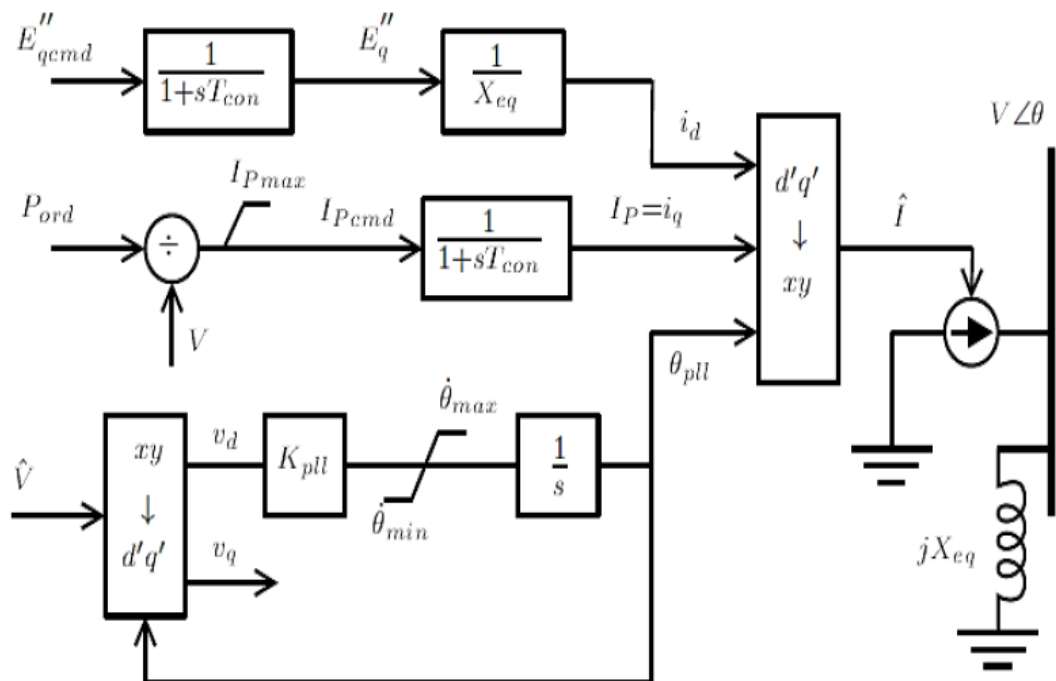
Ο διανυσματικός έλεγχος επιτυγχάνει τελικά, με την παραδοχή της οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης [9], την αποσύμπλεξη των δύο ρυθμιζόμενων συνιστωσών

του ρεύματος του δρομέα. Το γεγονός αυτό απλοποιεί κατά πολύ τον τρόπο προσομοίωσης της λειτουργίας των ΑΓΔΤ για τους σκοπούς των μελετών ευστάθειας αφού δεν χρειάζεται αναλυτική παράσταση της δυναμικής της ασύγχρονης γεννήτριας, των μετατροπέων τάσης και του ενδιάμεσου πυκνωτή, αλλά επαρκούν οι ισοδύναμοι βρόχοι ελέγχου.

Μέσω της προσέγγισης αυτής με τους ισοδύναμους βρόχους ελέγχου, το γενικευμένο μοντέλο αναπαράστασης ενός αιολικού πάρκου αποτελούμενου από ΑΓΔΤ απαρτίζεται από τέσσερα βασικά συστατικά μέρη:

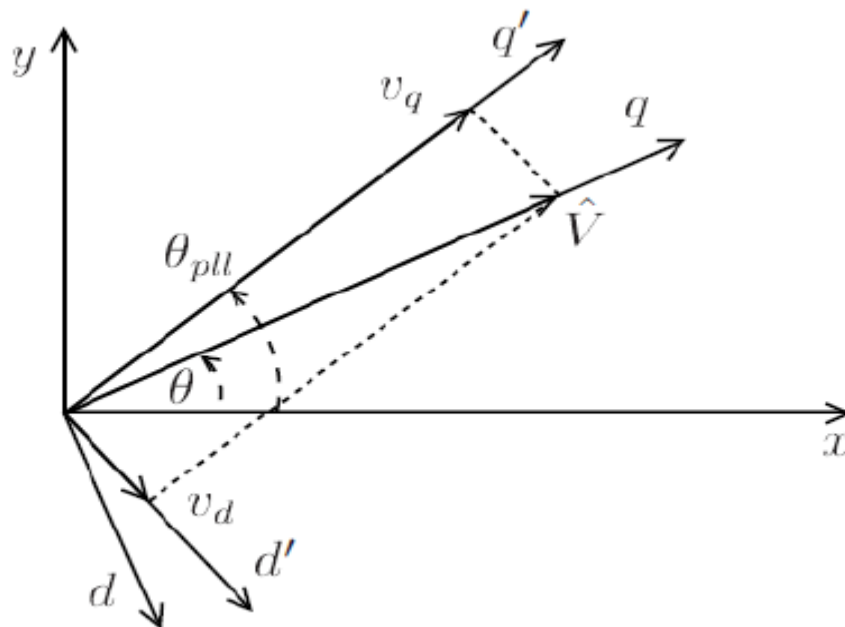
- i. Γεννήτρια/Μετατροπέας (Generator/Converter)
- ii. Έλεγχος μετατροπέα (Converter Control)
- iii. Μηχανικό μέρος (Wind turbine)
- iv. Έλεγχος γωνίας βήματος (Pitch Control)

Στο Σχήμα 2.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα βαθμίδων της μοντελοποίησης του μέρους Γεννήτρια/Μετατροπέας. Η επαγωγική αντίδραση  $X_{eq}$  αποτελεί την ισοδύναμη αντίδραση Norton που εισάγεται όταν θεωρούμε την ΑΓΔΤ (με έλεγχο μετατροπέα) ως μια ελεγχόμενη πηγή ρεύματος. Στην ίδια λογική η  $E_q''$  είναι μια ισοδύναμη τάση που ελέγχει την έγχυση άεργου ρεύματος της ΑΓΔΤ. Η εντολή για τη ρύθμιση της άεργης συνιστώσας του ρεύματος  $E_{qcmd}''$  προέρχεται από τον ελεγκτή άεργου ισχύος και η αντίστοιχη εντολή για την ενεργό συνιστώσα  $P_{ord}$  από τον ελεγκτή της ταχύτητας του δρομέα (έλεγχος στροφών).



Σχ. 2.13 Μοντελοποίηση μέρους Γεννήτρια/Μετατροπέας ΑΓΔΤ

Καθώς ο μετατροπέας πλευράς δρομέα οδηγεί το ρεύμα δρομέα πολύ γρήγορα, η δυναμική που συνδέεται με την πεπλεγμένη μαγνητική ροή του δρομέα μπορεί να αμεληθεί. Παρ' όλα αυτά, το μοντέλο περιέχει δυο μικρές χρονικές σταθερές ( $T_{con}=20ms$ ) προς αναπαράσταση των καθυστερήσεων στους αντίστοιχους βρόχους ελέγχου. Επίσης λαμβάνεται υπόψη η καθυστέρηση συν ευθυγράμμιση του dq πλαισίου της μηχανής με την τερματική τάση κατά την εφαρμογή του διανυσματικού ελέγχου. Η καθυστέρηση αυτή οφείλεται στην απευθείας σύζευξη του στάτη της γεννήτριας στο δίκτυο με την αντίστοιχη μαγνητική σύζευξη που αυτή συνεπάγεται. Αυτό το γεγονός οδηγεί στην ύπαρξη μεταβατικά μιας απόκλισης στην προσαρμογή του πλαισίου αναφοράς της γεννήτριας. Λειτουργία του βρόχου κλειδώματος φάσης (Phase Locked Loop –PLL) είναι η εκτίμηση της απόκλισης αυτής. Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 2.14 το πλαίσιο που καθορίζεται από το βρόχο κλειδώματος φάσης του μετατροπέα συμβολίζεται με  $d'q'$  και συμπίπτει με το πλαίσιο  $dq$  στη μόνιμη κατάσταση.



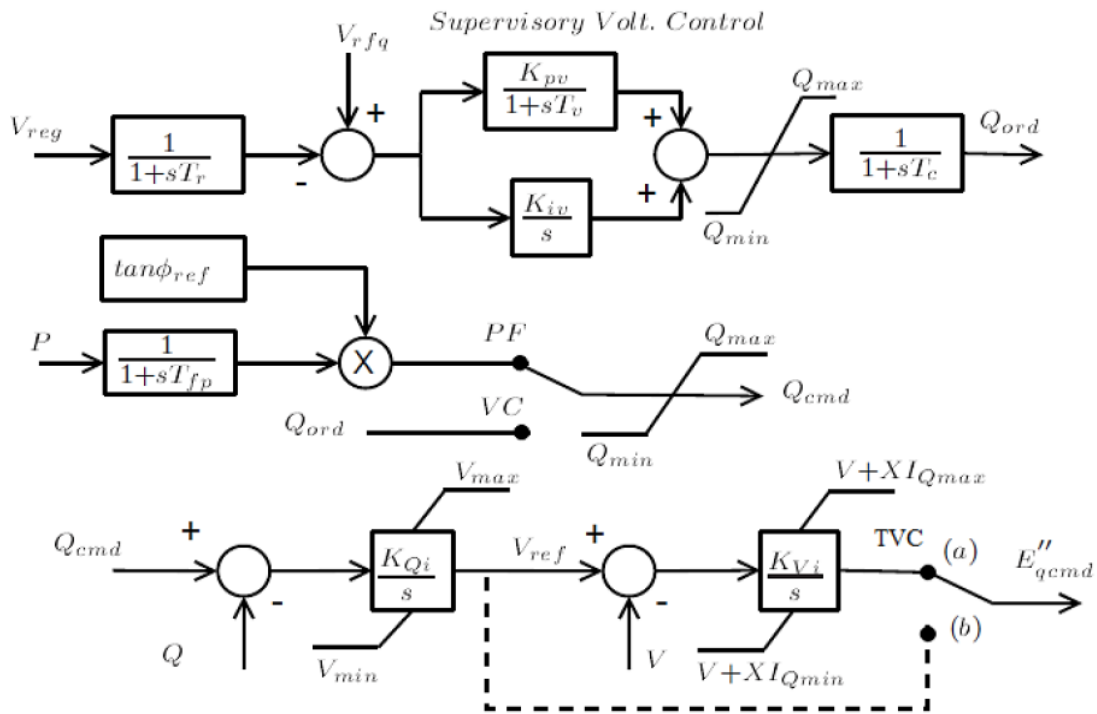
Σχ. 2.14 Σύγχρονα πλαίσια αναφοράς

Ο έλεγχος στροφών και ο έλεγχος της έγχυσης άεργου ισχύος από τους οποίους προέρχονται οι εντολές  $P_{ord}$  και  $E_{qcmd}''$  αντίστοιχα περιλαμβάνονται στον Έλεγχο Μετατροπέα. Στο Σχήμα 2.15 παρουσιάζεται ο ελεγκτής άεργου ισχύος της ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης.

Όσον αφορά την άεργο ισχύ, υπάρχει είτε η δυνατότητα ελέγχου συντελεστή ισχύος είτε ρύθμισης τάσης. Και στις δύο περιπτώσεις, η άεργος ισχύς  $Q_{cmd}$  που καλείται να παράγει η ΑΓΔΤ είναι η τιμή αναφοράς για έναν ολοκληρωματικό ελεγκτή. Σε περίπτωση που ο δεύτερος διακόπτης του Σχήματος 2.15 είναι στη θέση (α), η έξοδος  $V_{ref}$  του ολοκληρωματικού ελεγκτή είναι η είσοδος για έναν δεύτερο ολοκληρωματικό ελεγκτή που οδηγεί το  $E_{qcmd}''$ . Αυτή είναι η επιλογή ρύθμισης



τερματικής τάσης (Terminal Voltage Control – TVC) των ανεμογεννητριών και μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την επίτευξη καλής απόκρισης της τάσης σε περίπτωση τοπικών σφαλμάτων ή άλλων διαταραχών. Συνεπώς, είναι πιθανό ο διαχειριστής του αιολικού πάρκου να επιλέξει να τον χρησιμοποιήσει και γι' αυτό συμπεριλαμβάνεται σαν επιλογή στο συγκεκριμένο μοντέλο. Μπορεί, ωστόσο, να παρακαμφθεί επιλέγοντας τη θέση (β) για το δεύτερο διακόπτη του Σχήματος 2.15.

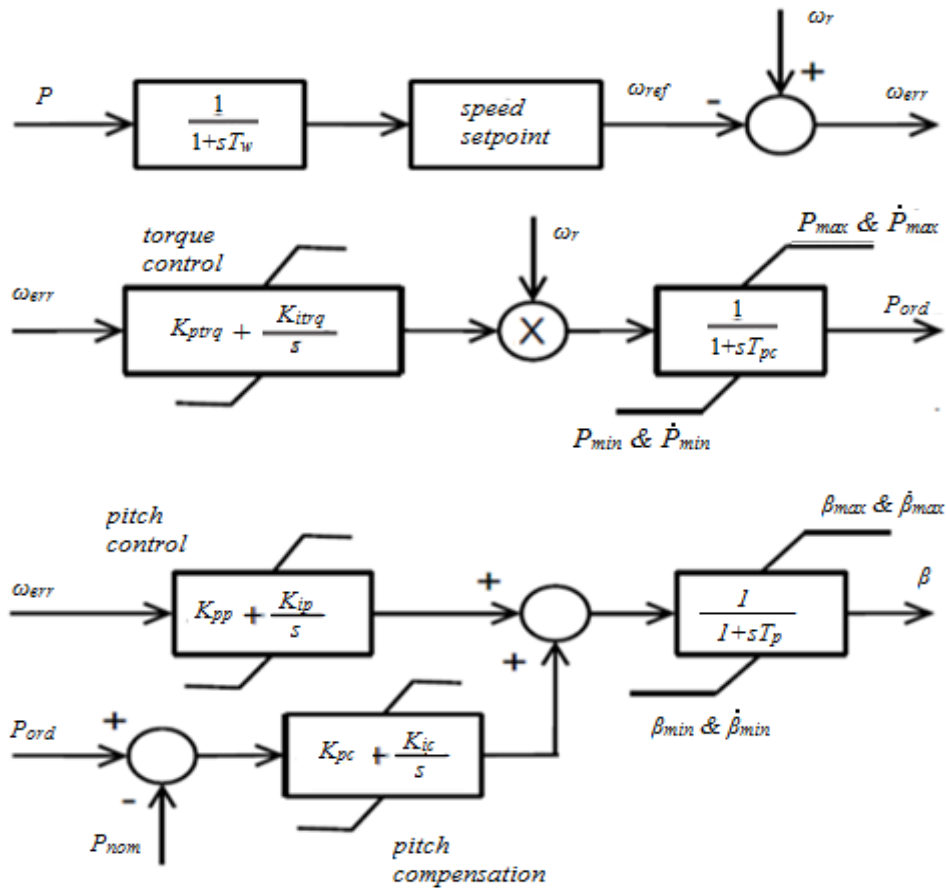


Σχ. 2.15 Ελεγκτής άεργου ισχύος

Στο Σχήμα 2.16 που ακολουθεί φαίνονται ο έλεγχος στροφών του μετατροπέα καθώς και ο έλεγχος της γωνίας βήματος των πτερυγίων. Ο έλεγχος στροφών γίνεται με βάση τη μέτρηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος  $P$ . Η ταχύτητα αναφοράς  $\omega_{ref}$  προκύπτει για κάθε τιμή της ενεργού ισχύος από τη χαρακτηριστική καμπύλη ελέγχου στροφών, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται ο αεροδυναμικός συντελεστής (σχέση 2.29). Στο μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική, η καμπύλη χαρακτηρίζεται από διακριτά σημεία αντιστοίχισης ισχύος – ταχύτητας, ενώ στις ενδιάμεσες τιμές εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή, όπως προτείνεται στο [24]. Για να αποφεύγεται η επίδραση των μεταβατικών μεταβολών του ανέμου στη ταχύτητα αναφοράς εισάγεται ένα φίλτρο (καθυστέρηση) μετά τη μέτρηση της παραγόμενης ισχύος με αρκετά μεγάλη χρονική σταθερά ( $T_\omega = 5s$ ).

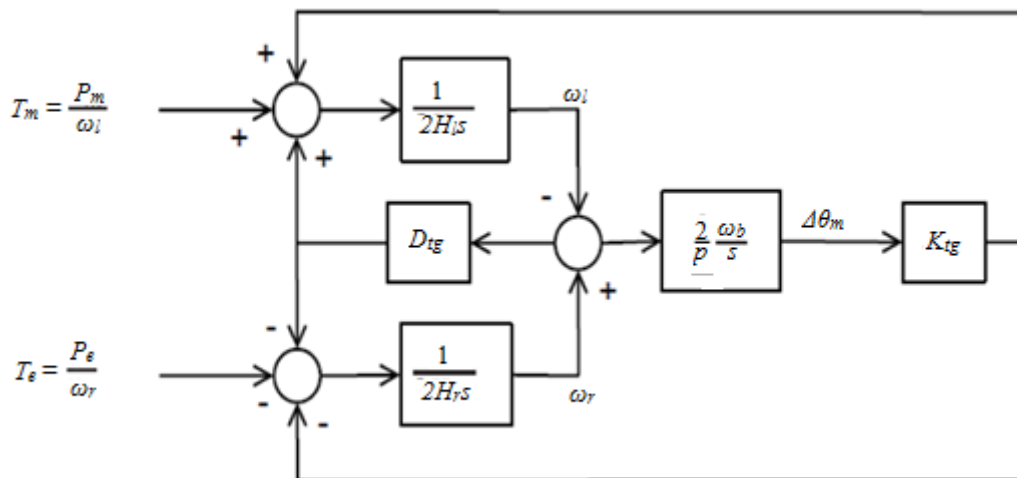
Όσον αφορά τον έλεγχο της γωνίας βήματος, βλέπουμε ότι αποτελείται από δύο PI ελεγκτές. Ο πρώτος έχει ως είσοδο το σφάλμα στην ταχύτητα περιστροφής και έξοδο την επιθυμητή γωνία, ενώ ο δεύτερος PI ελεγκτής (Pitch compensation) εξασφαλίζει ότι η γωνία βήματος θα έχει την ελάχιστη δυνατή γωνία σε κάθε σημείο

λειτουργίας για να εξασφαλίζεται ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής. Η τελική γωνία  $\beta$  είναι το άθροισμα των δύο PI ελεγκτών.



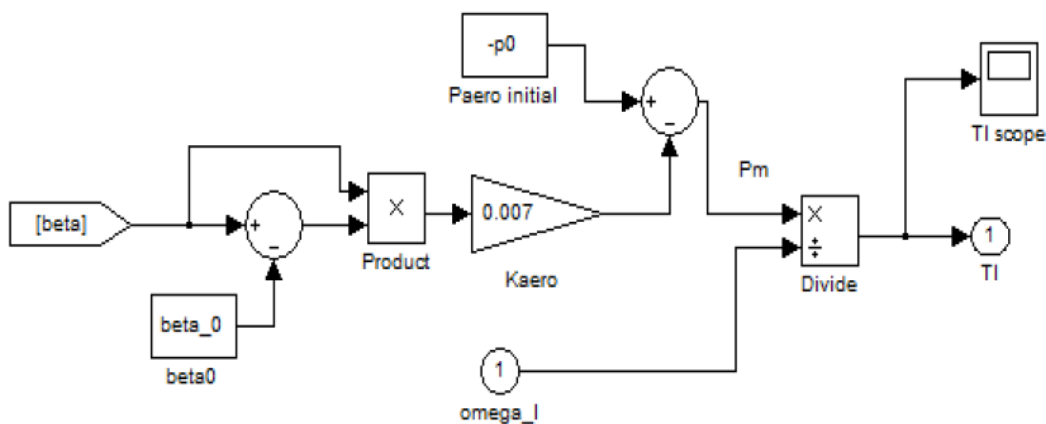
Σχ. 2.16 Έλεγχος στροφών και γωνίας βήματος περυγίων

Για την παράσταση του μηχανικού μέρους χρησιμοποιείται το μοντέλο των δύο στρεφόμενων μαζών προς αναπαράσταση της δυναμικής που οφείλεται στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης (Σχήμα 2.17):



Σχ. 2.17 Μηχανικό μέρος – Μοντέλο δύο στρεφόμενων μαζών

Η αποδιδόμενη μηχανική ροπή  $T_m$  (ή  $T_l$  εφόσον προέρχεται από τον ανεμοκινητήρα) υπολογίζεται στη συγκεκριμένη μοντελοποίηση μέσω μιας προσεγγιστικής λογικής κατάλληλης για μελέτες ευστάθειας [20,24]. Η λογική αυτή συνδέει την αεροδυναμική ισχύ με τη γωνία βήματος των πτερυγίων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.18, και δεν χρησιμοποιείται ο αναλυτικός τύπος υπολογισμού της αεροδυναμικής ισχύος. Το μοντέλο δεν υποστηρίζει, επομένως, τη δυνατότητα προσομοίωσης διαταραχών ανέμου, καθώς εστιάζει στη συμπεριφορά της ΑΓΔΤ στις διαταραχές του δικτύου και για χρονικό ορίζοντα όπου μπορεί να θεωρηθεί ότι η ταχύτητα του ανέμου δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα. Σημειώνεται ότι το αρνητικό πρόσημο στην αρχική ενεργό ισχύ  $p_0$  στο Σχήμα 2.18 οφείλεται στη σύμβαση κινητήρα που ακολουθείται.



Σχ. 2.18 Σύνδεση αεροδυναμικού με μηχανικό μέρος (υπολογισμός μηχανικής ροπής)

Έτσι για τη μηχανική ισχύ και ροπή αντίστοιχα ισχύει:

$$P_m = P_o - (\beta - \beta_o)\beta K_{aero} \quad (2.31)$$

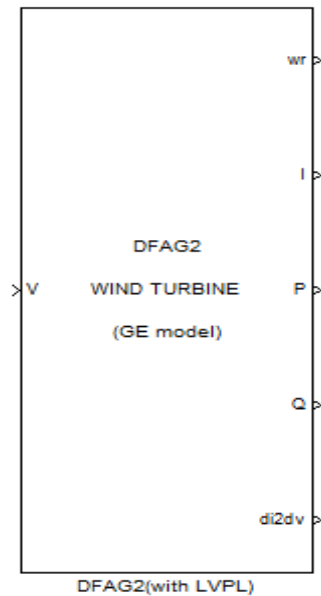
$$T_l = \frac{P_m}{\omega_l} \quad (2.32)$$

όπου:

- $P_o$  η αρχική ενεργός ισχύς (αμ στη βάση της μηχανής)
- $\beta$  η τρέχουσα γωνία βήματος των πτερυγίων ( $^\circ$ )
- $\beta_o$  η αρχική γωνία βήματος των πτερυγίων ( $^\circ$ )
- $K_{aero}$  είναι ο συντελεστής που συνδέει τη γωνία βήματος με τη μηχανική ισχύ (=0,007 στο [24])

Τέλος, το μοντέλο της ΑΓΔΤ περιλαμβάνει και λειτουργία περιορισμού ενεργού ρεύματος σε βυθίσεις τάσης (Low Voltage Power Logic – LVPL). Αυτή η λειτουργία επιβάλλει έναν άνω περιορισμό στο ενεργό ρεύμα που μπορεί να εγχύσει η ανεμογεννήτρια και αυξάνει τη δυνατότητά της για άεργο έγχυση. Η συγκεκριμένη λειτουργία περιγράφεται αναλυτικά στο [14].

Το μπλοκ της ΑΓΔΤ που περιγράφηκε βρίσκεται στη βιβλιοθήκη του WHSSP ως Doubly\_Fed\_Wind\_Turbine2.mdl και φαίνεται στο Σχήμα 2.19:



Σχ. 2.19 Μπλοκ ΑΓΔΤ στο Simulink

Είσοδος του μοντέλου είναι η τερματική τάση της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης, ανηγμένη στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος. Σε επόμενο κεφάλαιο θα προστεθεί και η συχνότητα του συστήματος ως δεύτερη είσοδος. Στην έξοδο διακρίνονται τα εξής πέντε σήματα:

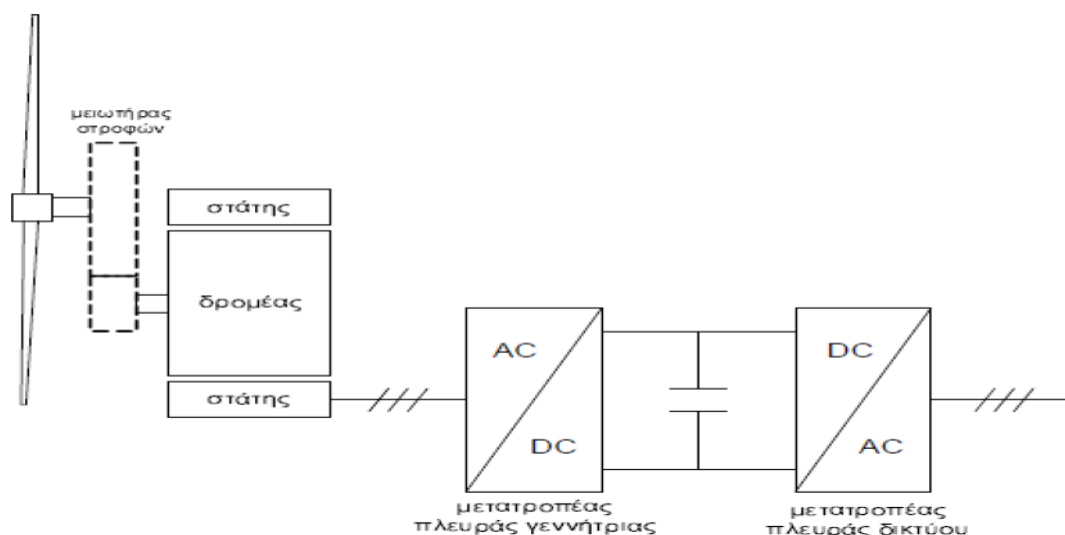
- i. Η γωνιακή ταχύτητα  $w_r$  (αμ) του δρομέα της μηχανής επαγωγής της ΑΓΔΤ.
- ii. Το διάνυσμα  $(i_x, i_y)$  του συνολικά απορροφούμενου (σύμβαση κινητήρα) ρεύματος  $I$  (αμ) της ΑΓΔΤ στη βάση του συστήματος κι ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.
- iii. Η εγχεόμενη (σύμβαση γεννήτριας) ενεργός ισχύς  $P$  (αμ) στη βάση του συστήματος.
- iv. Η εγχεόμενη (σύμβαση γεννήτριας) άεργος ισχύς  $Q$  (αμ) στη βάση του συστήματος.
- v. Το διάνυσμα  $di2dv$  για την επίλυση του δικτύου το οποίο δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$di2dv = [(bus\ code) \ 0 \ -1/X_{eq} \ 1/X_{eq} \ 0 \ i_{nl,x} \ i_{nl,y}]^T \quad (2.33)$$

όπου  $i_{nl,x}, i_{nl,y}$  τα εγχεόμενα ρεύματα τα οποία δεν εξαρτώνται γραμμικά από την τερματική τάση αλλά προκύπτουν ως συνάρτηση των διαφόρων μεταβλητών κατάστασης εσωτερικά του μοντέλου της ΑΓΔΤ (ουσιαστικά οι συνιστώσες του ρεύματος  $\hat{I}$  της ισοδύναμης πηγής ρεύματος του Σχήματος 2.13.

### 2.3.7. Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών πλήρους μετατροπέα ισχύος (Τύπος Δ)

Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 1.2, στις ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα (ΑΓΠΜ) χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες για την ηλεκτρομηχανική μετατροπή, ενώ όλη η παραγόμενη ισχύς διέρχεται από το μετατροπέα. Η βασική και πιο συνηθισμένη διάταξη της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα φαίνεται στο Σχήμα 2.20:



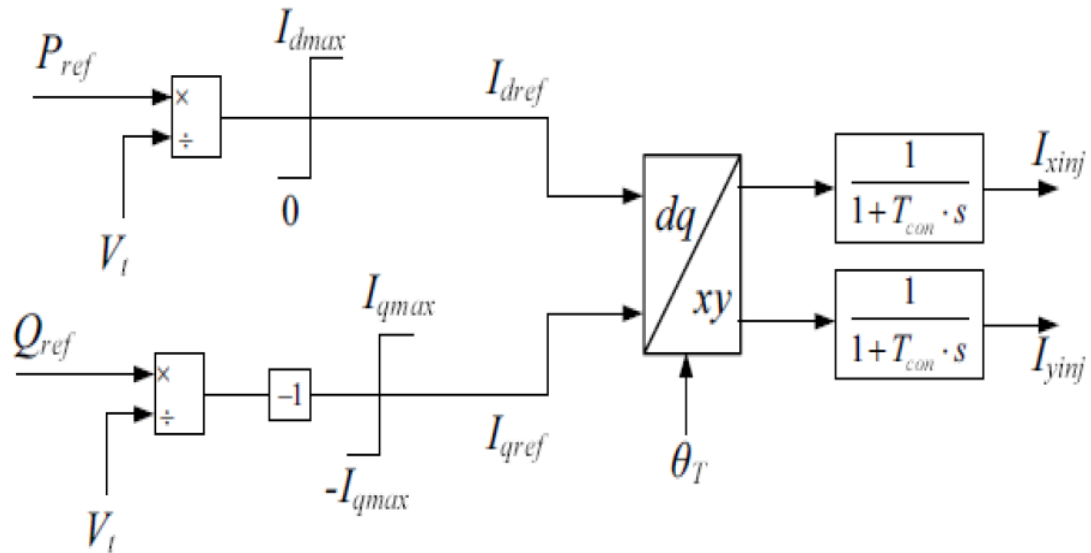
Σχ. 2.20 Βασική διάταξη ΑΓΠΜ

Το μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε για το περιβάλλον του WHSSP στο [15] είναι κατάλληλο για την αναπαράσταση ενός αιολικού πάρκου αποτελούμενο από ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα και ακολουθεί κι αυτό τη λογική της οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης. Δυναμικές που εξελίσσονται σε χρονική κλίμακα αρκετά μικρότερη από αυτή που αφορά την ανάλυση ευστάθειας ΣΗΕ μπορούν να αγνοηθούν (δυναμική DC πυκνωτή ή των διακοπτικών στοιχείων). Η διάταξη που μοντελοποιήθηκε στην ουσία συμπεριφέρεται ως προς το δίκτυο σαν μια ελεγχόμενη πηγή ρεύματος. Συνεπώς, το μοντέλο εγγείει στο δίκτυο ενεργά κι άεργα ρεύματα ανάλογα με τις επιθυμητές εγχύσεις ενεργού κι άεργου ισχύος και ανάλογα με την τερματική τάση. Ομοίως με την ΑΓΔΤ, έχουμε την υλοποίηση ενός μοντέλου αναπαράστασης με ισοδύναμους βρόχους ελέγχου, το οποίο απαρτίζεται από τέσσερα βασικά συστατικά μέρη:

- i. Γεννήτρια/Μετατροπέας (Generator/Converter)
- ii. Έλεγχος μετατροπέα (Converter Control)
- iii. Μηχανικό μέρος (Wind turbine)
- iv. Έλεγχος γωνίας βήματος (Pitch Control)

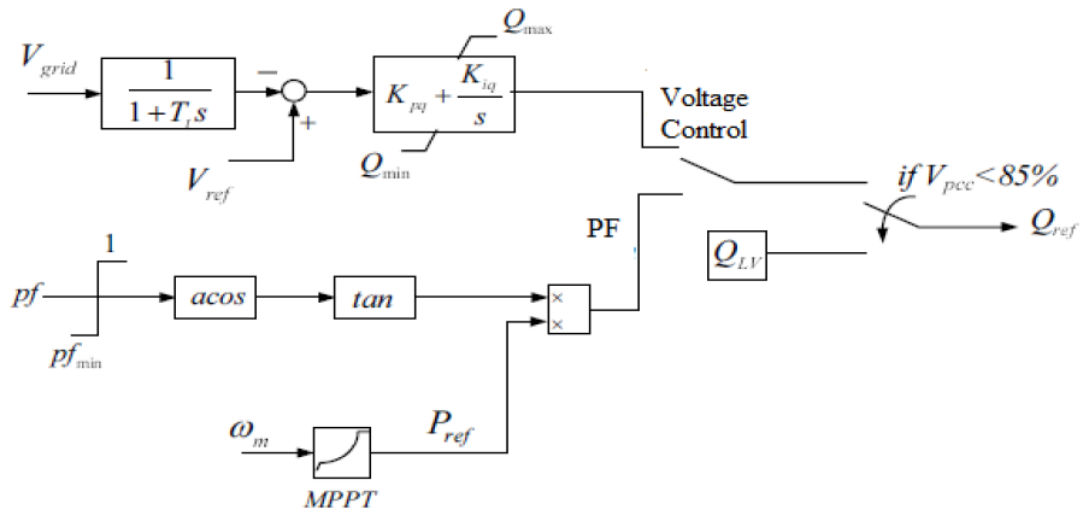
Στο Σχήμα 2.21 παρατίθεται η μοντελοποίηση της Γεννήτριας/Μετατροπέα. Βλέπουμε ότι η απαίτηση για ενεργό κι άεργο ισχύ ( $P_{ref}$  και  $Q_{ref}$  αντίστοιχα) μεταφράζεται απευθείας σε ισοδύναμες εντολές για ενεργό κι άεργο ρεύμα ( $I_{dref}$  και

$I_{qref}$  αντίστοιχα) συναρτήσει της τερματικής τάσης  $V_t$ . Έτσι, εδώ δεν υπάρχει κάποια ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση  $X_{eq}$ . Επίσης, απουσιάζει ο βρόχος κλειδώματος φάσης PLL και η μετατροπή των ρευμάτων από το σύγχρονο πλαίσιο dq της γεννήτριας στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς xy γίνεται απευθείας με χρήση της μετρούμενης γωνίας της τερματικής τάσης  $\theta_T$  ως προς το xy πλαίσιο.



Σχ. 2.21 Μοντελοποίηση Γεννήτριας/Μετατροπέα

Ο έλεγχος μετατροπέα απεικονίζεται στο Σχήμα 2.22 και περιλαμβάνει τον ελεγκτή άεργου ισχύος και τον ελεγκτή στροφών (ή ενεργού ισχύος) από τους οποίους προκύπτουν οι εντολές  $P_{ref}$  και  $Q_{ref}$  που χρησιμοποιούνται σαν εντολές στο κομμάτι γεννήτριας/μετατροπέα:



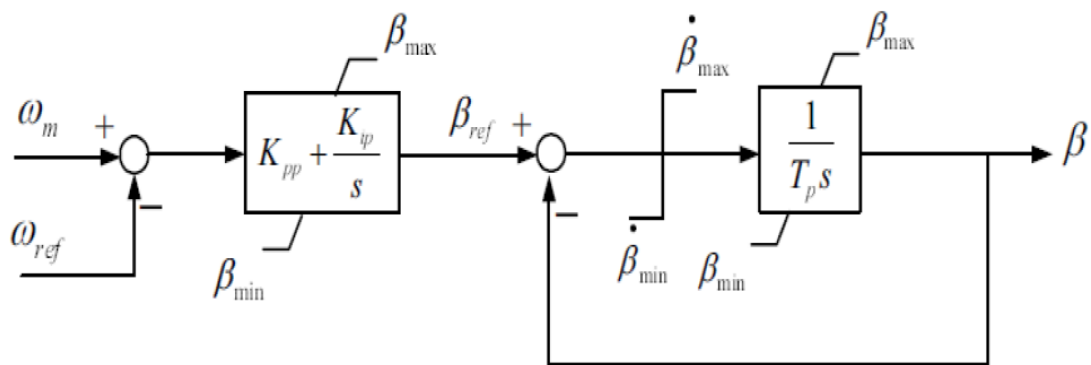
Σχ. 2.22 Μοντελοποίηση ελέγχου μετατροπέα

Η εντολή για ενεργό ισχύ προκύπτει μέσω της στρατηγικής μέγιστης απολαβής ισχύος (MPPT), η οποία βασίζεται στη μετρούμενη ταχύτητα του δρομέα της μηχανής  $\omega_m$  (ή  $N_r$  σε ΣΑΛ). Συγκεκριμένα, κάθε ταχύτητα ανέμου αντιστοιχίζεται σε

για ταχύτητα περιστροφής, για την οποία ο αεροδυναμικός συντελεστής (και, συνεπώς, η αεροδυναμική ισχύς από τη σχέση 2.29) γίνεται μέγιστος.

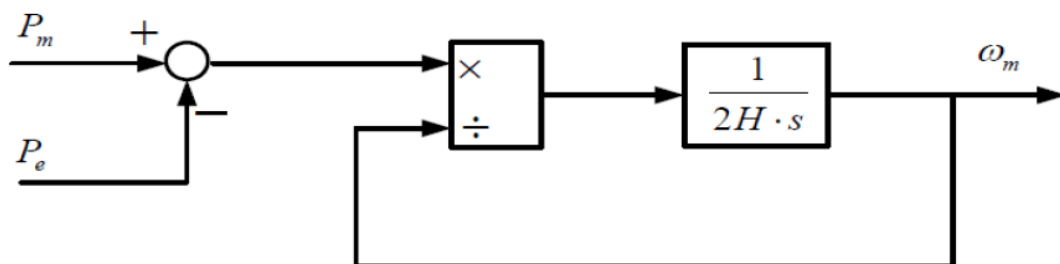
Για την εντολή έγχυσης άεργου ισχύος  $Q_{ref}$  υπάρχουν δύο δυνατότητες ελέγχου όπως και στην περίπτωση της ΑΓΔΤ. Μπορεί να προκύπτει είτε μέσω ρύθμισης του συντελεστή ισχύος (Power Factor – PF) είτε μέσω ρύθμισης της τάσεως (Voltage Control), ανάλογα με τη θέση του διακόπτη στο Σχήμα 2.22. Στην πρώτη περίπτωση, η  $Q_{ref}$  προκύπτει απευθείας από την εντολή  $P_{ref}$  μέσω του συντελεστή ισχύος που ορίζεται από το χρήστη και μπορεί να είναι είτε επαγωγικός είτε χωρητικός. Στην περίπτωση που ο διακόπτης είναι στη θέση Voltage Control, η εντολή  $Q_{ref}$  προκύπτει από έναν ΠΙ ελεγκτή που δέχεται ως είσοδο το σφάλμα της μετρούμενης τάσης του ζυγού ρύθμισης από την τάση αναφοράς. Υπάρχει επίσης μια μικρή χρονική καθυστέρηση στη μέτρηση και το φιλτράρισμα της τάσης. Τέλος, όπως και στην περίπτωση της ΑΓΔΤ, υπάρχει και η λογική αδιάλειπτης λειτουργίας της μηχανής σε περίπτωση βύθισης τάσης.

Ο βρόχος του ελεγκτή γωνίας βήματος πτερυγίων φαίνεται στο Σχήμα 2.23. Σημειώνεται ότι απουσιάζει ο βρόχος αντιστάθμισης (Pitch compensation) σε σχέση με το αντίστοιχο σύστημα ελέγχου της ΑΓΔΤ που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2.16.



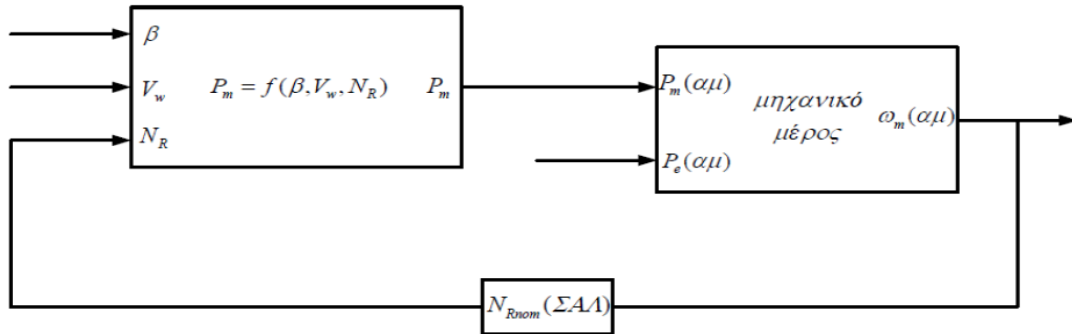
Σχ. 2.23 Έλεγχος γωνίας βήματος ΑΓΠΜ

Σε αντίθεση με την ΑΓΔΤ, το μηχανικό μέρος της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα αναπαριστάται από το μοντέλο μιας στρεφόμενης μάζας (Σχήμα 2.24). Αυτό συμβαίνει γιατί θεωρούμε ότι η πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια μπορεί να συνδεθεί απευθείας με τον ανεμοκινητήρα χωρίς τη μεσολάβηση κιβωτίου ταχυτήτων. Επιπλέον, στο Σχήμα φαίνεται και η μετατροπή από μηχανική και ηλεκτρική ισχύ ( $P_m$  και  $P_e$ ) σε μηχανική και ηλεκτρική ροπή ( $T_m$  και  $T_e$ ).



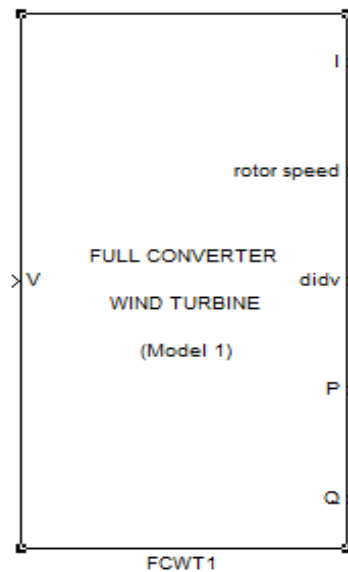
Σχ. 2.24 Μηχανικό μέρος – Μοντέλο μίας στρεφόμενης μάζας

Η σύνδεση του αεροδυναμικού μέρους με το μηχανικό φαίνεται στο διάγραμμα βαθμίδων του Σχήματος 2.25. Στο αεροδυναμικό μέρος υπολογίζεται η μηχανική (αεροδυναμική) ισχύς  $P_m$  συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου  $v_w$ , η οποία υπολογίζεται στη ρουτίνα αρχικοποίησης στη μάσκα ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες, της γωνίας βήματος  $\beta$  και των στροφών της ανεμογεννήτριας  $N_r$ .



Σχ. 2.25 Σύνδεση μηχανικού με αεροδυναμικό μέρος

Το μπλοκ της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα που περιγράφηκε βρίσκεται στη βιβλιοθήκη του WHSSP με το όνομα Full\_Converter\_Wind\_Turbine1.mdl και φαίνεται στο Σχήμα 2.26:



Σχ. 2.26 Μπλοκ ΑΓΠΜ στο Simulink

Είσοδος του μοντέλου είναι η τερματική τάση της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα ανηγμένη στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος. Σε επόμενο κεφάλαιο θα προστεθεί και η συχνότητα του συστήματος ως δεύτερη είσοδος. Στην έξοδο διακρίνονται τα εξής πέντε σήματα:

- i. Το διάνυσμα  $(i_x, i_y)$  του συνολικά απορροφούμενου (σύμβαση κινητήρα) ρεύματος  $I$  (αμ) της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα στη βάση του συστήματος κι ανηγμένο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.



- ii. Η γωνιακή ταχύτητα  $N_r$  (ΣΑΛ-rpm) του δρομέα της μηχανής.
- iii. Η εγχεόμενη (σύμβαση γεννήτριας) ενεργός ισχύς  $P$  (αμ) στη βάση του συστήματος.
- iv. Η εγχεόμενη (σύμβαση γεννήτριας) άεργος ισχύς  $Q$  (αμ) στη βάση του συστήματος.
- v. Το διάνυσμα  $di2dv$  για την επίλυση του δικτύου το οποίο δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$di2dv = [(bus\ code) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ i_x \ i_y]^T \quad (2.34)$$

όπου  $i_x, i_y$  τα εγχεόμενα ρεύματα τα οποία δεν εξαρτώνται γραμμικά από την τερματική τάση αλλά προκύπτουν ως συνάρτηση των διαφόρων μεταβλητών κατάστασης εσωτερικά του μοντέλου της ΑΓΔΤ (ουσιαστικά οι συνιστώσες  $I_{xinj}$  και  $I_{yinj}$  του Σχήματος 2.21 που συνθέτουν το ολικό εγχεόμενο ρεύμα).



# Κεφάλαιο 3

## Αρχή Σχεδίασης Εξομοιωτή Αδράνειας κι Εφαρμογή σε απλά συστήματα

### 3.1. Γενικό σύστημα

Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 1.5 της εισαγωγής, θεωρείται πλέον απαραίτητη η ανάπτυξη τεχνολογίας ώστε να γίνει εφικτή η συμμετοχή των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στη ρύθμιση της συχνότητας ενός αυτόνομου συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσαρμογή ενός εξομοιωτή αδράνειας στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.

Ο εξομοιωτής αδράνειας αντιλαμβάνεται τη μεταβολή της συχνότητας του συστήματος μετά από μια διαταραχή στο ισοζύγιο ισχύος, και δίνει εντολή για μεταβατική αύξηση της έγχυσης ενεργού ισχύος της ανεμογεννήτριας υποβοηθώντας με αυτό τον τρόπο στον περιορισμό της μεταβατικής βύθισης συχνότητας. Η μεταβατική αύξηση ισχύος γίνεται δυνατή χρησιμοποιώντας τη συσσωρευμένη κινητική ενέργεια του άξονα της ανεμογεννήτριας, επιβραδύνοντάς τον προσωρινά. Φυσικά, η έγχυση ενεργού ισχύος στο δίκτυο και η ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας πρέπει να επανέρχονται στις αρχικές τιμές τους, ώστε να εξασφαλίζεται η λειτουργία με βέλτιστη απόδοση στη μόνιμη κατάσταση. Συνεπώς, η έξοδος του εξομοιωτή αδράνειας στη μόνιμη κατάσταση πρέπει να είναι μηδενική και να μην επηρεάζεται από το μόνιμος σφάλμα της συχνότητας.

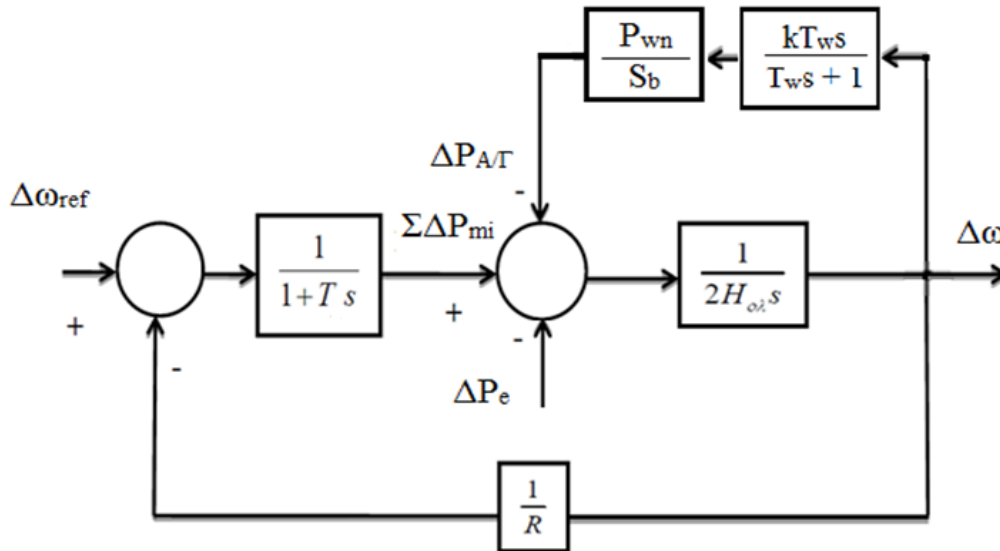
Επιπλέον, ο εξομοιωτής αδράνειας πρέπει να ενεργοποιείται μόνο σε περιπτώσεις μείωσης της συχνότητας. Για την περίπτωση που υπάρχει περίσσεια παραγωγής έχουν αναπτυχθεί τρόποι ελέγχου και κώδικες δικτύου, που ρυθμίζουν την απόκριση της ανεμογεννήτριας με περιορισμό συνήθως της ενεργού παραγωγής της [22].

Ο προτεινόμενος ρυθμιστής, συνεπώς, είναι ένα φίλτρο απαλοιφής (wash – out filter), του οποίου η έξοδος είναι μη μηδενική σε περίπτωση που ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας είναι μη μηδενικός. Η έξοδος του φίλτρου απαλοιφής πολλαπλασιάζεται με ένα κέρδος ώστε να αντιστοιχηθεί η μεταβολή της συχνότητας σε ανάλογη έγχυση ισχύος της ανεμογεννήτριας. Η συνάρτηση μεταφοράς του εξομοιωτή αδράνειας είναι επομένως η εξής:

$$G_{I/E}(s) = \frac{kT_w s}{1 + T_w s} \quad (3.1)$$

Η χρονική σταθερά του φίλτρου θα επιλεγεί ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος που είναι εγκατεστημένο το αιολικό πάρκο. Στο Σχήμα 3.1 παρατίθεται ο βρόχος ρύθμισης συχνότητας ενός αυτόνομου συστήματος με την προσθήκη του

προτεινόμενου εξομοιωτή αδράνειας, έχοντας λάβει υπόψη τη συνολική ονομαστική ισχύ των αιολικών πάρκων που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο. Το χρονικό διάστημα που εξετάζεται αντιστοιχεί στην πρωτεύουσα ρύθμιση και γι' αυτό το σήμα  $\Delta\omega_{ref}$  είναι σταθερό και ίσο με μηδέν. Τέλος, σε περίπτωση πτώσης της συχνότητας το  $\Delta\omega$  είναι αρνητικό και γι' αυτό το λόγο η έξοδος του φίλτρου απαλοιφής αφαιρείται από τη συνολική παραγωγή μηχανικής ισχύος.



Σχ. 3.1 Βρόχος ρύθμισης συχνότητας με εξομοιωτή αδράνειας

Οι μεταβλητές που απεικονίζονται είναι οι εξής:

- $T$  η χρονική σταθερά του ρυθμιστή στροφών της ισοδύναμης απλοποιημένης γεννήτριας
- $R$  ο στατισμός της ισοδύναμης συμβατικής μονάδας
- $H$  η αδράνεια της ισοδύναμης συμβατικής μονάδας
- $k$  το κέρδος του εξομοιωτή αδράνειας σε αμ στη βάση ισχύος της ανεμογεννήτριας
- $T_w$  η χρονική σταθερά του εξομοιωτή αδράνειας
- $P_{wn}/S_b$  ο λόγος της ονομαστικής αιολικής ισχύος ως προς τη βασική ισχύ του συστήματος
- $\Delta\omega$  η μεταβολή της ανά μονάδα τιμής της συχνότητας από την ονομαστική (50Hz)

Η συνάρτηση μεταφοράς με ανοιχτό το βρόχο του στατισμού του συστήματος πριν την εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας είναι:

$$G_o(s) = \frac{1}{2Hs(1+Ts)} \quad (3.2)$$

Από τη συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου (3.2) συμπεραίνεται ότι ο ρυθμός πτώσης της συχνότητας αμέσως μετά από μια διαταραχή του ισοζυγίου είναι ανάλογος του όρου  $1/2H$ , ενώ η απόκριση του ρυθμιστή στροφών κυριαρχείται από τον πόλο στη θέση  $-1/T$ .

Εισάγοντας τον εξομοιωτή αδράνειας στο σύστημα, η συνάρτηση ανοιχτού βρόχου στατισμού γίνεται:

$$G_{o,n}(s) = \frac{1 + T_w s}{(2H + k'T_w)s \left(1 + \frac{2HT_w}{2H + k'T_w} s\right) (1 + Ts)} \quad (3.3)$$

όπου  $k' = k \frac{P_{wn}}{S_b}$ .

Η εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας έχει τροποποιήσει τη συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου ως εξής:

- Προστέθηκε ένα μηδενικό στη θέση  $-\frac{1}{T_w}$ .
- Η αδράνεια αυξήθηκε κατά τον παράγοντα  $k'T_w/2$ .
- Εισήγαγε έναν πόλο στο σύστημα στη θέση  $-\frac{1}{T_w} - \frac{k'}{2H}$

Η προτεινόμενη αρχή σχεδίασης, που ακολουθείται σε αυτή τη διπλωματική, αφορά την επιλογή της παραμέτρου  $T_w$ .

Προτείνεται η χρονική σταθερά του φίλτρου απαλοιφής να επιλέγεται ίση με την επικρατούσα χρονική σταθερά ρύθμισης της συχνότητας του συστήματος. Δηλαδή:

$$T_w = T \quad (3.4)$$

Κάνοντας αυτή την επιλογή, το μηδενικό τοποθετείται πάνω στον πόλο  $-1/T$  αναιρώντας τον και η συνάρτηση ανοιχτού βρόχου του συστήματος μετατρέπεται ως εξής:

$$G_{o,n}(s) = \frac{1}{(2H + k'T_w)s \left(1 + \frac{2HT_w}{2H + k'T_w} s\right)} \quad (3.5)$$

Με αυτό τον τρόπο ο ρυθμός πτώσης της συχνότητας αμέσως μετά τη διαταραχή είναι ανάλογος του όρου:

$$\frac{1}{(2H + k'T_w)} < \frac{1}{2H} \quad (3.6)$$

ενώ ο επικρατών πόλος έχει μετακινηθεί προς τα αριστερά κατά τον παράγοντα  $-k'/2H$ , δηλαδή βρίσκεται στη θέση:

$$p_n = -\frac{1}{T} - \frac{k'}{2H} \quad (3.7)$$

Συγκεκριμένα, επιτυγχάνεται με αυτή την αρχή σχεδίασης:

- Αύξηση της αδράνειας που «βλέπει» το σύστημα αμέσως μετά τη διαταραχή και, συνεπώς, μείωση του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας.
- Ταχύτερη απόκριση της συχνότητας του συστήματος.

Κλείνοντας το βρόχο του στατισμού και μεταβάλλοντας την τιμή του, σχεδιάζεται ο γεωμετρικός τόπος ριζών του συστήματος εισάγοντας τον εξομοιωτή αδράνειας.

Στο γενικό σύστημα που εξετάζεται ο γεωμετρικός τόπος αποτελείται από δύο κατακόρυφους κλάδους. Το σημείο θλάσης για την πρώτη περίπτωση είναι [29]:

$$\frac{d}{ds} \left( -\frac{1}{G_o(s)} \right) = 0 \Rightarrow s_\theta = -\frac{1}{2T} \quad (3.8)$$

Μετά την εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας και σύμφωνα με την (3.3) είναι:

$$\frac{d}{ds} \left( -\frac{1}{G_{o,n}(s)} \right) = 0 \Rightarrow s_{\theta,n} = -\frac{1}{2T_w} - \frac{k'}{4H} \quad (3.9)$$

Είναι δυνατόν επίσης, να υπολογιστεί η συνάρτηση της συχνότητας συναρτήσει του χρόνου για βηματική αύξηση στο ηλεκτρικό φορτίο. Η συνάρτηση μεταφοράς της συχνότητας για μια διαταραχή  $\Delta P_e(s)$  πριν την εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας είναι (η διαταραχή στην ηλεκτρική ισχύ μπαίνει με αρνητικό πρόσημο στη συνάρτηση μεταφοράς):

$$\frac{\Delta \Omega(s)}{\Delta P_e(s)} = -\frac{Ts + 1}{2Hs(Ts + 1) + 1/R} \quad (3.10)$$

Οι ρίζες του παρονομαστή της (3.10) συναρτήσεως των παραμέτρων του συστήματος είναι:

$$s_{1,2} = \sigma \pm j\omega_d = -\frac{1}{2T} \pm j \frac{\sqrt{\frac{8HT}{R} - 4H^2}}{4HT} \quad (3.11)$$

Για βηματική μεταβολή  $\Delta P_e(s)$  είναι:

$$\Delta \Omega(s) = -\frac{Ts + 1}{s(2Hs(Ts + 1) + 1/R)} \Delta P_e \quad (3.12)$$

Η (3.12) μέσω της (3.11) μετατρέπεται ως εξής:

$$\Delta\Omega(s) = -\frac{Ts + 1}{2HTs((s + \sigma)^2 + \omega_d^2)} \Delta P_e \quad (3.13)$$

Αναλύοντας την (3.13) σε απλά κλάσματα, εφαρμόζοντας αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace και παρατηρώντας ότι:

$$2HT(\sigma^2 + \omega_d^2) = \frac{1}{R} \quad (3.14)$$

υπολογίζεται η συνάρτηση της συχνότητας ως προς το χρόνο ως εξής:

$$\Delta\omega(t) = -\Delta P_e \left[ R - Re^{-\sigma t} \cos(\omega_d t) + \frac{1 - 2H\sigma R}{2H\omega_d} e^{-\sigma t} \sin(\omega_d t) \right] \quad (3.15)$$

Θέτοντας την παράγωγο της (3.13) ίση με μηδέν υπολογίζεται η χρονική στιγμή στην οποία η συχνότητα θα έχει την ελάχιστη τιμή της ( $t > 0$ ):

$$t_{minf} = \frac{1}{\omega_d} \left[ \pi + \arctan \left( -\frac{\omega_d}{2H\omega_d^2 R - \sigma + 2H\sigma^2 R} \right) \right] \quad (3.16)$$

Αντικαθιστώντας το αποτέλεσμα της (3.16) στην (3.15) υπολογίζεται η ελάχιστη τιμή της συχνότητας για τη μεταβολή  $\Delta P_e$ .

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για τον υπολογισμό της συνάρτησης της συχνότητας μετά την εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας με την προτεινόμενη επιλογή για τη χρονική σταθερά  $T_w$  (Σχέση 3.3). Η (3.10) μετατρέπεται ως εξής:

$$\Delta\Omega'(s) = -\Delta P_e \frac{T_w s + 1}{(2H + k'T_w)s \left( \frac{2HT_w}{2H + k'T_w} s + 1 \right) + \frac{1}{R}} \quad (3.17)$$

Οι ρίζες του παρονομαστή της (3.17) είναι:

$$s'_{1,2} = \sigma' \pm j\omega'_d = -\frac{1}{2T} - \frac{k'}{4H} \pm j \sqrt{\frac{\frac{8HT}{R} - (2H + k'T_w)^2}{4HT}} \quad (3.18)$$

Έτσι, για βηματική μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος, η (3.17) γίνεται αντίστοιχα με την (3.13):

$$\Delta\Omega'(s) = -\frac{T_w s + 1}{2HT_w s((s + \sigma')^2 + \omega'^2_d)} \Delta P_e \quad (3.19)$$

Αναλύοντας την (3.19) σε απλά κλάσματα και εφαρμόζοντας αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace (η (3.14) ισχύει και για τα  $\sigma'$ ,  $\omega'_d$ ) προκύπτει:

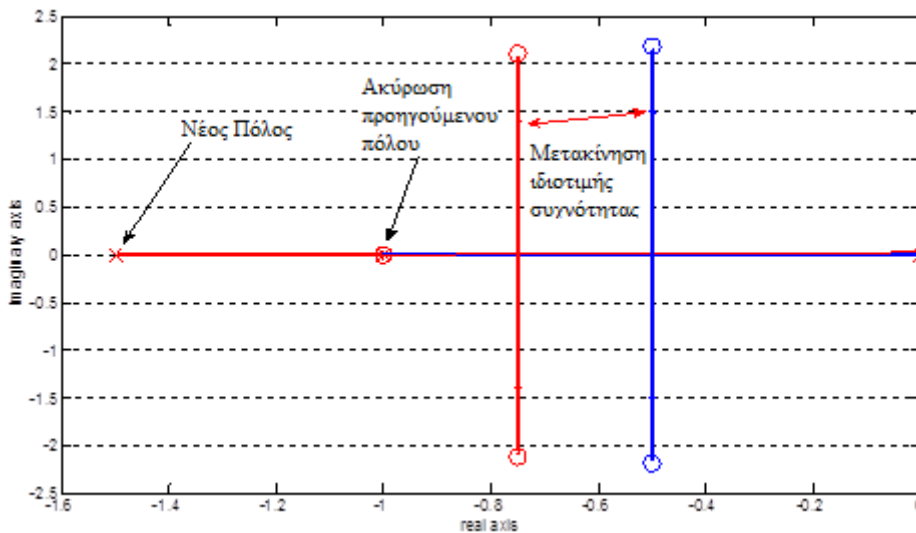
$$\Delta\omega'(t) = -\Delta P_e \left[ R - R e^{-\sigma' t} \cos(\omega'_d t) + \frac{1 - 2H\sigma'R}{2H\omega'_d} e^{-\sigma' t} \sin(\omega'_d t) \right] \quad (3.20)$$

Η χρονική στιγμή που παρουσιάζει ελάχιστο η (3.20) προκύπτει από τη σχέση (3.16) με αντικατάσταση των  $\sigma, \omega_d$  από τα  $\sigma', \omega'_d$  αντίστοιχα.

Επιλέγοντας για τις παραμέτρους τις ενδεικτικές τιμές:

- $T = T_w = 1s$
- $k = 10$
- $\frac{P_{wn}}{S_b} = 0,4$
- $H = 4s$

σχεδιάζεται ο γεωμετρικός τόπος ριζών του συστήματος για κέρδος  $1/R$  του στατισμού από 0 έως 40 (Σχήμα 3.2):



Σχ. 3.2 Γεωμετρικός τόπος ριζών γενικού συστήματος με και χωρίς  $E/A$

Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται με μπλε και κόκκινο χρώμα ο τόπος ριζών χωρίς και με εξομοιωτή αδράνειας αντίστοιχα. Με 'x' συμβολίζονται οι ιδιοτιμές του συστήματος για μηδενικό κέρδος στατισμού (ανοιχτός βρόχος), ενώ με 'o' οι ιδιοτιμές του συστήματος για  $1/R = 40$  (ή  $R = 2,5\%$ ). Όπως φαίνεται, η ιδιοτιμή που σχετίζεται με τη ρύθμιση συχνότητας μετακινείται προς τα αρνητικά του άξονα των πραγματικών αριθμών. Επιπλέον, για ίδια τιμή στατισμού η συχνότητα ταλάντωσης της ιδιοτιμής είναι λίγο μικρότερη και η απόσβεση είναι καλύτερη.

Χωρίς εξομοιωτή αδράνειας ( $k = 0$ ), οι ιδιοτιμές του συστήματος είναι από την (3.11):

$$s_{1,2} = -\sigma \pm j\omega_d = -0,5s^{-1} \pm j1,5s^{-1} \quad (3.21)$$



Από την (3.16) προκύπτει η χρονική στιγμή που παρουσιάζεται η μέγιστη μεταβατική βύθιση της συχνότητας:

$$t_{minf} = 1,262s \quad (3.22)$$

Αντικαθιστώντας το αποτέλεσμα της (3.21) στην (3.15) και για αύξηση 20% στην ηλεκτρική ισχύ προκύπτει:

$$\Delta\omega_{min} = -0,01841\alpha\mu \text{ ή } f_{min} = 49,079Hz \quad (3.23)$$

Μετά την εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας με τις ενδεικτικές τιμές στο σύστημα προκύπτουν από την (3.18):

$$s'_{1,2} = -\sigma' \pm j\omega'_d = -0,75s^{-1} \pm j1,392s^{-1} \quad (3.24)$$

Αντικαθιστώντας στην (3.16) προκύπτει η χρονική στιγμή που προκύπτει η μέγιστη μεταβατική βύθιση της συχνότητας:

$$t'_{minf} = 1,256s \quad (3.25)$$

Αντικαθιστώντας το αποτέλεσμα της (3.25) στην (3.20) προκύπτει η μέγιστη μεταβατική βύθιση της συχνότητας:

$$\Delta\omega_{min} = -0,01551\alpha\mu \text{ ή } f_{min} = 49,224Hz \quad (3.26)$$

Τα παραπάνω αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1 όπου παρατίθεται η μέγιστη μεταβατική βύθιση καθώς και η χρονική στιγμή στην οποία συμβαίνει για το γενικό σύστημα με τις ενδεικτικές τιμές που προαναφέρθηκαν:

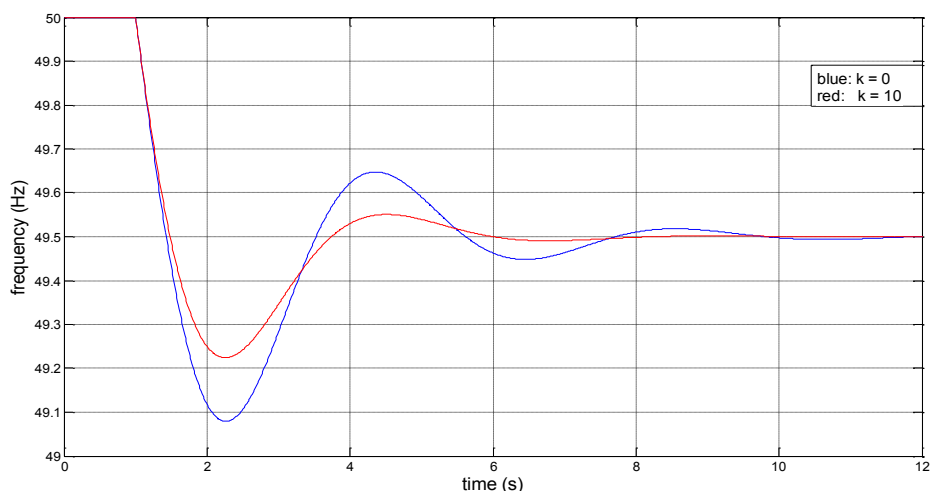
**Πίνακας 3.1** Χαρακτηριστικά απόκρισης συχνότητας χωρίς και με E/A

Χωρίς εξομοιωτή αδράνειας		Με εξομοιωτή αδράνειας	
$t_{minf}$ (s)	$f_{min}$ (Hz)	$t_{minf}$ (s)	$f_{min}$ (Hz)
1,262	49,079	1,256	49,224

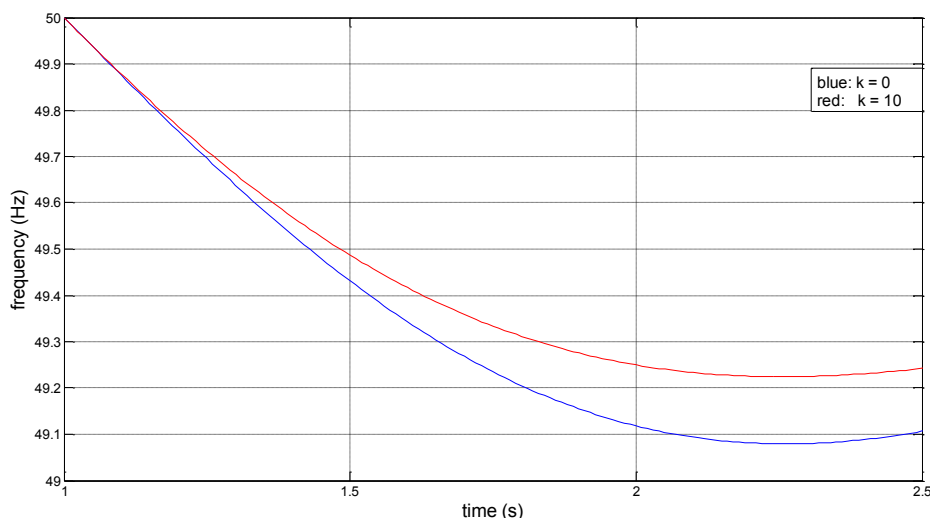
Στο Σχήμα 3.3α σχεδιάζεται η απόκριση της συχνότητας του συστήματος σε Hz με και χωρίς εξομοιωτή αδράνειας. Η διαταραχή στην ηλεκτρική ισχύ γίνεται τη χρονική στιγμή  $t = 1s$  (κάτι που συνεπάγεται ότι πρέπει να προστεθεί 1s στα αποτελέσματα των (3.22) και (3.25)). Με κόκκινο χρώμα σχεδιάζεται η απόκριση με τον εξομοιωτή αδράνειας, ενώ με μπλε η μεταβολή της συχνότητας χωρίς τον εξομοιωτή. Με την εισαγωγή του εξομοιωτή βελτιώνονται σημαντικά τα χαρακτηριστικά της συχνότητας, ενώ επαληθεύονται και για τις δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα που παρατέθηκαν στον Πίνακα 3.1. Τέλος, παρατηρείται πιο γρήγορη

απόκριση, μικρότερη μεταβατική βύθιση της συχνότητας και μεγαλύτερη απόσβεση των ταλαντώσεων.

Επίσης, η αδράνεια που «βλέπει» το σύστημα μετά τη διαταραχή αυξάνεται. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο Σχήμα 3.3β, στο οποίο σχεδιάζεται η απόκριση της συχνότητας  $f$  για το πρώτο 1,5s μετά τη διαταραχή. Στην περίπτωση με τον εξομοιωτή αδράνειας (κόκκινο χρώμα), ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας είναι μικρότερος.



**Σχ. 3.3α** Απόκριση συχνότητας συστήματος με και χωρίς  $E/A$



**Σχ. 3.3β** Μεταβολή συχνότητας για το πρώτο 1,5s

Στα επόμενα κεφάλαια θα γίνει γραμμική και δυναμική ανάλυση της επίδρασης του εξομοιωτή αδράνειας σε απλά συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, θα προσομοιωθούν σενάρια διαφορετικών μεταβολών του ηλεκτρικού φορτίου σε σύστημα ατμοστρόβιλου μίας βαθμίδας – απομονωμένου φορτίου και ατμοστρόβιλου τριών βαθμίδων – απομονωμένου φορτίου. Η διερεύνηση θα γίνει αρχικά αμελώντας τη δυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας, υποθέτοντας ιδανικό εξομοιωτή αδράνειας.

## **3.2. Σχεδίαση για σύστημα Ατμοστρόβιλου – Απομονωμένου φορτίου**

Σε αυτή την ενότητα, θα γίνει σχεδίαση και ανάλυση της απόκρισης του ιδανικού εξομοιωτή αδράνειας για απλά συστήματα. Το πρώτο σύστημα στο οποίο εφαρμόζεται ο ιδανικός εξομοιωτής αδράνειας εξετάζεται στην ενότητα 3.2.1. και αποτελείται από μια μονάδα παραγωγής (ατμοστρόβιλος μίας βαθμίδας) με αρκετά γρήγορη απόκριση ρύθμισης συχνότητας. Στην ενότητα 3.2.2. η μονάδα παραγωγής τροποποιείται ώστε να έχει πιο αργή απόκριση όσον αφορά τη ρύθμιση συχνότητας και εξετάζεται εκ νέου η επίδραση του εξομοιωτή αδράνειας στις μεταβλητές του συστήματος.

### **3.2.1. Εφαρμογή ιδανικού εξομοιωτή αδράνειας σε σύστημα με ατμοστρόβιλο μιας βαθμίδας**

Αρχικά, περιγράφεται το σύστημα ατμοστρόβιλου – απομονωμένου φορτίου που χρησιμοποιείται για την ανάλυση του εξομοιωτή αδράνειας. Στην ενότητα 3.2.1.1, θα περιγραφεί αναλυτικά η διαδικασία επιλογής των παραμέτρων του και θα γίνει ανάλυση των ιδιοτιμών του συστήματος με και χωρίς τον εξομοιωτή αδράνειας. Στις ενότητες 3.2.1.2 και 3.2.1.3 εξετάζεται η απόκριση του συστήματος για μεταβολή 10% και 20% αντίστοιχα στο ηλεκτρικό φορτίο.

#### **3.2.1.1. Δεδομένα συστήματος – Γραμμική ανάλυση**

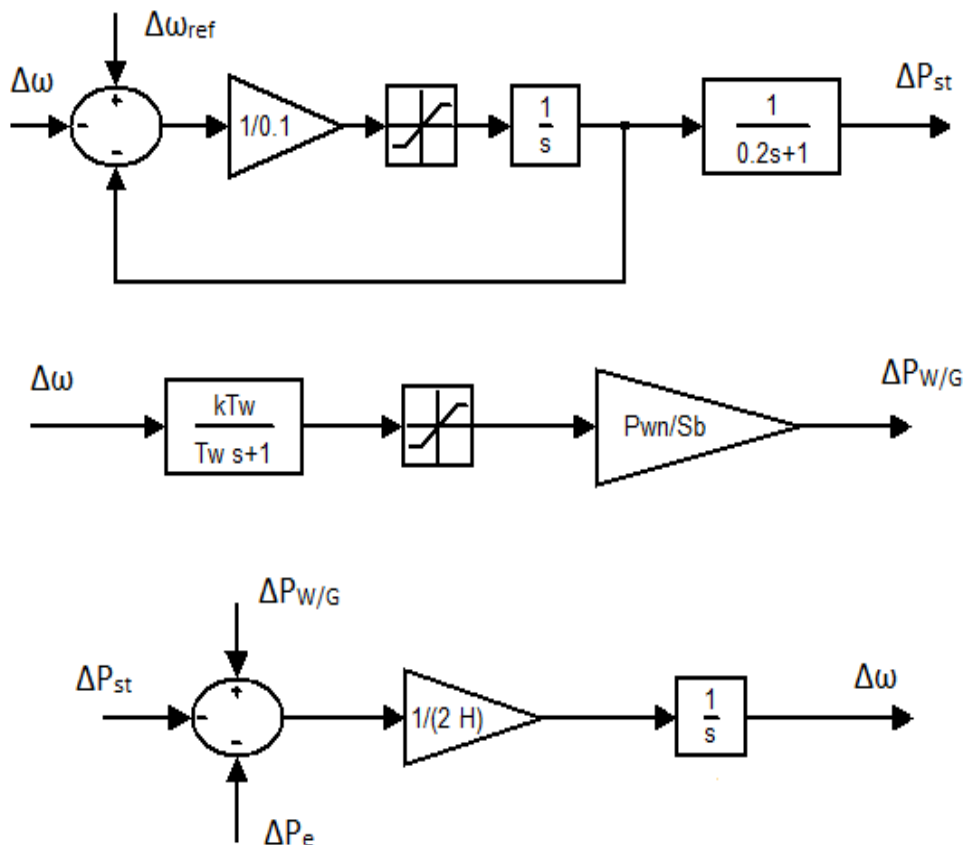
Το σύστημα αποτελείται από ένα ηλεκτρικό φορτίο σταθερής ισχύος ίσης με 1αμ σε βάση ισχύος 100MVA, το οποίο τροφοδοτείται από έναν ατμοστρόβιλο μίας βαθμίδας και ένα αιολικό πάρκο. Τα χαρακτηριστικά του ατμοστρόβιλου μιας βαθμίδας που χρησιμοποιείται δίνονται στον Πίνακα 3.2. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο περιορισμός στο ρυθμό ανοίγματος της βαλβίδας είναι αρκετά χαλαρός για να μπορεί ο ατμοστρόβιλος να αναλάβει το επιπλέον φορτίο χωρίς να οδηγηθούμε σε πριονωτή απόκριση που μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια [28]. Επιπλέον, θεωρείται ότι έχει επαρκή στρεφόμενη εφεδρεία για να καλύψει την αύξηση στο ηλεκτρικό φορτίο.

Η ονομαστική ισχύς του αιολικού πάρκου θεωρείται ίση με το 40% του αρχικού ηλεκτρικού φορτίου. Στην ανάλυση που ακολουθεί για τον ιδανικό εξομοιωτή αδράνειας γίνεται η υπόθεση πως το αιολικό πάρκο λειτουργεί στο 60% της ονομαστικής του ισχύος. Συνολικά, αυτό ισοδυναμεί με ένα μεγάλο ποσοστό αιολικής διείσδυσης (24%).

**Πίνακας 3.2** Δεδομένα ατμοστροβίλου μίας βαθμίδας

Συμβολισμός	Παράμετρος	Τιμή
$f_n$	Ονομαστική συχνότητα	50Hz
$T_g$	Χρονική σταθερά σερβομηχανισμού	0,1s
$T_{hp}$	Χρονική σταθερά εκτόνωσης υψηλής πίεσης	0,2s
$R$	Στατισμός	0,05
$H$	Σταθερά αδράνειας	3,82s
$\dot{g}_{max}$	Μέγιστος ρυθμός ανοίγματος δικλείδας	15%
$P_{wn}$	Ονομαστική ισχύς αιολικού πάρκου	0,4αμ
$P_{w0}$	Αρχικό σημείο λειτουργίας αιολικού πάρκου	60%

Η μοντελοποίηση του ατμοστροβίλου, του εξομοιωτή αδράνειας και του μηχανικού μέρους της γεννήτριας στο περιβάλλον του Simulink φαίνονται στο Σχήμα 3.4:



**Σχ. 3.4** Μοντελοποίηση ατμοστροβίλου, εξομοιωτή αδράνειας και μηχανικού μέρους γεννήτριας

Στον Πίνακα 3.3 φαίνονται οι πόλοι του συστήματος με ανοιχτό βρόχο στατισμού και οι συντελεστές συμμετοχής του κάθε πόλου πριν και μετά την

εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας με  $T_w = 0,2s$  και μια ενδεικτική τιμή  $k=10$ . Για τη γραμμικοποίηση του συστήματος και την εξαγωγή των πόλων και των συντελεστών συμμετοχής χρησιμοποιήθηκε η εντολή `linmodv5` του λογισμικού MATLAB.

**Πίνακας 3.3** Πόλοι ανοιχτού βρόχου στατισμού με και χωρίς E/A

Πόλος χωρίς E/A	Συντ. Συμ.	Πόλος με E/A	Συντ. Συμ.
0+0j	w 1,00	0+0j	w 1,00
-5+0j	P <sub>m</sub> 1,00	-5,524+0j	w 0,10 I/E 1,00
-10+0j	g 1,00	-10+0j	g 1,00

Επεξήγηση μεταβλητών κατάστασης:

- $w$ : συχνότητα συστήματος
- $P_m$ : μηχανική ισχύς ατμοστροβίλου
- $g$ : Άνοιγμα δικλείδας ατμού
- $I/E$ : Ισχύς εξομοιωτή αδράνειας

Παρατηρείται η εισαγωγή ενός πόλου ( $p = -5.524$ ) που οφείλεται στον εξομοιωτή αδράνειας στη θέση που προβλέπει η (3.5), με το κέρδος  $k$  να πολλαπλασιάζεται με 0,4 που είναι ο λόγος της ονομαστικής ισχύος του αιολικού πάρκου ως προς τη βάση του συστήματος. Σημειώνεται ότι ο πόλος στη θέση -5 εξακολουθεί να υπάρχει, αλλά δεν επηρεάζει το γεωμετρικό τόπο ριζών καθώς έχει αναιρεθεί από το μηδενικό που τοποθετήθηκε στη συγκεκριμένη θέση.

Κλείνοντας το βρόχο του στατισμού ( $R = 0,05$ ) εξετάζεται η μεταβολή της ιδιοτιμής ρύθμισης συχνότητας για ίδιες τιμές των παραμέτρων του εξομοιωτή αδράνειας (Πίνακας 3.4):

**Πίνακας 3.4** Ιδιοτιμή ρύθμισης συχνότητας και συντελεστές συμμετοχής με και χωρίς E/A

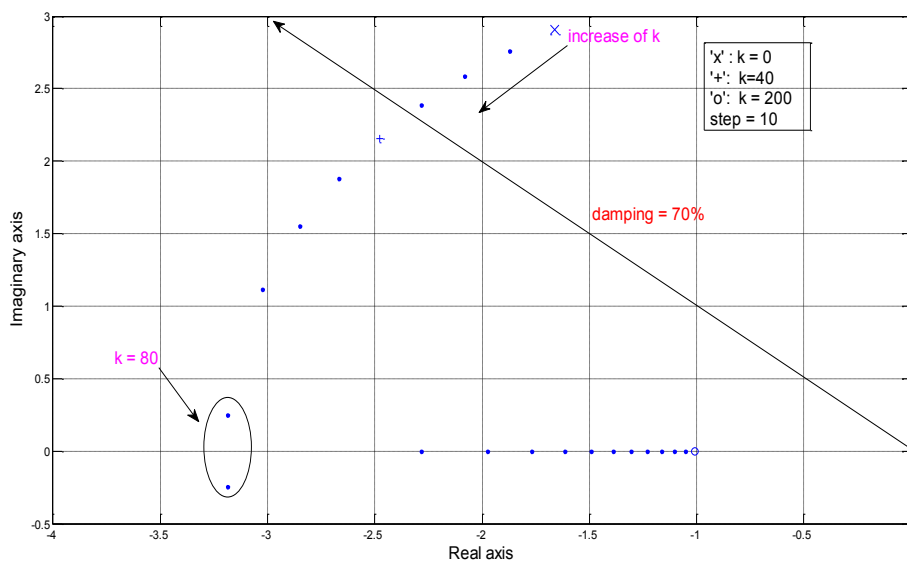
Πόλος χωρίς E/A	Σ.Σ	Πόλος με E/A	Σ.Σ.
-1,661±j2,907	P <sub>m</sub> 0,76 g 0,38 w 1,00	-1,873±j2,758	P <sub>m</sub> 0,88 g 0,43 w 1,00 I/E 0,15

Από τον Πίνακα 3.4 παρατηρείται ότι η εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας στο σύστημα οδήγησε σε μετατόπιση της ιδιοτιμής ρύθμισης συχνότητας προς τα αριστερά μειώνοντας ταυτόχρονα τη συχνότητα ταλάντωσής της.

Στο Σχήμα 3.5 σχεδιάζεται η μεταβολή της ιδιοτιμής που σχετίζεται με τη ρύθμιση της συχνότητας για τιμές του κέρδους  $k$  του εξομοιωτή αδράνειας από 0 έως 200. Με 'x' σημειώνονται οι ιδιοτιμές του συστήματος για  $k = 0$  (χωρίς συμμετοχή του εξομοιωτή αδράνειας). Αυξάνοντας το κέρδος  $k$  του ρυθμιστή, οι ιδιοτιμές μετακινούνται προς το σημείο που σημειώνεται με 'ο' και αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή

για κέρδος εξομοιωτή  $k = 200$ . Η γραμμή στο Σχήμα 3.5 αντιστοιχεί στα σημεία με απόσβεση ταλάντωσης 70%. Για τη συγκεκριμένη τιμή απόσβεσης δεν παρατηρείται υπερακόντιση της συχνότητας κάτω από την τιμή μόνιμης κατάστασης. Αυτή η απόσβεση επιτυγχάνεται για τιμή κέρδους εξομοιωτή αδράνειας ανάμεσα στις τιμές 30 και 40.

Όπως είναι φανερό, η αύξηση του κέρδους μετακινεί προς τα αριστερά την ιδιοτιμή που σχετίζεται με τη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος και, ταυτόχρονα, μειώνει τη συχνότητα ταλάντωσής της. Έτσι, τα χαρακτηριστικά της απόκρισης της συχνότητας βελτιώνονται σημαντικά.



Σχ. 3.5 Μετακίνηση ιδιοτιμής ρύθμισης συχνότητας για μεταβολή του  $k$

Στη συνέχεια, θα εξεταστεί η δυναμική απόκριση της συχνότητας για την επιλεγμένη τιμή της χρονικής σταθεράς  $T_w$  και για μεταβολή του κέρδους  $k$ . Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ότι η μεταβατική αύξηση στην ισχύ γίνεται δυνατή αντλώντας ισχύ από την συσσωρευμένη κινητική ενέργεια στον άξονα της ανεμογεννήτριας. Αυτό συνεπάγεται ότι ο άξονας της ανεμογεννήτριας θα επιβραδυνθεί. Για το λόγο αυτό, η έξοδος του ρυθμιστή περιορίζεται στο 10% της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας. Το συγκεκριμένο όριο (10%) χρησιμοποιείται και στο αντίστοιχο μοντέλο του εξομοιωτή αδράνειας της GE που περιγράφεται στο [22], το οποίο, με κατάλληλη επιλογή παραμέτρων, είναι ισοδύναμο με το μοντέλο της ΑΓΔΤ που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2.

Κατά τη διάρκεια της δυναμικής ανάλυσης θα προσομοιωθούν οι εξής μεταβολές:

- Βηματική αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου κατά 10% από την ονομαστική.
- Βηματική αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου κατά 20% από την ονομαστική.

Σε κάθε περίπτωση, το κέρδος του εξομοιωτή αδράνειας θα αυξάνεται σταδιακά για όσο παρατηρείται βελτίωση στην απόκριση της συχνότητας, μέχρις ότου ο περιοριστής εμποδίσει την περαιτέρω βελτίωση, οπότε και συνεπάγεται ότι δεν εξυπηρετεί η μεγαλύτερη αύξηση του κέρδους.

### 3.2.1.2. Βηματική αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου κατά 10%

Η διαταραχή στο φορτίο λαμβάνει χώρα για  $t = 5s$ . Πριν τη διαταραχή η συχνότητα είχε την ονομαστική της τιμή (50Hz) ενώ η έξοδος του εξομοιωτή αδράνειας ήταν μηδενική. Η ισχύς του ηλεκτρικού φορτίου είναι ίση με  $1\mu = 100\%$ , ενώ το ισοδύναμο αιολικό πάρκο καλύπτει, όπως προαναφέρθηκε, το 24% του φορτίου. Το υπόλοιπο 76% καλύπτεται από τον ατμοστρόβιλο. Επομένως, όσον αφορά το ισοζύγιο ισχύος πριν τη διαταραχή ισχύει:

$$P_{st} + P_w = P_e = 1 \mu \quad (3.27)$$

$$P_{st} = 0,76 \mu \quad (3.28)$$

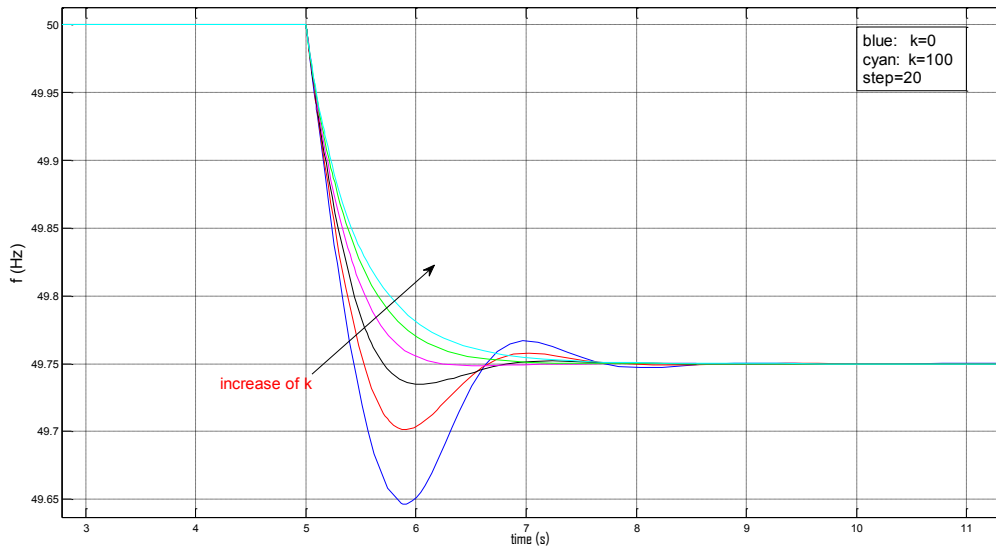
$$P_w = 0,24 \mu \quad (3.29)$$

Αμέσως μετά τη διαταραχή, το ηλεκτρικό φορτίο θα έχει μεγαλύτερη τιμή από την παραγόμενη μηχανική ισχύ οδηγώντας έτσι σε βύθιση της συχνότητας. Σε περίπτωση που δεν είναι ενεργοποιημένος ο εξομοιωτής αδράνειας (δηλαδή για  $k = 0$ ), το αιολικό πάρκο δεν αντιλαμβάνεται τη μεταβολή της συχνότητας καθώς είναι ασύγχρονα συζευγμένο στο δίκτυο μέσω των ηλεκτρονικών ισχύος. Έτσι, η απόκριση της συχνότητας εξαρτάται αποκλειστικά από την ικανότητα της συμβατικής μονάδας να προσαρμόσει την παραγωγή της ώστε να καλύψει το επιπλέον φορτίο. Με την αύξηση, όμως, του κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας, η ανεμογεννήτρια συμμετέχει όλο και περισσότερο στην κάλυψη του φορτίου αφού αυξάνει προσωρινά την έγχυση ενεργού ισχύος της στο δίκτυο, υποβοηθώντας έτσι το έργο της συμβατικής μονάδας.

Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται η απόκριση της συχνότητας για αύξηση της τιμής του κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας από  $k = 0$  έως  $k = 100$  με βήμα  $\Delta k = 20$ . Σημειώνεται ότι η χρονική σταθερά του ρυθμιστή παραμένει σταθερή και ίση με  $T_w = 0,2s$ . Η κατεύθυνση του βέλους αντιστοιχεί σε αύξηση για το κέρδος  $k$  του εξομοιωτή αδράνειας.

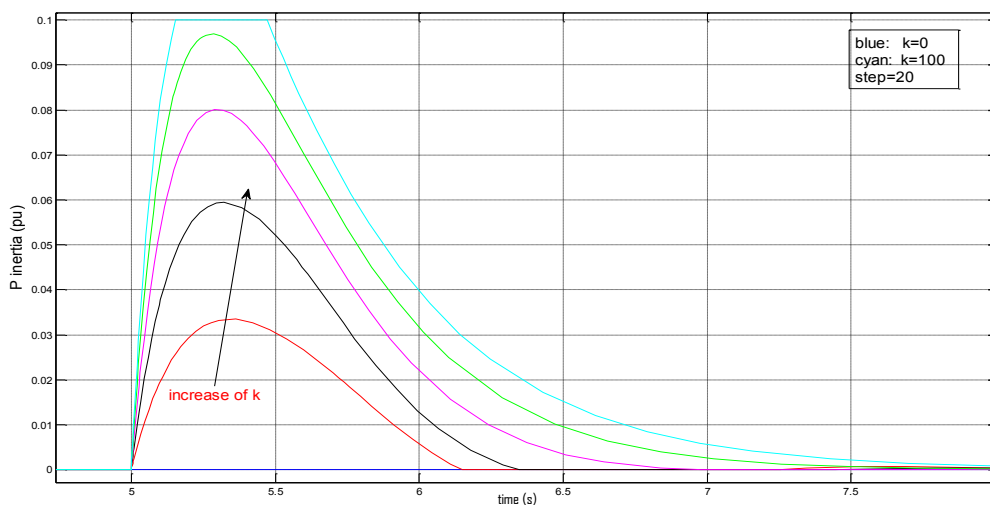
Τα χαρακτηριστικά της απόκρισης της συχνότητας βελτιώνονται με την εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας για αύξηση του κέρδους μέχρι και την τιμή  $k = 60$ . Από τα πρώτα στάδια της μεταβατικής βύθισης, η προστιθέμενη αδράνεια που εισάγεται από τον εξομοιωτή αδράνειας μειώνει την κλίση της μεταβολής της συχνότητας. Επιπλέον, η μεταβατική βύθιση είναι μικρότερη (υψηλότερο ναδίρ συχνότητας), ενώ η απόσβεση της ταλάντωσης της συχνότητας αυξάνεται σημαντικά. Μάλιστα, δεν παρατηρείται υπερακόντιση της συχνότητας κατά την επαναφορά για τιμή  $k > 40$ . Ωστόσο, όπως φάνηκε κι από τη γραμμική ανάλυση που προηγήθηκε,

περαιτέρω αύξηση του κέρδους του ρυθμιστή αδράνειας δεν συνεισφέρει στη βελτίωση της απόκρισης, αλλά αντιθέτως, καθιστά πιο αργή τη μετάβαση στην τιμή μόνιμης κατάστασης. Συνεπώς, μια τιμή για το  $k$  ανάμεσα στο 40 και το 60 κρίνεται ικανοποιητική για αυτή την περίπτωση. Παρόμοιο αποτέλεσμα εξάγεται και από το Σχήμα 3.5, όπου για  $k = 40$  η απόσβεση ήταν λίγο μεγαλύτερη από 70%. Στη δυναμική απόκριση παρατηρείται μια μικρή υπερακόντιση της συχνότητας λόγω του περιορισμού στο ρυθμό ανάληψης φορτίου από τον ατμοστρόβιλο.



Σχ. 3.6 Απόκριση συχνότητας για  $T_w = 0,2s$  και σταδιακή αύξηση του  $k$

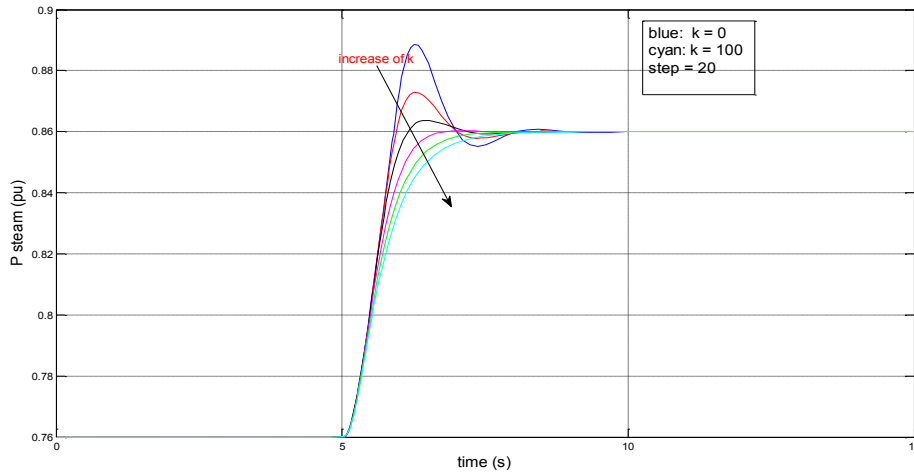
Η εγγεόμενη ισχύς στο σύστημα από τον εξομοιωτή αδράνειας για τις ίδιες τιμές του κέρδους  $k$  παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7. Και σε αυτή την περίπτωση μεγαλύτερο κέρδος του εξομοιωτή αδράνειας οδηγεί σε μεγαλύτερη και πιο απότομη έγχυση ισχύος, μέχρις ότου να επιδράσει ο περιοριστής μεγίστου. Αυτό παρατηρείται για τιμή  $k = 100$ . Επιπλέον, η έγχυση ισχύος διατηρείται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα κάτι που εξηγεί και την καθυστέρηση στη μετάβαση της συχνότητας στην τιμή μόνιμης κατάστασης.



Σχ. 3.7 Έγχυση ενεργού ισχύος από εξομοιωτή αδράνειας για διάφορες τιμές του  $k$



Τέλος, παρατίθεται (Σχήμα 3.8) η απόκριση της μηχανικής ισχύος του ατμοστροβίλου. Εδώ παρατηρείται επίσης πιο ομαλή απόκριση της ισχύος με την αύξηση του κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας μέχρι μια τιμή γύρω στο 60, ενώ περαιτέρω αύξηση καθυστερεί την ολική ανάληψη του φορτίου από τον ατμοστρόβιλο.

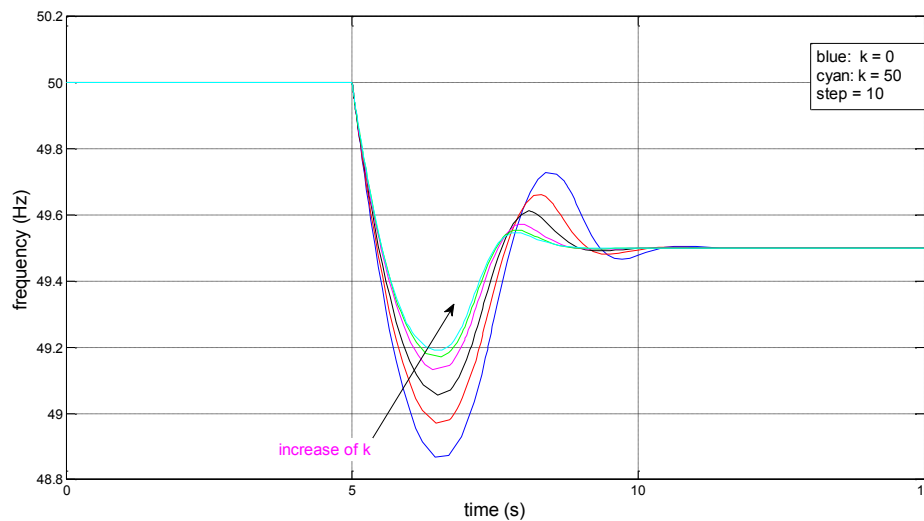


Σχ. 3.8 Απόκριση μηχανικής ισχύος ατμοστροβίλου για διάφορες τιμές του  $k$

### 3.2.1.3. Βηματική αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου κατά 20%

Διατηρώντας τα ίδια δεδομένα και τις ίδιες αρχικές συνθήκες με πριν, προσομοιώνεται βηματική αύξηση κατά 20% του φορτίου. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια με της προηγούμενης ενότητας. Για την επιλεγμένη τιμή της χρονικής σταθεράς  $T_w$  αυξάνεται το κέρδος  $k$  μέχρι περαιτέρω αύξηση να μην συνοδεύεται από κάποια θετική επίδραση στην απόκριση της συχνότητας.

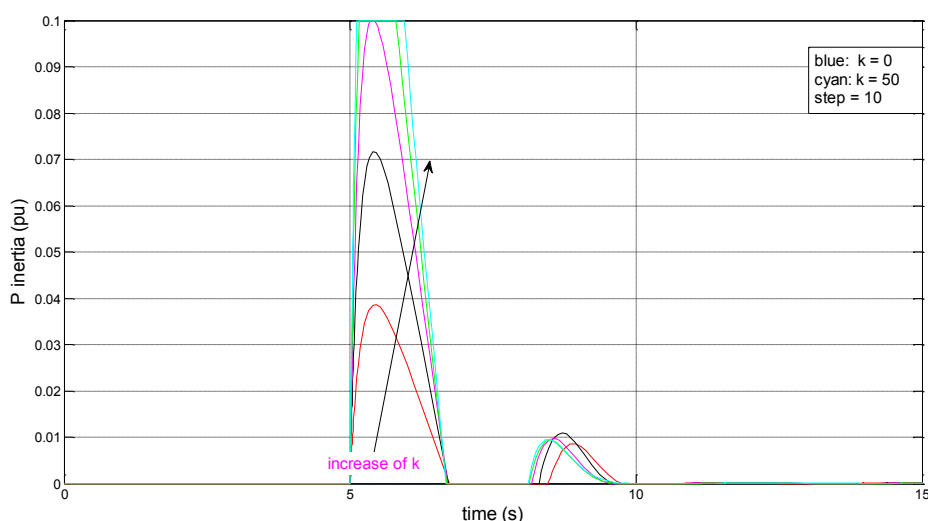
Στο Σχήμα 3.9 απεικονίζεται η απόκριση της συχνότητας του συστήματος:



Σχ. 3.9 Απόκριση συχνότητας συστήματος για διάφορες τιμές του  $k$

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, πιο απότομη πτώση της συχνότητας και μεγαλύτερη μεταβατική βύθιση. Η αύξηση του  $k$  μέχρι μια τιμή περίπου 30 επιφέρει σημαντική βελτίωση στην απόκριση, αλλά το μέγεθος της βελτίωσης δεν αυξάνεται ανάλογα με το  $k$ . Μάλιστα, η βελτίωση που επιφέρει στην απόκριση η αύξηση της τιμής του  $k$  από 40 σε 50 είναι πολύ μικρή, ενώ η επίδραση περαιτέρω αύξησης είναι αμελητέα. Αυτό συμβαίνει γιατί ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας είναι πιο μεγάλος σε αυτή την περίπτωση, κάτι που οδηγεί σε πιο έντονη απόκριση του εξομοιωτή αδράνειας και επίδραση του περιοριστή σε μικρότερη τιμή του κέρδους  $k$ .

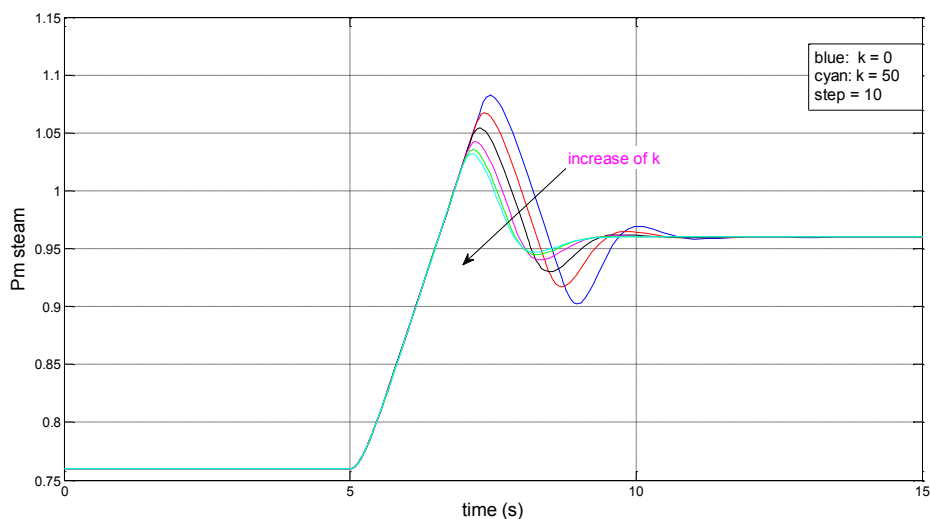
Αυτό φαίνεται πιο καθαρά στην απόκριση της ισχύος από τον εξομοιωτή αδράνειας (Σχήμα 3.10). Όπως και στην περίπτωση της μικρότερης μεταβολής, η αύξηση του κέρδους  $k$  οδηγεί σε μεγαλύτερη και πιο απότομη έγχυση ισχύος. Στη συγκεκριμένη απόκριση, παρατηρείται και μια δεύτερη έγχυση ισχύος λίγο μετά την αρχική διαταραχή, η οποία οφείλεται στην υπερακόντιση της συχνότητας και στην ταλάντωσή της μέχρι να φτάσει στην τιμή μόνιμης κατάστασης. Το ύψος της δεύτερης έγχυσης είναι αρκετά μικρότερο (περίπου 0,01αμ).



**Σχ. 3.10** Έγχυση ενεργού ισχύος από αδρανειακό ελεγκτή για διάφορες τιμές του  $k$

Τέλος, παρατίθεται στο Σχήμα 3.11 η απόκριση της συμβατικής παραγωγής μηχανικής ισχύος από τον αμοστρόβιλο, την οποία εξομαλύνει η εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας, όπως και στην περίπτωση της μικρότερης μεταβολής.

Στην ανάλυση που προηγήθηκε φάνηκε η ευεργετική επίδραση του εξομοιωτή αδράνειας στην απόκριση της συχνότητας για σχετικά μικρή (10%) αλλά και για μεγαλύτερη (20%) διαταραχή. Από τις αποκρίσεις της συχνότητας βγαίνει το συμπέρασμα ότι το σύστημα θα αντιμετώπιζε πρόβλημα και θα αναγκαζόταν σε μερική αποκοπή φορτίου μόνο στην περίπτωση της μεγαλύτερης διαταραχής (20%) που η συχνότητα έπεσε κάτω από τα 49 Hz [16].



**Σχ. 3.11** Απόκριση μηχανικής ισχύος ατμοστρόβιλου για διάφορες τιμές του  $k$

Αντιθέτως, στην πρώτη περίπτωση το σύστημα θα μπορούσε να ανταπεξέλθει ικανοποιητικά χωρίς μερική αποκοπή φορτίου και χωρίς τη χρήση της προστιθέμενης αδράνειας από τις ανεμογεννήτριες. Γι' αυτό το λόγο, η επιλογή του κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας μπορεί να γίνει με βάση τη χειρότερη αναμενόμενη διαταραχή (στην περίπτωσή μας η αύξηση του φορτίου κατά 20%), στο οποίο είναι απαραίτητη η συμμετοχή του ώστε να επιτευχθεί η ελάχιστη δυνατή αποκοπή φορτίου. Στον Πίνακα 3.5 παρατίθενται οι προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων του εξομοιωτή αδράνειας για το συγκεκριμένο σύστημα. Σημειώνεται ότι λόγω της μικρής τιμής του  $T_w$  σε αυτή την περίπτωση (0,2s), το συνολικό κέρδος του αριθμητή της (3.1)  $kT_w$  έχει λογική τιμή 6 - 8s. Έτσι, μια επιλογή τιμής για το κέρδος  $k$  από 30 έως 40 κρίνεται ικανοποιητική.

**Πίνακας 3.5** Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων  $E/A$  για σύστημα με ατμοστρόβιλο μίας βαθμίδας (βάση ανεμογεννήτριας)

$T_w$ (s)	$k$ (αμ)	$kT_w$ (αμs)
0,2	30	6
0,2	40	8

Στις επόμενες ενότητες, θα προσομοιώνεται μόνο η περίπτωση της μεγαλύτερης διαταραχής (20%) για την ανάλυση του εξομοιωτή αδράνειας.

### 3.2.2. Εφαρμογή ιδανικού εξομοιωτή αδράνειας σε σύστημα με ατμοστρόβιλο τριών βαθμίδων

Ο ατμοστρόβιλος της προηγούμενης ενότητας μπορεί να τροποποιηθεί εισάγοντας δύο επιπλέον βαθμίδες, μέσης και χαμηλής πίεσης. Η ύπαρξη των

επιπλέον βαθμίδων επιτρέπει την αναθέρμανση του ατμού στο ενδιάμεσο στάδιο, βελτιώνοντας με αυτό τον τρόπο τη συνολική απόδοση του θερμοδυναμικού κύκλου [7]. Ωστόσο, η αναθέρμανση του ατμού χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη χρονική σταθερά. Έτσι, η ύπαρξη αναθέρμανσης στον αμοστροβίλο αυξάνει τη συνολική απόδοσή του, αλλά συγχρόνως, καθυστερεί σημαντικά τη μεταβατική απόκρισή του και μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερες διακυμάνσεις της συχνότητας κατά τη διάρκεια διαταραχών στο ισοζύγιο ισχύος. Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται γραμμική ανάλυση των ιδιοτιμών του συστήματος, όπως στο σύστημα με τον αμοστροβίλο μιας βαθμίδας, και στη συνέχεια, αναλύεται η επίδραση του εξομοιωτή αδράνειας στην απόκριση του συστήματος.

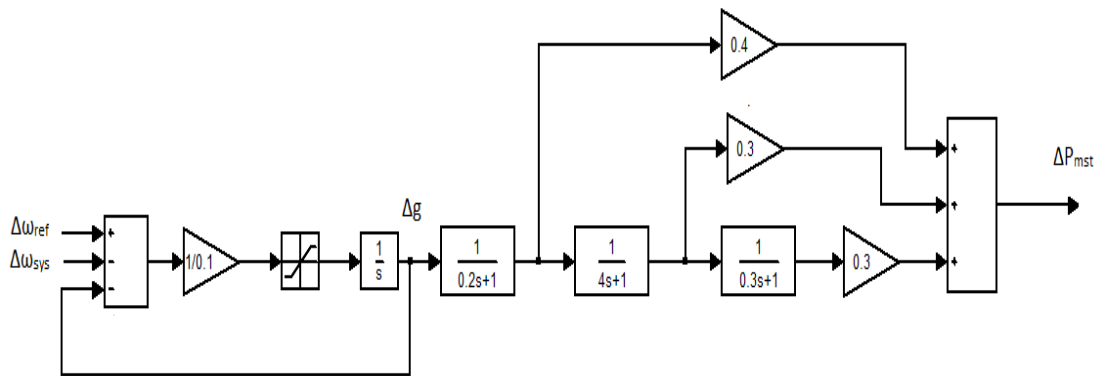
### 3.2.2.1. Δεδομένα συστήματος – Γραμμική ανάλυση

Τα χαρακτηριστικά του αμοστροβίλου τριών βαθμίδων που θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση που θα ακολουθήσει παρατίθενται στον Πίνακα 3.6:

*Πίνακας 3.6 Δεδομένα αμοστροβίλου τριών βαθμίδων*

Συμβολισμός	Παράμετρος	Τιμή
$f_n$	Ονομαστική συχνότητα συστήματος	50Hz
$T_g$	Χρονική σταθερά σερβομηχανισμού	0,1s
$T_{hp}$	Χρονική σταθερά εκτόνωσης υψηλής πίεσης	0,2s
$K_{hp}$	Ποσοστό εκτόνωσης στην υψηλή πίεση	0,4
$T_{mp}$	Χρονική σταθερά αναθέρμανσης	4s
$K_{mp}$	Ποσοστό εκτόνωσης στη μέση πίεση	0,3
$T_{lp}$	Χρονική σταθερά χαμηλής πίεσης	0,3s
R	Στατισμός	0,05
H	Σταθερά αδράνειας	3,82s
$\dot{g}_{max}$	Μέγιστος ρυθμός ανοίγματος δικλείδας	15%

Η μοντελοποίηση του εξομοιωτή αδράνειας και του μηχανικού μέρους της γεννήτριας παραμένουν όπως στο Σχήμα 3.4. Η μοντελοποίηση του αμοστροβίλου φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Σε αυτή την περίπτωση, η τελική παραγόμενη μηχανική ισχύς του αμοστροβίλου είναι το άθροισμα των εξόδων των τριών βαθμίδων. Στην υψηλή βαθμίδα εκτονώνεται το 40% του ατμού ενώ το υπόλοιπο προωθείται στη βαθμίδα της αναθέρμανσης. Σε αυτό το στάδιο ακολουθείται η ίδια διαδικασία, δηλαδή εκτονώνεται το 30% του ατμού ενώ το υπόλοιπο ποσοστό προωθείται στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης που παράγεται το υπόλοιπο ποσοστό της μηχανικής ισχύος.



Σχ. 3.12 Μοντελοποίηση ατμοστροβίλου 3 βαθμίδων στο Simulink

Η επικρατούσα χρονική σταθερά του συστήματος, η οποία ουσιαστικά καθορίζει την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος, είναι η χρονική σταθερά της αναθέρμανσης ( $T_{mp} = 4s$ ). Σύμφωνα με την αρχή σχεδίασης που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η χρονική σταθερά του εξομοιωτή αδράνειας επιλέγεται έτσι ώστε να είναι ίση με αυτή την τιμή. Δηλαδή επιλέγεται:

$$T_w = 4s \quad (3.30)$$

Η χρονική σταθερά  $T_w$  έχει αρκετά μεγαλύτερη τιμή σε αυτή την περίπτωση οπότε για να κυμαίνεται η τιμή του συνολικού κέρδους  $kT_w$  σε αντίστοιχο λογικό επίπεδο με της προηγούμενης παραγράφου, η τιμή του  $k$  θα είναι ανάλογα μικρότερη. Ακολουθώντας λοιπόν την ίδια διαδικασία με πριν, υπολογίζονται οι πόλοι του συστήματος με ανοιχτό το βρόχο του στατισμού χωρίς εξομοιωτή αδράνειας και, στη συνέχεια, με εξομοιωτή αδράνειας με  $T_w = 4s$  και κέρδος  $k = 1$  (Πίνακας 3.7):

Πίνακας 3.7 Πόλοι ανοιχτού βρόχου στατισμού με και χωρίς E/A

Πόλος χωρίς E/A	Σ.Σ	Πόλος με E.A	Συντ. Συμ.
0+0j	w 1,00	0+0j	w 1,00 I/E 0,21
-3,33+0j	P <sub>lp</sub> 1,00	-3,33+0j	P <sub>lp</sub> 1,00
-0,25+0j	P <sub>mp</sub> 1,00	-0,25+0j	P <sub>mp</sub> 1,00
-5+0j	P <sub>hp</sub> 1,00	-5+0j	P <sub>hp</sub> 1,00
-10+0j	g 1,00	-10+0j	g 1,00
-	-	-0,3024+0j	w 0,21 I/E 1,00

Επεξήγηση μεταβλητών κατάστασης:

- $w$ : συχνότητα συστήματος
- $P_{lp}$ : Παραγόμενη μηχανική ισχύς από βαθμίδα χαμηλής πίεσης

- $P_{mp}$ : Παραγόμενη μηχανική ισχύς από βαθμίδα αναθέρμανσης
- $P_{hp}$ : Παραγόμενη μηχανική ισχύς από βαθμίδα υψηλής πίεσης
- $g$ : Άνοιγμα δικλείδας ατμοστροβίλου
- $I/E$ : Ισχύς εξομοιωτή αδράνειας

Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται εισαγωγή ενός νέου πόλου στη θέση που ορίζεται από την (3.5):

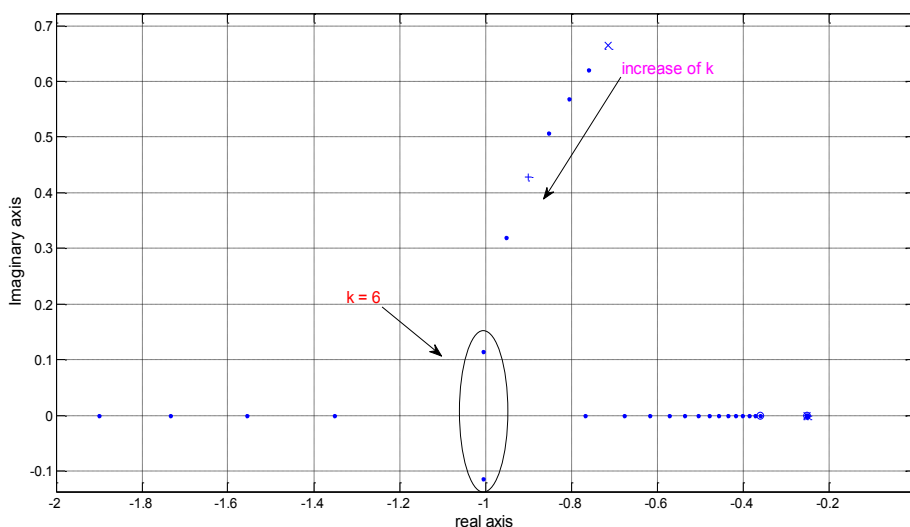
$$p_n = -0,3024 \quad (3.31)$$

Κλείνοντας το βρόχο του στατισμού ( $R = 0,05$ ) και για την ίδια ενδεικτική τιμή κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας, εξετάζεται η μεταβολή των ιδιοτιμών του συστήματος και ιδιαίτερα αυτών που σχετίζονται με τη ρύθμιση της συχνότητας (Πίνακας 3.8). Η ιδιοτιμή που καθορίζει την τελική ταχύτητα της απόκρισης παρατίθεται στον Πίνακα 3.8. Η συγκεκριμένη ιδιοτιμή, μετακινείται προς τα αριστερά μετά την εισαγωγή του αδρανειακού ρυθμιστή από το οποίο συνεπάγεται πως η απόκριση της συχνότητας γίνεται λίγο πιο γρήγορη, ενώ βελτιώνεται και η απόσβεσή της.

**Πίνακας 3.8** Ιδιοτιμή ρύθμισης συχνότητας με κλειστό βρόχο στατισμού με και χωρίς E/A

Πόλος χωρίς E/A	Συντ. Συμ.	Πόλος με E/A	Συντ. Συμ.
-0,7144±j0,664	$P_{hp}$ 0,22	-0,7589±j0,6205	$P_{hp}$ 0,22
	$P_{mp}$ 0,82		$P_{mp}$ 0,86
	$P_{lp}$ 0,14		$P_{lp}$ 0,15
	$g$ 0,10		$g$ 0,10
	$w$ 1,00		$w$ 1,00

Όπως και στην περίπτωση του ατμοστροβίλου μιας βαθμίδας, με 'x' απεικονίζονται οι ιδιοτιμές του συστήματος για  $k = 0$ , που μετατοπίζονται με την αύξηση του  $k$  προς τα σημεία που απεικονίζονται με 'o' και αντιστοιχεί σε  $k = 20$ .



**Σχ. 3.13** Μετακίνηση ιδιοτιμής ρύθμισης συχνότητας για μεταβολή του  $k$

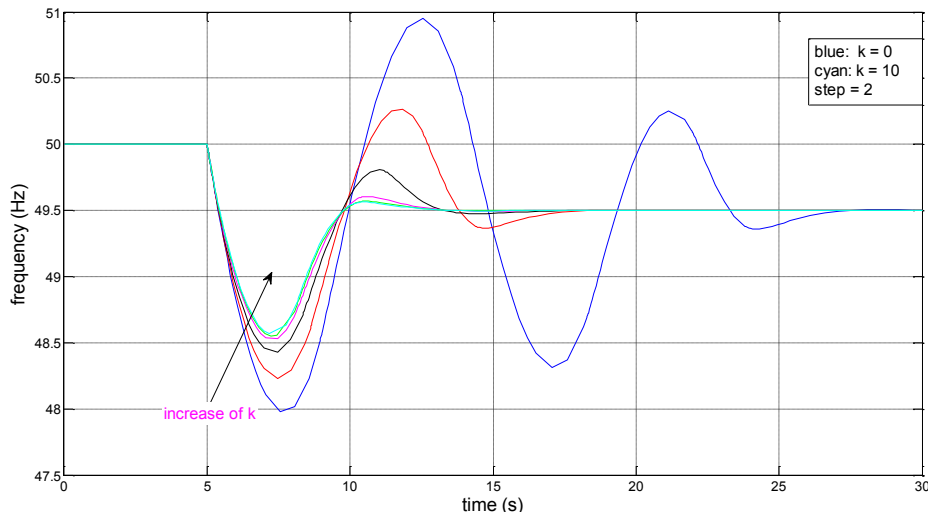
Η ιδιοτιμή που σχετίζεται με τη ρύθμιση συχνότητας, μετακινείται προς τα αριστερά καθώς αυξάνεται το κέρδος του εξομοιωτή αδράνειας, ενώ μειώνεται το φανταστικό της μέρος. Αυτό συμβαίνει μέχρι την τιμή  $k = 6$ , καθώς για περαιτέρω αύξηση του κέρδους, η συχνότητα ταλάντωσης της ιδιοτιμής έχει εξαλειφθεί πλήρως.

Συνεπώς, από τη γραμμική ανάλυση συμπεραίνεται ότι η μέγιστη τιμή κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας για την οποία παρατηρείται κάποια βελτίωση για το συγκεκριμένο σύστημα είναι η τιμή  $k = 6$ .

### 3.2.2.2. Βηματική αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου κατά 20%

Όπως και στην περίπτωση του αμοστροβίλου χωρίς αναθέρμανση, το επίπεδο της αιολικής διείδυσης θεωρείται ίσο με 40%, ενώ η αρχική ισχύς του ηλεκτρικού φορτίου είναι ίση με 1 αμ. Η διαταραχή συμβαίνει για  $t = 5s$ . Στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζεται η απόκριση της συχνότητας του συστήματος καθώς αυξάνεται η τιμή του κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας.

Παρατηρείται ότι χωρίς τον εξομοιωτή αδράνειας, υπάρχει έντονη ταλάντωση στην απόκριση της συχνότητας. Αυτό οφείλεται στην πιο αργή απόκριση του αμοστροβίλου με αναθέρμανση σε σχέση με τον αμοστροβίλο μίας βαθμίδας και στον περιορισμό στο ρυθμό ανάληψης φορτίου ( $\dot{g}_{max} = 15\%$ ).



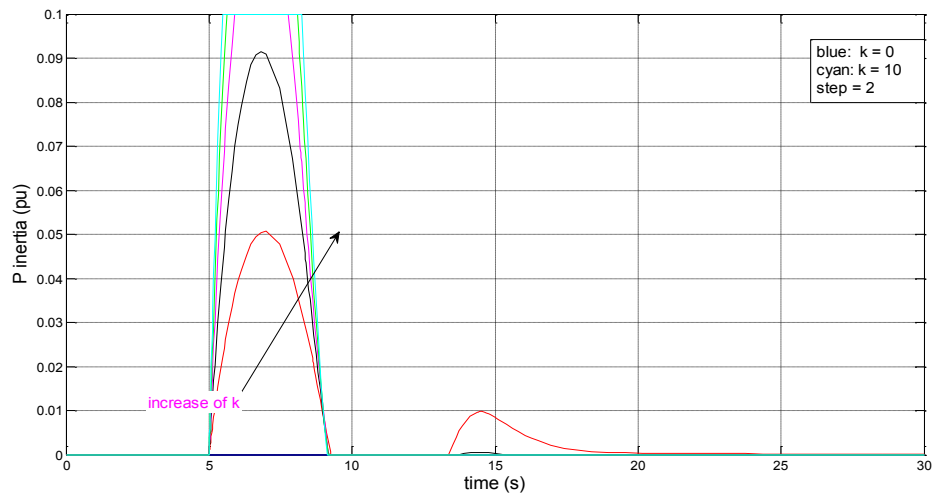
Σχ. 3.14 Απόκριση συχνότητας συστήματος για διαφορετικές τιμές του  $k$

Η εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας επιφέρει σημαντική βελτίωση στην απόκριση της συχνότητας. Πιο συγκεκριμένα, μειώνει τη μεταβατική βύθιση της συχνότητας από τα 48 Hz στα 48,5 Hz, και ταυτόχρονα συνεισφέρει σημαντικά στην απόσβεση της ταλάντωσης. Η αύξηση της τιμής του  $k$  επιδρά βελτιωτικά μέχρι μια τιμή ανάμεσα στο 4 και το 6, ενώ περαιτέρω αύξηση επιφέρει αμελητέα αποτελέσματα λόγω του περιορισμού στην εγχεόμενη ισχύ. Επομένως, μια ικανοποιητική τιμή για το  $k$  (για  $T_w = 4s$ ) κυμαίνεται ανάμεσα στο 4 και το 6.

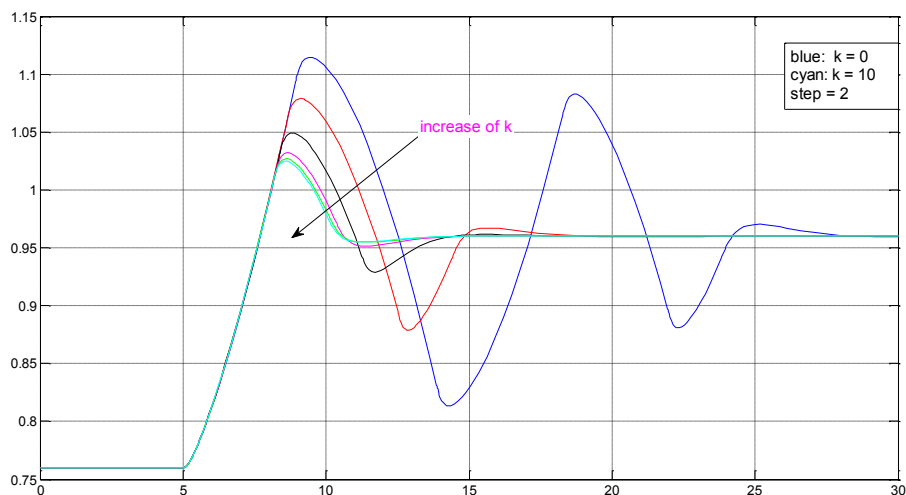
Σημειώνεται ότι η ταλάντωση της απόκρισης χωρίς εξομοιωτή αδράνειας του Σχήματος 3.14 δεν είναι ιδιαίτερα ρεαλιστική, αλλά θεωρείται μάλλον ακραία. Πάντως, ακόμα και για μια τέτοια ακραία περίπτωση, η επίδραση του εξομοιωτή αδράνειας είναι καθοριστική και βελτιώνει σημαντικά τα χαρακτηριστικά της απόκρισης της συχνότητας.

Στα Σχήματα 3.15 και 3.16 παρατίθενται οι αποκρίσεις της εγγεόμενης ισχύος από τον εξομοιωτή αδράνειας και η παραγόμενη μηχανική ισχύς του αμοστροβίλου αντίστοιχα. Όπως και στον αμοστροβίλο μίας βαθμίδας, η απόκριση του εξομοιωτή αδράνειας γίνεται πιο έντονη με την αύξηση του κέρδους του. Για τιμή κέρδους μεγαλύτερη του  $k = 4$  (μαύρο χρώμα), η ισχύς του εξομοιωτή αδράνειας περιορίζεται από τον περιορισμό 10% στην έξοδό του.

Όσον αφορά την παραγωγή μηχανικής ισχύος από τον αμοστροβίλο, παρατηρείται πιο εξομαλυμένη απόκριση με πιο γρήγορη απόσβεση της ταλάντωσής της. Όπως αναμενόταν, για τιμή κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας μεγαλύτερη από 4, η βελτίωση που παρατηρείται μειώνεται σημαντικά μέχρι που γίνεται ανεπαίσθητη.



**Σχ. 3.15** Απόκριση εξομοιωτή αδράνειας για διάφορες τιμές  $k$



**Σχ. 3.16** Μηχανική ισχύς αμοστροβίλου για διάφορες τιμές  $k$



Από την ανάλυση που προηγήθηκε, βγαίνει το συμπέρασμα ότι σε ένα αυτόνομο σύστημα με σημαντική αιολική διείσδυση και με σχετικά αργή απόκριση όσον αφορά τη ρύθμιση συχνότητας, η παροχή αδρανειακή απόκρισης από τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών είναι απαραίτητη για την ομαλή λειτουργία του συστήματος και μπορεί να περιορίσει σημαντικά την αποκοπή φορτίου. Επιπλέον, συνεισφέρει στο να γίνει πιο γρήγορη η μετάβαση στη μόνιμη κατάσταση και εξομαλύνει την απόκριση των συμβατικών μονάδων. Στον Πίνακα 3.9 παρατίθενται οι προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων του ιδανικού εξομοιωτή αδράνειας για το συγκεκριμένο σύστημα. Σημειώνεται ότι σε αυτή την περίπτωση, λόγω της μεγάλης τιμής της χρονικής σταθεράς του φίλτρου  $T_w$ , το συνολικό κέρδος του αριθμητή της (3.1)  $kT_w$  έχει μεγαλύτερη τιμή σε σύγκριση με το αντίστοιχο συνολικό κέρδος που προτείνεται για την τιμή  $T_w = 0,2s$  στο σύστημα με αμοστρόβιλο μίας βαθμίδας (Πίνακας 3.5 - βάση ισχύος ανεμογεννήτριας).

**Πίνακας 3.9** Προτεινόμενες τιμές για σύστημα με αμοστρόβιλο τριών βαθμίδων

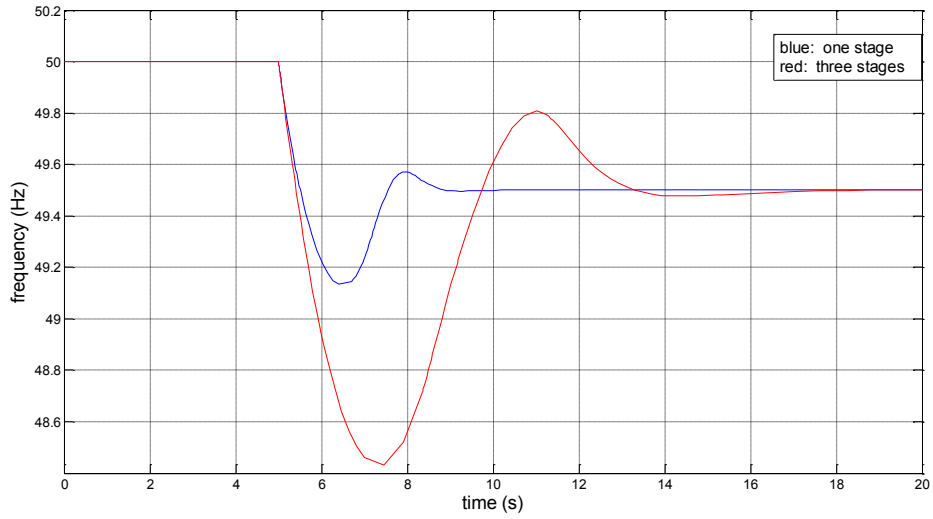
$T_w$ (s)	k (αμ)	$kT_w$ (αμs)
4	4	16
4	6	24

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια σύγκριση μεταξύ των αποκρίσεων των διαφόρων μεταβλητών των δύο συστημάτων που αναλύθηκαν σε αυτό το Κεφάλαιο μετά την προσθήκη του εξομοιωτή αδράνειας. Για το σύστημα με τον αμοστρόβιλο μίας βαθμίδας επιλέγονται οι τιμές της πρώτης γραμμής του Πίνακα 3.5, ενώ για το σύστημα με τον αμοστρόβιλο τριών βαθμίδων επιλέγονται επίσης οι γραμμές της πρώτης γραμμής του Πίνακα 3.9.

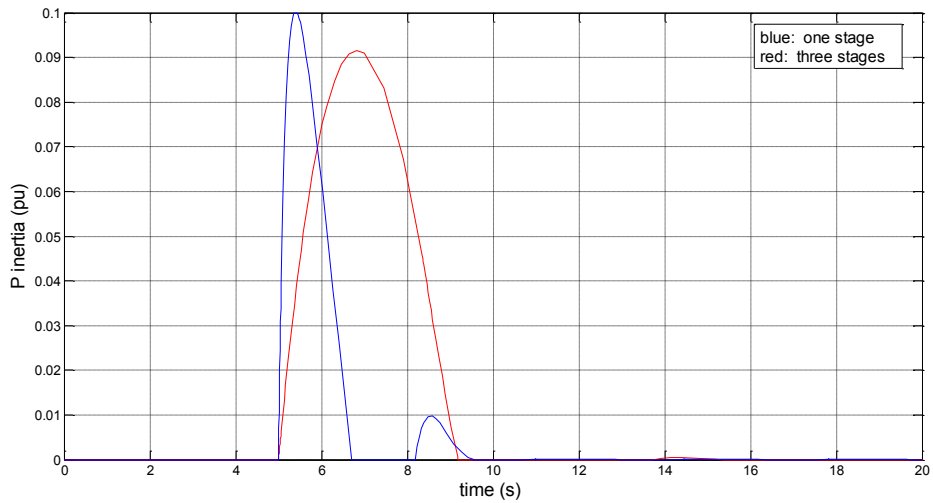
Η μεταβολή της συχνότητας των δύο συστημάτων και η ισχύς που εγγέεται από τον εξομοιωτή αδράνειας παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.17 και 3.18 αντίστοιχα. Με μπλε χρώμα σχεδιάζονται οι αποκρίσεις που αντιστοιχούν στο γρήγορο σύστημα (μία βαθμίδα), ενώ με οι αποκρίσεις με κόκκινο χρώμα αντιστοιχούν στο αργό σύστημα (τρεις βαθμίδες).

Όπως γίνεται αντιληπτό, η συχνότητα του γρήγορου συστήματος παρουσιάζει μικρότερη μεταβατική βύθιση και γενικά καλύτερα χαρακτηριστικά, ενώ η αδρανειακή υποστήριξη διαρκεί για μικρότερο χρονικό διάστημα. Μάλιστα, η συνολική ενέργεια που δίνεται στο σύστημα από τον εξομοιωτή αδράνειας είναι μικρότερη στο γρήγορο σύστημα (το εμβαδόν που περικλείεται από την μπλε καμπύλη είναι μικρότερο).

Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι ένα σύστημα με γρήγορη απόκριση όσον αφορά την αποκατάσταση του ισοζυγίου ισχύος, χρειάζεται αδρανειακή υποστήριξη για μικρότερο χρονικό διάστημα σε σύγκριση με ένα πιο αργό σύστημα ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητικό αποτέλεσμα.



*Σχ. 3.17 Μεταβολή συχνότητας συστημάτων με εξομοιωτή αδράνειας*



*Σχ. 3.18 Ισχύς εξομοιωτή αδράνειας και για τα δύο συστήματα*

## **Κεφάλαιο 4**

### **Εφαρμογή Εξομοιωτή αδράνειας σε Μοντέλα Ανεμογεννητριών – Εφαρμογή σε απλά συστήματα**

#### **4.1. Γενικά**

Στο κεφάλαιο που προηγήθηκε, θεωρήθηκε ιδανικός εξομοιωτής αδράνειας και αγνοήθηκε η επίδραση των εσωτερικών βρόχων ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Έτσι, δεν λήφθηκε υπόψη η επίδραση που έχει η επιβράδυνση του άξονα της ανεμογεννήτριας στη δυναμική συμπεριφορά της. Επιπλέον, ο μόνος περιορισμός που εισήχθη ήταν στην έξοδο του εξομοιωτή αδράνειας και αγνοήθηκαν περαιτέρω περιορισμοί για την ασφάλεια της ανεμογεννήτριας και γενικά του μηχανικού και ηλεκτρικού εξοπλισμού της.

Σε αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά μοντέλα ανεμογεννητριών για την διερεύνηση της δυναμικής τους συμπεριφοράς στο αποτέλεσμα του εξομοιωτή αδράνειας. Συγκεκριμένα, στην ενότητα 4.2 παρουσιάζονται επιπλέον παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη και να μοντελοποιηθούν προτού εφαρμοστεί ο εξομοιωτής αδράνειας σε κάποιο μοντέλο ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών. Στην ενότητα 4.3, ο εξομοιωτής αδράνειας εφαρμόζεται στο μοντέλο της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα που περιγράφηκε στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο και εξετάζεται η επίδραση του συγκεκριμένου μοντέλου σε παράλληλη λειτουργία με τον ατμοστρόβιλο μίας και τριών βαθμίδων. Στην ενότητα 4.4 ακολουθείται η ίδια διαδικασία για το μοντέλο της ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης. Σε κάθε μοντέλο εξετάζεται η λειτουργία του εξομοιωτή αδράνειας για λειτουργία σε μερικό φορτίο, αλλά και για λειτουργία υπό ονομαστικό φορτίο με ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερης της ονομαστικής και γωνία πτερυγίων  $\beta$  μεγαλύτερη του μηδενός.

#### **4.2. Υλοποίηση εξομοιωτή αδράνειας για ανεμογεννήτριες**

Όπως προαναφέρθηκε, ο εξομοιωτής αδράνειας απαιτεί την απελευθέρωση μέρους της κινητικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας ώστε να συνεισφέρει στην αδρανειακή απόκριση του συστήματος. Με αυτό τον τρόπο επιβραδύνεται ο άξονας της ανεμογεννήτριας για μικρό χρονικό διάστημα, ενώ ο έλεγχος στροφών (Σχήμα 2.16 του δεύτερου Κεφαλαίου) αναλαμβάνει την επιτάχυνσή του αμέσως μετά ώστε να επανέλθει στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας που καθορίζεται από την καμπύλη ισχύος-στροφών. Για να μη δημιουργούνται προβλήματα στην κανονική λειτουργία της Α/Γ με μεγάλες αποκλίσεις από την επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής, πρέπει να περιοριστεί η μέγιστη ισχύς που μπορεί να εγχύσει ο εξομοιωτής αδράνειας

(Περιορισμός i). Ο συγκεκριμένος περιορισμός εφαρμόστηκε ήδη στον ιδανικό εξομοιωτή αδράνειας στο προηγούμενο κεφάλαιο με μέγιστη επιτρεπτή τιμή της ισχύος  $\Delta P_e = 0.1 \mu\text{m}$  στη βάση ισχύος της ανεμογεννήτριας.

Επιπλέον, για την αποφυγή απότομων μεταβολών στην ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας, αλλά και για τη μείωση της μηχανικής καταπόνησης εισάγεται ένα όριο στο ρυθμό αύξησης της ηλεκτρικής ισχύος που καλείται να εγχύσει η ανεμογεννήτρια στο δίκτυο (Περιορισμός ii) [23,32]

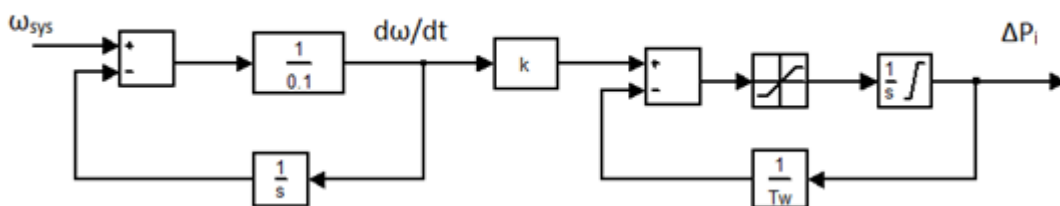
Επίσης, ένα βαθυπερατό φίλτρο εισάγεται πριν τον εξομοιωτή αδράνειας, το οποίο αποτρέπει τα προβλήματα που μπορεί να δημιουργηθούν από τον θόρυβο στη συχνότητα [33] και περιλαμβάνει την καθυστέρηση στη μέτρηση της συχνότητας.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί, όπως αναφέρεται και στο [22], ότι για αρχική λειτουργία μικρότερη του 50% του ονομαστικού φορτίου της ανεμογεννήτριας, η διαθέσιμη ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αδρανειακή υποστήριξη μειώνεται, ενώ για αρχική ισχύ λειτουργίας μικρότερη ή ίση με 20% της ονομαστικής ο εξομοιωτής αδράνειας δεν ενεργοποιείται και δεν εγχέεται ενέργεια στο σύστημα. Σε αυτή την εργασία εξετάζονται μόνο σημεία λειτουργίας άνω του 50%, οπότε ο συγκεκριμένος περιορισμός δεν λαμβάνεται υπόψη. Σημειώνεται ωστόσο, ότι σε χαμηλά σημεία λειτουργίας των ανεμογεννητριών, αναμένεται και η αιολική διείσδυση να είναι ανάλογα μικρότερη.

Συνοψίζοντας, η υλοποίηση του εξομοιωτή αδράνειας για την εφαρμογή σε μοντέλο ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει τις εξής προσθήκες στο μοντέλο του προηγούμενου κεφαλαίου:

- i. Περιορισμός στην έξοδο του εξομοιωτή αδράνειας.
- ii. Περιορισμός ρυθμού μεταβολής της εξόδου του εξομοιωτή αδράνειας.
- iii. Φίλτρο μέτρησης της συχνότητας με χρονική σταθερά  $100\text{ms}$ .

Στο Σχήμα 4.1 παρατίθεται η υλοποίηση του εξομοιωτή αδράνειας στο περιβάλλον του Simulink για εφαρμογή στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών:

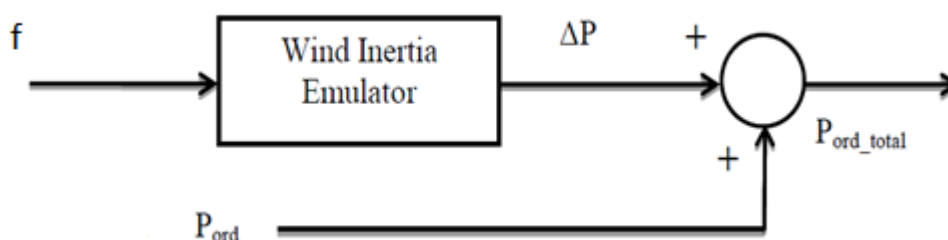


Σχ. 4.1 Υλοποίηση εξομοιωτή αδράνειας στο Simulink

Στην υλοποίηση του Σχήματος 4.1, παρατηρείται, όπως προαναφέρθηκε, μια καθυστέρηση της μέτρησης της συχνότητας με χρονική σταθερά  $100\text{ms}$ . Ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας μετατρέπεται στη συνέχεια σε αντίστοιχο σήμα για έγχυση ηλεκτρικής ισχύος από τον εξομοιωτή αδράνειας. Επίσης, στο Σχήμα 4.1 φαίνονται και οι δύο περιοριστές. Ο πρώτος είναι ο περιοριστής ρυθμού αύξησης της ηλεκτρικής ισχύος. Ο δεύτερος περιοριστής περιορίζει τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ.

Και για τους δύο περιοριστές επιλέγονται οι τιμές που προτείνονται για το αντίστοιχο μοντέλο διπλής τροφοδότησης της GE [22]. Η τιμή του περιοριστή εξόδου είναι, όπως χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, 10%, ενώ ο περιοριστής ρυθμού έχει τιμή 0,1αμ/s. Και οι δύο τιμές αναφέρονται στην ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας.

Επιπλέον, τα μοντέλα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 πρέπει να τροποποιηθούν κατάλληλα. Αρχικά, εκτός από την τάση, πρέπει να δέχονται ως είσοδο και τη συχνότητα του συστήματος, η οποία θα οδηγείται στη συνέχεια προς μέτρηση στον εξομοιωτή αδράνειας. Στη συνέχεια, η εντολή του εξομοιωτή αδράνειας προστίθεται στην ισχύ αναφοράς που προέρχεται από τον έλεγχο στροφών της ανεμογεννήτριας ( $P_{ord}$ ). Η τελική εντολή ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας είναι σε κάθε περίπτωση το άθροισμα αυτών των δύο συνιστωσών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2:



Σχ. 4.2 Τροποποίηση εντολής ισχύος ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών με προσθήκη εξομοιωτή αδράνειας

### 4.3. Εφαρμογή για μοντέλο Α/Γ πλήρους μετατροπέα

Αρχικά, θα χρησιμοποιηθεί η ανεμογεννήτρια πλήρους μετατροπέα για να προσδιοριστεί η επίδραση των εσωτερικών βρόχων ελέγχου της στη συμπεριφορά του εξομοιωτή αδράνειας. Στο μοντέλο αυτό παριστάνεται η αεροδυναμική συμπεριφορά του κινητήρα (προσδιορισμός αεροδυναμικής ισχύος). Αποδεικνύεται, ωστόσο, ότι η επίδρασή της στο τελικό αποτέλεσμα είναι αμελητέα.

Στην ενότητα 4.3.1. εξετάζεται η απόκριση του συστήματος με τον αμοιστρόβιλο μίας βαθμίδας. Στην ενότητα 4.3.2. ακολουθεί η ίδια διαδικασία για τον αμοιστρόβιλο τριών βαθμίδων. Στη συνέχεια, στην ενότητα 4.3.3, εξετάζεται η τροποποίηση του ελέγχου στροφών του συγκεκριμένου μοντέλου για τη βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς. Τέλος, στην ενότητα 4.3.4 αναλύεται η επίδραση του εξομοιωτή αδράνειας σε περίπτωση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας σε ονομαστικό φορτίο, με ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη του μηδενός, δηλαδή υπό γωνία πτερυγίων μεγαλύτερη του μηδενός.

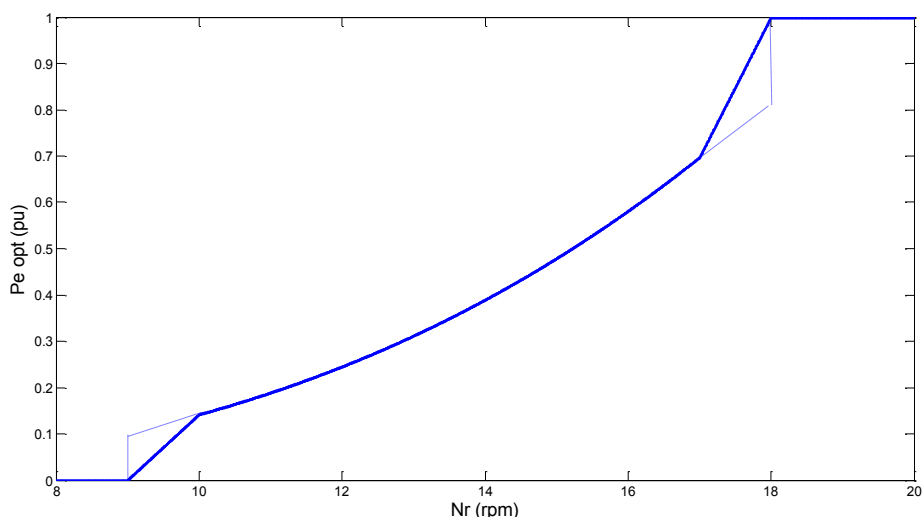
### 4.3.1. Εφαρμογή σε σύστημα ατμοστροβίλου μίας βαθμίδας και ΑΓΠΜ

Τα δεδομένα του ατμοστροβίλου μιας βαθμίδας παραμένουν όπως έχουν παρουσιαστεί στον Πίνακα 3.2. Οι ανεμογεννήτριες ομαδοποιούνται και παρουσιάζονται σαν ένα αιολικό πάρκο αντίστοιχης ονομαστικής ισχύος. Στον Πίνακα 4.1 παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων του αιολικού πάρκου και των ανεμογεννητριών πλήρους μετατροπέα που το απαρτίζουν όπως έχουν επιλεγεί κι επεξηγηθεί στο [14]. Έχουν αμεληθεί οι τιμές των παραμέτρων βρόχων ελέγχου που είναι ανενεργοί σε αυτό το κεφάλαιο (π.χ. έλεγχος τάσης):

*Πίνακας 4.1 Τιμές παραμέτρων Α/Π με ΑΓΠΜ*

Παράμετρος	Επεξήγηση	Τιμή	Παράμετρος	Επεξήγηση	Τιμή
$P_{nom}$ (MW)	Ονομαστική ισχύς Α/Π	40	H	αδράνεια ανεμοκινητήρα	3,64
R (m)	ακτίνα πτερωτής	37,5	$K_{pp}$	αναλογικό κέρδος ελέγχου πτερυγίων	200
$v_{nom}$ (m/s)	Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	12	$K_{ip}$	ολοκληρωτικό κέρδος ελέγχου πτερυγίων	60
$N_{rnom}$ (ΣΑΛ)	Ονομαστική ταχύτητα δρομέα	18	$T_s$	χρονική σταθερά σερβομηχανισμού ελέγχου πτερυγίων	0,25
$N_{rin}$ (ΣΑΛ)	Ελάχιστη ταχύτητα δρομέα	9	$\dot{\beta}_{max}$ (°/s)	όριο μεταβολής γωνίας βήματος	8
$P_{nom}$ (MW)	Ονομαστική ισχύς Α/Γ	2	$\beta_{min}$ (°)	ελάχιστη γωνία πτερυγίων	0
$\beta_0$ (°)	Αρχική γωνία πτερυγίων	0	$\beta_{max}$ (°)	μέγιστη γωνία πτερυγίων	30
pf	Συντελεστής ισχύος	1	-	-	-

Η χαρακτηριστική ελέγχου στροφών για το συγκεκριμένο μοντέλο ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα σχεδιάζεται στο Σχήμα 4.3. Γύρω από την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή, η βέλτιστη καμπύλη χαρακτηρίζεται από τα κομμάτια που έχουν σχεδιαστεί με διακεκομμένη γραμμή. Ωστόσο, για την αποφυγή προβλημάτων υπολογισμού προτιμάται η συνεχής γραμμή ακόμα κι αν αυτό οδηγήσει σε υποβέλτιστη λειτουργία για τις συγκεκριμένες περιοχές ταχυτήτων.



**Σχ. 4.3** Χαρακτηριστική καμπύλη ελέγχου στροφών ΑΓΠΜ

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης γίνεται η παραδοχή πως η τάση του ζυγού που συνδέονται ο ατμοστρόβιλος και η ανεμογεννήτρια παραμένει ίση με 1αμ. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί και ως συντηρητική προσέγγιση, καθώς η μείωση της τιμής της τάσης κατά τη διάρκεια μιας διαταραχής οδηγεί σε μείωση του ηλεκτρικού φορτίου. Επίσης, για το χρονικό διάστημα που εξετάζεται γίνεται χωρίς μεγάλο σφάλμα η υπόθεση ότι η μέση ταχύτητα του ανέμου παραμένει σταθερή, ενώ η τυρβώδης συνιστώσα της φιλτράρεται από τα συστήματα ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Θεωρείται πως οι ανεμογεννήτριες του αιολικού πάρκου λειτουργούν στο 60% της ονομαστικής τους ισχύος με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος πριν τη διαταραχή. Συνεπώς, πριν τη διαταραχή η κατανομή του ισοζυγίου μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος είναι (σε βάση ισχύος 100MVA):

**Πίνακας 4.2** Αρχικό ισοζύγιο ισχύος

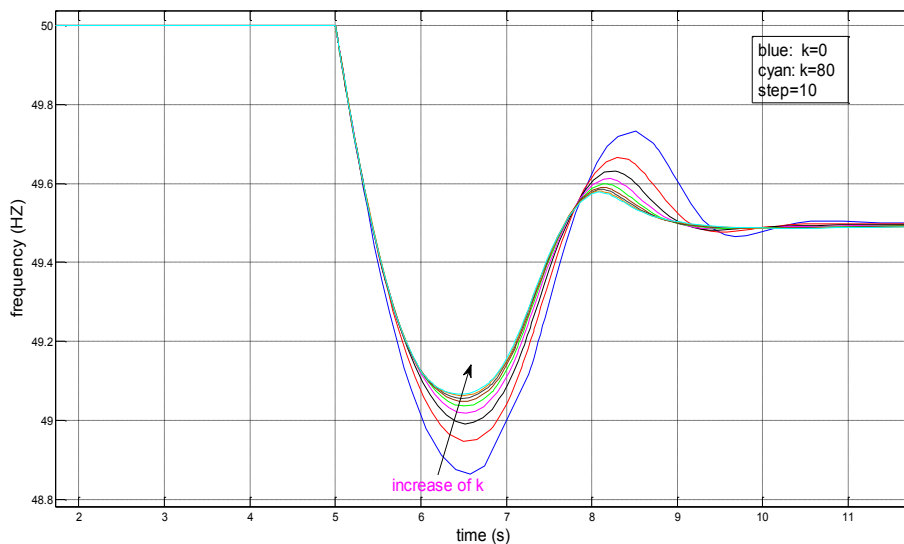
Μέγεθος	Επεξήγηση	Τιμή
$P_e$	Ηλεκτρικό φορτίο	1 αμ
$P_{mst}$	Μηχανική ισχύς Α/Σ	0,76αμ
$P_w$	Ένεργός Ισχύς Α/Γ	0,24αμ

Όπως έχει προαναφερθεί, η ανεμογεννήτρια είναι ασύγχρονα συζευγμένη στο δίκτυο και δεν αντιλαμβάνεται τη μεταβολή της αν δεν υπάρχει ο εξομοιωτής αδράνειας. Επομένως, η εισαγωγή της στο σύστημα του ατμοστρόβιλου μίας βαθμίδας δεν επηρεάζει την επικρατούσα χρονική σταθερά του συστήματος. Έτσι, ακολουθώντας την αρχή σχεδίασης που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η τιμή της χρονικής σταθεράς του εξομοιωτή αδράνειας επιλέγεται και σε αυτή την περίπτωση ίση με  $T_w = 0,2s$ .

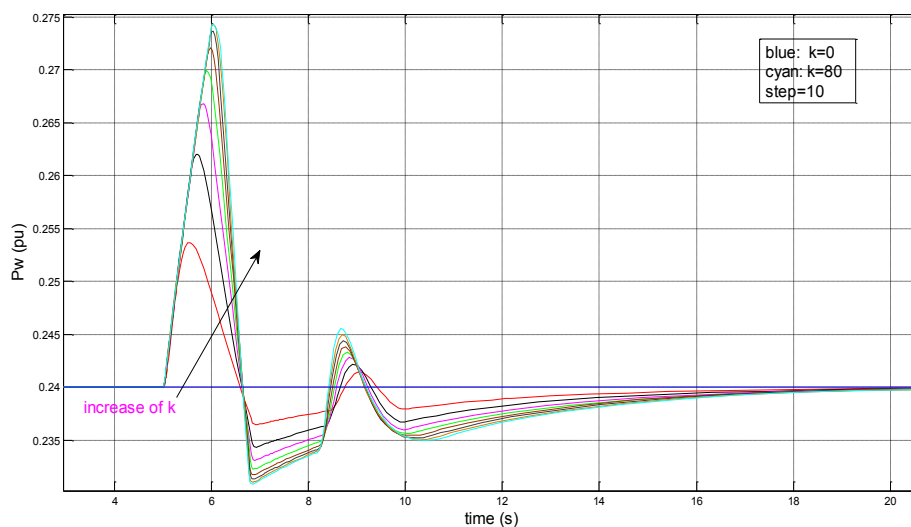
Στη συνέχεια, προσομοιώνεται βηματική αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου κατά 20%. Η τιμή του κέρδους  $k$  του εξομοιωτή αδράνειας αυξάνεται σταδιακά μέχρι το

σημείο που θα παρατηρηθεί ότι περαιτέρω αύξηση δεν συνεπάγεται κάποια σημαντική βελτίωση στην απόκριση της συχνότητας.

Η απόκριση της συχνότητας για τιμές του  $k$  από 0 έως 80 φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Με την αύξηση του κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας, είναι φανερό ότι η απόκριση της συχνότητας βελτιώνεται παρουσιάζοντας μικρότερη μεταβατική βύθιση και ταχύτερη μετάβαση στην τιμή μόνιμη κατάσταση. Ωστόσο, από την τιμή  $k = 30$  και μετά παρατηρείται σημαντικά μικρότερη βελτίωση. Επιπλέον, η βελτίωση που επιτυγχάνεται σε σύγκριση με τον ιδανικό εξομοιωτή αδράνειας του προηγούμενου κεφαλαίου είναι μικρότερη. Πιο συγκεκριμένα, με τον ιδανικό εξομοιωτή αδράνειας η μέγιστη μεταβατική βύθιση ήταν λίγο πάνω από τα 49,2 Hz, ενώ σε αυτή την περίπτωση είναι λίγο κάτω από τα 49,1Hz. Στα Σχήματα 4.5 και 4.6 παρατίθεται η απόκριση της ισχύος και της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας για αύξηση του κέρδους  $k$ .

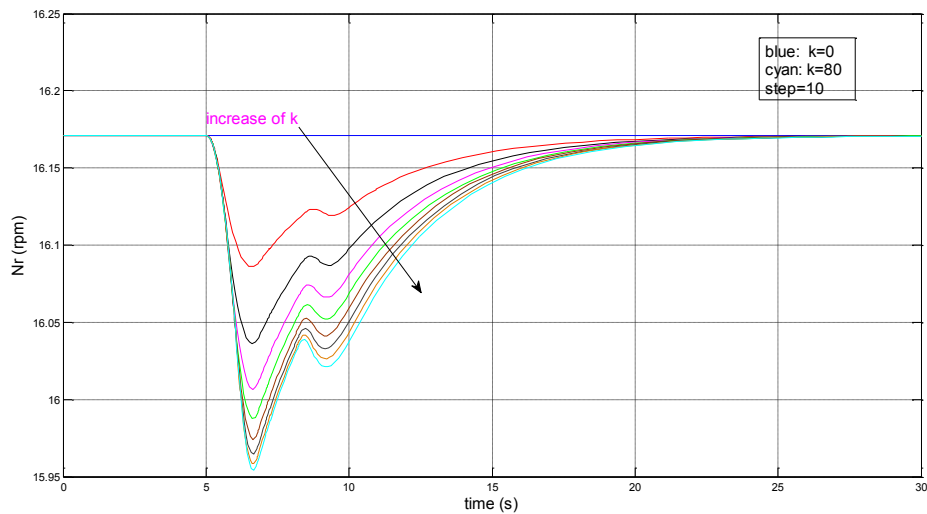


Σχ. 4.4 Απόκριση συχνότητας για διάφορες τιμές του  $k$



Σχ. 4.5 Απόκριση ισχύος ανεμογεννήτριας για διάφορες τιμές του  $k$





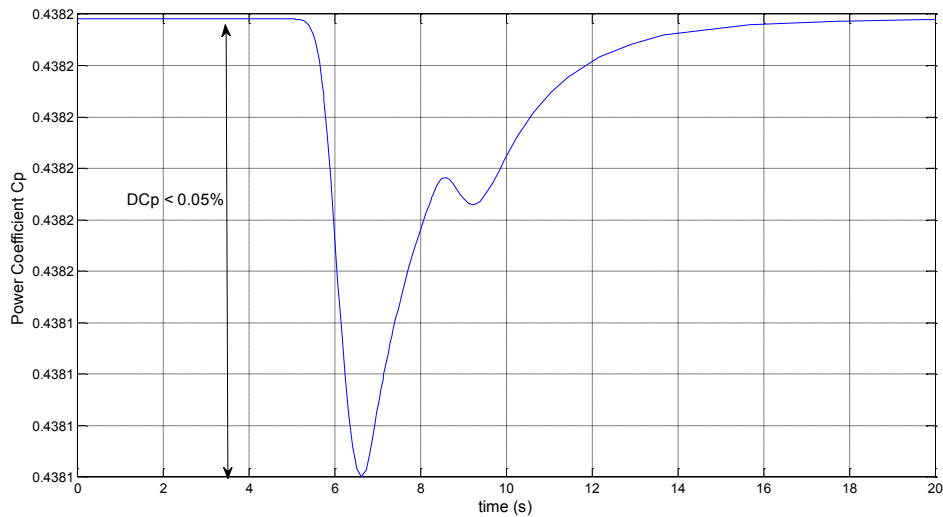
**Σχ. 4.6** Απόκριση γωνιακής ταχύτητας ανεμογεννήτριας για διάφορες

Παρατηρείται ότι η αύξηση του κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας μέχρι την τιμή  $k = 60$  οδηγεί σε μεγαλύτερη μεταβατική έγχυση ισχύος και σε μεγαλύτερη επιβράδυνση της ανεμογεννήτριας, ενώ για περαιτέρω αύξηση του κέρδους η διαφορά είναι αμελητέα. Ακόμη, ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η ισχύς της ανεμογεννήτριας αμέσως μετά τη διαταραχή είναι σταθερός για όλες σχεδόν τις τιμές του κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας. Αυτό οφείλεται στον περιοριστή ρυθμού που έχουμε εισάγει στην έξοδο του εξομοιωτή αδράνειας και στην επιλογή της χρονικής σταθεράς  $T_w$ . Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή μικρής τιμής για το  $T_w$  συνεπάγεται πιο απότομη έγχυση ισχύος, κάτι που καθιστά την επίδραση του περιοριστή ρυθμού αρκετά σημαντική στην τελική απόκριση.

Τονίζεται ότι τη μεταβατική αύξηση της ισχύος λόγω του εξομοιωτή αδράνειας, διαδέχεται μια βύθιση της ισχύος σε επίπεδα κάτω από την αεροδυναμική ισχύ που λαμβάνεται από τον άνεμο. Αυτό οφείλεται στη δεύτερη συνιστώσα της ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας ( $P_{ord}$  στο Σχήμα 4.2). Πιο συγκεκριμένα, η στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος, που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο μοντέλο για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ισχύος αναφοράς, όταν μειώνεται η ταχύτητα περιστροφής αντιστοιχίζει αυτή την ταχύτητα σε μικρότερη ενεργό ισχύ αναφοράς. Όσο το άθροισμα της ενεργού ισχύος αναφοράς από τον έλεγχο στροφών και της ενεργού ισχύος από τον έξοδο του εξομοιωτή αδράνειας είναι μεγαλύτερο από τη μηχανική ισχύ που λαμβάνεται από τον άνεμο, η ταχύτητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας μειώνεται. Αυτό παρατηρείται στα Σχήματα 4.5 και 4.6 για το χρονικό διάστημα  $5s < t < 6,5s$ . Στη συνέχεια, η μείωση της ταχύτητας του δρομέα και της εξόδου του εξομοιωτή αδράνειας οδηγεί σε βύθιση της ισχύος κάτω από τη αεροδυναμική, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση του δρομέα της ανεμογεννήτριας, όπως φαίνεται για  $6,5s < t < 8,2s$ . Εξαιτίας της ταλάντωσης της συχνότητας, σε αυτή τη χρονική στιγμή προκαλείται μια δεύτερη και μικρότερη έγχυση ισχύος από τον

εξομοιωτή αδράνειας, η οποία επιβραδύνει εκ νέου τον άξονά της μέχρι τα 8,5s περίπου. Στη συνέχεια, η ισχύς της ανεμογεννήτριας και η ταχύτητα επιστροφής επιστρέφουν ομαλά στο σημείο λειτουργίας πριν τη διαταραχή.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η επίδραση του εξομοιωτή αδράνειας στην αεροδυναμική ισχύ που λαμβάνει η ανεμογεννήτρια από τον άνεμο. Δεδομένου ότι η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται, ο αεροδυναμικός συντελεστής  $C_p$  παύει να είναι βέλτιστος καθώς δεν έχουμε βέλτιστο λόγο ακροπερυγίου  $\lambda$ . Ωστόσο, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.7, στο οποίο έχει σχεδιαστεί η μεταβολή του  $C_p$  για  $k = 30$ , αυτή η μεταβολή είναι μικρότερη από 0,05%, δηλαδή ουσιαστικά αμελητέα.



Σχ. 4.7 Μεταβολή αεροδυναμικού συντελεστή για  $k = 30$

Από τις παραπάνω αποκρίσεις εξάγεται το συμπέρασμα ότι η επιλογή για το κέρδος του εξομοιωτή αδράνειας  $k = 30$  επιφέρει ικανοποιητικό αποτέλεσμα στα χαρακτηριστικά της απόκρισης της συχνότητας του συστήματος.

Γραμμικοποιώντας το σύστημα, βρίσκουμε ότι η ιδιοτιμή που σχετίζεται με τη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος έχει μετακινηθεί σημαντικά προς τα αριστερά.

Πίνακας 4.3 Ιδιοτιμή ρύθμισης συχνότητας με και χωρίς E/A

Ιδιοτιμή χωρίς E/A	Σ.Σ	Απόσβεση	Ιδιοτιμή με E/A	Σ.Σ.	Απόσβεση
$-1,661 \pm j2,907$	$P_m$ 0,76 $g$ 0,38 $w$ 1,00	0,4961	$-3,015 \pm j2,346$	$P_m$ 1,00 $g$ 0,42 $w$ 0,53 $w_{meas}$ 0,60 $I/E$ 0,55	0,7892

Η μεταβλητή κατάστασης  $w_{meas}$  εισάγεται από την καθυστέρηση στη μέτρηση της συχνότητας.

Στον Πίνακα 4.5 παρατίθενται οι προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων του εξομοιωτή αδράνειας για το συγκεκριμένο σύστημα (βάση ισχύος ανεμογεννήτριας):

**Πίνακας 4.4** Προτεινόμενες τιμές  $E/A$  για σύστημα με αμοστροβίλο μίας βαθμίδας

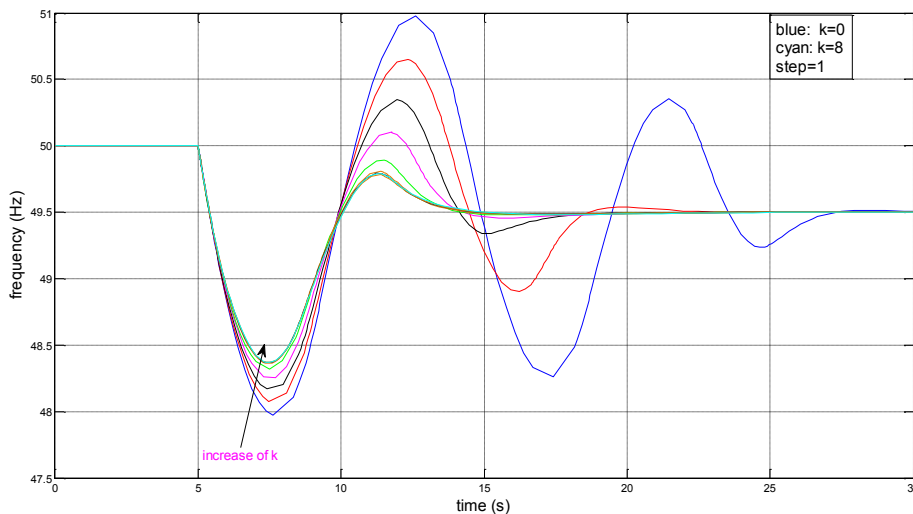
$T_w$ (s)	$k$ (αμ)	$kT_w$ (αμs)
0,2	30	6

### 4.3.2. Εφαρμογή σε σύστημα αμοστροβίλου τριών βαθμίδων και ΑΓΠΜ

Το ίδιο μοντέλο ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα προστίθεται στο σύστημα του αμοστροβίλου με αναθέρμανση που παρουσιάστηκε στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο (Πίνακας 3.5). Η αρχική κατανομή του φορτίου διατηρείται ίδια όπως στον Πίνακα 4.2, δηλαδή η ανεμογεννήτρια παράγει το 60% της ονομαστικής της ισχύος.

Σύμφωνα με την αρχή σχεδίασης που ακολουθείται, η τιμή της χρονικής σταθεράς του εξομοιωτή αδράνειας επιλέγεται ίση με  $T_w = 4s$ .

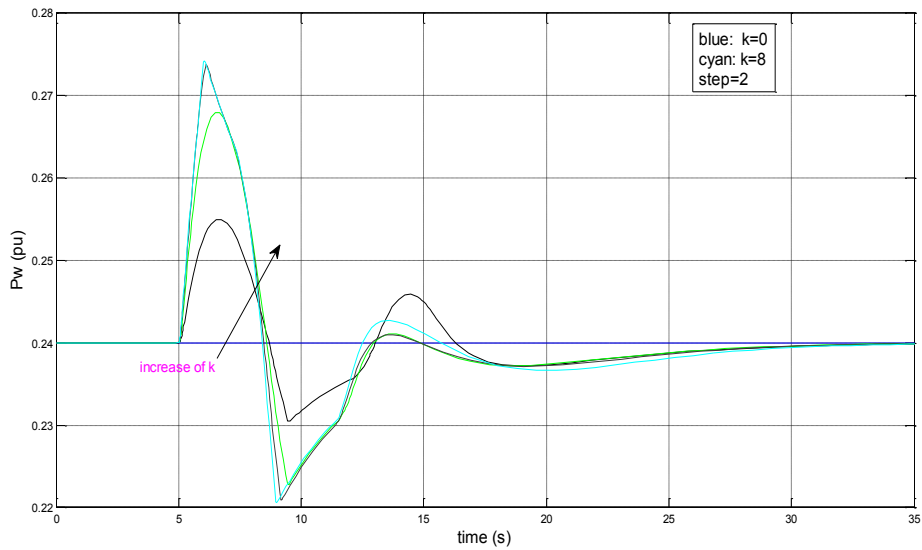
Για βηματική μεταβολή 20% στο ηλεκτρικό φορτίο, ακολουθείται η ίδια διαδικασία όπως και στην περίπτωση του συστήματος με αμοστροβίλο μιας βαθμίδας. Η απόκριση της συχνότητας του συστήματος παρατίθεται στο Σχήμα 4.8:



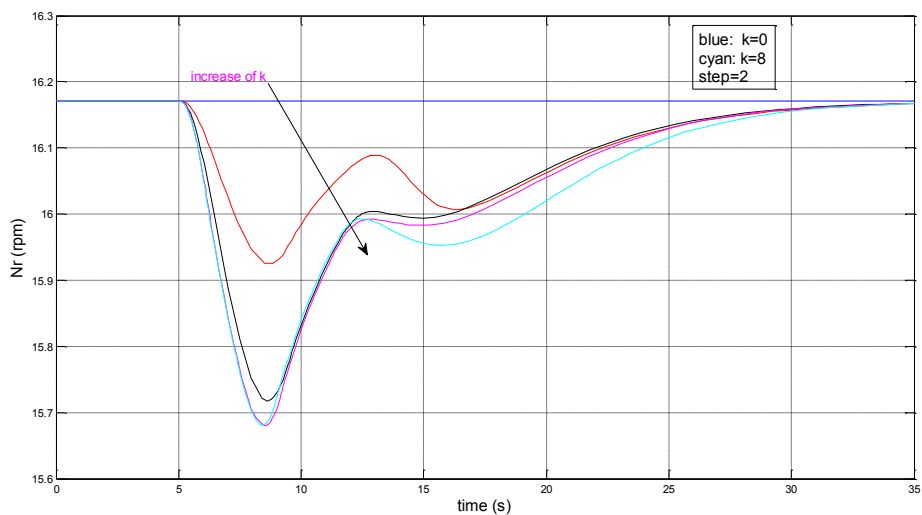
**Σχ. 4.8** Απόκριση συχνότητας για διάφορες τιμές του  $k$

Η αύξηση του κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας οδηγεί σε μικρότερη μεταβατική βύθιση και ταχύτερη απόσβεση των ταλαντώσεων. Η διαφορά με την περίπτωση του ιδανικού εξομοιωτή αδράνειας εντοπίζεται στο μέγεθος της βελτίωσης. Στην περίπτωση του ιδανικού εξομοιωτή αδράνειας η μεταβατική βύθιση της συχνότητας περιορίστηκε πάνω από τα 48,5Hz, ενώ με το μοντέλο της ΑΓΠΜ, επιτυγχάνεται η μέγιστη μεταβατική βύθισή της να είναι λίγο κάτω από τα 48.5Hz.

Στα Σχήματα 4.9 και 4.10 παρατίθενται οι αποκρίσεις της παραγόμενης ισχύος από την ανεμογεννήτρια και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της:



**Σχ. 4.9** Ενεργός ισχύς ΑΓΠΜ για διάφορες τιμές του  $k$



**Σχ. 4.10** Ταχύτητα περιστροφής ΑΓΠΜ για διάφορες τιμές του  $k$

Η συμπεριφορά των μεταβλητών της ανεμογεννήτριας καθώς αυξάνεται το κέρδος του εξομοιωτή αδράνειας είναι σε γενικές γραμμές παρόμοια όπως και στο σύστημα με τον ατμοστρόβιλο χωρίς αναθέρμανση.

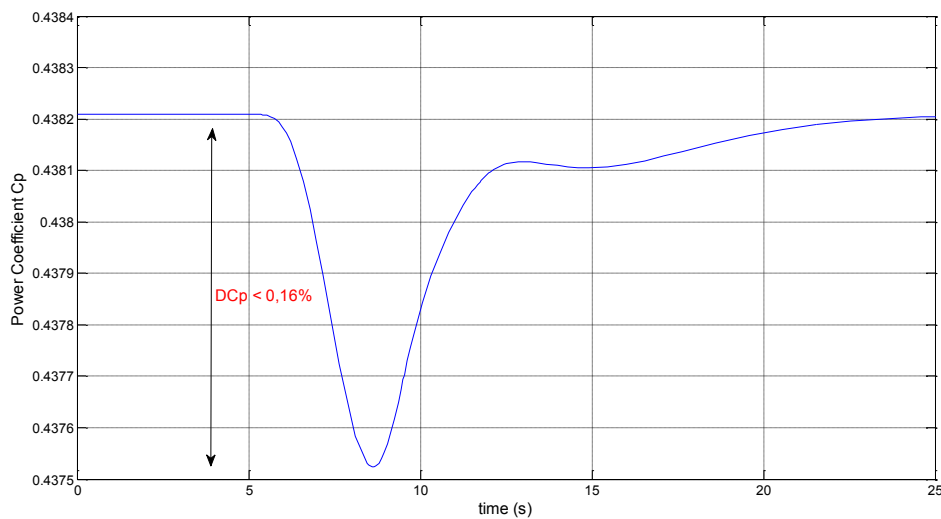
Όσον αφορά την παραγόμενη ενεργό ισχύ από την ανεμογεννήτρια, η απόκρισή της είναι εντονότερη καθώς αυξάνεται το κέρδος του εξομοιωτή αδράνειας μέχρι μια τιμή για το κέρδος  $k = 4$ . Για τιμές  $k \geq 6$  γίνεται αντιληπτή η επίδραση του περιοριστή ρυθμού του εξομοιωτή αδράνειας (ο ρυθμός αύξησης της ενεργού ισχύος είναι σταθερός), ενώ παρατηρείται και παραμόρφωση της απόκρισης. Η παραμόρφωση οφείλεται στην παρουσία του περιοριστή μεγίστου στην έξοδο του εξομοιωτή αδράνειας. Τέλος, η αύξηση του κέρδους  $k$  οδηγεί και σε μεγαλύτερη και

πιο απότομη βύθιση ισχύος κατά την αποκατάσταση της ταχύτητας περιστροφής στην ονομαστική.

Όσον αφορά την ταχύτητα του δρομέα, παρουσιάζει πιο ομαλή απόκριση σε σύγκριση με την αντίστοιχη απόκριση στο σύστημα ατμοστροβίλου μίας βαθμίδας, αλλά η επιβράδυνση είναι τελικά μεγαλύτερη. Αυτό συμβαίνει γιατί η μεγαλύτερη χρονική σταθερά  $T_w$  συνεπάγεται ότι η αύξηση της ενεργού ισχύος γίνεται πιο αργά, αλλά διαρκεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Γι' αυτό το λόγο η συνολική εγγεόμενη ενέργεια στο δίκτυο, που απορροφάται από την κινητική ενέργεια του άξονα της ανεμογεννήτριας, είναι τελικά μεγαλύτερη.

Σημειώνεται ότι και σε αυτή την περίπτωση εμφανίζεται μια δεύτερη έγχυση ισχύος από τον εξομοιωτή αδράνειας (και επακόλουθα μια δεύτερη επιβράδυνση του άξονα) που οφείλεται στην έντονη ταλάντωση της συχνότητας μέχρι να μεταβεί στην τιμή μόνιμης κατάστασης.

Η μεγαλύτερη επιβράδυνση του άξονα σε σύγκριση με το σύστημα με τον ατμοστροβίλο μιας βαθμίδας, είναι αναμενόμενο να οδηγήσει σε μεγαλύτερη μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή. Ωστόσο, όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.11 η μείωση και σε αυτή την περίπτωση δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική ( $\Delta C_p < 0,15\%$ ) και δεν επιφέρει μεγάλη μεταβολή στη μηχανική ισχύ που λαμβάνεται από τον άνεμο.



Σχ. 4.11 Μεταβολή αεροδυναμικού συντελεστή για  $k = 4$

Γραμμικοποιώντας το σύστημα μπορούμε να δούμε τη μεταβολή της ιδιοτιμής της συχνότητας εισάγοντας τον εξομοιωτή αδράνειας με  $T_w = 4s$ ,  $k = 4$ .

Πίνακας 4.5 Ιδιοτιμή ρύθμισης συχνότητας με και χωρίς E/A

Ιδιοτιμή χωρίς E/A	Συντ. Συμ.	Λόγος απόσβεσης	Ιδιοτιμή με E/A	Συντ. Συμ.	Λόγος απόσβεσης
-0,7144±j0,664	$P_{hp}$ 0,22 $P_{mp}$ 0,82 $P_{lp}$ 0,14 w 1,00 g 0,10	0,7325	-0,7629±j0,4873	$P_{hp}$ 0,16 $P_{mp}$ 1,00 $P_{lp}$ 0,15 w 0,82 $w_r$ 0,27	0,8428

Όπως φαίνεται από τον προηγούμενο πίνακα, η ιδιοτιμή που σχετίζεται με τη ρύθμιση της συχνότητας μετακινείται προς τα αριστερά, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η συχνότητα ταλάντωσης. Σε αντίθεση με τον ιδανικό εξομοιωτή αδράνειας, η μετακίνηση προς τα αριστερά είναι σημαντικά μικρότερη. Αυτό οφείλεται στη μείωση της ταχύτητας περιστροφής του άξονα και τον έλεγχο στροφών της ανεμογεννήτριας. Μάλιστα, σε σύγκριση με το σύστημα μίας βαθμίδας, η επίδραση του ελέγχου στροφών είναι ιδιαίτερα σημαντική λόγω της μεγαλύτερης επιβράδυνσης και της μεγαλύτερης χρονικής σταθεράς του εξομοιωτή αδράνειας.

Συνοψίζοντας, η εφαρμογή του εξομοιωτή αδράνειας σε μοντέλο ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα έχει τα ίδια αποτελέσματα σε γενικές γραμμές με τον ιδανικό εξομοιωτή αδράνειας χωρίς, όμως, το αποτέλεσμα να είναι εξίσου θετικό στην τελική απόκριση. Στην περίπτωση που επιλέγεται σχετικά μικρή χρονική σταθερά  $T_w$  (γρήγορο σύστημα), η βελτίωση περιορίζεται κυρίως λόγω του περιορισμού στο ρυθμό απόκρισης του εξομοιωτή αδράνειας. Επιπλέον, η επιβράδυνση στην οποία υποβάλλεται ο άξονας είναι σχετικά μικρή και ο έλεγχος στροφών δεν επηρεάζει ιδιαίτερα το αποτέλεσμα. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή έχει επιλεγεί μια σχετικά μεγαλύτερη χρονική σταθερά (αργό σύστημα), ο περιοριστής ρυθμού έχει μικρότερη επιρροή στο αποτέλεσμα, αλλά η επιβράδυνση του άξονα είναι μεγαλύτερη κι ο έλεγχος στροφών της ανεμογεννήτριας οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση της συνιστώσας  $P_{ord}$  του Σχήματος 4.2 και, τελικά, σε μεγαλύτερη βύθιση της ενεργού ισχύος της ανεμογεννήτριας.

Στον Πίνακα 4.6 παρατίθενται οι προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων του εξομοιωτή αδράνειας για αυτό το σύστημα (βάση ισχύος ανεμογεννήτριας):

*Πίνακας 4.6 Προτεινόμενες τιμές E/A για σύστημα με αμοστροβίλο τριών βαθμίδων*

$T_w$ (s)	k (αμ)	$kT_w$ (αμs)
4	4	16

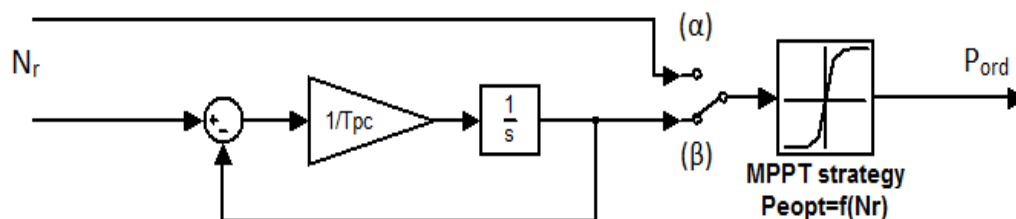
### 4.3.3. Τροποποίηση ελέγχου στροφών ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζεται η δυνατότητα τροποποίησης του ελέγχου στροφών της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η προσθήκη μιας χρονικής καθυστέρησης στη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, η οποία εισάγεται πριν τον έλεγχο μέγιστης απολαβής ισχύος της ανεμογεννήτριας. Η συγκεκριμένη καθυστέρηση αποσκοπεί να επιτύχει τα εξής:

- Εξομάλυνση των μικρών διακυμάνσεων στην ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ώστε να μην οδηγούν σε αντίστοιχες διακυμάνσεις της εντολής ενεργού ισχύος.

- Καθυστερήση του ελέγχου στροφών της ανεμογεννήτριας. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα, η μείωση της συνιστώσας  $P_{ord}$  του Σχήματος 4.2 να καθυστερεί και να μην συμβαίνει αμέσως μετά την έγχυση της ηλεκτρικής ισχύος από τον εξομοιωτή αδράνειας, αλλά αφού έχει αναλάβει το φορτίο η συμβατική μονάδα

Η τροποποίηση του ελέγχου στο Simulink για το μοντέλο της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.12. Σε περίπτωση που η ανεμογεννήτρια δεν υποστηρίζει τη λειτουργία του εξομοιωτή αδράνειας, το φίλτρο παρακάμπτεται τοποθετώντας τον διακόπτη στη θέση (α):



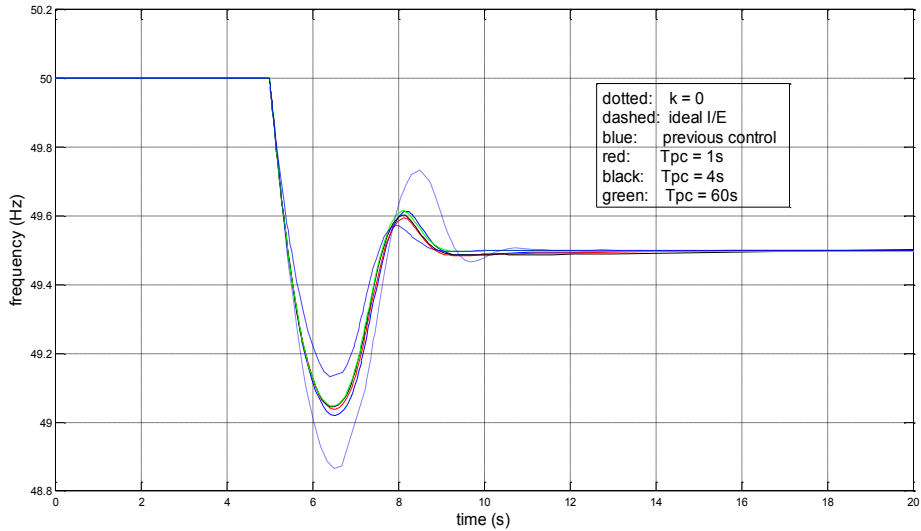
Σχ. 4.12 Τροποποίηση ελέγχου μέγιστης απολαβής ισχύος

Επομένως, η τροποποίηση του ελέγχου στροφών έγκειται στην επιλογή της χρονικής σταθεράς  $T_{pc}$ . Για το λόγο αυτό διεξάγονται δοκιμές στα δύο συστήματα με ατμοστρόβιλο μίας και τριών βαθμίδων.

Στο Σχήμα 4.13 απεικονίζεται η απόκριση της συχνότητας του συστήματος με ατμοστρόβιλο μίας βαθμίδας. Ως τιμή του κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας έχει επιλεγεί η τιμή  $k = 30$ . Με εστιγμένη γραμμή σχεδιάζεται η απόκριση χωρίς εξομοιωτή αδράνειας, ενώ η διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει την απόκριση του ιδανικού εξομοιωτή αδράνειας. Με μπλε χρώμα σχεδιάζεται η απόκριση με την αρχική μοντελοποίηση του ελέγχου στροφών, με κόκκινο για  $T_{pc} = 1s$ , με μαύρο για  $T_{pc} = 4s$  και με πράσινο για  $T_{pc} = 60s$ .

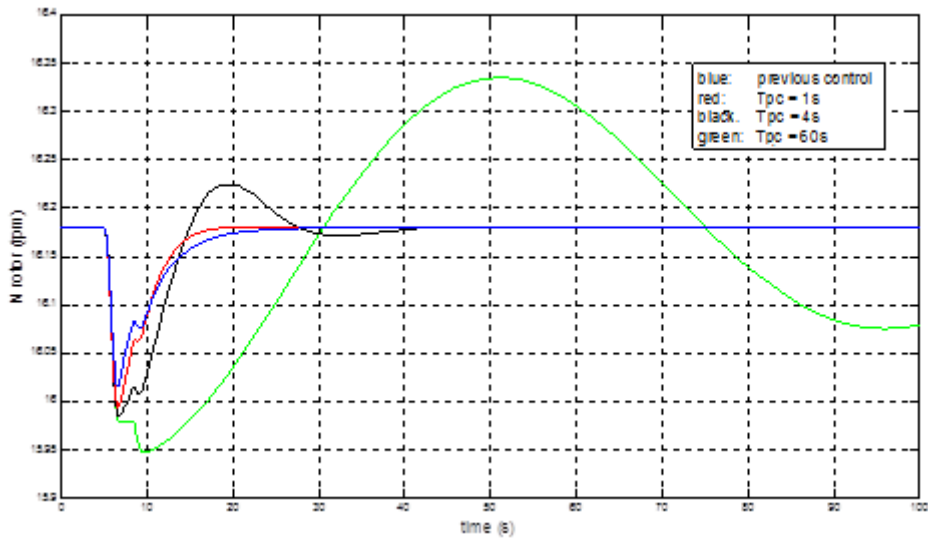
Σε κάθε περίπτωση παρατηρείται μόνο μια μικρή βελτίωση της απόκρισης με την αύξηση της χρονικής σταθεράς. Αυτό οφείλεται στο ότι για το συγκεκριμένο μοντέλο ανεμογεννήτριας και στο συγκεκριμένο σύστημα, δεν προκαλείται σημαντική επιβράδυνση στο δρομέα και, συνεπώς, η βύθιση της ισχύος δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική (Σχήμα 4.5). Σε κάθε περίπτωση, ωστόσο, το αποτέλεσμα δεν είναι εξίσου θετικό όσο του ιδανικού εξομοιωτή αδράνειας, κυρίως λόγω του περιοριστή ρυθμού αύξησης της εγχεόμενης ενεργού ισχύος που προστέθηκε στην έξοδό του.

Ωστόσο, όπως είναι αναμενόμενο, η τροποποίηση του ελέγχου στροφών επηρεάζει περισσότερο την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της ανεμογεννήτριας, της οποίας η απόκριση σχεδιάζεται στο Σχήμα 4.14 για τις διάφορες τιμές της χρονικής σταθεράς  $T_{pc}$ . Στο ίδιο διάγραμμα παρατίθεται με μπλε χρώμα η αρχική απόκριση της ταχύτητας.



**Σχ. 4.13** Μεταβολή της συχνότητας του συστήματος για διάφορες τιμές του  $T_{pc}$

Όπως παρατηρείται, η αύξηση της χρονικής σταθεράς οδηγεί σε λίγο μεγαλύτερη επιβράδυνση του δρομέα. Αυτό συμβαίνει γιατί η μείωση της εντολής ενεργού ισχύος καθυστερείται και η ισχύς παραμένει μεγαλύτερη της μηχανικής για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Για  $T_{pc} = 1s$  παρατηρείται γρήγορη επαναφορά της ταχύτητας στην αρχική. Αυξάνοντας περαιτέρω τη χρονική σταθερά  $T_{pc}$ , η μέγιστη επιβράδυνση γίνεται ακόμα μεγαλύτερη, ενώ παρατηρείται και μια προσωρινή υπερτάχυνση του δρομέα μέχρι την τελική σταθεροποίηση της ταχύτητας στην αρχική της τιμή. Τέλος, η αύξηση ακόμα περισσότερο της χρονικής σταθεράς στα 60 δευτερόλεπτα οδηγεί σε μεγάλη ταλάντωση της ταχύτητας περιστροφής, η οποία εξαλείφεται μετά από σημαντικά μεγάλο χρονικό διάστημα (περίπου τρία λεπτά).



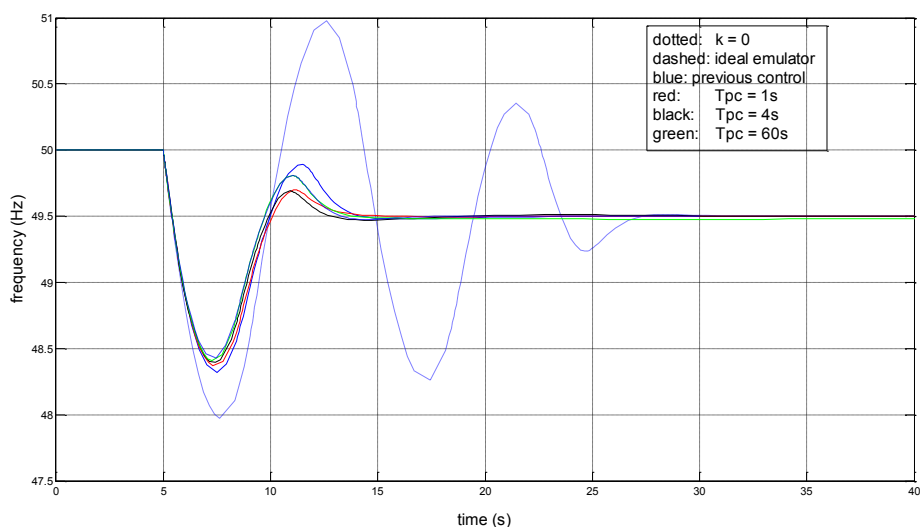
**Σχ. 4.14** Ταχύτητα περιστροφής δρομέα για διάφορες τιμές  $T_{pc}$



Δεδομένου ότι η βελτίωση που παρατηρείται στη συχνότητα είναι μικρή, από την παραπάνω μελέτη εξάγεται το συμπέρασμα ότι η επιλογή  $T_{pc} = 1s$  επιφέρει ικανοποιητικό αποτέλεσμα χωρίς να οδηγεί σε μεγάλη αύξηση των ταλαντώσεων της ταχύτητας περιστροφής. Αντιθέτως, η επαναφορά στην αρχική ταχύτητα παρατηρείται ότι γίνεται πιο γρήγορα για τη συγκεκριμένη τιμή της χρονικής σταθεράς.

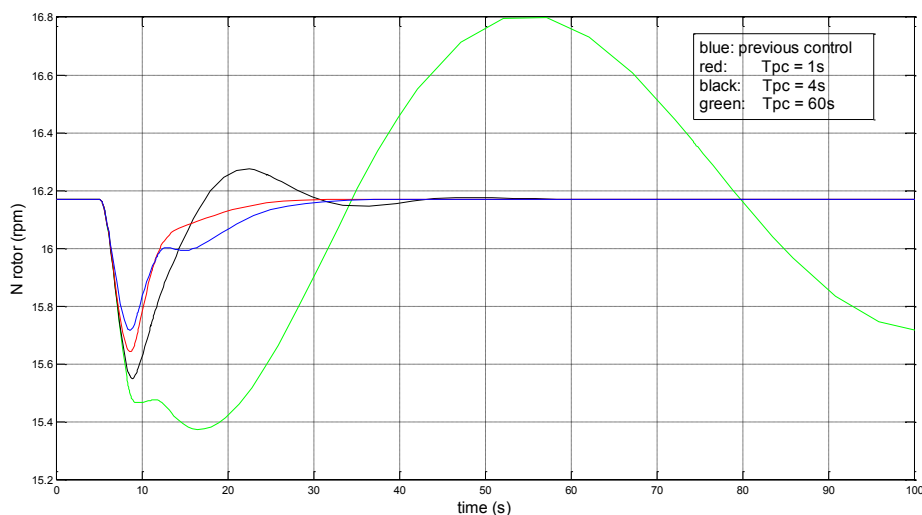
Στη συνέχεια, εξετάζεται η επιρροή της καθυστέρησης του ελέγχου στροφών στο σύστημα με τον ατμοστρόβιλο τριών βαθμίδων. Όπως παρατηρήθηκε στο Σχήμα 4.8, η βύθιση της ισχύος αμέσως μετά τη διαταραχή σε αυτή την περίπτωση είναι πιο σημαντική, ενώ ο περιοριστής ρυθμού δεν επηρεάζει σημαντικό το αποτέλεσμα. Για τις ίδιες τιμές της χρονικής σταθεράς  $T_{pc}$  παρατίθεται η απόκριση της συχνότητας του συστήματος στο Σχήμα 4.15. Για τις παραμέτρους του εξομοιωτή αδράνειας έχουν επιλεγθεί οι τιμές του Πίνακα 4.6.

Παρατηρείται ότι η αύξηση της χρονικής σταθεράς οδηγεί και σε αυτή την περίπτωση σε μια μικρή μόνο βελτίωση της απόκρισης. Ούτως ή άλλως, η αρχική απόκριση δεν είχε ιδιαίτερη διαφορά από την απόκριση που είχε επιτευχθεί με τον ιδανικό εξομοιωτή αδράνειας, οπότε τα περιθώρια βελτίωσης σε αυτή την περίπτωση ήταν αρκετά μικρά.



Σχ. 4.15 Μεταβολή συχνότητας για διάφορες τιμές  $T_{pc}$

Στο Σχήμα 4.16 απεικονίζεται η απόκριση της ταχύτητας του δρομέα για τις διάφορες τιμές της χρονικής σταθεράς  $T_{pc}$ .



**Σχ. 4.16** Ταχύτητα δρομέα για διάφορες τιμές  $T_{pc}$

Και σε αυτή την περίπτωση εξάγονται παρόμοια συμπεράσματα. Για μικρές τιμές της χρονικής σταθεράς (κόκκινο και μαύρο χρώμα) παρατηρείται λίγο μεγαλύτερη επιβράδυνση του δρομέα, με την απόκριση να σταθεροποιείται σε σύντομο χρονικό διάστημα. Αντιθέτως, εάν επιλεγεί μια αρκετά μεγάλη χρονική σταθερά, εμφανίζονται μεγάλες ταλαντώσεις με πολύ αργή απόσβεση.

Συνοψίζοντας, η τροποποίηση του ελέγχου στροφών για το συγκεκριμένο μοντέλο έχει μια μικρή βελτιωτική επίδραση στην απόκριση της συχνότητας του συστήματος. Ωστόσο, η τιμή της χρονικής σταθεράς  $T_{pc}$  είναι καλύτερο να περιοριστεί σε μικρή τιμή (1s) για την αποφυγή της εμφάνισης μεγάλων ταλαντώσεων στην ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

#### 4.3.4. Επίδραση ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων στην αδρανειακή απόκριση της ΑΓΠΜ

Στη μελέτη που προηγήθηκε, υποτέθηκε σε όλες τις περιπτώσεις λειτουργία της ανεμογεννήτριας με παραγόμενη ενεργό ισχύ μικρότερη της ονομαστικής. Γι' αυτό το λόγο η γωνία  $\beta$  των πτερυγίων ήταν σταθερά ίση με την ελάχιστη τιμή της ( $\beta = 0$ ). Όπως, όμως, αναφέρθηκε στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, η ισχύς των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών περιορίζεται στην ονομαστική με τον έλεγχο της γωνίας βήματος  $\beta$  των πτερυγίων.

Ο συγκεκριμένος έλεγχος είναι ενεργός όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει την ονομαστική. Αναλαμβάνει να μεταβάλλει τη γωνία  $\beta$  σε περίπτωση που η ταχύτητα του δρομέα είναι διαφορετική της ονομαστικής. Για παράδειγμα, αν η ταχύτητα περιστροφής είναι μικρότερη της ταχύτητας αναφοράς, η γωνία των πτερυγίων μειώνεται ώστε να επανέλθει στην ταχύτητα αναφοράς και αντίστροφα. Έτσι, η επιβράδυνση του δρομέα της ανεμογεννήτριας που προκαλείται από την

επίδραση του εξομοιωτή αδράνειας, αναμένεται να οδηγήσει σε μείωση της γωνίας των πτερυγίων ώστε να αυξηθεί ο αεροδυναμικός συντελεστής και η αεροδυναμική ισχύς. Εκ πρώτης όψεως, αυτό φαίνεται να συνεισφέρει στη μείωση της επιβράδυνσης του δρομέα της ανεμογεννήτριας. Ωστόσο, η λειτουργία του ελεγκτή γωνίας βήματος, διέπεται από χρονικές σταθερές και μηχανικούς περιορισμούς, κάτι που είναι πιθανόν να θέσει θέμα συνεργασίας μεταξύ των δύο ρυθμιστών.

Στη συνέχεια, θα εξεταστεί η επίδραση του ελέγχου βήματος πτερυγίων στην αδρανειακή απόκριση της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα. Τα συστήματα με ατμοστρόβιλο μίας και τριών βαθμίδων θα χρησιμοποιηθούν και σε αυτή την περίπτωση.

Η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας θεωρείται και σε αυτή την περίπτωση ότι είναι ίση με το 40% του αρχικού ηλεκτρικού φορτίου. Συνεπώς, η κατανομή της παραγωγής πριν τη διαταραχή είναι:

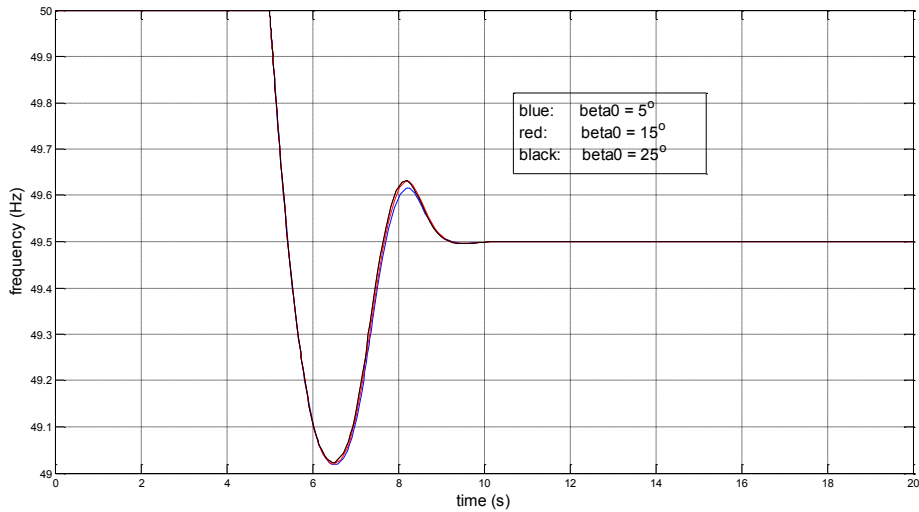
**Πίνακας 4.7 Αρχικό ισοζύγιο ισχύος**

Μέγεθος	Επεξήγηση	Τιμή
$P_e$	Ηλεκτρικό φορτίο	1 αμ
$P_{mst}$	Μηχανική ισχύς A/Σ	0,60αμ
$P_w$	Ενεργός Ισχύς A/Γ	0,40αμ

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως μεταβάλλεται μόνο το σημείο λειτουργίας του ατμοστρόβιλου και όχι τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του. Συνεπώς, οι ανά μονάδα τιμές των Πινάκων 3.1 και 3.5 παραμένουν σταθερές.

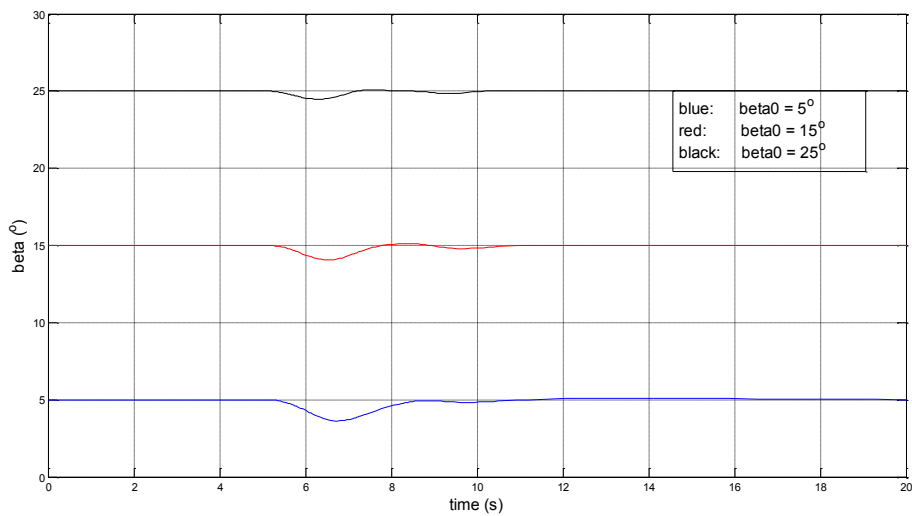
Για τις παραμέτρους του εξομοιωτή αδράνειας στην περίπτωση με τον ατμοστρόβιλο μίας βαθμίδας επιλέγονται οι τιμές που κρίθηκαν ικανοποιητικές από την ανάλυση που προηγήθηκε, δηλαδή  $T_w = 0,2s$  και  $k = 30$  (Πίνακας 4.4).

Επιπλέον, χρησιμοποιείται ο τροποποιημένος έλεγχος στροφών που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Ως τιμή της χρονικής σταθεράς  $T_{pc}$  έχει επιλεγεί η τιμή  $T_{pc} = 1s$ . Εξετάζονται τρία διαφορετικά σημεία λειτουργίας που αντιστοιχούν σε γωνία βήματος πτερυγίων  $\beta = 5^\circ$  (μπλε χρώμα),  $15^\circ$  (κόκκινο χρώμα) και  $25^\circ$  (μαύρο χρώμα). Η απόκριση της συχνότητας για κάθε σημείο λειτουργίας φαίνεται στο Σχήμα 4.17 Παρατηρείται μικρή επίδραση στα χαρακτηριστικά της συχνότητας με σχεδόν αμελητέα βελτίωση της μεταβατικής βύθισης και μείωση της υπερακόντισης κατά την επαναφορά της συχνότητας στην τιμή μόνιμης κατάστασης.



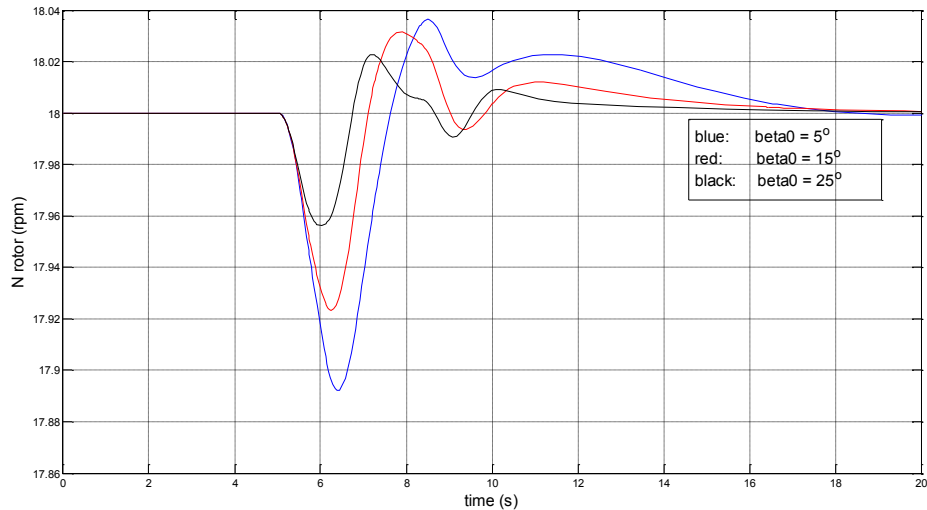
**Σχ. 4.17** Μεταβολή συχνότητας για σημεία λειτουργίας με διαφορετική γωνία  $\beta$

Στη συνέχεια παρατίθεται η απόκριση της γωνίας  $\beta$  για διαφορετικές αρχικές τιμές. Καθώς αυξάνεται η γωνία, παρατηρείται λίγο ομαλότερη απόκριση, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.18:

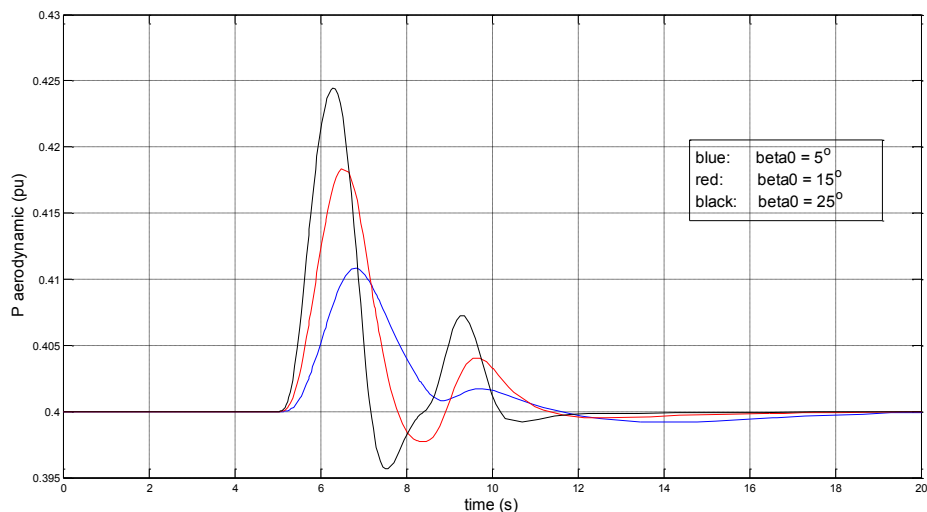


**Σχ. 4.18** Απόκριση γωνίας  $\beta$  για τρία σημεία λειτουργίας

Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και για την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της ανεμογεννήτριας (Σχήμα 4.19). Η επιβράδυνση του δρομέα είναι μικρότερη για μεγαλύτερη αρχική γωνία πτερυγίων. Αυτό εξηγείται από τη μοντελοποίηση του αεροδυναμικού μέρους και το γεγονός ότι σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, η μείωση της γωνίας των πτερυγίων οδηγεί σε μεγαλύτερη αύξηση της αεροδυναμικής ισχύος από ότι σε χαμηλότερες ταχύτητες (Σχήμα 4.20). Στη συνέχεια, παρατηρείται υπερτάχυνση του δρομέα, η οποία, ωστόσο, είναι αρκετά μικρή (0,11%) και δεν διαρκεί για μεγάλο διάστημα.



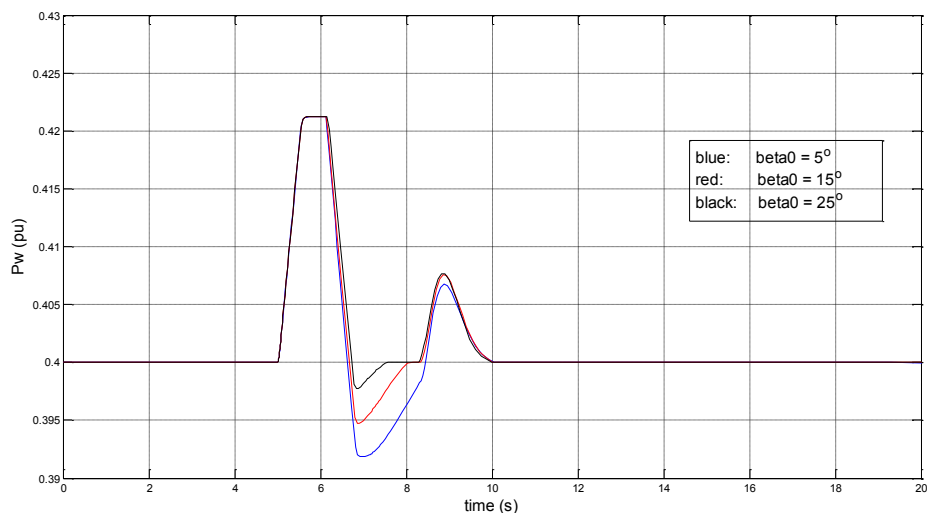
**Σχ. 4.19** Ταχύτητα περιστροφής δρομέα για διαφορετική αρχική γωνία  $\beta$



**Σχ. 4.20** Αεροδυναμική ισχύς για διαφορετική αρχική γωνία  $\beta$

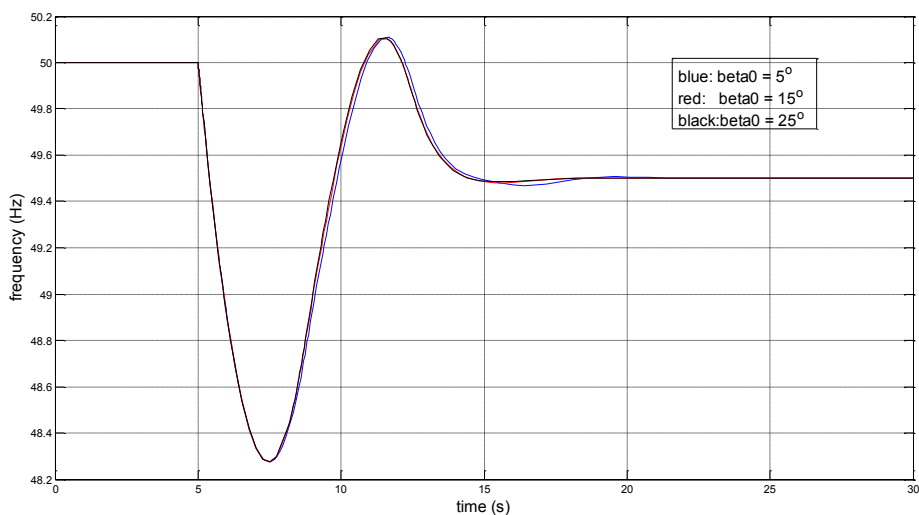
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η απόκριση της ενεργού ισχύος της ανεμογεννήτριας που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.21. Αρχικά, σε αυτή την περίπτωση η ενεργός ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας περιορίζεται από το μέγιστο μεταβατικό ενεργό ρεύμα που μπορεί να εγχύσει η ανεμογεννήτρια στο δίκτυο. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, το άνω όριο έγχυσης ενεργού ρεύματος είναι περίπου ίσο με 105% της ονομαστικής ισχύος. Αυτό, φυσικά, έχει σαν αποτέλεσμα τη μικρότερη βελτίωση στη μεταβατική βύθιση της συχνότητας καθώς, η αύξηση της ισχύος της ανεμογεννήτριας είναι μικρότερη από το 10% που επιτυγχάνεται για μικρότερη αρχική ισχύ λειτουργίας.

Όσον αφορά την επίδραση του pitch controller, παρατηρείται ότι η λειτουργία υπό μεγαλύτερη αρχική γωνία πτερυγίων συνεισφέρει στη μείωση της βύθισης της ισχύος λόγω της αύξησης στη μηχανική ισχύ που λαμβάνεται από τον άνεμο. Ειδικότερα, στην περίπτωση που η γωνία  $\beta$  είναι ίση με  $25^\circ$  (μαύρο χρώμα), η βύθιση της ισχύος είναι σχεδόν αμελητέα.



**Σχ. 4.21** Ενεργός ισχύς ανεμογεννήτριας για διαφορετική αρχική γωνία  $\beta$

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για το σύστημα με αμοστροβίλο τριών βαθμίδων, σχεδιάζεται αρχικά η συχνότητα του συστήματος για τα τρία διαφορετικά σημεία λειτουργίας που μελετήθηκαν στην ανάλυση που προηγήθηκε για τον αμοστροβίλο μίας βαθμίδας (Σχήμα 4.22). Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, δεν παρατηρείται κάποια σημαντική επίδραση στην απόκριση της συχνότητας, εκτός από μια σχεδόν ανεπαίσθητη βελτίωση κατά την επαναφορά της στην τιμή μόνιμης κατάστασης.



**Σχ. 4.22** Μεταβολή συχνότητας για διαφορετική αρχική γωνία  $\beta$

Παρόμοια συμπεράσματα με το σύστημα με αμοστροβίλο μίας βαθμίδας εξάγονται και για τα υπόλοιπα μεγέθη του συστήματος (γωνία  $\beta$  πτερυγίων, ταχύτητα περιστροφής δρομέα, αεροδυναμική ισχύς, ενεργός ισχύς ανεμογεννήτριας) τα οποία παραλείπονται προς χάριν συντομίας.

Συνοψίζοντας, στη συγκεκριμένη μοντελοποίηση της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα, δεν παρατηρείται κάποιο πρόβλημα στη συνεργασία μεταξύ ελέγχου

γωνίας βήματος και εξομοιωτή αδράνειας. Ιδιαίτερα στην απόκριση της συχνότητας, η επιρροή του ελέγχου γωνίας πτερυγίων είναι αμελητέα. Διαφορά παρατηρείται κυρίως στην ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, στην οποία η μεγαλύτερη γωνία οδηγεί σε μικρότερη βύθιση κατά την περίοδο λειτουργίας του εξομοιωτή αδράνειας.

Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση εισάγεται ένας επιπλέον περιορισμός που αφορά τη μέγιστη μεταβατική ενεργό ισχύ που μπορεί να εγχύσει η ανεμογεννήτρια στο δίκτυο. Ειδικά για το μοντέλο ΑΓΠΜ που χρησιμοποιείται σε αυτή τη διπλωματική, ο περιορισμός αυτός (5% περίπου) είναι αυστηρότερος από τον περιορισμό στην έξοδο του εξομοιωτή αδράνειας (10%) και γι' αυτό το λόγο η βελτίωση που επιτυγχάνεται στην απόκριση της συχνότητας είναι μικρότερη. Συνεπώς, για το συγκεκριμένο μοντέλο, πρέπει να αναμένεται μικρότερη δυνατότητα παροχής αδρανειακής υποστήριξης στο σύστημα, όταν πριν τη διαταραχή η ανεμογεννήτρια παράγει πάνω από το 95% της ονομαστικής ισχύος της.

## **4.4. Εφαρμογή για μοντέλο ΑΓΔΤ**

Στη μελέτη που προηγήθηκε για την ανεμογεννήτρια πλήρους μετατροπέα, αποδείχθηκε ότι η επιβράδυνση του δρομέα της ανεμογεννήτριας λόγω του εξομοιωτή αδράνειας επιφέρει αμελητέα μεταβολή στον αεροδυναμικό συντελεστή  $C_p$  και, συνεπώς, στην αεροδυναμική ισχύ. Συνεπώς, το μοντέλο ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης που περιγράφηκε στο δεύτερο κεφάλαιο και στο οποίο αμελείται το αεροδυναμικό κομμάτι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της επίδρασης του εξομοιωτή αδράνειας στα συστήματα με αμοστρόβιλο μίας και τριών βαθμίδων χωρίς κάποιο ιδιαίτερο σφάλμα.

Στην ενότητα 4.4.1. δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου της ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης και γίνεται διερεύνηση της επίδρασής του στην απόκριση συχνότητας του συστήματος με αμοστρόβιλο μίας βαθμίδας. Στην ενότητα 4.4.2. επαναλαμβάνεται η διαδικασία για το σύστημα με τον αμοστρόβιλο τριών βαθμίδων. Στην ενότητα 4.4.3. εξετάζεται η τροποποίηση του ελέγχου στροφών της ανεμογεννήτριας ώστε να βελτιωθεί η δυναμική της συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της παροχής αδρανειακής υποστήριξης. Τέλος, στην ενότητα 4.4.4. εξετάζεται η επίδραση του εξομοιωτή αδράνειας για λειτουργία ονομαστικής ισχύος με ενεργό τον έλεγχο γωνίας βήματος των πτερυγίων.

### **4.4.1. Εφαρμογή σε σύστημα αμοστρόβιλου μίας βαθμίδας και ΑΓΔΤ**

Τα χαρακτηριστικά του αιολικού πάρκου και των ανεμογεννητριών που το απαρτίζουν παρατίθενται στον Πίνακα 4.8. Όπως και στην ΑΓΠΜ οι παράμετροι που σχετίζονται με ανενεργά σχήματα ελέγχου (π.χ. τάσης) δεν παρουσιάζονται.

Πίνακας 4.8 Χαρακτηριστικά Α/Π με ΑΓΔΤ

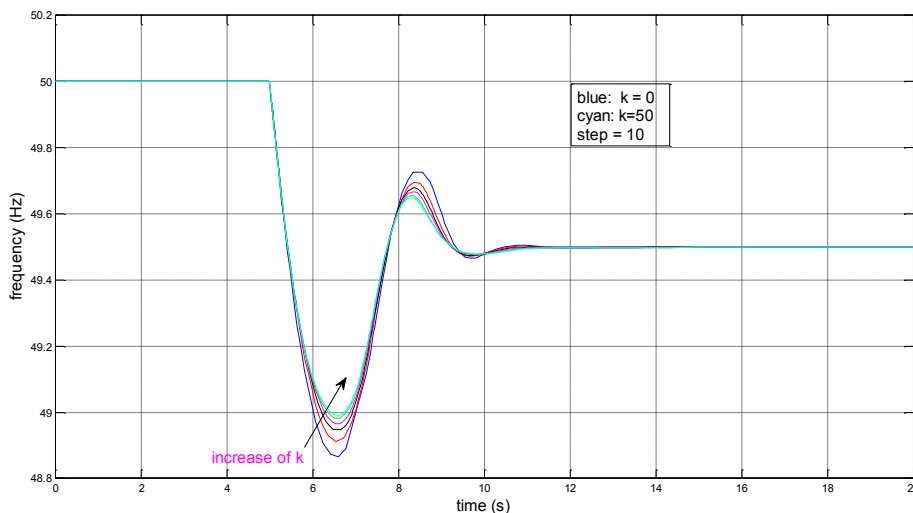
Παράμετρος	Επεξήγηση	Τιμή	Παράμετρος	Επεξήγηση	Τιμή
$S_{nom}(MVA)$	Ονομαστική φαινόμενη ισχύς Α/Π	44,44	$K_{pp}$	Αναλογικό κέρδος PI ελεγκτή γωνίας βήματος	150
$P_{nom}(MW)$	Ονομαστική ισχύς Α/Π	40	$K_{ip}$	Ολοκληρωτικό κέρδος PI ελεγκτή γωνίας βήματος	25
$H_r(s)$	Αδράνεια δρομέα	0,962	$K_{pc}$	Αναλογικό κέρδος βρόχου αντιστάθμισης	3
$H_l(s)$	Αδράνεια ανεμοκινητήρα	3,395	$K_{ic}$	Ολοκληρωτικό κέρδος βρόχου αντιστάθμισης	30
$D_{tg}$	Συντελεστής απόσβεσης	2,344	$T_{servo}(s)$	Χρονική σταθερά σερβομηχανισμού ελεγκτή γωνίας πτερυγίων	0,3
$K_{tg}$	Σταθερά ελαστικότητας άξονα	1,387	ratelim (°/s)	Ρυθμός μεταβολής γωνίας πτερυγίων	10
poles	πόλοι μηχανής επαγωγής	6	betamin (°)	Ελάχιστη γωνία $\beta$	0
$v_{nom}(m/s)$	Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	11,4	betamax (°)	Μέγιστη γωνία $\beta$	27
$P_{nom}(MW)$	Ονομαστική ισχύς Α/Γ	1,5	$P_{max}(αμ)$	Άνω περιορισμός ενεργού ισχύος	1,12
beta0 (°)	Αρχική γωνία πτερυγίων	0	$P_{min}(αμ)$	Κάτω περιορισμός ενεργού ισχύος	0,1
(αμ) [wpmin, wp20, wp40, wp60, wp100]			Διακριτά σημεία καμπύλης ισχύος – ταχύτητας περιστροφής		[0,69, 0,78, 0,98, 1,12, 1,2]

Η ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδότησης λειτουργεί στο 60% της ονομαστικής της ισχύος με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος πριν τη διαταραχή. Όσον αφορά την άεργο ισχύ, έχει επιλεγεί ο έλεγχος σταθερού συντελεστή ισχύος χωρίς ρύθμιση τερματικής τάσης, που αντιστοιχεί στη θέση ( $\beta$ ) του δεύτερου διακόπτη του Σχήματος 2.15. Οι ίδιες παραδοχές (σταθερή και μοναδιαία τάση ζυγού, σταθερή μέση ταχύτητα ανέμου για το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα) γίνονται και σε αυτή την περίπτωση. Το αρχικό ισοζύγιο ισχύος παραμένει όπως στον Πίνακα 4.2.

Η χρονική σταθερά του εξομοιωτή αδράνειας επιλέγεται ίση με  $T_w = 0,2s$ , όπως έγινε και για το μοντέλο πλήρους μετατροπέα. Αυξάνοντας το κέρδος του εξομοιωτή αδράνειας εξετάζεται η μεταβολή της συχνότητας του συστήματος (Σχήμα 4.23), της ενεργού ισχύος της ανεμογεννήτριας και της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της. Συγκρίνοντας με τις αντίστοιχες αποκρίσεις για το μοντέλο ανεμογεννήτριας πλήρους



μετατροπέα, παρατηρείται παρόμοια δυναμική συμπεριφορά καθώς αυξάνεται το κέρδος με το φαινόμενο του κορεσμού στην απόκριση της συχνότητας να παρατηρείται σε τιμή περίπου 30. Η μεταβατική βύθιση της συχνότητας που επιτυγχάνεται σε αυτή την περίπτωση είναι λίγο κάτω από τα 49Hz.

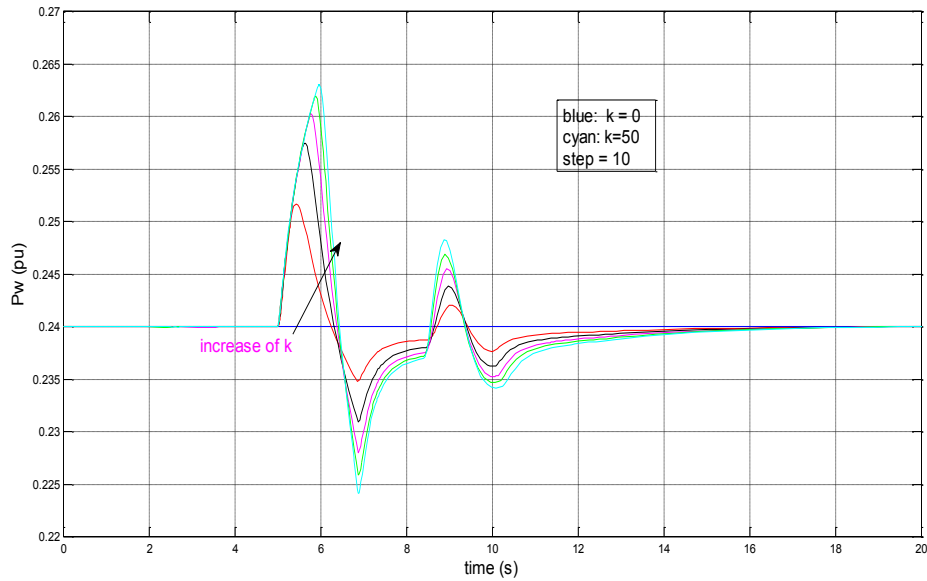


Σχ. 4.23 Μεταβολή συχνότητας για διάφορες τιμές του  $k$

Η διαφορά με το μοντέλο της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα, παρατηρείται κυρίως στην απόκριση της ενεργού ισχύος της ανεμογεννήτριας (Σχήμα 4.24). Σε αυτή την περίπτωση, η βύθιση της ισχύος είναι σημαντικά μεγαλύτερη, κάτι που οφείλεται στη διαφορετική μοντελοποίηση του ελέγχου στροφών της ανεμογεννήτριας.

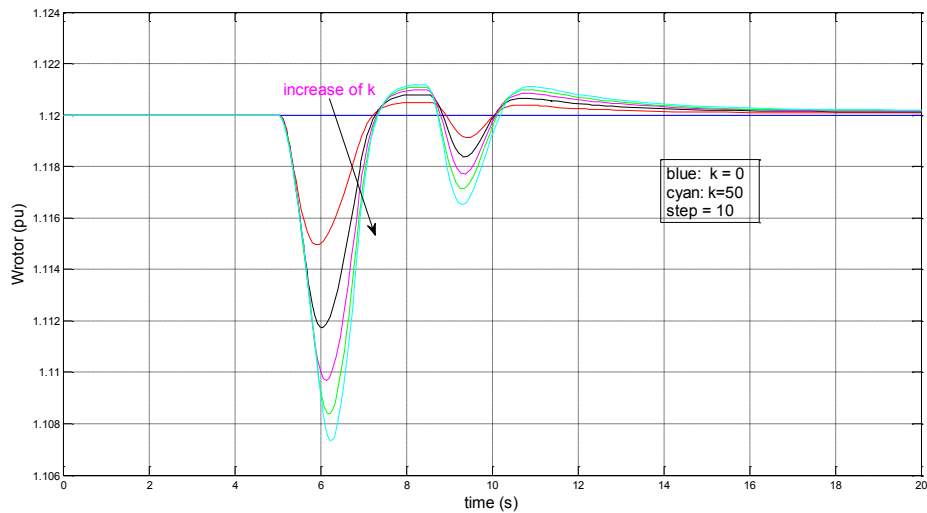
Όπως περιγράφηκε στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο (Σχήμα 2.16), η ταχύτητα αναφοράς προκύπτει από την καμπύλη ταχύτητας περιστροφής – ισχύος, μετά από μέτρηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος. Στη συνέχεια, το σφάλμα της ταχύτητας αναφοράς από την ταχύτητα περιστροφής οδηγείται σε έναν PI ελεγκτή ο οποίος καθορίζει αρκετά γρήγορα την τελική εντολή ηλεκτρικής ισχύος.

Το αποτέλεσμα της εισαγωγής του εξομοιωτή αδράνειας είναι η αύξηση της εγχεόμενης ηλεκτρικής ισχύος και η επιβράδυνση του άξονα. Το πρώτο έχει ως αποτέλεσμα την (μικρή λόγω της μεγάλης χρονικής σταθεράς του φίλτρου μέτρησης της ισχύος) αύξηση της ταχύτητας αναφοράς του δρομέα, ενώ το δεύτερο δημιουργεί σφάλμα ανάμεσα στην ταχύτητα αναφοράς και την πραγματική ταχύτητα περιστροφής. Αποτέλεσμα είναι η σημαντική μείωση της συνιστώσας  $P_{ord}$  (Σχήμα 4.2), ώστε να επιταχυνθεί εκ νέου ο δρομέας στην αρχική ταχύτητα.



**Σχ. 4.24** Ενεργός ισχύς ΑΓΔΤ για διάφορες τιμές του  $k$

Και εδώ παρατηρείται μια δεύτερη έγχυση ισχύος κατά την ταλάντωση της συχνότητας γύρω από την τελική της τιμή η οποία γίνεται πιο απότομη καθώς αυξάνεται το κέρδος του εξομοιωτή αδράνειας. Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν κι από την απόκριση της ταχύτητας του δρομέα της ανεμογεννήτριας όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.25.

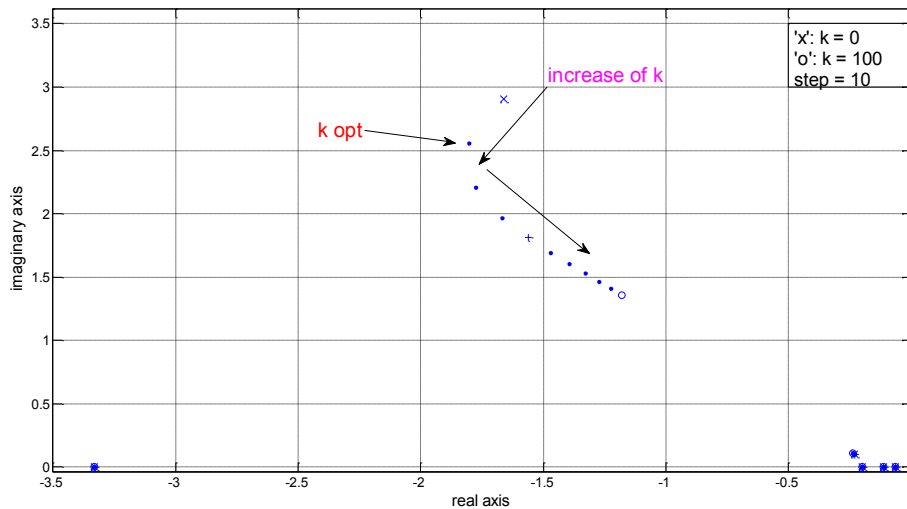


**Σχ. 4.25** Ταχύτητα περιστροφής δρομέα ανεμογεννήτριας για διάφορες τιμές  $k$

Κάνοντας γραμμικοποίηση στο σύστημα εξετάζεται η μεταβολή της ιδιοτιμής που σχετίζεται με την απόκριση της συχνότητας καθώς αυξάνεται το κέρδος του εξομοιωτή αδράνειας. Στο Σχήμα 4.26 σχεδιάζεται η ιδιοτιμή για κέρδη εξομοιωτή αδράνειας από  $k = 0$  ('x') έως  $k = 100$  ('o') με βήμα  $\Delta k = 10$ .

Μέχρι την τιμή  $k = 10$ , η ιδιοτιμή μετακινείται προς τα αρνητικά του πραγματικού άξονα. Αυξάνοντας περαιτέρω το κέρδος του εξομοιωτή αδράνειας, η ιδιοτιμή μετακινείται προς τα θετικά του πραγματικού άξονα και τελικά καταλήγει

δεξιότερα της αρχικής της θέσης. Αυτό οφείλεται στη λειτουργία του ρυθμιστή στροφών της ΑΓΔΤ, η οποία, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, μειώνει την ενεργό ισχύ της ανεμογεννήτριας σε επίπεδα μικρότερα της μηχανικής ισχύος. Έτσι, ενώ η απόσβεση του ρυθμού συνεχίζει να αυξάνεται λόγω της μείωσης της συχνότητας ταλάντωσης, η απόκριση της συχνότητας γίνεται βραδύτερη. Ωστόσο, λόγω της μη γραμμικότητας που εισάγουν οι περιορισμοί στο σύστημα, από την προσομοίωση επιλέγεται μια τιμή μεγαλύτερη από το  $k_{opt}$  που σημειώνεται στο Σχήμα 4.26.



Σχ. 4.26 Μετακίνηση ιδιοτιμής συχνότητας για αύξηση του  $k$

Στον Πίνακα 4.9 συνοψίζονται οι προτεινόμενες τιμές για τις παραμέτρους του εξομοιωτή αδράνειας για όλες τις περιπτώσεις για το σύστημα με ατμοστρόβιλο μίας βαθμίδας.

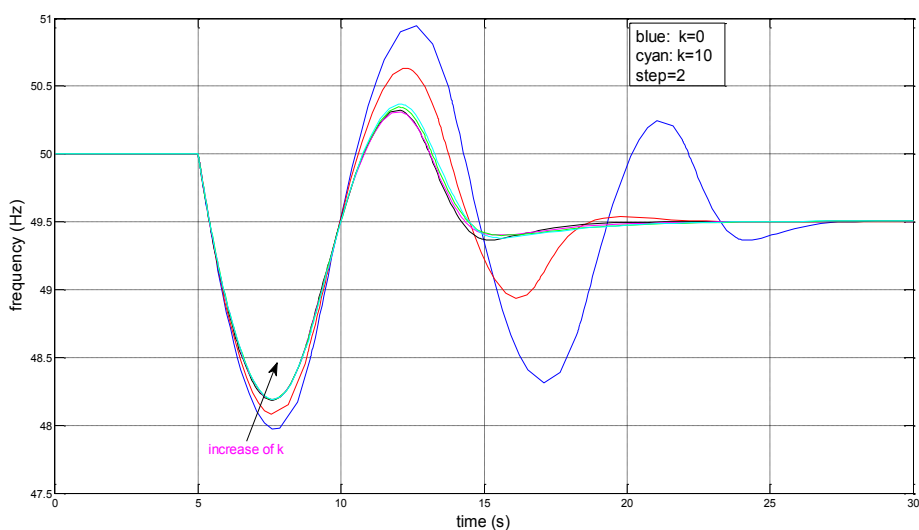
Πίνακας 4.9 Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων  $E/A$  για σύστημα με ατμοστρόβιλο μίας βαθμίδας

Μοντέλο Α/Γ	$T_w$ (s)	$k$ (αμ)	$kT_w$ (αμs)
Ιδανικός Ε/Α	0,2	30-40	6-8
ΑΓΠΜ	0,2	30	6
ΑΓΔΤ	0,2	30	6

Είναι σημαντικό να τονιστεί πως, παρόλο που η βελτίωση που επιτυγχάνεται τελικά στην απόκριση της συχνότητας δεν είναι ίδια σε όλες τις περιπτώσεις, προκύπτουν περίπου ίδιες τιμές για τις παραμέτρους του εξομοιωτή αδράνειας.

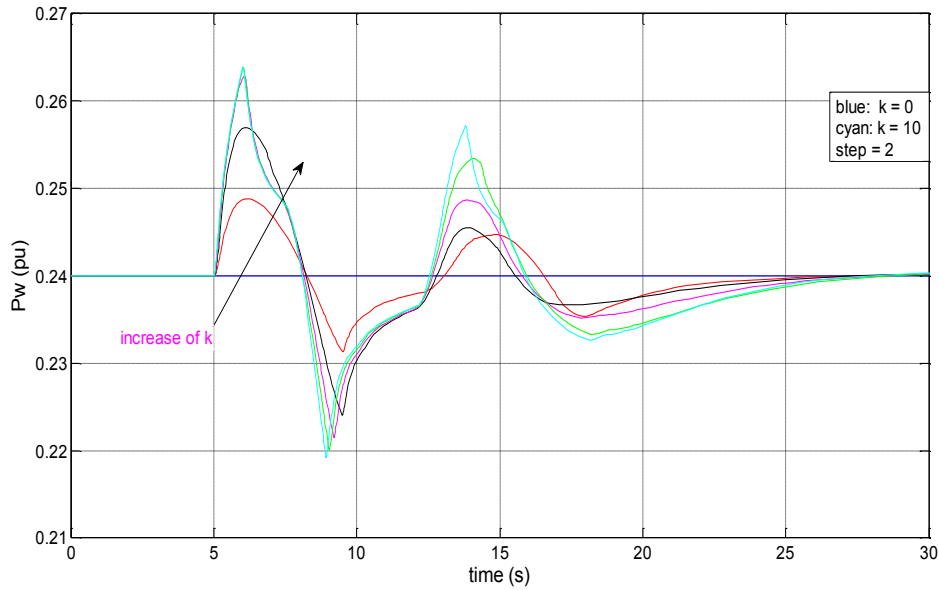
#### 4.4.2. Εφαρμογή σε σύστημα ατμοστροβίλου τριών βαθμίδων και ΑΓΔΤ

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται εφαρμόζοντας το μοντέλο της ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης στο σύστημα με τον ατμοστρόβιλο τριών βαθμίδων. Στο Σχήμα 4.27 σχεδιάζεται η συχνότητα του συστήματος συναρτήσει του χρόνου. Είναι εμφανής και σε αυτή την περίπτωση η θετική επίδραση του εξομοιωτή αδράνειας στην εξομάλυνση της απόκρισης και στην αύξηση της απόσβεσης των ταλαντώσεων. Ο κορεσμός στην απόκριση παρατηρείται για τιμή  $k = 4$  και μειώνεται η μεταβατική βύθιση στα 48,3 Hz από τα 48 Hz.



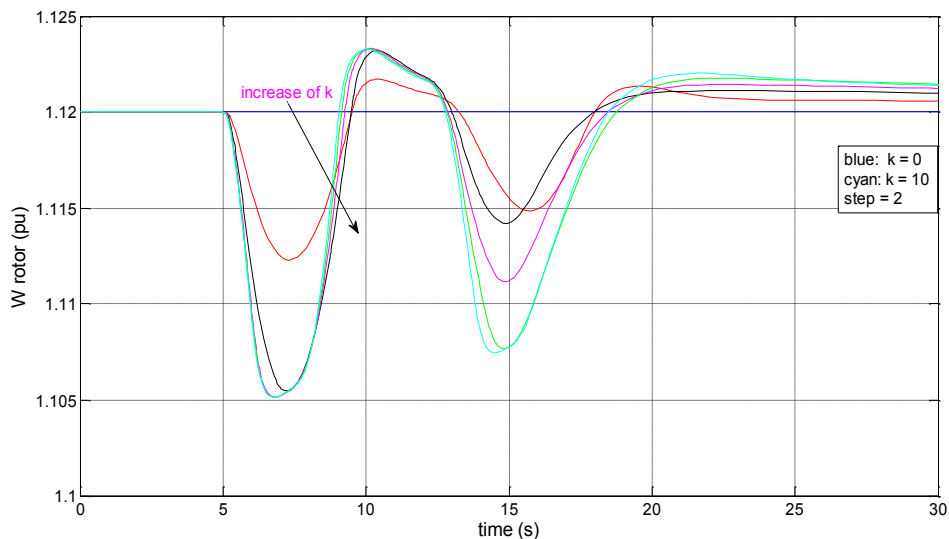
Σχ. 4.27 Μεταβολή συχνότητας συστήματος για διάφορες τιμές  $k$

Στο Σχήμα 4.28 απεικονίζεται η ενεργός ισχύς της ανεμογεννήτριας συναρτήσει του χρόνου. Όπως είναι εμφανές, η αύξηση του κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας οδηγεί και σε αυτή την περίπτωση σε πιο έντονη αύξηση της ενεργού ισχύος. Για τιμή κέρδους εξομοιωτή  $k > 4$  παρατηρείται παραμόρφωση της απόκρισης, κάτι που οφείλεται στον περιορισμό στην έξοδο του εξομοιωτή αδράνειας. Όσον αφορά τη δεύτερη μεταβατική έγχυση λίγο πριν τα 15s, παρατηρείται ότι για  $k = 4$ , το ύψος της είναι μικρότερο από ότι για  $k = 2$ . Αυτό οφείλεται στην εξομάλυνση της ταλάντωσης της συχνότητας και τη μείωση της υπερακόντισής της κατά την επαναφορά στην τιμή μόνιμης κατάστασης. Περαιτέρω αύξηση του κέρδους δεν οδηγεί σε κάποια εξομάλυνση της απόκρισης και γι' αυτό, το ύψος της δεύτερης μεταβατικής έγχυσης του εξομοιωτή αδράνειας αυξάνεται για  $k > 4$ .



**Σχ. 4.28** Απόκριση ενεργού ισχύος ΑΓΔΤ για διάφορες τιμές  $k$

Στο Σχήμα 4.29 έχει σχεδιαστεί η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές του κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας. Τα συμπεράσματα που εξάγονται είναι παρόμοια με αυτά της απόκρισης της ισχύος της ανεμογεννήτριας. Δηλαδή, η αύξηση του κέρδους οδηγεί σε μεγαλύτερη πρώτη επιβράδυνση μέχρι την τιμή  $k = 4$ , ενώ για μεγαλύτερη τιμή κέρδους δεν παρατηρείται διαφορά. Επιπλέον, όσον αφορά τη δεύτερη επιβράδυνση που λαμβάνει χώρα, παρατηρείται ότι και σε αυτή την περίπτωση είναι μικρότερη για  $k = 4$  λόγω της εξομάλυνσης της ταλάντωσης της συχνότητας.

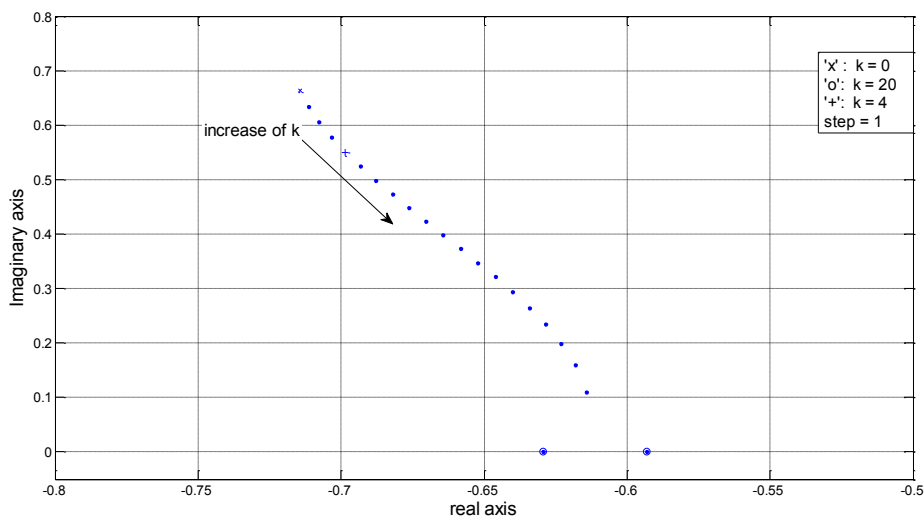


**Σχ. 4.29** Ταχύτητα μεταβολής δρομέα ΑΓΔΤ για διάφορες τιμές  $k$

Στη συνέχεια, εξετάζεται η μεταβολή της ιδιοτιμής ρύθμισης συχνότητας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.30, η ιδιοτιμή δεν μετακινείται προς τα αριστερά όπως

αναμενόταν. Αντιθέτως, καθώς αυξάνεται το κέρδους του εξομοιωτή η ιδιοτιμή μετακινείται προς τα θετικά του άξονα των πραγματικών. Η απόσβεση του ρυθμού αυξάνεται λόγω της μεγάλης μείωσης του φανταστικού μέρους της ιδιοτιμής. Ωστόσο, η απόκριση της συχνότητας δεν γίνεται πιο γρήγορη όπως αναμενόταν. Αυτό οφείλεται στο ρυθμιστή στροφών του συγκεκριμένου μοντέλου ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης. Λόγω των μη γραμμικοτήτων που υπάρχουν στο συγκεκριμένο σύστημα (περιοριστής ρυθμού αμοστροβίλου, περιοριστές του εξομοιωτή αδράνειας), η καθυστέρηση της απόκρισης της συχνότητας δεν γίνεται αντιληπτή.

Στα πλαίσια της επιδίωξης εύρωστου (robust) ελέγχου, στην επόμενη ενότητα γίνεται τροποποίηση του ελέγχου στροφών του μοντέλου για τη μείωση της επίδρασής του κατά τη διάρκεια της αδρανειακής απόκρισης.



**Σχ. 4.30** Μετακίνηση ιδιοτιμής ρύθμισης συχνότητας για αύξηση του  $k$

Στον Πίνακα 4.10 συνοψίζονται οι προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων του εξομοιωτή αδράνειας για το σύστημα με αμοστρόβιλο τριών βαθμίδων. Αξίζει να σημειωθεί πως και στις τρεις περιπτώσεις επιλέγονται περίπου ίδιες τιμές.

**Πίνακας 4.10** Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων  $E/A$  για σύστημα με αμοστρόβιλο με αναθέρμανση

Μοντέλο A/Γ	$T_w$ (s)	$k$ (αμ)	$kT_w$ (αμs)
Ιδανικός E/A	4	4-6	16-24
ΑΓΠΜ	4	4	16
ΑΓΔΤ	4	4	16

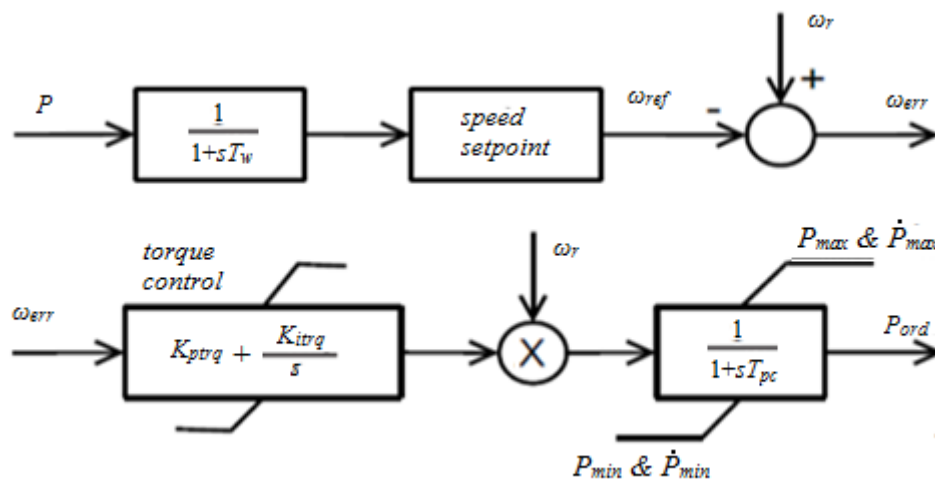
### 4.4.3. Τροποποίηση ελέγχου στροφών ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης

Όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους, ο έλεγχος στροφών της ανεμογεννήτριας τείνει να ανατρέψει την επίδραση του εξομοιωτή αδράνειας μειώνοντας την συνιστώσα  $P_{ord}$  (Σχήμα 4.2) της εντολής ενεργού ισχύος.

Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο για τη μοντελοποίηση που ακολουθήθηκε για την ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδότησης. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος θα επιχειρηθεί η τροποποίηση του ελέγχου στροφών ώστε να γίνει λιγότερη αισθητή η επίδρασή του στο τελικό αποτέλεσμα.

Η λογική που ακολουθείται και γι' αυτό το μοντέλο είναι η καθυστέρηση της επιτάχυνσης του δρομέα στην αρχική ταχύτητα και η αναβολή της για μετά το τέλος της πρωτεύουσας ρύθμισης. Αυτό μπορεί να γίνει κάνοντας την εντολή ενεργού ισχύος της ανεμογεννήτριας λιγότερο «ευαίσθητη» στις διακυμάνσεις της ταχύτητας του δρομέα. Με αυτό τον τρόπο η βύθιση της ηλεκτρικής ισχύος που παρατηρήθηκε, είναι δυνατόν να εξομαλυνθεί και η διαδικασία της ανάκτησης της κινητικής ενέργειας του δρομέα να λάβει χώρα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Η μοντελοποίηση του ελέγχου στροφών για την ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδότησης έχει περιγραφεί στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο και απεικονίζεται στο Σχήμα 2.16, το οποίο προς χάριν ευκολίας παρατίθεται κι εδώ χωρίς τον έλεγχο γωνίας βήματος (Σχήμα 4.31):



Σχ. 4.31 Έλεγχος στροφών ΑΔΓΤ

Οι αρχικές και οι τελικές τιμές των παραμέτρων του ελέγχου στροφών παρατίθενται στον Πίνακα 4.11.

*Πίνακας 4.11 Αρχικές και τελικές τιμές παραμέτρων ελέγχου στροφών*

Παράμετρος	Αρχική Τιμή	Τελική τιμή ( $T_w = 0,2s$ )	Τελική τιμή ( $T_w = 4s$ )
$K_{ptrq}$	3	1	1
$K_{itrq}$	0,6	0,2	0,2
$T_w$ (s)	5	5	5
$T_{pc}$ (s)	0,05	4	4

Η τιμή της χρονικής σταθεράς  $T_w$  είναι αρκετά μεγάλη και γι' αυτό το λόγο η ταχύτητα αναφοράς δεν αλλάζει σημαντικά κατά τη διάρκεια της αδρανειακής απόκρισης. Οπότε, η απόκριση της εντολής ενεργού ισχύος καθορίζεται κατά κύριο λόγο από την επιλογή των τιμών για τα κέρδη  $K_{ptrq}$  και  $K_{itrq}$  και τη χρονική σταθερά  $T_{pc}$ , που μέχρι τώρα αποσκοπούσαν στη γρήγορη επαναφορά της ταχύτητας στην ταχύτητα αναφοράς. Με αυτό τον τρόπο οδηγούσαν σε σημαντική μείωση της εντολής ενεργού ισχύος σε τιμή μικρότερη της μηχανικής ισχύος. Μεταβάλλοντας τις τιμές της χρονικής σταθεράς  $T_{pc}$  και των κερδών του PI ελεγκτή είναι δυνατόν να αναβληθεί – επιβραδυνθεί αυτή η μείωση της εντολής ενεργού ισχύος ώστε να μην επιδρά αρνητικά κατά τη διάρκεια της αδρανειακής απόκρισης της ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης.

Στους Πίνακες 4.12 και 4.13 παρατίθενται οι ιδιοτιμές που σχετίζονται με τη ρύθμιση συχνότητας των δύο συστημάτων που εξετάστηκαν για διάφορες τιμές των παραμέτρων του ελέγχου στροφών. Όσον αφορά τις τιμές  $k$  και  $T_w$  του εξομοιωτή αδράνειας έχουν επιλεγεί οι αντίστοιχες τιμές για το μοντέλο ΑΓΔΤ του Πίνακα 4.9 για το σύστημα με ατμοστρόβιλο μίας βαθμίδας και του Πίνακα 4.10 για το σύστημα με ατμοστρόβιλο τριών βαθμίδων.

Όπως φαίνεται από τους πίνακες, η τροποποίηση του ελέγχου στροφών οδηγεί σε κάθε περίπτωση σε μετακίνηση της ιδιοτιμής της συχνότητας προς τα αριστερά, οδηγώντας έτσι σε ταχύτερη απόκριση της συχνότητας. Επιπλέον, η αύξηση των δύο χρονικών σταθερών επιφέρει ακόμα μεγαλύτερη μετακίνηση προς τα αριστερά της ιδιοτιμής. Πάντως, οι διαφορές που παρατηρούνται στις τρεις τελευταίες γραμμές του κάθε πίνακα είναι αμελητέες και γι' αυτό προτιμούνται οι παράμετροι της τρίτης γραμμής που πετυχαίνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα με μικρότερη παρέμβαση στη δυναμική της ανεμογεννήτριας. Στην τελευταία γραμμή του κάθε πίνακα, σημειώνονται οι τιμές που προτείνονται στο αντίστοιχο μοντέλο της GE στο [22] και αντιστοιχούν σε  $T_w = 5,5s$  και  $k = 10$ .

Στο Σχήμα 4.32 απεικονίζεται η μεταβολή της συχνότητας του συστήματος με ατμοστρόβιλο μίας βαθμίδας. Με μπλε χρώμα σχεδιάζεται η απόκριση με τις αρχικές τιμές των παραμέτρων του ελέγχου στροφών, με κόκκινο η απόκριση για τις τελικές τιμές και με μαύρο η απόκριση για τον ιδανικό εξομοιωτή αδράνειας.

Παρατηρείται σημαντική βελτίωση των χαρακτηριστικών της απόκρισης της συχνότητας. Η μεταβατική βύθιση είναι σημαντικά μικρότερη με το ναδίρ της συχνότητας να είναι πλέον στα 49,1Hz περίπου. Επιπλέον, μειώνεται η υπερακόντιση



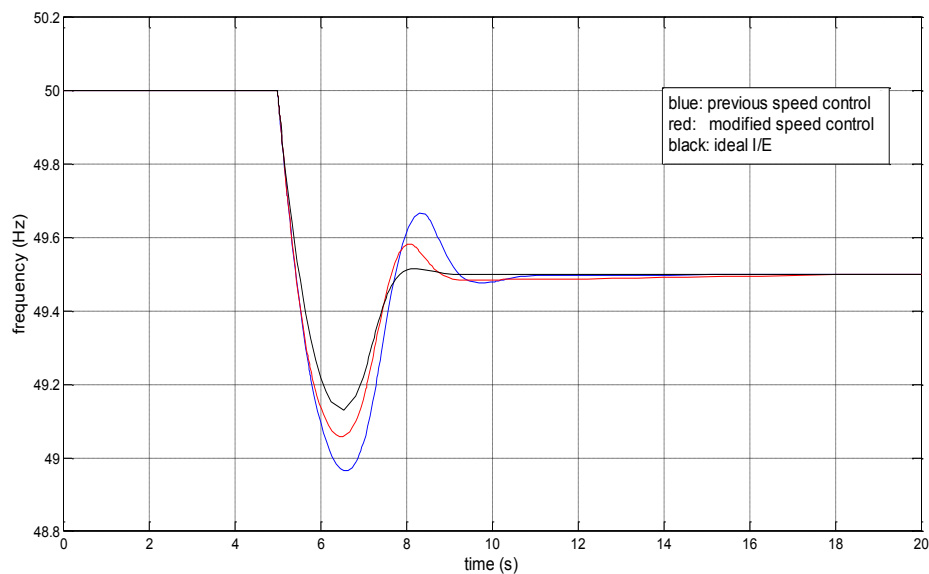
της συχνότητας κατά την επαναφορά και η συχνότητα σταθεροποιείται τελικά λίγο μετά τα 10s.

*Πίνακας 4.12* Ιδιοτιμή ρύθμισης συχνότητας για τροποποίηση των παραμέτρων του ελέγχου στροφών – 1 βαθμίδα

Παράμετροι Ελέγχου Στροφών				A/Σ μίας βαθμίδας
$K_{ptrq}$	$K_{itrq}$	$T_{\omega}$ (s)	$T_{pc}$ (s)	Ιδιοτιμή συχνότητας
3	0,6	5	0,05	$-1,6680 \pm j1,969$
3	0,2	5	0,05	$-1,6800 \pm j1,999$
1	0,2	5	0,05	$-2,225 \pm j1,334$
<b>1</b>	<b>0,2</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b><math>-3,071 \pm j2,505</math></b>
1	0,2	60	4	$-3,070 \pm j2,501$
0,5	0,05	60	4	$-3,067 \pm j2,488$

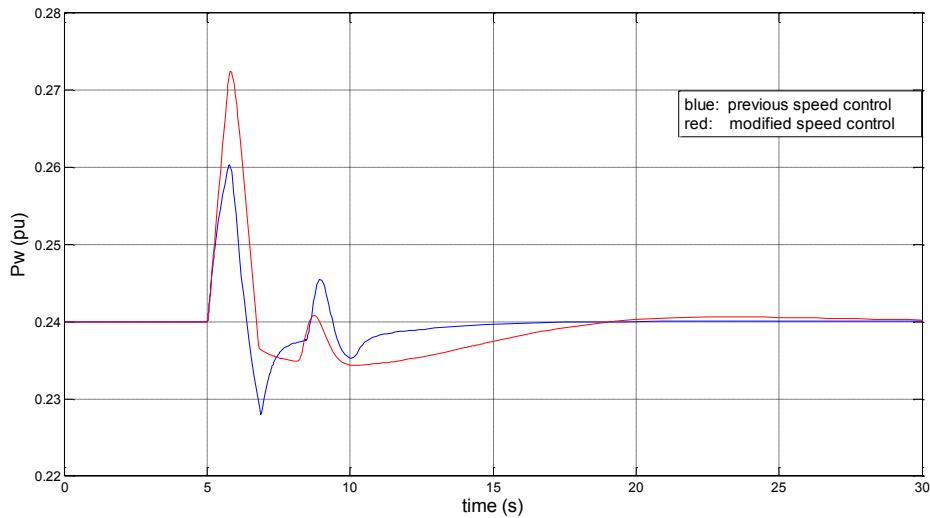
*Πίνακας 4.13* Ιδιοτιμή ρύθμισης συχνότητας και για τροποποίηση των παραμέτρων του ελέγχου στροφών – 3 βαθμίδες

Παράμετροι Ελέγχου Στροφών				A/Σ τριών βαθμίδων
$K_{ptrq}$	$K_{itrq}$	$T_{\omega}$ (s)	$T_{pc}$ (s)	Ιδιοτιμή συχνότητας
3	0,6	5	0,05	$-0,6984 \pm j0,5504$
3	0,2	5	0,05	$-0,7047 \pm j0,5611$
1	0,2	5	0,05	$-0,7396 \pm j0,4761$
<b>1</b>	<b>0,2</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b><math>-1,1610 \pm j0,5037</math></b>
1	0,2	60	4	$-1,1680 \pm j0,4961$
0,5	0,05	60	4	$-1.1540 \pm j0.4445$



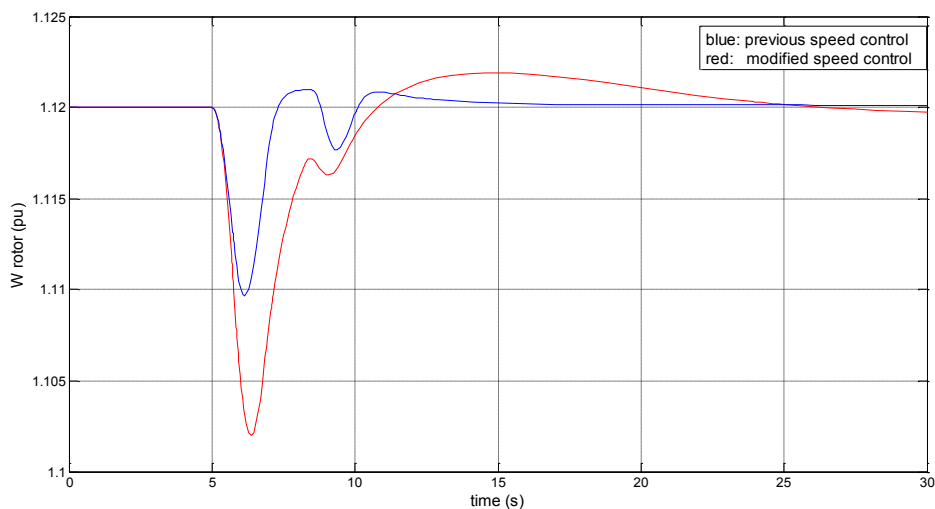
*Σχήμα 4.32* Συχνότητα συστήματος για τροποποίηση του ελέγχου στροφών - μία βαθμίδα

Η ενεργός ισχύς και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα φαίνονται στα Σχήματα 4.33 και 4.34 αντίστοιχα. Όσον αφορά την ενεργό ισχύ, παρατηρείται ότι η έγχυση ισχύος είναι μεγαλύτερη και διατηρείται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ενώ η βύθιση που ακολουθεί είναι σημαντικά μικρότερη. Επιπλέον, έχει εξομαλυνθεί σημαντικά η δεύτερη αύξηση της εγχεόμενης ισχύος που παρατηρείται μετά τα 8s. Τέλος, μετά τα 8s η ενεργός ισχύς επανέρχεται ομαλά στην αρχική της τιμή.



**Σχήμα 4.33** Ενεργός ισχύς ΑΓΔΤ για τροποποίηση του ελέγχου στροφών – μία βαθμίδα

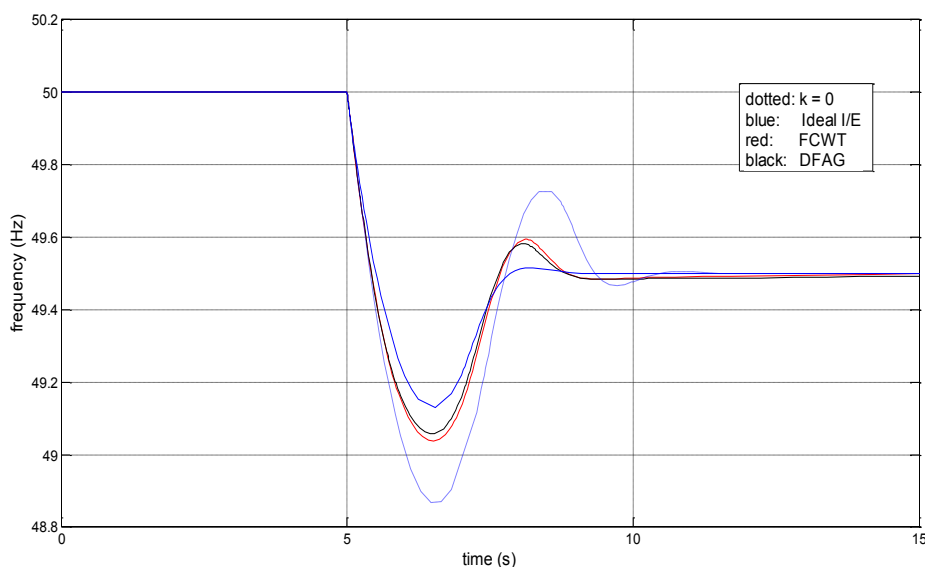
Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και για την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Πιο συγκεκριμένα, επιβραδύνεται περισσότερο με τον τροποποιημένο έλεγχο στροφών, κάτι που είναι αναμενόμενο καθώς η ηλεκτρική ισχύς διατηρείται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα πάνω από την αεροδυναμική. Ωστόσο, και σε αυτή την περίπτωση, η προκαλούμενη επιβράδυνση είναι μικρότερη από 2%. Επιπλέον, η επιτάχυνση εκ νέου του δρομέα στην ταχύτητα περιστροφής πριν τη διαταραχή είναι λίγο πιο αργή, ενώ παρατηρείται μια ταλάντωση μικρού πλάτους γύρω από την αρχική τιμή που αποσβεννύεται ουσιαστικά μετά από περίπου 15s.



**Σχήμα 4.34** Ταχύτητα περιστροφής δρομέα για τροποποίηση του ελέγχου στροφών – μία βαθμίδα

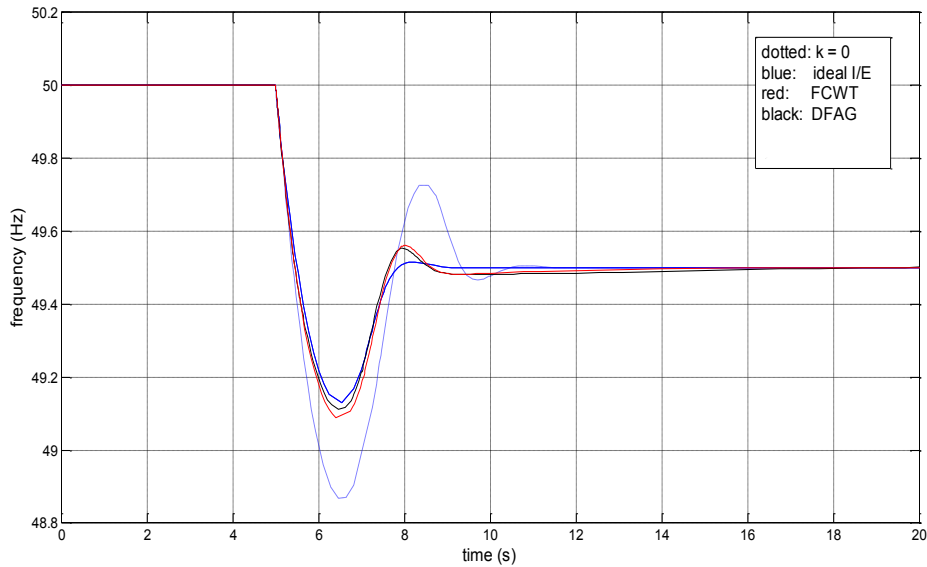
Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να γίνει σύγκριση της απόκρισης της συχνότητας για κάθε μοντέλο ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε και του ιδανικού εξομοιωτή αδράνειας. Για την ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης επιλέγονται οι τιμές των παραμέτρων του Πίνακα 4.12, ενώ για την ανεμογεννήτρια πλήρους μετατροπέα επιλέγεται η τιμή  $T_{pc} = 1s$ . Το κέρδος του εξομοιωτή αδράνειας είναι και στις τρεις περιπτώσεις ίσο με  $k = 30$ .

Με εστιγμένη γραμμή σχεδιάζεται η απόκριση χωρίς εξομοιωτή αδράνειας, με μπλε χρώμα η απόκριση με τον ιδανικό εξομοιωτή αδράνειας και με κόκκινο και μαύρο χρώμα η απόκριση όταν έχει εφαρμοστεί στο μοντέλο της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα ή της ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης αντίστοιχα. (Σχήμα 4.35).



Σχ. 4.35 Σύγκριση μεταβολή συχνότητας για διαφορετικά μοντέλα A/Γ – μία βαθμίδα

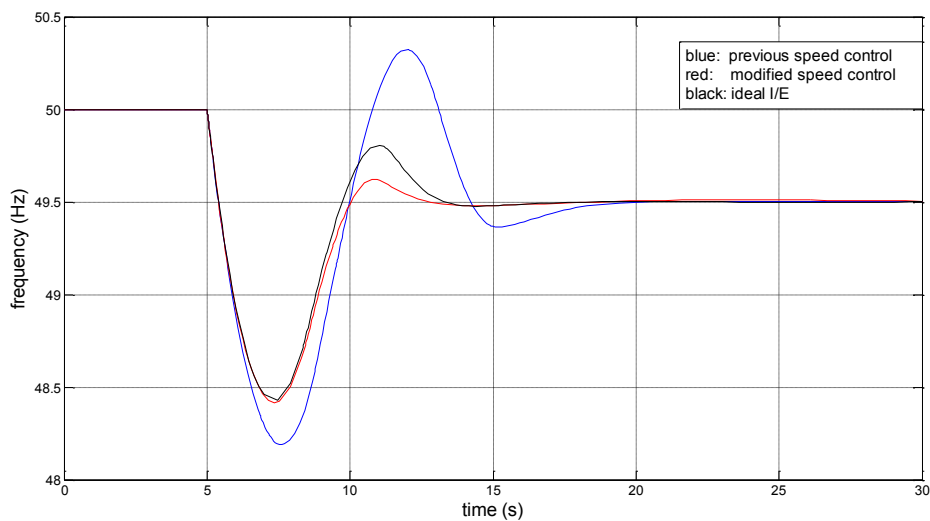
Σε περίπτωση που ο εξομοιωτής αδράνειας έχει εφαρμοστεί σε κάποιο από τα δύο μοντέλα ανεμογεννητριών, το αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται είναι παρόμοιο. Ωστόσο, παρατηρείται σημαντική διαφορά με τον ιδανικό εξομοιωτή αδράνειας, κάτι που οφείλεται στον περιοριστή ρυθμού στην αύξηση της έγχυσης ενεργού ισχύος. Χαλαρώνοντας μάλιστα το όριο του περιοριστή ρυθμού του εξομοιωτή αδράνειας, είναι δυνατόν να προσεγγιστεί ακόμα περισσότερο η απόκριση του ιδανικού εξομοιωτή αδράνειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.36 για μέγιστο ρυθμό 0,2αμ/s. Υπενθυμίζεται ότι τα όρια έχουν ληφθεί από την αντίστοιχη μοντελοποίηση για το μοντέλο διπλής τροφοδότησης 1.5MW της GE, όπως μοντελοποιήθηκε στο [22]. Έτσι, είναι δυνατόν τα αντίστοιχα όρια για κάποιο άλλο μοντέλο ανεμογεννήτριας να έχουν διαφορετικές τιμές.



**Σχ. 4.36** Σύγκριση μεταβολής συχνότητας για διαφορετικά μοντέλα  $A/\Gamma$  και χαλαρότερο ρυθμό περιοριστή στον  $E/A$  – μία βαθμίδα

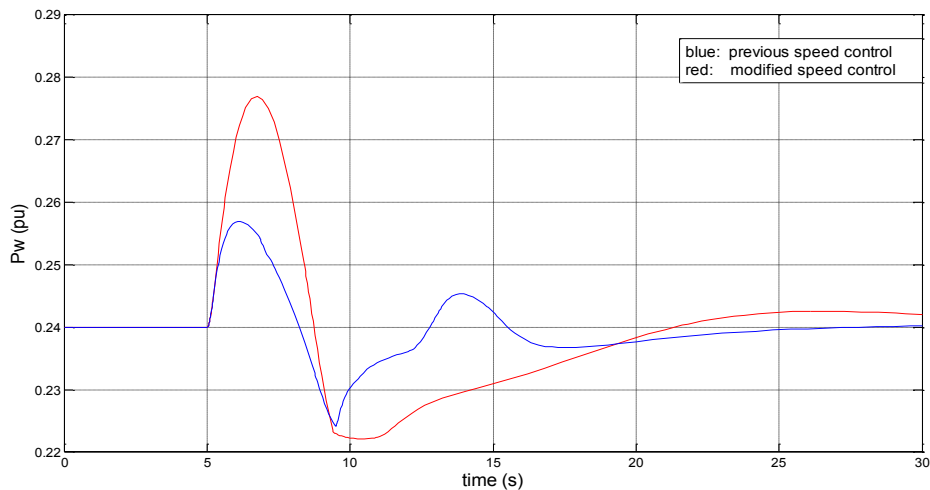
Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, σχεδιάζονται οι αποκρίσεις των ίδιων μεγεθών με την τροποποίηση του ελέγχου στροφών για το σύστημα με ατμοστρόβιλο τριών βαθμίδων.

Όσον αφορά τη συχνότητα (Σχήμα 4.37), η βελτίωση των χαρακτηριστικών της είναι ιδιαίτερα σημαντική. Εκτός από μικρότερη μεταβατική βύθιση (λίγο κάτω από τα 48.5Hz), παρατηρείται μικρότερη υπερακόντιση κατά την επαναφορά της και γενικά πιο γρήγορη απόκριση. Μάλιστα, η απόκριση προσεγγίζει ικανοποιητικά την απόκριση που έχει επιτευχθεί με τη χρήση του ιδανικού εξομοιωτή αδράνειας, ενώ παρουσιάζει μικρότερη υπερακόντιση. Η μικρότερη υπερακόντιση οφείλεται στη μείωση της ενεργού ισχύος της ανεμογεννήτριας εκείνο το χρονικό διάστημα.



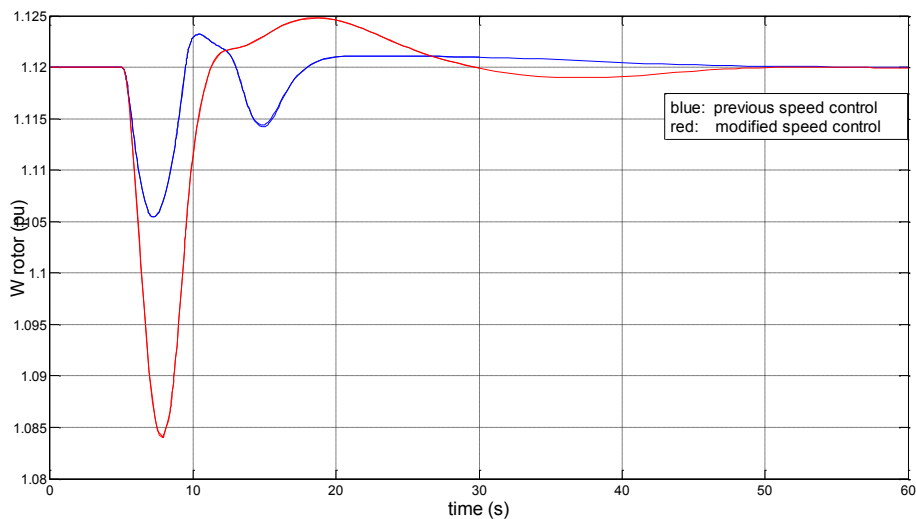
**Σχήμα 4.37** Συχνότητα συστήματος μετά από τροποποίηση του ελέγχου στροφών – τρεις βαθμίδες

Από την απόκριση της ενεργού ισχύος της ανεμογεννήτριας (Σχήμα 4.38), εξάγονται παρόμοια συμπεράσματα με το σύστημα με ατμοστρόβιλο μιας βαθμίδας. Η έγχυση ισχύος είναι πιο μεγάλη και διαρκεί για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η βύθιση της ισχύος αμέσως μετά την μεταβατική αύξησή της είναι λίγο μεγαλύτερη απ' ό,τι αρχικά, αλλά συμβαίνει λίγο πριν τα 10s που όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.37, η συχνότητα είναι ήδη στο τελευταίο στάδιο της επαναφοράς της. Τέλος, ακολουθεί μια αργή ταλάντωση της ισχύος γύρω από την αρχική της τιμή με μικρό πλάτος μέχρι την τελική σταθεροποίησή της.



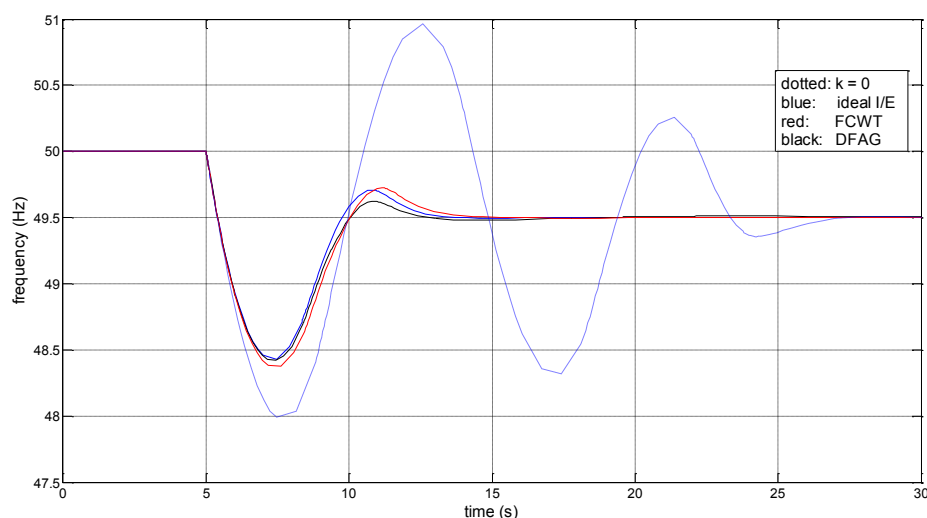
**Σχήμα 4.38** Ενεργός ισχύς ΑΓΔΤ μετά από τροποποίηση του ελέγχου στροφών τρεις βαθμίδες

Τέλος, η ταχύτητα του δρομέα (Σχήμα 4.39) επιβραδύνεται περισσότερο όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της μεγαλύτερης παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, με τη μέγιστη βύθιση να μην ξεπερνάει το 4%. Τη μεταβατική βύθιση διαδέχεται μια αργή ταλάντωση της ταχύτητας περιστροφής γύρω από την αρχική τιμή της (1,12αμ), με το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης, ωστόσο, να μην ξεπερνάει το 0,5%. Η ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας σταθεροποιείται τελικά στην αρχική της τιμή και συνεπώς, επανέρχεται σε στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος λίγο πριν τα 50s.



**Σχήμα 4.39** Ταχύτητα περιστροφής δρομέα ΑΓΔΤ μετά από τροποποίηση του ελέγχου στροφών – τρεις βαθμίδες

Στο Σχήμα 4.40 σχεδιάζεται η μεταβολή της συχνότητας και για τα δύο μοντέλα ανεμογεννητριών που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 και γίνεται σύγκριση με το αποτέλεσμα του ιδανικού εξομοιωτή αδράνειας.



**Σχ. 4.40** Σύγκριση μεταβολή συχνότητας για διαφορετικά μοντέλα ΑΓ – τρεις βαθμίδες

Αντίθετα με το σύστημα μίας βαθμίδας, η απόκριση του ιδανικού εξομοιωτή αδράνειας προσεγγίζεται ικανοποιητικά και από τα δύο μοντέλα ανεμογεννητριών με πολύ μικρές αποκλίσεις και δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τον περιοριστή ρυθμού.

Συμπερασματικά, στην περίπτωση του συγκεκριμένου μοντέλου ΑΓΔΤ είναι απαραίτητη η τροποποίηση του ελέγχου στροφών καθώς με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η αναίρεση της αδρανειακής απόκρισης της ανεμογεννήτριας και το αποτέλεσμα βελτιώνεται σημαντικά.

#### 4.4.4. Επίδραση ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων στην αδρανειακή απόκριση της ΑΓΔΤ

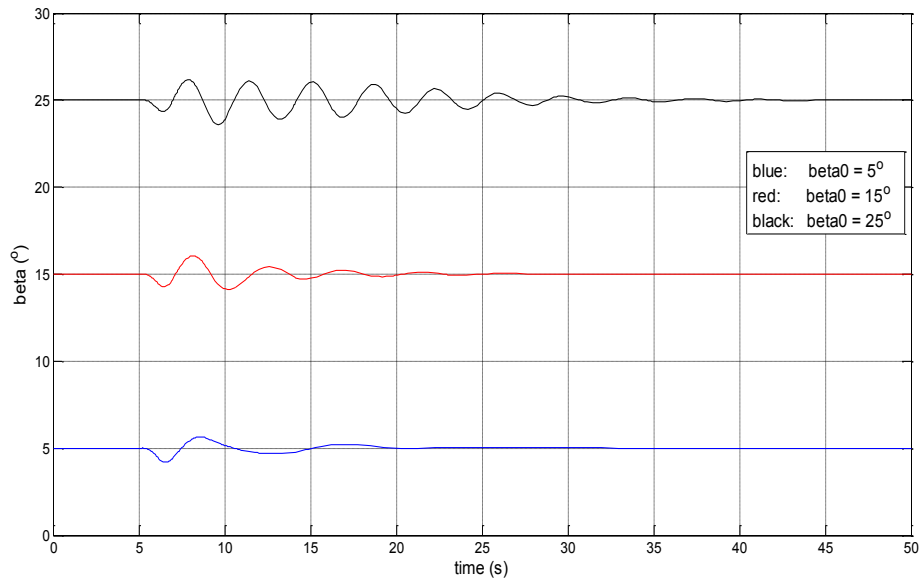
Η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας θεωρείται και σε αυτή την περίπτωση ότι είναι ίση με το 40% του αρχικού ηλεκτρικού φορτίου. Συνεπώς, η κατανομή της παραγωγής πριν τη διαταραχή είναι όπως στον Πίνακα 4.7.

Αρχικά εξετάζεται η επίδραση του ελέγχου πτερυγίων στο σύστημα με ατμοστρόβιλο μίας βαθμίδας. Για τις παραμέτρους του εξομοιωτή αδράνειας επιλέγονται οι τιμές που προτείνονται για την ΑΓΔΤ στον Πίνακα 4.8.

Όσον αφορά τις παραμέτρους του ελέγχου στροφών επιλέγονται οι τιμές του Πίνακα 4.10 που αντιστοιχούν σε  $T_w = 0,2s$ .

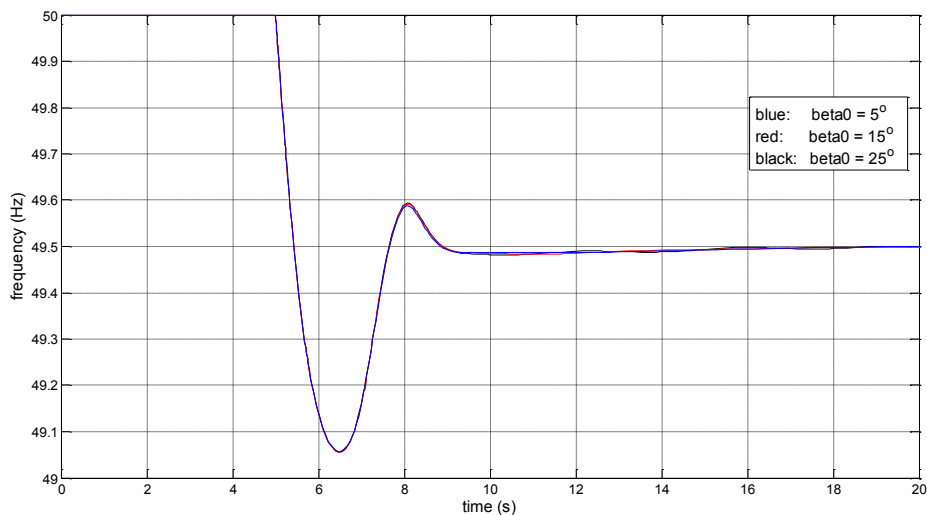
Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια με αυτήν που ακολουθήθηκε για την ΑΓΠΜ. Προσομοιώνονται δηλαδή τρία διαφορετικά σημεία λειτουργίας που αντιστοιχούν σε διαφορετική αρχική ταχύτητα ανέμου και σε διαφορετική αρχική γωνία  $\beta$ . Σε κάθε περίπτωση παρατίθενται οι αποκρίσεις των διαφόρων μεταβλητών της ΑΓΔΤ. Στο Σχήμα 4.41 σχεδιάζεται αρχικά η απόκριση της γωνίας  $\beta$  για

διαφορετική αρχική τιμή κάθε φορά. Με μπλε χρώμα σχεδιάζεται η απόκριση για γωνία  $\beta = 5^\circ$ , με κόκκινο για  $\beta = 15^\circ$  και με μαύρο για  $\beta = 25^\circ$ :



**Σχ. 4.41** Μεταβολή γωνίας  $\beta$  για διαφορετικά αρχικά σημεία λειτουργίας – Σύστημα 1 βαθμίδας

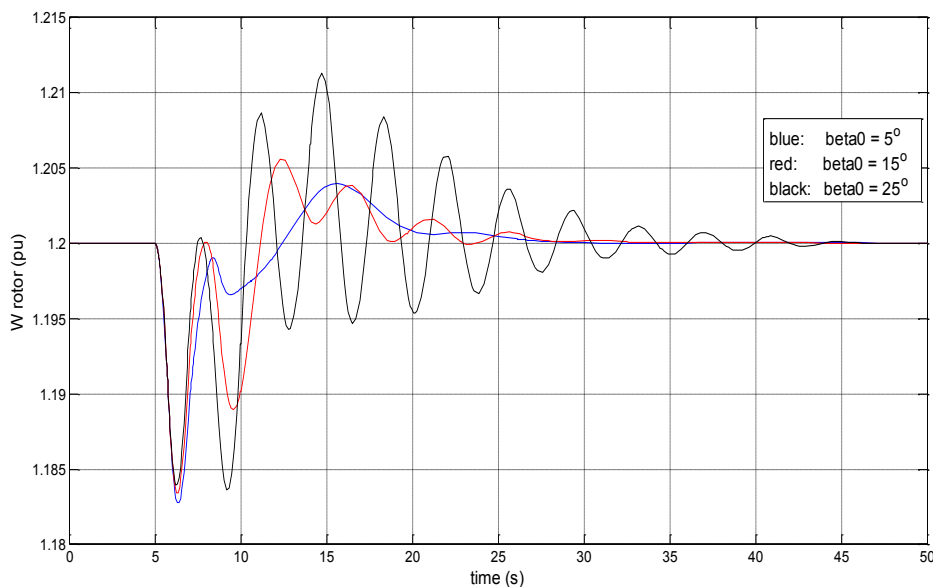
Σε αντίθεση με το μοντέλο ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα, η λειτουργία υπό μεγαλύτερη αρχική γωνία πτερυγίων οδηγεί στην εμφάνιση πιο έντονων ταλαντώσεων με μικρή απόσβεση. Ωστόσο, αυτές οι ταλαντώσεις δεν παρατηρούνται στη συχνότητα, όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.42, στο οποίο η γραφική παράσταση της συχνότητας είναι σχεδόν πανομοιότυπη για όλα τα αρχικά σημεία λειτουργίας.



**Σχ. 4.42** Συχνότητα συστήματος για διαφορετική αρχική γωνία  $\beta$  – Σύστημα 1 βαθμίδας

Αντιθέτως, οι ταλαντώσεις της γωνίας των πτερυγίων επηρεάζουν ιδιαίτερα την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα που παρατίθεται στο Σχήμα 4.43. Για μικρή γωνία δεν προκαλείται ιδιαίτερο πρόβλημα στην ταχύτητα της ανεμογεννήτριας. Ωστόσο, για λειτουργία υπό μεγαλύτερη γωνία πτερυγίων, η συχνότητα και το πλάτος των

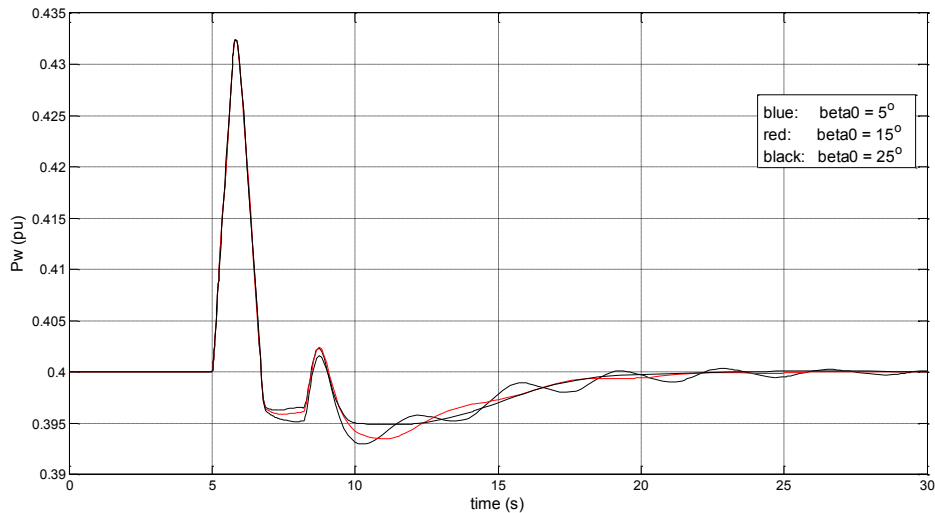
ταλαντώσεων αυξάνονται, ενώ η απόσβεσή τους καθίσταται αρκετά μικρή οδηγώντας σε μη αποδεκτή απόκριση για σημείο λειτουργίας με  $\beta_o = 25^\circ$  (μαύρο χρώμα στο Σχήμα 4.43). Επιπλέον, η αρχική επιβράδυνση δεν μειώνεται σημαντικά καθώς, ο έλεγχος γωνίας πτερυγίων δεν προλαβαίνει να ανταποκριθεί στη γρήγορη επιβράδυνση που προκαλείται λόγω της επιλογής μικρής τιμής για τη χρονική σταθερά του εξομοιωτή αδράνειας ( $T_w = 0,2s$ ). Αντιθέτως, προκαλείται και μια δεύτερη σημαντική επιβράδυνση λίγο πριν τα 10s. Τέλος, η μέγιστη υπερτάχυνση του δρομέα είναι λίγο μεγαλύτερη από 1%.



**Σχ. 4.43** Ταχύτητα περιστροφής δρομέα για διαφορετική αρχική γωνία  $\beta$  – Σύστημα 1 βαθμίδας

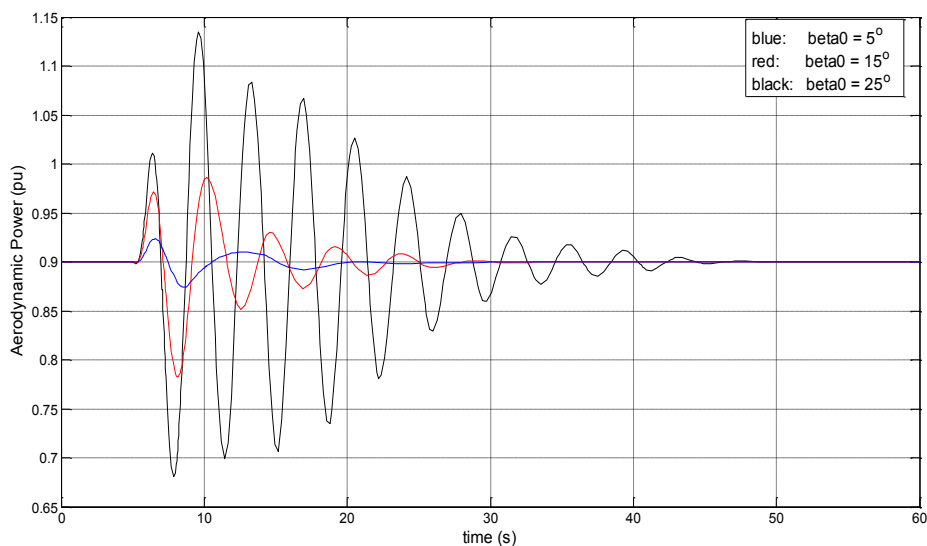
Οι ταλαντώσεις της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, δεν παρατηρούνται στη συχνότητα του συστήματος λόγω του τροποποιημένου ελέγχου στροφών που υλοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Συγκεκριμένα, η επιβράδυνση του ελέγχου στροφών συνεισφέρει ώστε οι ταλαντώσεις της ταχύτητας περιστροφής να μην «περνάνε» στην ενεργό ισχύ της ανεμογεννήτριας. Για του λόγου το αληθές παρατίθεται στο Σχήμα 4.44 η ενεργός ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας. Παρατηρείται μια μικρή ταλάντωση για μεγαλύτερη αρχική γωνία  $\beta$  στις αποκρίσεις με κόκκινο και μαύρο χρώμα ( $\beta = 15^\circ$  και  $25^\circ$  αντίστοιχα), η οποία ωστόσο είναι μικρού πλάτους και συμβαίνει μετά τα 10s που η συχνότητα έχει σταθεροποιηθεί στην τελική τιμή της. Ακόμη, αντίθετα με το μοντέλο ΑΓΠΜ της προηγούμενης ενότητας, η αύξηση της ισχύος δεν περιορίζεται από το μέγιστο δυνατό ρεύμα που μπορεί να εγχύσει η ανεμογεννήτρια. Αυτό δεν συμβαίνει γιατί ο περιορισμός του μέγιστου ενεργού ρεύματος για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ίσος με 10%.





**Σχ. 4.44** Ενεργός ισχύς εξόδου ΑΓΔΤ για διαφορετική αρχική γωνία  $\beta$  – Σύστημα 1 βαθμίδας

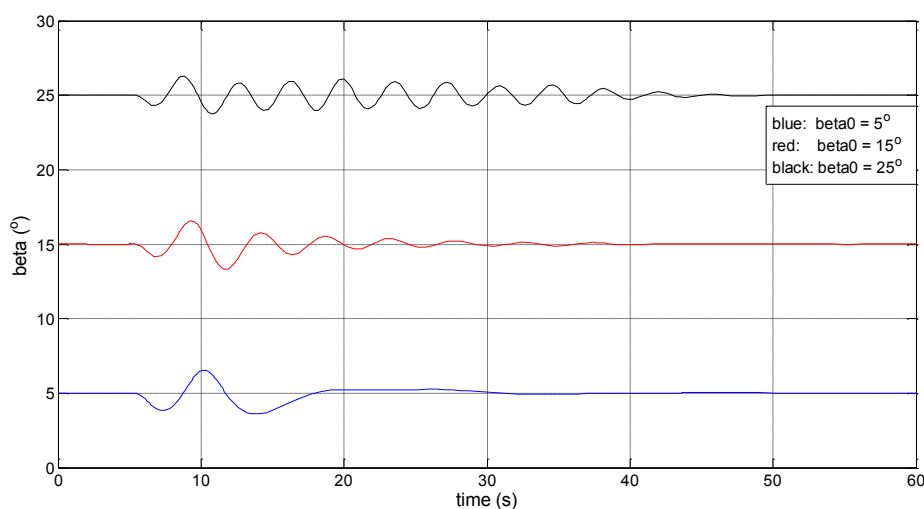
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβολή της αεροδυναμικής ισχύος κατά τη διάρκεια της αδρανειακής απόκρισης. Όπως περιγράφηκε στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, στη συγκεκριμένη μοντελοποίηση χρησιμοποιείται ο προσεγγιστικός υπολογισμός της μηχανικής ισχύος για μεταβολή της γωνίας  $\beta$  των πτερυγίων (Σχήμα 2.18 και σχέση 2.31). Η μεταβολή της μηχανικής ισχύος για διαφορετικά σημεία λειτουργίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.45 (αμ στη βάση ισχύος της ανεμογεννήτριας  $S_{nom}$ ). Όπως είναι αναμενόμενο, η αεροδυναμική ισχύς παρακολουθεί με διαφορά φάσης 180<sup>ο</sup> τη μεταβολή της γωνίας  $\beta$ .



**Σχ. 4.45** Αεροδυναμική ισχύς ΑΓΔΤ για διαφορετικά αρχικά σημεία λειτουργίας – Σύστημα 1 βαθμίδας

Διατηρώντας την ίδια κατανομή παραγωγής (Πίνακας 4.7) για το σύστημα με τον ατμοστρόβιλο τριών βαθμίδων, προσομοιώνεται η επίδραση του εξομοιωτή αδράνειας στα διάφορα μεγέθη της ανεμογεννήτριας, όταν λειτουργεί με τη γωνία πτερυγίων να περιορίζει την ισχύ στην ονομαστική της τιμή. Εξετάζονται και σε αυτή την περίπτωση τα ίδια αρχικά σημεία λειτουργίας, δηλαδή  $\beta = 5^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ . Για τις παραμέτρους του εξομοιωτή αδράνειας και του ελέγχου στροφών έχουν επιλεγεί οι προτεινόμενες τιμές για το σύστημα με ατμοστρόβιλο τριών βαθμίδων των Πινάκων 4.9 και 4.10 αντίστοιχα.

Όπως και για το σύστημα με ατμοστρόβιλο μίας βαθμίδας, δεν αναμένεται κάποια σημαντική διαφορά στην απόκριση της συχνότητας του συστήματος, καθώς οι ταλαντώσεις της ταχύτητας περιστροφής εξομαλύνονται ικανοποιητικά από τον έλεγχο στροφών της ανεμογεννήτριας και δεν δημιουργούν αντίστοιχες ταλαντώσεις στην ενεργό ισχύ. Γι' αυτό το λόγο παραλείπονται προς χάριν οικονομίας τα αντίστοιχα διαγράμματα της συχνότητας και της ενεργού ισχύος της ανεμογεννήτριας και η ανάλυση εστιάζεται στην απόκριση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Στο Σχήμα 4.46 παρατίθεται αρχικά η μεταβολή της γωνία  $\beta$  για διαφορετικά αρχικά σημεία λειτουργίας, ενώ στο Σχήμα 4.47 απεικονίζεται η απόκριση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα.

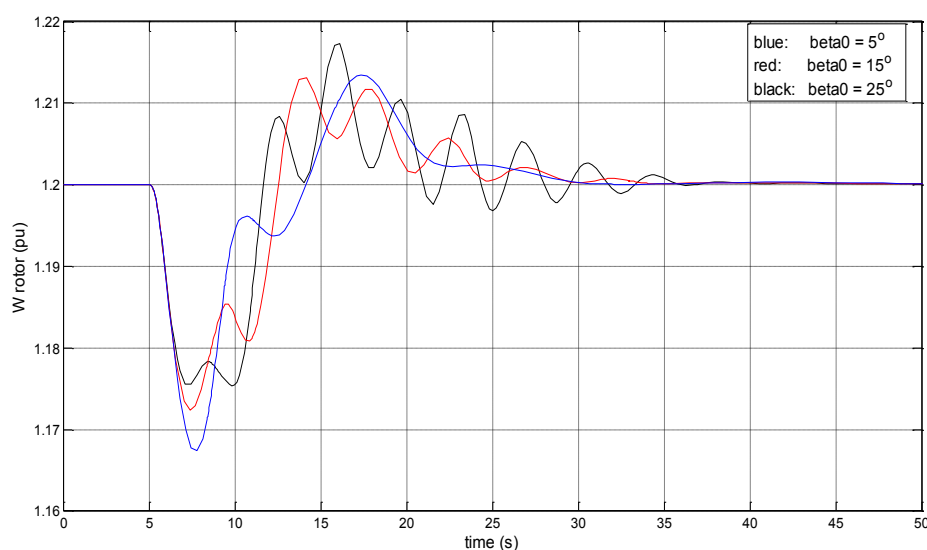


**Σχ. 4.46** Μεταβολή γωνίας  $\beta$  για διαφορετικά αρχικά σημεία λειτουργίας – Σύστημα 3 βαθμίδων

Η απόκριση της γωνίας  $\beta$  έχει όμοια χαρακτηριστικά και στα δύο συστήματα με την ταλάντωση για  $\beta = 25^\circ$  να αποσβεννύεται λίγο πριν τα 40s και στις δύο περιπτώσεις. Ωστόσο, ειδικά στις μικρότερες γωνίες ( $\beta = 5^\circ$  και  $\beta = 15^\circ$ ), παρατηρείται μεγαλύτερο εύρος ταλάντωσης από ότι για τις αντίστοιχες αποκρίσεις του Σχήματος 4.41.

Όσον αφορά την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, η επιλογή μεγαλύτερης χρονικής σταθεράς αδρανειακού εξομοιωτή ( $T_w = 4s$ ) οδηγεί σε πιο αργή επιβράδυνση. Έτσι, σε αντίθεση με το σύστημα με τον ατμοστρόβιλο μίας βαθμίδας, η αρχική μείωση της γωνίας  $\beta$  γίνεται αντιληπτή με τη μείωση της μέγιστης

επιβράδυνσης του δρομέα. Σε σύγκριση με το Σχήμα 4.43, παρατηρείται λίγο πιο γρήγορη απόσβεση των ταλαντώσεων, αλλά η μέγιστη υπερτάχυνση είναι λίγο μεγαλύτερη και περίπου ίση με 1,7%.



**Σχ. 4.47** Ταχύτητα περιστροφής δρομέα ΑΓΔΤ για διαφορετική αρχική γωνία  $\beta$  – Σύστημα 3 βαθμίδων

Συνοψίζοντας, και για τα δύο συστήματα παρατηρήθηκε εμφάνιση όλο και πιο έντονων ταλαντώσεων για αρχική λειτουργία υπό μεγαλύτερη γωνία βήματος πτερυγίων. Οι ταλαντώσεις παρατηρούνται στην ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και στην απόκριση της γωνίας των πτερυγίων, αλλά δεν επηρεάζουν την απόκριση της συχνότητας καθώς δεν «περνούν» στην παραγόμενη ενεργό ισχύ της ανεμογεννήτριας. Ωστόσο, η απόκριση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της ΑΓΔΤ σε σημείο λειτουργίας με μεγάλη γωνία πτερυγίων θεωρείται μη αποδεκτή.

Για το λόγο αυτό τροποποιείται ο έλεγχος της γωνίας βήματος ώστε να εξομαλυνθεί η απόκριση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Θα γίνει πρώτα ανάλυση της ιδιοτιμής που σχετίζεται με τη ρύθμιση της γωνίας πτερυγίων. Το σημείο λειτουργίας για το οποίο θα γίνει η παρακάτω ανάλυση είναι για αρχική γωνία  $\beta = 25^\circ$  για την οποία εντοπίστηκε το μεγαλύτερο πρόβλημα.

Στον Πίνακα 4.14 εξετάζεται η τιμή της ιδιοτιμής ρύθμισης γωνίας πτερυγίων για τις αρχικές και τελικές τιμές των παραμέτρων του ελέγχου στροφών (Πίνακας 4.11) με απενεργοποιημένο τον εξομοιωτή αδράνειας ( $k = 0$ ). Παρατηρείται ότι η συγκεκριμένη τροποποίηση οδήγησε σε σημαντική μείωση της απόσβεσης της ιδιοτιμής, κάτι που παρατηρήθηκε και στην ανάλυση που προηγήθηκε.

Οι μεταβλητές κατάστασης που εμφανίζονται στον πίνακα είναι οι εξής:

- $\omega_r$ : Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της ανεμογεννήτριας
- $\omega_l$ : Η ταχύτητα περιστροφής του ανεμοκινητήρα
- $\beta$ : Γωνία των πτερυγίων
- $I_p$ : Ολοκληρωματικό μέρος PI ελεγκτή πτερυγίων
- $\Delta\theta_m$ : Γωνιακή παραμόρφωση άξονα

**Πίνακας 4.14** Ιδιοτιμή βρόχου ρύθμισης γωνίας  $\beta$  για αρχικές και τελικές τιμές παραμέτρων ελέγχου στροφών

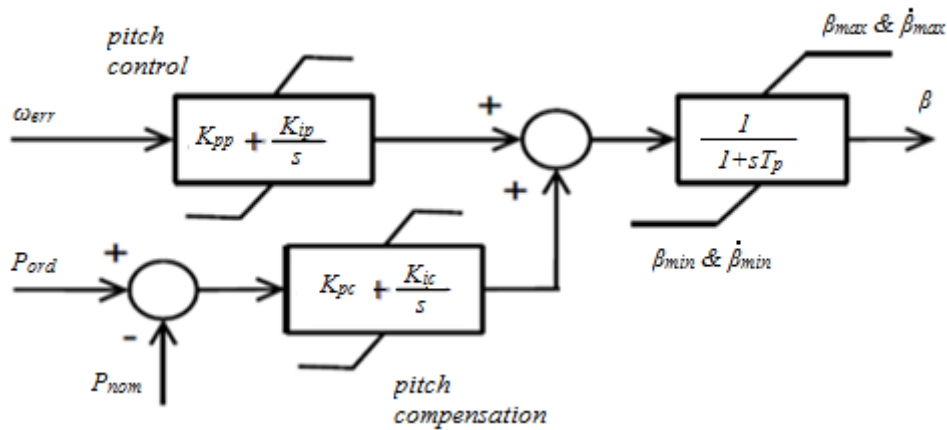
Παράμετροι ελέγχου στροφών	Ιδιοτιμή	Λόγος Απόσβεσης	Συντ. Συμ.
Αρχικές	$-0,2994 \pm j1,498$	0,1961	$\omega_r$ 0,55 $\beta$ 0,46 $\omega_l$ 1,00 $I_p$ 0,10 $I_{pc}$ 0,54
Τελικές	$-0,02033 \pm j1,752$	0.0116	$\omega_r$ 1,00 $\beta$ 0,52 $\omega_l$ 0,98 $I_p$ 0,11 $\Delta\theta_m$ 0,11

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 4.15 εξετάζεται η μεταβολή που επιφέρει στη συγκεκριμένη ιδιοτιμή η ενεργοποίηση του εξομοιωτή αδράνειας στα δύο συστήματα διατηρώντας τις τελικές τιμές των παραμέτρων του ελέγχου στροφών. Αυτό που παρατηρείται είναι μόνο μια μικρή επίδραση της ενεργοποίησης του εξομοιωτή αδράνειας. Συγκεκριμένα, στο πρώτο σύστημα παρατηρείται μικρή μείωση της απόσβεσης, ενώ στο δεύτερο μια μικρή μόνο βελτίωση. Και στις δύο περιπτώσεις πάντως, η απόσβεση του ρυθμού εξακολουθεί να είναι πολύ μικρή.

**Πίνακας 4.15** Ιδιοτιμή βρόχου ρύθμισης γωνίας  $\beta$  για ενεργό εξομοιωτή αδράνειας

Σύστημα	Ιδιοτιμή	$T_w$ (s)	k	Λόγος Απόσβεσης	Συντ. Συμ.
A/Σ μίας βαθμίδας	$-0,01601 \pm j1,749$	0,2	30	0,009156	$\omega_r$ 1,00 $\beta$ 0,52 $\omega_l$ 0,99 $I_p$ 0,11 $\Delta\theta_m$ 0,11
A/Σ τριών βαθμίδων	$-0,02308 \pm j1,749$	4	4	0,01319	$\omega_r$ 1,00 $\beta$ 0,52 $\omega_l$ 0,99 $I_p$ 0,11 $\Delta\theta_m$ 0,11

Για τη μείωση των ταλαντώσεων και την ταχύτερη απόσβεσή τους στην περίπτωση που είναι ενεργός ο εξομοιωτής αδράνειας εξετάζεται η τροποποίηση του ελέγχου της γωνίας βήματος. Αρχικά η τροποποίηση θα γίνει στο σύστημα με αμοστρόβιλο μίας βαθμίδας. Σε αυτό το σημείο παρατίθεται ξανά προς χάρην ευκολίας το διάγραμμα βαθμίδων του ελεγκτή γωνίας βήματος της ΑΓΔΤ:



Σχ. 4.48 Έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων

Οι αρχικές τιμές των παραμέτρων που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.48 παρατίθενται στον Πίνακα 4.16:

Πίνακας 4.16 Αρχικές τιμές παραμέτρων ελέγχου γωνίας βήματος

Παράμετρος	Αρχική Τιμή
$K_{pp}$	150
$K_{ip}$	25
$K_{pc}$	3
$K_{ic}$	30
$T_p$ (s)	0,3

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να επισημανθεί η ιδιαιτερότητα που παρουσιάζεται όταν είναι ενεργοί και ο εξομοιωτής αδράνειας και ο έλεγχος γωνίας πτερυγίων. Κατά τη διάρκεια μια διαταραχής στη συχνότητα, ο εξομοιωτής αδράνειας εκμεταλλεύεται την αποθηκευμένη κινητική ενέργεια του δρομέα και αυξάνει την εντολή για έγχυση ενεργού ισχύος στο δίκτυο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι δύο PI ελεγκτές να βλέπουν διαφορετικό σφάλμα. Συγκεκριμένα, ο πρώτος PI ελεγκτής τείνει να μειώσει τη γωνία πτερυγίων, ενώ ο PI ελεγκτής δίνει εντολή για αύξηση της γωνίας  $\beta$ .

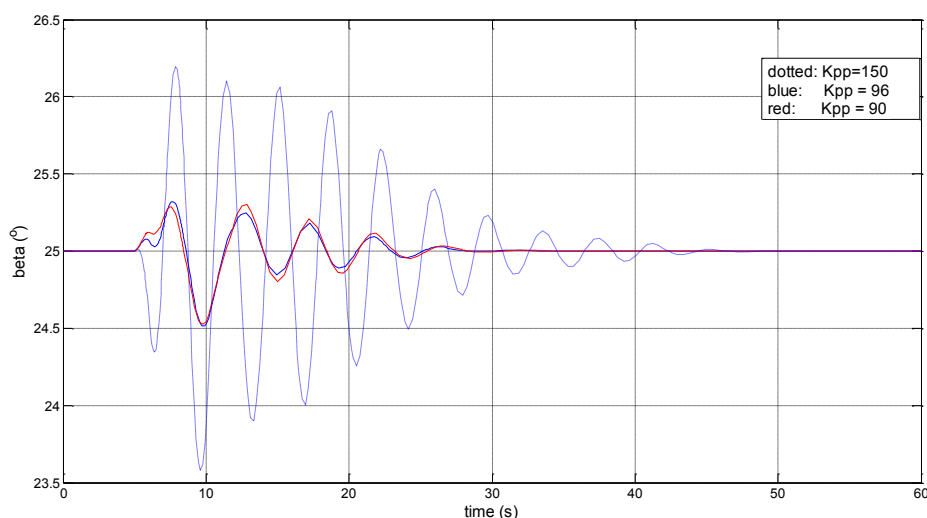
Στη συνέχεια, θα γίνει προσπάθεια αύξησης της απόσβεσης της ιδιοτιμής ρύθμισης της γωνίας των πτερυγίων μειώνοντας τα κέρδη του πρώτου PI ελεγκτή. Με αυτόν τον τρόπο ο έλεγχος γίνεται πιο αργός και η μείωση της γωνίας  $\beta$  πιο μικρή. Ζητούμενο είναι να επιτευχθεί ένας σχετικά ανεκτός λόγος απόσβεσης κοντά στο 10% χωρίς να καταστεί υπερβολικά αργός ο έλεγχος της γωνίας πτερυγίων.

Στον Πίνακα 4.17 παρατίθεται η μεταβολή της ιδιοτιμής για μείωση των κερδών  $K_{pp}$  και  $K_{ip}$  διατηρώντας σταθερό και ίσο με 6 το λόγο  $K_{pp}/K_{ip}$  και σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους. Παρατηρείται ότι επιτυγχάνεται ένας λόγος απόσβεσης μεγαλύτερος του 10% για τις τιμές κερδών των δύο τελευταίων σειρών.

**Πίνακας 4.17** Μεταβολή ιδιοτιμής ρύθμισης γωνίας πτερυγίων

Τιμές παραμέτρων		Ιδιοτιμή	Λόγος απόσβεσης
$K_{pp}$	$K_{ip}$		
150	25	$-0,01601 \pm j1,749$	0,009156
120	20	$-0,08426 \pm j1,581$	0,05323
105	17,5	$-0,12310 \pm j1,483$	0,08271
<b>96</b>	<b>16,5</b>	<b><math>-0,14880 \pm j1,419</math></b>	<b>0,1043</b>
<b>90</b>	<b>15</b>	<b><math>-0,16730 \pm j1,374</math></b>	<b>0,1209</b>

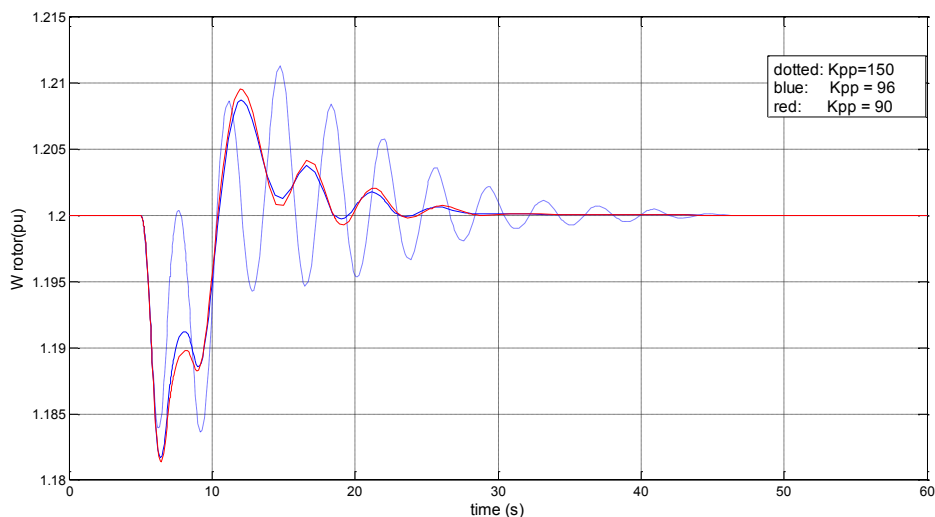
Η απόκριση της γωνίας  $\beta$  για τις παραμέτρους των δύο τελευταίων σειρών του Πίνακα 4.17 (έντονη γραμματοσειρά) σχεδιάζεται στο Σχήμα 4.49. Με εστιγμένη γραμμή σχεδιάζεται η απόκριση για τις αρχικές τιμές των παραμέτρων (πρώτη σειρά Πίνακα 4.17):



**Σχ. 4.49** Απόκριση γωνίας πτερυγίων για διαφορετικές τιμές κερδών  $K_{pp}$  και  $K_{ip}$  (σταθερός λόγος  $K_{pp}/K_{ip}$ ) – μία βαθμίδα

Όπως αναμενόταν, επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση της απόκρισης. Πιο συγκεκριμένα, επιτυγχάνεται απόσβεση της ταλάντωσης πριν τα 30s και μείωση του εύρους της ταλάντωσης της γωνίας σε λιγότερο από  $1^\circ$  από  $2,5^\circ$  που ήταν αρχικά.

Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα παρατίθεται στο Σχήμα 4.50. Παρατηρείται λίγο μεγαλύτερη επιβράδυνση του δρομέα κάτι που δικαιολογείται και από τη μικρή αύξηση της γωνίας  $\beta$  αμέσως μετά τη διαταραχή. Ωστόσο, μειώνεται η μέγιστη υπερτάχυνση του δρομέα, ενώ η ταλάντωση της ταχύτητας αποσβεννύεται σημαντικά πιο γρήγορα.



**Σχ. 4.50** Ταχύτητα περιστροφής δρομέα για διαφορετικές τιμές κερδών  $K_{pp}$  και  $K_{ip}$  (σταθερός λόγος  $K_{pp}/K_{ip}$ ) – μία βαθμίδα

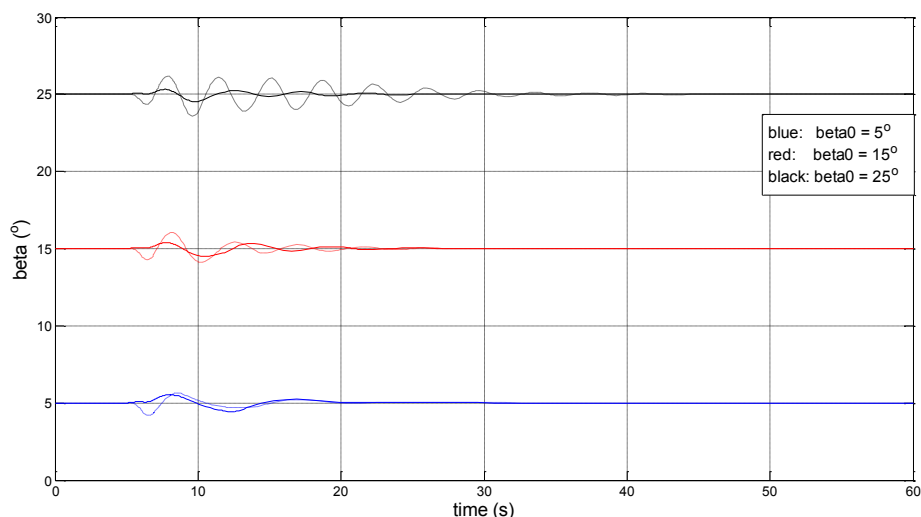
Ανάμεσα στις τιμές των παραμέτρων του ελέγχου γωνίας πτερυγίων για τα οποία έγινε η προσομοίωση, παρατηρείται μικρή διαφορά για μεταβολή του  $K_{pp}$  από 96 σε 90 (και αντίστοιχα για το  $K_{ip}$  από 16,5 σε 15), και γι' αυτό επιλέχθηκε η μεγαλύτερη τιμή.

**Πίνακας 4.18** Αρχικές και τελικές τιμές παραμέτρων ελέγχου γωνίας βήματος – Σύστημα μίας βαθμίδας

Παράμετρος	Αρχική Τιμή	Τελική τιμή
$K_{pp}$	150	96
$K_{ip}$	25	16,5
$K_{pc}$	3	3
$K_{ic}$	30	30
$T_p$ (s)	0,3	0,3

Στο Σχήμα 4.51 παρατίθεται με διακεκομμένη και συμπαγή γραμμή η αρχική και τελική απόκριση της γωνίας  $\beta$  και για τα τρία σημεία λειτουργίας. Για μεγάλες γωνίες παρατηρείται σημαντική βελτίωση της απόκρισης και μείωσης των ταλαντώσεων, ενώ για μικρότερες γωνίες η διαφορά μεταξύ αρχικής και τελικής απόκρισης δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Συνοψίζοντας, η τροποποίηση του ελέγχου γωνίας πτερυγίων με αυτό τον τρόπο οδηγεί σε αύξηση της απόσβεσης της ταλάντωσης της γωνίας των πτερυγίων και της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Ακόμη, παρόλο που ο έλεγχος γωνίας βήματος γίνεται πιο αργός με αυτό τον τρόπο, η μέγιστη επιβράδυνση του δρομέα δεν αυξάνεται ιδιαίτερα, ενώ η υπερτάχυνση που παρατηρείται μετά το πέρας της αδρανειακής απόκρισης είναι μικρότερη του 1% και αποσβεννύεται αρκετά γρήγορα.



**Σχ. 4.51** Αρχική και τελική απόκριση γωνίας  $\beta$  για διαφορετικά σημεία λειτουργίας – μία βαθμίδα

Παρόμοια διαδικασία ακολουθείται για το σύστημα με ατμοστρόβιλο τριών βαθμίδων. Υπενθυμίζεται ότι σε αυτή την περίπτωση, η απόσβεση των ταλαντώσεων στην ταχύτητα και τη γωνία πτερυγίων ήταν λίγο πιο γρήγορη και η υπερτάχυνση της ανεμογεννήτριας ήταν λίγο μεγαλύτερη από 1,5%. Ο λόγος  $K_{pp}/K_{ip}$  παραμένει σταθερός και ίσος με 6, ενώ οι τιμές των υπολοίπων παραμέτρων του ελέγχου γωνίας πτερυγίων παραμένουν σταθερές. Για τον εξομοιωτή αδράνειας ισχύουν οι προτεινόμενες τιμές του Πίνακα 4.10.

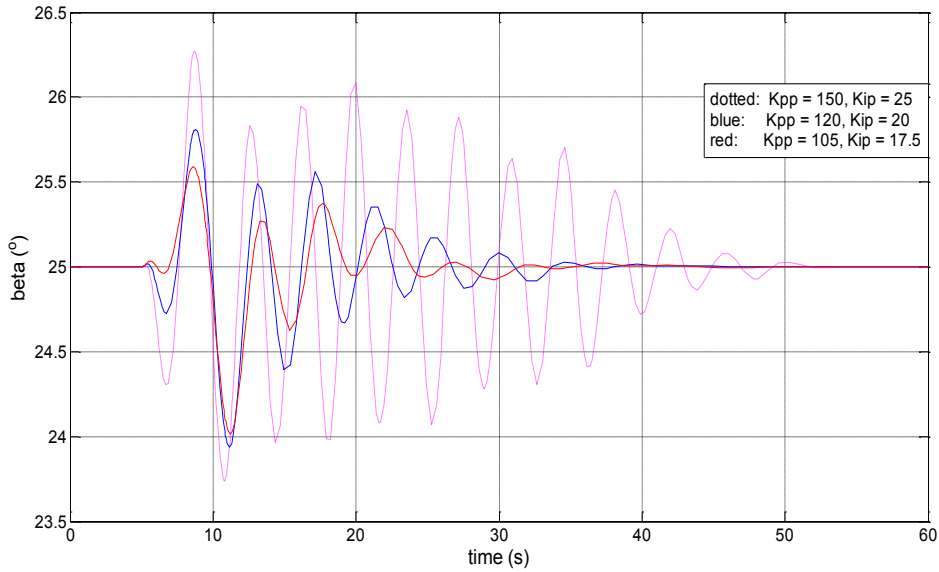
**Πίνακας 4.19** Μεταβολή ιδιοτιμής ρύθμισης γωνίας πτερυγίων – Σύστημα τριών βαθμίδων

Τιμές παραμέτρων		Ιδιοτιμή	Λόγος απόσβεσης
$K_{pp}$	$K_{ip}$		
150	25	$-0,02308 \pm j1,749$	0,01319
<b>120</b>	<b>20</b>	<b><math>-0,09061 \pm j1,579</math></b>	<b>0,05729</b>
<b>105</b>	<b>17,5</b>	<b><math>-0,1282 \pm j1,48</math></b>	<b>0,08631</b>
96	16,5	$-0,1525 \pm j1,414$	0,1072
90	15	$-0,1696 \pm j1,368$	0,1231

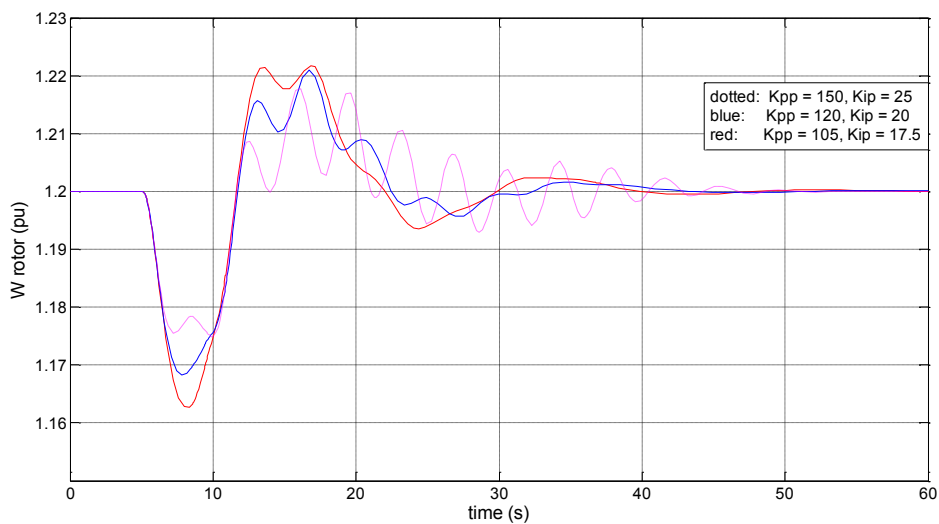
Οι αποκρίσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια αντιστοιχούν στις τιμές παραμέτρων της δεύτερης και τρίτης γραμμής του πίνακα (σημειώνονται με έντονη γραμματοσειρά). Η περαιτέρω μείωση των κερδών αυξάνει λίγο την απόσβεση της ταλάντωσης, αλλά όπως θα δειχθεί από τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, οδηγεί σε αύξηση της υπερτάχυνσης του δρομέα.

Στα Σχήματα 4.52 και 4.53 σχεδιάζεται η μεταβολή της γωνίας των πτερυγίων και της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα αντίστοιχα. Οι παράμετροι του εξομοιωτή αδράνειας



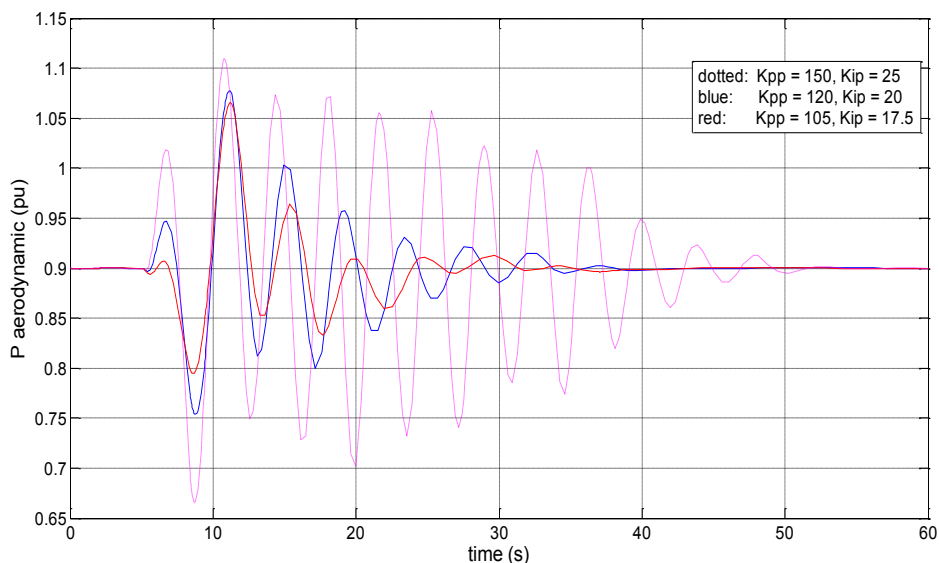


**Σχ. 4.52** Γωνία πτερυγίων για διαφορετικές τιμές κερδών  $K_{pp}$  και  $K_{ip}$  (σταθερός λόγος  $K_{pp}/K_{ip}$ ) – τρεις βαθμίδες



**Σχ. 4.53** Ταχύτητα δρομέα για διαφορετικές τιμές κερδών  $K_{pp}$  και  $K_{ip}$  (σταθερός λόγος  $K_{pp}/K_{ip}$ ) – τρεις βαθμίδες

Όπως γίνεται αντιληπτό, η μείωση των δύο κερδών οδηγεί σε μεγαλύτερη αρχική επιβράδυνση καθώς η αεροδυναμική ισχύς αυξάνεται όλο και λιγότερο κατά τη διάρκεια της αδρανειακής απόκρισης (Σχήμα 4.54). Στην απόκριση που σχεδιάζεται με μπλε συνεχή γραμμή και αντιστοιχεί σε τιμές  $K_{pp} = 120$  και  $K_{ip} = 20$ , η μέγιστη υπερτάχυνση της ανεμογεννήτριας είναι ίση με 2% περίπου και ίδια με την αρχική. Για ακόμα μεγαλύτερη μείωση των κερδών αυξάνεται κι άλλο η υπερτάχυνση. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η απόσβεσή των ταλαντώσεων έχει μικρή διαφορά στις δύο περιπτώσεις.



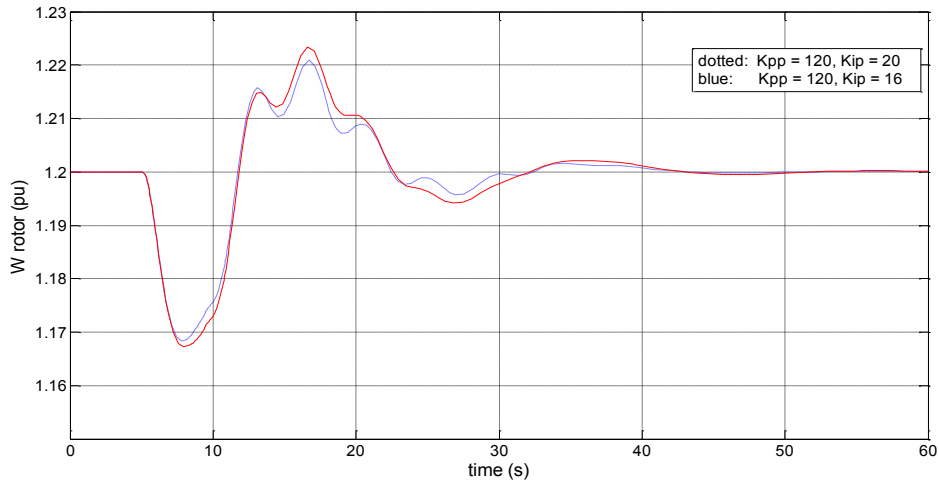
**Σχ. 4.54** Αεροδυναμική ισχύς για διαφορετικές τιμές κερδών  $K_{pp}$  και  $K_{ip}$  (σταθερός λόγος  $K_{pp}/K_{ip}$ ) - τρεις βαθμίδες

Για την περαιτέρω αύξηση της απόσβεσης χωρίς να οδηγηθεί σε υπερτάχυνση η ανεμογεννήτρια εξετάζεται η μείωση μόνο του ολοκληρωτικού κέρδους του ΠΙ ελεγκτή. Στον Πίνακα 4.20 φαίνεται η μεταβολή της ιδιοτιμής βρόχου ρύθμισης γωνίας πτερυγίων για σταδιακή μείωση του αναλογικού κέρδους:

**Πίνακας 4.20** Ιδιοτιμή βρόχου ρύθμισης πτερυγίων για σταθερό  $K_{pp} = 120$  και μείωση  $K_{ip}$

Τιμές παραμέτρων		Ιδιοτιμή	Λόγος απόσβεσης
$K_{pp}$	$K_{ip}$		
120	20	$-0,09061 \pm j1,579$	0,05729
120	18	$-0,0986 \pm j1,582$	0,06222
120	16	$-0,1065 \pm j1,584$	0,06708

Στο Σχήμα 4.55 απεικονίζεται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα για την πρώτη και την τελευταία γραμμή του Πίνακα 4.20. Η μέγιστη επιβράδυνση και υπερτάχυνση του δρομέα είναι περίπου ίδια και στις δύο περιπτώσεις με την δεύτερη τροποποίηση να οδηγεί σε μικρή αύξηση της υπερτάχυνσης. Ωστόσο, επιτυγχάνεται μια μικρή εξομάλυνση των ταλαντώσεων. Καταλήγοντας, μια επιλογή για αυτές τις δύο τιμές οδηγεί σε ανεκτή απόκριση της ταχύτητας περιστροφής.



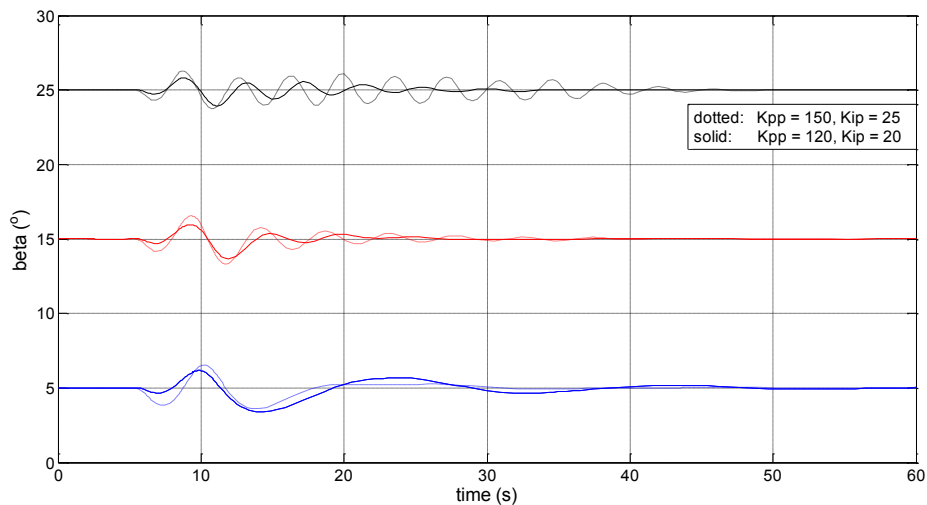
Σχ. 4.55 Ταχύτητα περιστροφής δρομέα για μείωση  $K_{ip}$  με  $K_{pp} = 120$  – τρεις βαθμίδες

Συνεπώς, οι αρχικές και οι προτεινόμενες τελικές τιμές για το συγκεκριμένο σύστημα παρατίθενται στον Πίνακα 4.21:

Πίνακας 4.21 Αρχικές και τελικές τιμές παραμέτρων ελέγχου γωνίας βήματος – Σύστημα τριών βαθμίδων

Παράμετρος	Αρχική Τιμή	Τελική τιμή
$K_{pp}$	150	120
$K_{ip}$	25	16-20
$K_{pc}$	3	3
$K_{ic}$	30	30
$T_p$ (s)	0,3	0,3

Η απόκριση της γωνίας  $\beta$  για όλα τα σημεία λειτουργίας για τις αρχικές και τελικές τιμές του ελέγχου γωνίας πτερυγίων απεικονίζεται στο Σχήμα 4.56. Για το ολοκληρωτικό κέρδος  $K_{ip}$  επιλέγεται η τιμή 20



Σχ. 4.56 Αρχική και τελική απόκριση γωνίας  $\beta$  για διαφορετικά σημεία λειτουργίας – τρεις βαθμίδες

Η απόκριση για αρχικό σημείο λειτουργίας με γωνία  $\beta = 25^\circ$  βελτιώνεται σημαντικά, ενώ για μικρότερες γωνίες η απόκριση δεν αλλάζει σημαντικά. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η συγκεκριμένη τροποποίηση μπορεί να γίνει για όλες τις γωνίες βήματος πτερυγίων όταν ο εξομοιωτής αδράνειας είναι ενεργός, χωρίς να δημιουργείται πρόβλημα στην απόκριση.

## **Κεφάλαιο 5**

### **Εφαρμογή εξομοιωτή αδράνειας στο αυτόνομο σύστημα της Ρόδου**

Στο κεφάλαιο αυτό προσομοιώνεται ο εξομοιωτής αδράνειας στα αιολικά πάρκα του αυτόνομου συστήματος της Ρόδου για ένα σενάριο υψηλής αιολικής διεύθυνσης. Στην ενότητα 5.1 θα δοθούν συνοπτικά τα γενικά δεδομένα του συστήματος και τα χαρακτηριστικά των συνιστωσών του. Επίσης, περιγράφονται τα σενάρια κατανομής παραγωγής που θα προσομοιωθούν.

Στην ενότητα 5.2 γίνεται προσομοίωση του συστήματος της Ρόδου για το πρώτο σενάριο χωρίς τον εξομοιωτή αδράνειας και αναλύεται η συμπεριφορά των διαφόρων μεγεθών δίνοντας έμφαση σε αυτά που αφορούν την απόκριση της συχνότητας. Στην ενότητα 5.3 ενεργοποιείται ο εξομοιωτής αδράνειας στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών του συστήματος και εξετάζεται η επίδρασή του στη συχνότητα και στα υπόλοιπα μεγέθη του συστήματος. Στην ενότητα 5.4 προσομοιώνεται το δεύτερο σενάριο κατανομής παραγωγής για την ίδια διαταραχή και στην ενότητα 5.5 γίνεται σύγκριση μεταξύ διαφόρων επιλογών για τη χρονική σταθερά του εξομοιωτή αδράνειας. Η διαταραχή που λαμβάνει χώρα στο σύστημα και για τα δύο σενάρια είναι η απώλεια της μεγαλύτερης συμβατικής μονάδας παραγωγής. Στην ενότητα 5.6 γίνεται γραμμικοποίηση του συστήματος της Ρόδου για το σημείο ισορροπίας που προκύπτει μετά από τη διαταραχή, και παρουσιάζεται σύντομα πώς μεταβάλλεται η ιδιοτιμή ρύθμισης συχνότητας μετά την εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας.

#### **5.1. Περιγραφή αυτόνομου συστήματος Ρόδου**

Τα βασικά χαρακτηριστικά του αυτόνομου συστήματος της Ρόδου παρατίθενται στον Πίνακα 5.1. Συλλέχθηκαν στα πλαίσια της μελέτης που έγινε στο ερευνητικό έργο [30] για τη Διεύθυνση Διαχείρισης Νησιών της ΔΕΗ Α.Ε.. Τα στοιχεία προέρχονται από τη Μελέτη Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς Νήσων (ΜΑΣΜ-Ν) 2008-2012 για το συγκεκριμένο νησί. Όσον αφορά τις μονάδες ΑΠΕ, περιλαμβάνονται τα υπάρχοντα αιολικά πάρκα, καθώς κι αυτά που έχουν πάρει όρους σύνδεσης και πρόκειται να συνδεθούν. Το σημείο λειτουργίας που παρουσιάζεται και θα εξεταστεί στη συνέχεια αντιστοιχεί στη μέγιστη αιολική διεύθυνση (34%).

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι πίνακες με τα δεδομένα του συστήματος της Ρόδου. Στον Πίνακα 5.2 δίνονται οι πληροφορίες των ζυγών του ΣΗΕ, καθώς και η κωδική τους ονομασία. Στον Πίνακα 5.3 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών ανυψώσεως τάσεως του δικτύου, εκτός των μετασχηματιστών των αιολικών πάρκων, των οποίων τα δεδομένα αναγράφονται στον Πίνακα 5.4. Στη συνέχεια, δίνονται τα στοιχεία των ζυγών φορτίου του συστήματος (Πίνακας 5.6) και των γραμμών μεταφοράς (Πίνακας 5.7).

*Πίνακας 5.1 Βασικά χαρακτηριστικά και σενάρια λειτουργίας ΣΗΕ Ρόδου*

<b>ΣΗΕ Ρόδου</b>	
<b>Μέγιστη εκτιμώμενη ζήτηση (MW)</b>	233,1
<b>Ονομαστική ισχύς συμβατικών μονάδων (MW)</b>	322,9
<b>Ονομαστική ισχύς αιολικών πάρκων</b>	48,8
<b>Φορτίο συστήματος (MW)</b>	83,07
<b>Παραγωγή Αιολικών (MW)</b>	28,24
<b>Παραγωγή Αιολικών (% Εγκ. Ισχύος)</b>	57,9%
<b>Διείσδυση Αιολικών (% Φορτίου Συστήματος)</b>	34%

*Πίνακας 5.2 Κωδική ονομασία και αρίθμηση ζυγών ΣΗΕ Ρόδου*

<b>A/A</b>	<b>Ονομασία</b>	<b>A/A</b>	<b>Ονομασία</b>	<b>A/A</b>	<b>Ονομασία</b>
1	ΣΟΡ (GAS)	8	ΓΕΝ ΥΤ	15	ΓΕΝ ΜΤ
2	ΣΟΡ (STEAM)	9	ΡΟΔ ΥΤ	16	ΡΟΔ ΜΤ
3	ΝΡΟΔ (DIESEL)	10	ΝΡΟΔ ΥΤ	17	ΨΖ
4	ΣΟΡ ΥΤ	11	ΣΟΡ ΜΤ (Α/Π4)	18	ΑΦ (Α/Π1)
5	ΙΑΛ ΥΤ	12	ΙΑΛ ΜΤ	19	ΓΕΝ (Α/Π5)
6	ΡΔΙ ΥΤ	13	ΡΔΙ ΜΤ	20	ΑΦ (Α/Π3)
7	ΑΦ ΥΤ	14	ΑΦ ΜΤ	21	ΓΕΝ (ΑΠ2)

*Πίνακας 5.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Μετασχηματιστών ανυψώσεως τάσεως*

<b>Ζυγός ΥΤ</b>	<b>Ζυγός ΜΤ</b>	<b>R (αμ)</b>	<b>X (αμ)</b>	<b>Λόγος μετασχηματισμού</b>
ΣΟΡ ΥΤ	ΣΟΡ ΜΤ	0,01008	0,39983	1,0000
ΡΔΙ ΥΤ	ΡΔΙ ΜΤ	0,0029	0,21486	1,0125
ΙΑΛ ΥΤ	ΙΑΛ ΜΤ	0,0029	0,21486	1,0125
ΓΕΝ ΥΤ	ΓΕΝ ΜΤ	0,01008	0,39983	1,0250
ΑΦ ΥΤ	ΑΦ ΜΤ	0,0029	0,21486	1,0000
ΡΟΔ ΥΤ	ΡΟΔ ΜΤ	0,0029	0,21486	1,0125
ΣΟΡ ΥΤ	ΣΟΡ (GAS)	0,01266	0,39983	1,0625
ΣΟΡ ΥΤ	ΣΟΡ (STEAM)	0,01250	0,21486	1,0670
ΝΡΟΔ ΥΤ	ΝΡΟΔ (DIESEL)	0,00250	0,21486	1,0500

Λόγω έλλειψης λεπτομερών στοιχείων και για λόγους απλότητας, όλοι οι μετασχηματιστές του δικτύου θεωρούνται σταθερής λήψης, αγνοώντας έτσι τη δράση των ΣΑΤΥΦ (Πίνακας 5.3).

*Πίνακας 5.4 Δεδομένα μετασχηματιστών σύνδεσης αιολικών πάρκων στο δίκτυο ΜΤ*

Κωδικός Αιολικού Πάρκου	Υποσταθμός σύνδεσης	X (αμ)	R (αμ)
1	ΑΦ ΜΤ	0,3257	Θεωρείται ότι οι ωμικές απώλειες έχουν συμπεριληφθεί στις τιμές παραγόμενης ενεργού ισχύος
2	ΓΕΝ ΜΤ	0,2222	
3	ΑΦ ΜΤ	1,2100	
5	ΓΕΝ ΜΤ	0,6050	
4	Θεωρείται απευθείας σύνδεση στο ζυγό ΣΟΡ ΜΤ		

Τα αιολικά πάρκα (ισοδύναμη ανεμογεννήτρια) συνδέονται στο δίκτυο μέσω ενός ισοδύναμου μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης με επαγωγική αντίδραση 0,04αμ στη βάση ισχύος του πάρκου. Παράλληλα, θεωρήθηκε μηδενική ωμική αντίσταση με την παραδοχή ότι οι ωμικές απώλειες έχουν συμπεριληφθεί στις τιμές της παραγόμενης ενεργού ισχύος (Πίνακας 5.4).

*Πίνακας 5.5 Πρόβλεψη ζήτησης Φορτίων Ηλεκτρικού Συστήματος Ρόδου*

Υποσταθμός σύνδεσης	A/A ζυγού	P (MW)	Q (MVar)
ΣΟΡ ΜΤ	11	6,34	3,51
ΙΑΛ ΜΤ	12	16,64	9,21
ΡΔΙ ΜΤ	13	21,95	12,15
ΑΦ ΜΤ	14	22,02	12,19
ΓΕΝ ΜΤ	15	4,49	2,48
ΡΟΔ ΜΤ	16	11,62	6,43
<b>Σύνολο</b>	-	<b>83,06</b>	<b>45,97</b>

*Πίνακας 5.6 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Γραμμών Μεταφοράς*

Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R (αμ)	X (αμ)	B (αμ)
ΣΟΡ ΥΤ	ΡΔΙ ΥΤ	0,01094	0,0441	0,01655
ΣΟΡ ΥΤ	ΡΔΙ ΥΤ	0,01094	0,0441	0,01655
ΣΟΡ ΥΤ	ΙΑΛ ΥΤ	0,01595	0,03883	0,114
ΣΟΡ ΥΤ	ΓΕΝ ΥΤ	0,02291	0,09237	0,03488
ΣΟΡ ΥΤ	ΑΦ ΥΤ	0,00699	0,02818	0,01064
ΡΔΙ ΥΤ	ΑΦ ΥΤ	0,01497	0,03846	0,0107
ΡΔΙ ΥΤ	ΡΟΔ ΥΤ	0,0006	0,0023	0,03382
ΙΑΛ ΥΤ	ΡΟΔ ΥΤ	0,0071	0,0171	0,03877
ΓΕΝ ΥΤ	ΝΡΟΔ ΥΤ	0,01014	0,04088	0,01543
ΑΦ ΥΤ	ΨΖ ΥΤ	0,007485	0,010823	0,00535
ΨΖ ΥΤ	ΝΡΟΔ ΥΤ	0,007485	0,010823	0,00535

Το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας που χρησιμοποιείται αντιστοιχεί σε αυτό που περιγράφηκε στην ενότητα 2.3.1. Για την παράσταση των συστημάτων διέγερσης και ρύθμισης της τάσης των σύγχρονων γεννητριών του συστήματος χρησιμοποιήθηκε το απλοποιημένο μοντέλο αυτόματου ρυθμιστή τάσης τύπου AC4A κατά IEEE, που περιγράφηκε στην ενότητα 2.3.3. Στον Πίνακα 5.7 δίνονται τα δεδομένα των γεννητριών του συστήματος και των αυτόματων ρυθμιστών τάσεως.

**Πίνακας 5.7 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Γεννητριών και APT**

Παράμετρος	Επεξήγηση παραμέτρου	Steam 1,2	Gas 1-4	Diesel 1-8
Γεννήτρια				
$S_N$ (MVA)	Ονομαστική φαινόμενη ισχύς	20	47,5	19,5
$\cos\phi$	Ονομαστικός συντελεστής ισχύος	0,8	0,8	0,8
$V_N$ (kV)	Ονομαστική τάση εξόδου	6,3	11,5	11
$P_{nom}$ (MW)	Αποδιδόμενη καθαρή ισχύς	14,2	27,5	15
$X_{Is}$	Αντίδραση σκεδάσεως στάτη	0,1064	0,12	0,175
$X_d$	Σύγχρονη αντίδραση ευθέος άξονα (αμ στη βάση της γεννήτριας)	2,351	1,88	2,07
$X_q$	Σύγχρονη αντίδραση εγκάρσιου άξονα (αμ στη βάση της γεννήτριας)	2,25	1	1,04
$X'_d$	Μεταβατική αντίδραση ευθέος άξονα (αμ στη βάση της γεννήτριας)	0,215	0,3	0,35
$X'_q$	Μεταβατική αντίδραση εγκάρσιου άξονα (αμ στη βάση της γεννήτριας)	0,45	0,34	0,236
$T_d$	Μεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτού κυκλώματος ευθέος άξονα (s)	8,99	9,6	5,8
$T_q$	Μεταβατική χρονική σταθερά εγκάρσιου άξονα (s)	0,5	0,4	0,128
H	Σταθερά αδράνειας σε sec (αμ στη βάση ισχύος της γεννήτριας)	3,82	1,5	1,33
R	Στατισμός μονάδας (αμ στη βάση της γεννήτριας)	0,05	0,04	0,04
APT				
$K_A$	Αναλογικό κέρδος APT	55	50	100
$T_A$ (s)	Χρονική σταθερά APT	0,35	0,30	0,04
$T_B$ (s)	Χρονική σταθερά φίλτρου μεταπορείας	15	15	10
$T_C$ (s)		1,5	1,5	1,5
$E_{min}$ (αμ)	Κάτω όριο τάσης διέγερσης	0	0	0
$E_{fmax}$ (αμ)	Άνω όριο τάσης διέγερσης	5,05	5,05	6,9

Στο ΣΗΕ της Ρόδου εμφανίζονται τρία είδη συμβατικών μονάδων παραγωγής: Με αμιοστρόβιλο, με αεριοστρόβιλο και με Ντηζελογεννήτρια. Για την παράσταση των αντίστοιχων ρυθμιστών στροφών και κινητήριων μηχανών, χρησιμοποιούνται τα μοντέλα που περιγράφηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο στην ενότητα 2.3.4. Επιπλέον, οι μονάδες παραγωγής με τα ίδια χαρακτηριστικά ομαδοποιούνται και παρουσιάζονται ως μία ισοδύναμη μονάδα παραγωγής με ονομαστική ισχύ το άθροισμα των επιμέρους μονάδων. Τα χαρακτηριστικά τους, δίνονται στους Πίνακες 5.8 έως 5.10.



**Πίνακας 5.8** Δεδομένα Ρυθμιστή Στροφών Ντηζελογεννήτριας

Παράμετρος	Επεξήγηση Παραμέτρου	Τιμή
$T_d$	Χρονική σταθερά ρυθμιστή (s)	0,7
rate max	Μέγιστος ρυθμός ανοίγματος βαλβίδας καυσίμου (αμ/s)	0,1
rate min	Μέγιστος ρυθμός κλεισίματος βαλβίδας καυσίμου (αμ/s)	-0,1
$P_{max}$	Μέγιστη παραγωγή ισχύος (αμ)	1

Η μοναδική χρονική σταθερά του ρυθμιστή στροφών της Ντηζελογεννήτριας είχε την τιμή  $T_d = 0,07s$ . Ωστόσο, θεωρήθηκε πως η συγκεκριμένη τιμή είναι πολύ μικρή και γι' αυτό στην παρούσα εργασία αντικαταστάθηκε από την πιο ρεαλιστική τιμή  $T_d = 0,7s$ , όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.8.

**Πίνακας 5.9** Δεδομένα Ρυθμιστή Στροφών αεριοστρόβιλου

Παράμετρος	Επεξήγηση παραμέτρου	Τιμή
$T_{i0}$	Ονομαστική θερμοκρασία εισόδου συμπιεστή ( $^{\circ}C$ )	30
$T_{d0}$	Ονομαστική θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή ( $^{\circ}C$ )	390
$T_{f0}$	Ονομαστική θερμοκρασία εισόδου στροβίλου ( $^{\circ}C$ )	1085
$T_{e0}$	Ονομαστική θερμοκρασία καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου ( $^{\circ}C$ )	532
$P_{r0}$	Ονομαστικός ρυθμός συμπίεσης	11,5
$\gamma$	Λόγος ειδικών θερμοχωρητικότητας ( $C_p/C_v$ )	1,4
$\eta_c$	Απόδοση συμπιεστή	85%
$\eta_i$	Εσωτερική απόδοση στροβίλου	85%
$K_0$	Ποσοστό ισχύος αεριοστρόβιλου ( $^{\circ}K^{-1}$ )	0,004628
$T_g$	Χρονική σταθερά ρυθμιστή στροφών (s)	0,05
$K_4$	Κέρδος ασπίδας θερμότητας (ακαριαία)	0,8
$K_5$	Κέρδος ασπίδας θερμότητας	0,2
$T_3$	Χρονική σταθερά ασπίδας θερμότητας (s)	15
$T_4$	Χρονική σταθερά αισθητήρα θερμοκρασίας (s)	2,5
$T_5$	Χρονική σταθερά του τμήματος του ελέγχου θερμοκρασίας που παρεμβαίνει στη ροή καυσίμου (s)	3,3
$T_t$	Ρυθμός ολοκλήρωσης του τμήματος ελέγχου θερμοκρασίας που παρεμβαίνει στη ροή καυσίμου (s)	0,4699
$T_{c \max}$	Μέγιστη τιμή της εξόδου $T_c$ του τμήματος ελέγχου θερμοκρασίας	1,1
$T_{c \min}$	Ελάχιστη τιμή της εξόδου $T_c$ του τμήματος ελέγχου θερμοκρασίας	0
$F_{d \max}$	Άνω όριο εισόδου στον έλεγχο καυσίμου	1,5
$F_{d \min}$	Κάτω όριο εισόδου στον έλεγχο καυσίμου	0
$K_3$	Εύρος ανοίγματος βαλβίδας καυσίμου	0,77
$K_6$	Ελάχιστο άνοιγμα βαλβίδας καυσίμου	0,23
$T_v$	Χρονική σταθερά ρύθμισης της βαλβίδας καυσίμου (s)	0,05
$T_f$	Χρονική σταθερά συστήματος καυσίμου (s)	0,4
$T_w$	Σταθερά χρόνου του τμήματος ελέγχου αέρα (s)	0,4699
$T_{cd}$	Χρονική σταθερά αεριοστρόβιλου (s)	0,2

**Πίνακας 5.10** Δεδομένα Ρυθμιστή Στροφών ατμοστρόβιλου

Παράμετρος	Επεξήγηση παραμέτρου	Τιμή
$T_{sm}$	Χρονική σταθερά σερβομηχανισμού (s)	0,1
$z_{max}$	Μέγιστος ρυθμός ανοίγματος βαλβίδας καυσίμου (αμ/s)	0,03
$z_{min}$	Μέγιστος ρυθμός κλεισίματος βαλβίδας καυσίμου (αμ/s)	-0,03
$F_{hp}$	Ποσοστό εκτόνωσης στο στρόβιλο υψηλής πίεσης	0,4
$F_{mp}$	Ποσοστό εκτόνωσης στο στρόβιλο μέσης πίεσης	0,3
$T_{hp}$	Χρονική σταθερά εκτόνωσης υψηλής πίεσης (s)	0,2
$T_r$	Χρονική σταθερά αναθέρμανσης (s)	4
$T_{bp}$	Χρονική σταθερά εκτόνωσης χαμηλής πίεσης (s)	0,3

Στο ΣΗΕ της Ρόδου συναντώνται αιολικά πάρκα με ανεμογεννήτριες Τύπου Α, Γ και Δ. Για την αναπαράστασή τους χρησιμοποιούνται τα μοντέλα που περιγράφηκαν στις παραγράφους 2.3.5, 2.3.6 και 2.3.7 αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 5.11 παρατίθενται τα δεδομένα του ΑΠ4 (τύπου Α). Στον Πίνακα 5.12 παρατίθενται τα δεδομένα των ΑΠ1 και ΑΠ5 που είναι τύπου Γ. Τέλος στον Πίνακα 5.13 παρουσιάζονται τα δεδομένα των ΑΠ2 και ΑΠ3 που αποτελούνται από ανεμογεννήτριες τύπου Δ.

**Πίνακας 5.11** Τιμές Παραμέτρων ΑΠ4 (Τύπου Α)

Παράμετρος	Επεξήγηση Παραμέτρου	Τιμή
bus code	Ζυγός σύνδεσης	11
$S_{nom}$ (MVA)	Ονομαστική Φαινόμενη Ισχύς Αιολικού Πάρκου	11,7
$f_{nom}$ (Hz)	Ονομαστική συχνότητα λειτουργίας	50
$R_s$ (αμ)	Αντίσταση στάτη	0,01
$X_{ls}$ (αμ)	Αντίδραση στάτη	0,1
$X_m$ (αμ)	Αντίδραση μαγνήτισης	3
$R_r$ (αμ)	Αντίσταση δρομέα	0,1
$X_{lr}$ (αμ)	Αντίδραση δρομέα	0,08
$H$ (s)	Αδράνεια μηχανής (μοντέλο μίας μάζας)	3
nturb	Αριθμός Α/Γ	13
radius (m)	Ακτίνα πτερωτής	26,1
ratio	Λόγος κιβωτίου ταχυτήτων	67,5
$v_{nom}$ (m/s)	Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	15
$p_{nom}$ (MW)	Ονομαστική ενεργός ισχύς 1Α/Γ	0,9
poles	Αριθμός πόλων	4
$H_r$ (s)	Ανηγμένη Αδράνεια δρομέα ανεμογεννήτριας	0,5
$H_l$ (s)	Ανηγμένη Αδράνεια ανεμοκινητήρα	2,5
$K_{sh}$	Σταθερά ελαστικότητας άξονα	0,3
$D_{sh}$	Συντελεστής απόσβεσης	0

Πίνακας 5.12 Τιμές Παραμέτρων ΑΠ1 και ΑΠ5 (Τύπου Γ)

Παράμετρος	Επεξήγηση Παραμέτρου	Τιμή ΑΠ1	Τιμή ΑΠ5
bus code	Ζυγός σύνδεσης	18	19
$S_{nom}$ (MVA)	Ονομαστική Φαινόμενη Ισχύς Α/Π	12,28	6,612
$N_t$	αριθμός Α/Γ	13	7
$v_{nom}$ (m/s)	ονομαστική ταχύτητα ανέμου	11,4	11,4
$p_{nom}$ (MW)	ονομαστική ενεργός ισχύς	0,85	0,85
$\beta_{0(^\circ)}$	αρχική γωνία $\beta$	0	0
poles	αριθμός πόλων	6	6
$K_{pll}$	Παράμετροι βρόχου κλειδώματος φάσης	30	30
$PLL_{MX}$		0,1	0,1
$PLL_{MN}$		-0,1	-0,1
$H_r$ (s)	Ανηγμένη αδράνεια δρομέα	0,962	0,962
$H_l$ (s),	Ανηγμένη αδράνεια ανεμοκινητήρα	3,395	3,395
$K_{tg}$	Σταθερά ελαστικότητας άξονα	1,387	1,387
$D_{tg}$	Συντελεστής απόσβεσης	2,344	2,344
$X_{eq}$ (αμ)	Ισοδύναμη αντίδραση Norton	0,8	0,8
$K_{pp}$	Αναλογικό κέρδος ελεγκτή γωνίας πτερυγίων	150	150
$K_{ip}$	Ολοκληρωτικό κέρδος ελεγκτή γωνίας πτερυγίων	25	25
$K_{pc}$	Αναλογικό κέρδος βρόχου αντιστάθμισης	3	3
$K_{ic}$	Ολοκληρωτικό κέρδος βρόχου αντιστάθμισης	30	30
$T_{servo}$ (s)	Χρονική σταθερά σερβομηχανισμού γωνίας πτερυγίων	0,3	0,3
ratelim ( $^\circ/s$ )	Μέγιστος ρυθμός αλλαγής γωνίας πτερυγίων	10	10
betamin ( $^\circ$ )	Ελάχιστη γωνία πτερυγίων	0	0
betamax ( $^\circ$ )	Μέγιστη γωνία πτερυγίων	27	27
$Q_{max}$ (αμ στην $S_{nom}$ )	Όρια ενεργού κι άεργου ισχύος	0296	0296
$Q_{min}$ (αμ στην $S_{nom}$ )		-0,436	-0,436
$P_{MX}$ (αμ στην $S_{nom}$ )		1,12	1,12
$P_{MN}$ (αμ στην $S_{nom}$ )		0,04	0,04
$V_{max}$ (αμ)	Όρια τερματικής τάσης	1,2	1,2
$V_{min}$ (αμ)		0,9	0,9
$XI_{Qmin}$ (αμ)	Όρια για τον περιορισμό του $E''_{qcmd}$ για ενεργό TVC	0,5	0,5
$XI_{Qmax}$ (αμ)		1,45	1,45
$R_{comp}$ (αμ $S_{nom}$ )	Ισοδύναμη ωμική κι επαγωγική αντίσταση από τον ζυγό της ΑΓΔΤ στο σημείο ρύθμισης τάσης κατά τον έλεγχο ρύθμισης τάσης (VC)	0	0
$X_{comp}$ (αμ $S_{nom}$ )		0,04	0,04
$K_{Qi}$	Κέρδη ολοκληρωματικών ελεγκτών ελεγκτή άεργου ισχύος	0,05	0,05
$K_{vi}$		40	40
$T_{LVPL}$	Παράμετροι LVPL	0,02	0,02
VLVPL1		0,5	0,5
VLVPL2		0,9	0,9

GLVPL		1,11	1,11
RipLVPL		5	5
Διακριτά σημεία καμπύλης ισχύος - ταχύτητας			
wpmin (αμ)	Ελάχιστη ταχύτητα	0,69	
wp20 (αμ)	Ταχύτητα στο 20% της ονομαστικής ισχύος	0,78	
wp40 (αμ)	Ταχύτητα στο 40% της ονομαστικής ισχύος	0,98	
wp60 (αμ)	Ταχύτητα στο 60% της ονομαστικής ισχύος	1,12	
wp100 (αμ)	Ταχύτητα στο 100% της ονομαστικής ισχύος	1,2	

Οι τιμές του Πίνακα 5.12 σχετικά με τα διακριτά σημεία της καμπύλης ισχύος ταχύτητας προέρχονται από το [24]. Σε σύγκριση με το [14] προτιμήθηκε το σετ τιμών στο οποίο ελάχιστη ταχύτητα είναι η 0,69αμ αντί για 0,30αμ. Επιπλέον, οι τιμές των παραμέτρων έχουν επιλεγεί σύμφωνα με το [25] και αντιστοιχούν σε ονομαστική ισχύ 1,5MW για την κάθε ανεμογεννήτρια. Θεωρείται ότι τα ανά μονάδα μεγέθη είναι ίδια και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις Α/Γ των 850kW των ΑΠ 1 και ΑΠ5.

*Πίνακας 5.13 Τιμές Παραμέτρων ΑΠ2 και ΑΠ3 (Τύπου Δ)*

Παράμετρος	Επεξήγηση παραμέτρου	Τιμή ΑΠ2	Τιμή ΑΠ3
bus code	Ζυγός σύνδεσης	21	20
P <sub>nom</sub> (MW)	Ονομαστική ενεργός ισχύς Α/Π	18	3,3
R (m)	Ακτίνα πτερωτής	37,5	22
v <sub>nom</sub> (m/s)	Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	12	12
N <sub>rnom</sub> (rpm)	Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής	18	32,5
N <sub>rin</sub> (rpm)	Ελάχιστη ταχύτητα περιστροφής	9	16
p <sub>nom</sub> (MW)	Ονομαστική ισχύς Α/Γ	2	0,66
beta_0 (°)	Αρχική γωνία βήματος	0	0
pf,	Συντελεστής ισχύος	1	1
H (s)	Ανηγμένη σταθερά αδράνειας	3,64	2
K <sub>p_p</sub>	Αναλογικό κέρδος ελεγκτή γωνίας πτερυγίων	200	200
K <sub>i_p</sub>	Ολοκληρωτικό κέρδος ελεγκτή γωνίας πτερυγίων	60	60
T <sub>s</sub> (s)	Χρονική σταθερά σερβομηχανισμού γωνίας πτερυγίων	0,25	0,25
betadot <sub>max</sub> (°/s)	Μέγιστος ρυθμός αλλαγής γωνίας πτερυγίων	8	8
beta <sub>min</sub> (°)	Ελάχιστη γωνία πτερυγίων	0	0
beta <sub>max</sub> (°)	Μέγιστη γωνία πτερυγίων	30	30
R <sub>comp</sub> (αμ στην S <sub>base</sub> )	Ισοδύναμη ωμική κι επαγωγική αντίσταση από τον τερματικό ζυγό του Α/Π στο σημείο ρύθμισης της τάσης κατά τον έλεγχο ρύθμισης τάσης (VC)	0	0
X <sub>comp</sub> (αμ στην S <sub>base</sub> )		0,2222	1,2100
K <sub>pq</sub>	Παράμετροι ελέγχου τάσης	5	5
K <sub>iq</sub>		0,5	0,5
T <sub>t</sub> (s)		0,06	0,06

Όπως τονίστηκε και στην ενότητα 1.2, οι ανεμογεννήτριες κάθε αιολικού πάρκου ομαδοποιούνται και αναπαριστώνται από μία ισοδύναμη γεννήτρια. Η ισοδύναμη ανεμογεννήτρια έχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ομοειδών που ενοποιήθηκαν και ονομαστική ισχύ ίση με το άθροισμα των επιμέρους ανεμογεννητριών. Για αυτή την αναπαράσταση γίνεται η παραδοχή ενιαίας ταχύτητας ανέμου (π.χ. αγνοούνται φαινόμενα «σκίασης») και αμελούνται οι ιδιαιτερότητες της εσωτερικής εγκατάστασης του πάρκου.

Όλες οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών (ΑΠ1, ΑΠ2, ΑΠ3, ΑΠ5) ακολουθούν τη λογική αδιάλειπτης λειτουργίας σε βύθιση τάσης (LVRT). Για το ΑΠ4, που αποτελείται από ανεμογεννήτριες Τύπου Α, λειτουργεί προστασία υπότασης με κρίσιμη τιμή αποσύνδεσης τη 0,85αμ (τερματική τάση).

Στο σύστημα της Ρόδου υπάρχουν εγκατεστημένοι ηλεκτρονόμοι (H/N) προστασίας υποσυχνότητας στους υποσταθμούς διανομής του φορτίου (Πίνακας 5.6). Η προστασία υποσυχνότητας για το ηλεκτρικό σύστημα της Ρόδου υλοποιείται με σύστημα αποκοπής φορτίου που ενεργοποιείται μόνο με την τιμή της συχνότητας χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο ρυθμός μεταβολής της. Τα όρια υποσυχνότητας για το συγκεκριμένο σύστημα κυμαίνονται από 48.5 μέχρι 48Hz με τον κάθε H/N να απορρίπτει το φορτίο που του αναλογεί όταν η συχνότητα πέσει κάτω από το επίπεδο ρύθμισής του για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από το επιτρεπτό. Όπως και στο [14], στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής δεν προσομοιώνεται αυτόματη αποκοπή φορτίου λόγω υποσυχνότητας, αλλά από την απόκριση της συχνότητας γίνεται διάγνωση για το αν θα προκληθεί ενεργοποίηση των ηλεκτρονόμων ή όχι.

Η παράσταση των φορτίων κατά την προσομοίωση γίνεται μέσω της μετατροπής τους σε σταθερές αγωγιμότητες, ανεξάρτητες από τη συχνότητα του δικτύου, σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$G = \frac{P_0}{V_0^2} \quad (5.1)$$

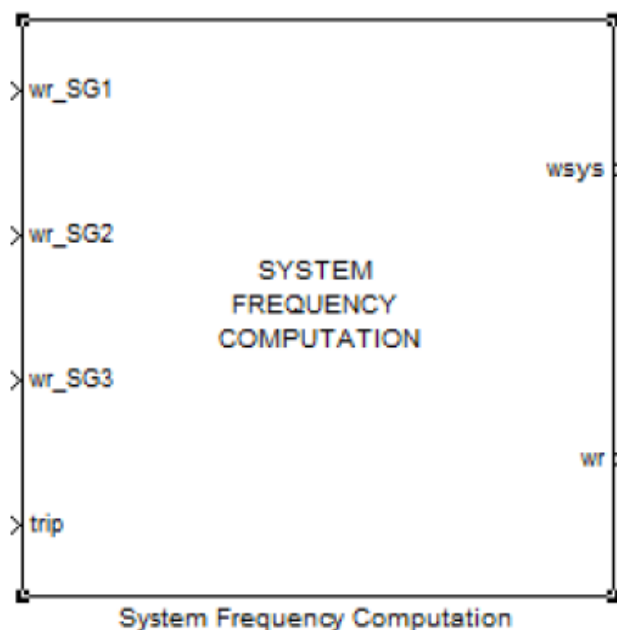
$$B = -\frac{Q_0}{V_0^2} \quad (5.2)$$

όπου:

- $P_0$  και  $Q_0$  η ενεργός και άεργος ισχύς του φορτίου στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.
- $V_0$  η τάση στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας προ της διαταραχής.

Τέλος, ως γωνιακή ταχύτητα του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς λαμβάνεται ο σταθμισμένος μέσος όρος των συχνοτήτων που προκύπτουν από τις σύγχρονες γεννήτριες με βάση τη σχέση (1.18) (αδρανειακό κέντρο βάρους). Το μπλοκ υπολογισμού της συχνότητας του συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 4.1 [14]. Ως εισόδους δέχεται τις γωνιακές ταχύτητες των σύγχρονων γεννητριών και ένα σήμα trip. Το συγκεκριμένο σήμα χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της διαταραχής. Πιο συγκεκριμένα, η διαταραχή είναι η απώλεια της μονάδας του αεριοστρόβιλου

(ζυγός 1), που αποτελεί τη μεγαλύτερη συμβατική μονάδα του νησιού. Το σήμα trip έχει μηδενική τιμή πριν τη διαταραχή. Θέτοντας την τιμή του ίση με 1, δίνεται εντολή για μηδενισμό της έγχυσης ρευμάτων στο δίκτυο από την αεριοστροβιλική μονάδα προσαρμόζοντας κατάλληλα το διάνυσμα di2dn και για αλλαγή του τρόπου υπολογισμού του σταθμισμένου μέσου από τις απομένουσες συμβατικές μονάδες (σύγχρονες μηχανές).



Σχ 5.1 Μπλοκ υπολογισμού συχνότητας συστήματος

Η κατανομή παραγωγής που παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.14 είναι τροποποίηση του Σεναρίου Β που παρουσιάστηκε στα [13] και [14]. Η διαφορά εντοπίζεται στην αρχική κατανομή της παραγωγής για τις συμβατικές μονάδες. Πιο συγκεκριμένα, αφαιρέθηκε ένα μέρος από την παραγωγή των αμοστροβίλων (2,5MW από τον καθένα), το οποίο κατανεμήθηκε ισόποσα στην παραγωγή των Νηζελογεννητριών. Με αυτό τον τρόπο, οι αμοστροβίλοι έχουν σημαντική διαθέσιμη στρεφόμενη εφεδρεία και συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας.

Στον Πίνακα 5.15 παρουσιάζεται η αρχική κατανομή του ΣΗΕ της Ρόδου για το Σενάριο ΙΙ που αντιστοιχεί στο σενάριο Β που παρουσιάστηκε στα [13] και [14]. Όπως παρατηρείται, οι δύο αμοστροβιλικές μονάδες λειτουργούν σχεδόν σε πλήρες φορτίο και ουσιαστικά δεν διαθέτουν στρεφόμενη εφεδρεία. Γι' αυτό το λόγο δε συμμετέχουν στη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος με το φορτίο του αεριοστροβίλου να αναλαμβάνεται πλήρως από τις Νηζελογεννήτριες.

Πίνακας 5.14 Κατανομή Παραγωγής Σεναρίου I για το ΣΗΕ της Ρόδου

Μονάδα Παραγωγής	Ζυγός σύνδεσης	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Στρεφόμενη εφεδρεία (MW)
Steam 1	ΣΟΡ (STEAM)	11,6	2,6
Steam 2	ΣΟΡ (STEAM)	11,6	2,6
Gas 1	ΣΟΡ (GAS)	13,17	14,32
Diesel 1	ΝΡΟΔ (DIESEL)	10	5
Diesel 2	ΝΡΟΔ (DIESEL)	10	5
<b>Σύνολο για Συμβατικές Μονάδες</b>		<b>56,38</b>	<b>29,52</b>
A/Π	Ζυγός σύνδεσης	Παραγόμενη ισχύς	% Ονομαστικής ισχύος
1	ΑΦ (ΑΠ1)	6,26	56,66
2	ΓΕΝ (ΑΠ2)	10,11	56,17
3	ΑΦ (ΑΠ3)	1,87	56,66
4	ΣΟΡ ΜΤ (ΑΠ4)	6,63	56,66
5	ΓΕΝ (ΑΠ5)	3,37	56,63
<b>Σύνολο για Α/Π</b>		<b>28,24</b>	

Πίνακας 5.15 Κατανομή Παραγωγής Σεναρίου II για το ΣΗΕ της Ρόδου

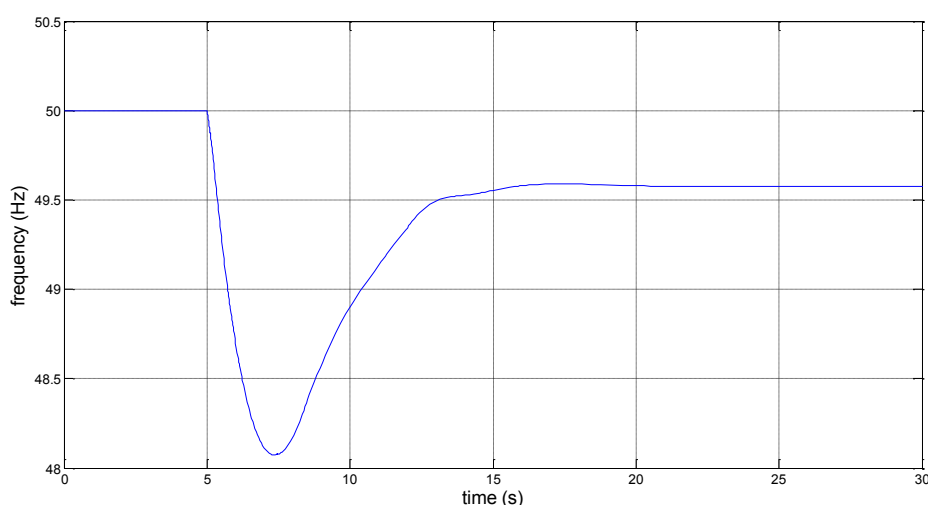
Μονάδα Παραγωγής	Ζυγός σύνδεσης	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Στρεφόμενη εφεδρεία (MW)
Steam 1	ΣΟΡ (STEAM)	14,1	0,1
Steam 2	ΣΟΡ (STEAM)	14,1	0,1
Gas 1	ΣΟΡ (GAS)	13,18	14,33
Diesel 1	ΝΡΟΔ (DIESEL)	7,5	7,5
Diesel 2	ΝΡΟΔ (DIESEL)	7,5	7,5
<b>Σύνολο για Συμβατικές Μονάδες</b>		<b>56,38</b>	<b>29,52</b>
A/Π	Ζυγός σύνδεσης	Παραγόμενη ισχύς	% Ονομαστικής ισχύος
1	ΑΦ (ΑΠ1)	6,26	56,66
2	ΓΕΝ (ΑΠ2)	10,11	56,17
3	ΑΦ (ΑΠ3)	1,87	56,66
4	ΣΟΡ ΜΤ (ΑΠ4)	6,63	56,66
5	ΓΕΝ (ΑΠ5)	3,37	56,63
<b>Σύνολο για Α/Π</b>		<b>28,24</b>	

## 5.2. Προσομοίωση και ανάλυση Σεναρίου I

Σε αυτή την ενότητα προσομοιώνεται το σύστημα της Ρόδου για την κατανομή παραγωγής που παρουσιάστηκε στον Πίνακα 5.14. Η διαταραχή που συμβαίνει στο σύστημα είναι η ξαφνική απώλεια της αεριοστροβιλικής μονάδας στο ζυγό ΣΟΡ, η οποία αποτελεί και τη μεγαλύτερη μονάδα του δικτύου. Η διαταραχή θεωρείται ότι γίνεται σε χρόνο  $t = 5s$  και αντιστοιχεί στο 15,58% του συνόλου της παραγωγής.

Η θεώρηση των φορτίων ως σταθερές αγωγιμότητες συνεπάγεται ότι η μείωση της τάσης που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της διαταραχής οδηγεί σε μείωση του ηλεκτρικού φορτίου και σε διευκόλυνση της ανάληψης φορτίου από τις συμβατικές μονάδες. Στη διπλωματική εργασία [14] περιγράφηκε αναλυτικά πώς η επιλογή του ελέγχου τερματικής τάσης (TVC) (βλ. ενότητα 2.3.6) για τις ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης (το μοντέλο της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα που χρησιμοποιείται δεν υποστηρίζει αυτή τη δυνατότητα) οδηγεί σε μεγαλύτερη μεταβατική βύθιση της συχνότητας καθώς δυσχεραίνει το έργο των συμβατικών μονάδων. Επομένως, όλα τα αιολικά πάρκα είναι σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος με ενεργό τον έλεγχο τερματικής τάσης στα δύο αιολικά πάρκα με ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης (ΑΠ1 και ΑΠ5).

Η απόκριση της συχνότητας του συστήματος για την κατανομή παραγωγής του Σεναρίου I απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2.



Σχ. 5.2 Μεταβολή συχνότητας ΣΗΕ Ρόδου – Σενάριο I

Η ηλεκτρική ισχύς που καλούνται να ικανοποιήσουν οι εναπομένουσες μονάδες αμέσως μετά τη διαταραχή είναι μεγαλύτερη από τη μηχανική ισχύ που παράγουν οι κινητήριες μηχανές τους. Έτσι, η συχνότητα του συστήματος μειώνεται και πέφτει αρκετά γρήγορα κάτω από τα 48,5Hz. Η μέγιστη μεταβατική βύθιση της συχνότητας φτάνει μέχρι τα 48,1Hz και συμβαίνει περίπου 2,5s μετά τη διαταραχή. Στη συνέχεια, η τιμή της συχνότητας αυξάνεται ομαλά και μετά τα 15s σταθεροποιείται στην τελική της τιμή λίγο πάνω από τα 49,5Hz. Υπενθυμίζεται ότι η ενεργοποίηση των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας δεν προσομοιώνεται αλλά γίνεται διάγνωση της αποκοπής φορτίου.



Στο Σχήμα 5.3 αναπαριστάται η συνολική μηχανική και ηλεκτρική ισχύς των εναπομενουσών συμβατικών μονάδων παραγωγής. Η συνολική ηλεκτρική ισχύς των συμβατικών μονάδων προκύπτει από το άθροισμά της ηλεκτρικής ισχύος που εγχέουν στο δίκτυο οι σύγχρονες γεννήτριές τους, δηλαδή:

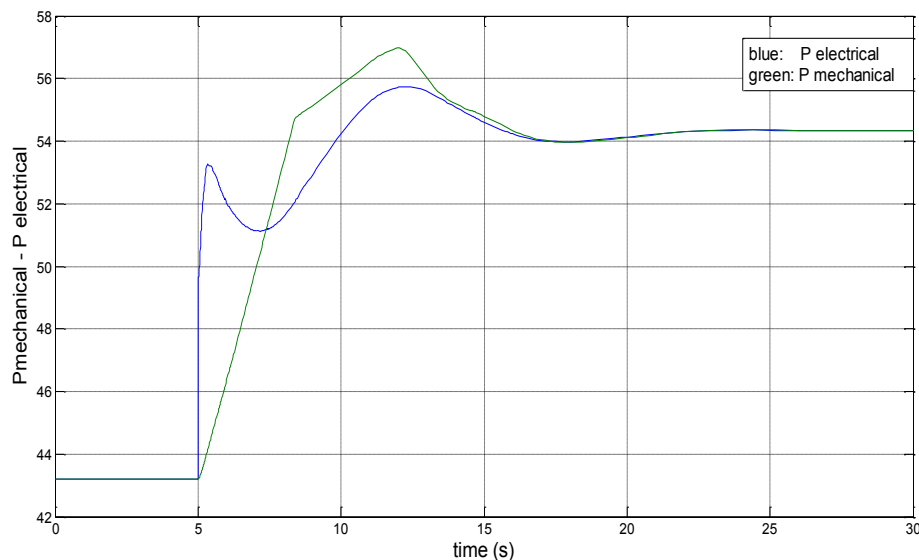
$$P_{e,t} = \sum_i P_{e,i} \quad (5.3)$$

Αντίστοιχα προκύπτει η συνολική μηχανική ισχύς των κινητήριων μηχανών:

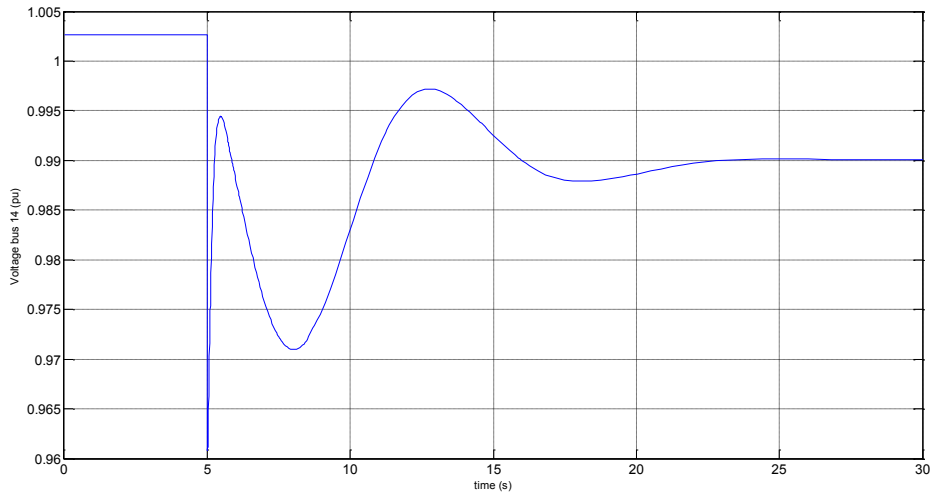
$$P_{m,t} = \sum_i P_{m,i} \quad (5.4)$$

Αμέσως μετά τη διαταραχή, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς υπολογίζεται από τις εξισώσεις του δικτύου οπότε αυξάνεται ακαριαία για να καλυφθεί η απώλεια παραγωγής. Η αύξηση αυτή ωστόσο, είναι μικρότερη από της ισχύ που παρήγαγε η αεριοστροβιλική μονάδα πριν τη διαταραχή. Αυτό εξηγείται από την πτώση της τάσης των ζυγών φορτίου, τα οποία έχουν θεωρηθεί σταθερής αγωγιμότητας. Ενδεικτικά παρατίθεται στο Σχήμα 5.4 η τάση του ζυγού 14 (ΑΦ ΜΤ) στον οποίο συνδέεται το μεγαλύτερο φορτίο του συστήματος, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5.6.

Μετά την πρώτη αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος ακολουθεί μια μικρή μείωσή της μέχρι τα 7,5s περίπου που επίσης δικαιολογείται από την απόκριση της τάσης των ζυγών φορτίου (βλ. Σχήμα 5.4). Η ηλεκτρική ισχύς σταθεροποιείται τελικά λίγο μετά τα 20s στα 54MW περίπου. Το ίδιο συμβαίνει και με την τάση του ζυγού 14, η οποία σταθεροποιείται σε μια τιμή περίπου 1,5% μικρότερη από την αρχική.

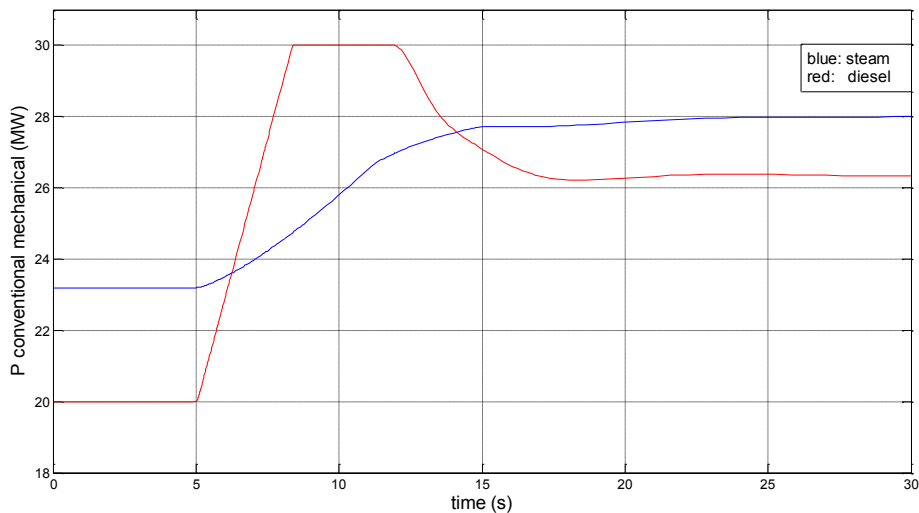


Σχ. 5.3 Παραγόμενη μηχανική και ηλεκτρική ισχύς συμβατικών μονάδων - Σενάριο I



Σχ. 5.4 Τάση ζυγού 14 – Σενάριο 1

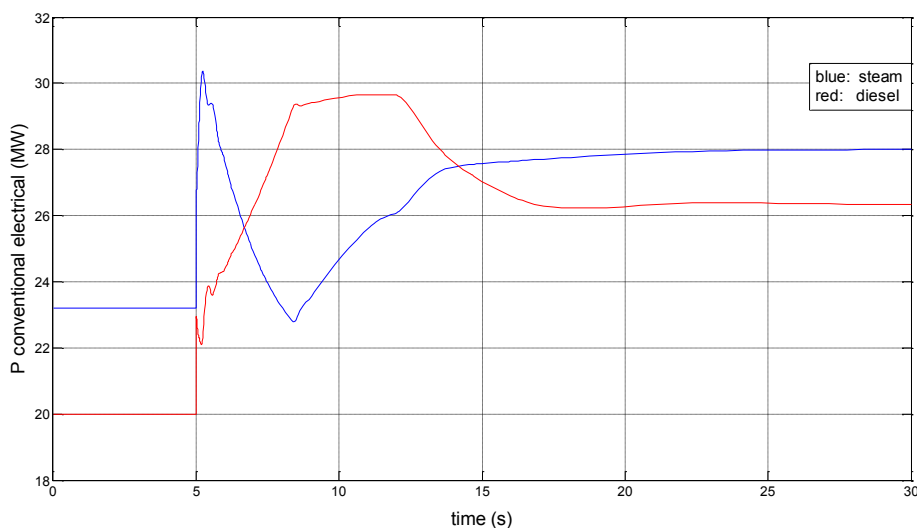
Όσον αφορά τη μηχανική ισχύ, αμέσως μετά τη διαταραχή παρατηρείται αύξηση της με σταθερό ρυθμό. Αυτό οφείλεται στο ότι και οι δύο μονάδες λειτουργούν με μέγιστο ρυθμό ανοίγματος δικλείδας ατμού ή βαλβίδας καυσίμου (3% για τους ατμοστρόβιλους και 10% για την Ντηζελογεννήτρια). Στα 7,5s περίπου η μηχανική ισχύς ξεπερνάει σε τιμή την ηλεκτρική. Αυτό το σημείο αντιστοιχεί στη μέγιστη μεταβατική βύθιση της συχνότητας του Σχήματος 5.2. Στα 8s περίπου παρατηρείται μια απότομη μείωση του ρυθμού αύξησης της μηχανική ισχύος που συμβαίνει επειδή οι ντηζελογεννήτριες φτάνουν στη μέγιστη δυνατή παραγωγή τους. Έτσι, από τα 8s και μετά, η αύξηση της μηχανικής ισχύος οφείλεται στις μονάδες με ατμοστρόβιλο. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο Σχήμα 5.5 που παρουσιάζεται η μεταβολή της μηχανικής ισχύος της καθεμίας συμβατικής μονάδας ξεχωριστά.



Σχ. 5.5 Μηχανική ισχύς συμβατικών μονάδων – Σενάριο 1

Η ηλεκτρική ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο από τις συμβατικές μονάδες απεικονίζεται στο Σχήμα 5.6. Όπως αναφέρθηκε για το Σχήμα 5.3, αμέσως μετά τη διαταραχή ακολουθεί μία ακαριαία αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος και των δύο

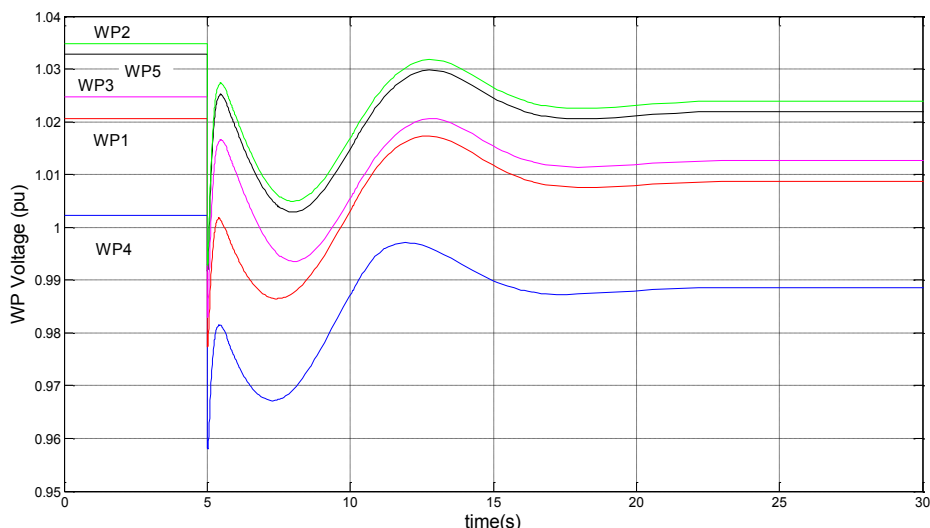
συμβατικών μονάδων ώστε να ικανοποιηθούν οι εξισώσεις του δικτύου. Επίσης, παρατηρείται αμέσως μετά η ηλεκτρομηχανική ταλάντωση μεταξύ των δύο μηχανών η οποία δεν έγινε αντιληπτή στο Σχήμα 5.3 που παρουσιάστηκε το άθροισμά τους.



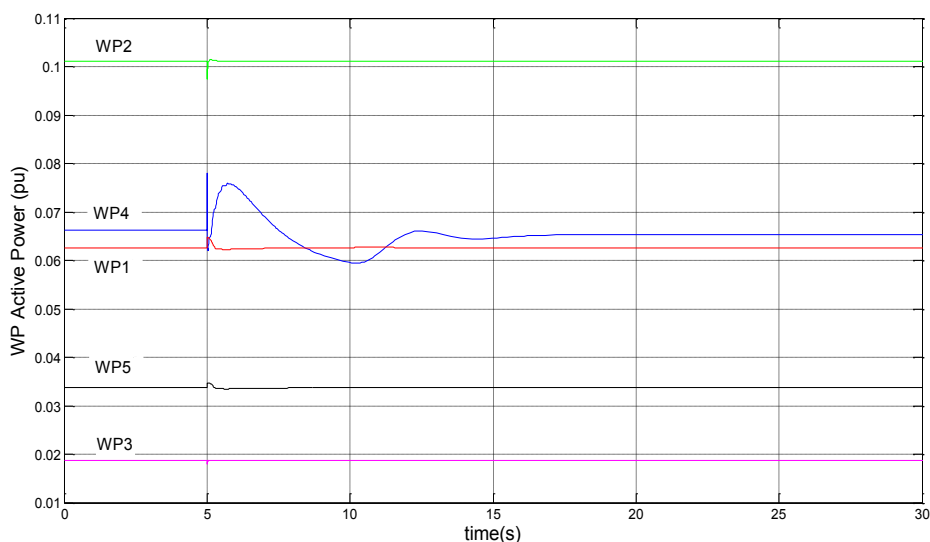
**Σχ. 5.6** Ηλεκτρική ισχύς συμβατικών μονάδων – Σενάριο I

Παρατίθενται επίσης οι τάσεις των ζυγών που συνδέονται τα αιολικά πάρκα (Σχήμα 5.7). Επισημαίνεται πως για τη συγκεκριμένη πτώση τάσης που παρατηρείται, δεν τίθεται θέμα αποσύνδεσης του ΑΠ4 (όριο τάσης αποσύνδεσης έχει θεωρηθεί η τιμή 0,85αμ), αλλά ούτε και περιορισμού του ενεργού ρεύματος των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών που λειτουργούν σε λογική αδιάλειπτης λειτουργίας υπό χαμηλή τάση. Η μέγιστη πτώσης τάσης είναι περίπου 4% σε κάθε περίπτωση, ενώ η τιμή στη μόνιμη κατάσταση είναι 1-1,5% μικρότερη από την αρχική.

Η απόκριση της ενεργού ισχύος των αιολικών πάρκων διαφέρει ανάλογα με το είδος τους. Το ΑΠ4 που είναι σταθερών στροφών κι επομένως σύγχρονα συζευγμένο στο δίκτυο, συνεισφέρει στην αδρανειακή απόκριση του συστήματος αυξάνοντας την ενεργό ισχύ που εγχέει στο δίκτυο. Ειδικότερα, μετά από ένα πολύ γρήγορο μεταβατικό φαινόμενο λόγω των ηλεκτρικών εξισώσεων του στάτη, η ισχύς αυξάνεται περίπου 0,01αμ στη βάση ισχύος του συστήματος. Στη συνέχεια, η ισχύς πέφτει για περίπου 10 δευτερόλεπτα κάτω από την αρχική κι ύστερα επανέρχεται ομαλά στην αρχική της τιμή. Αντιθέτως, τα υπόλοιπα αιολικά πάρκα που αποτελούνται από ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, παρουσιάζουν αμελητέα απόκριση ενεργού ισχύος (Σχήμα 5.8), όπως αναμενόταν. Σημειώνεται ότι επειδή ο εξομοιωτής αδράνειας είναι ανενεργός, οι παράμετροι του ελέγχου στροφών και του ελέγχου γωνίας βήματος έχουν σε αυτή την προσομοίωση τις αρχικές τους τιμές (Πίνακας 4.10).

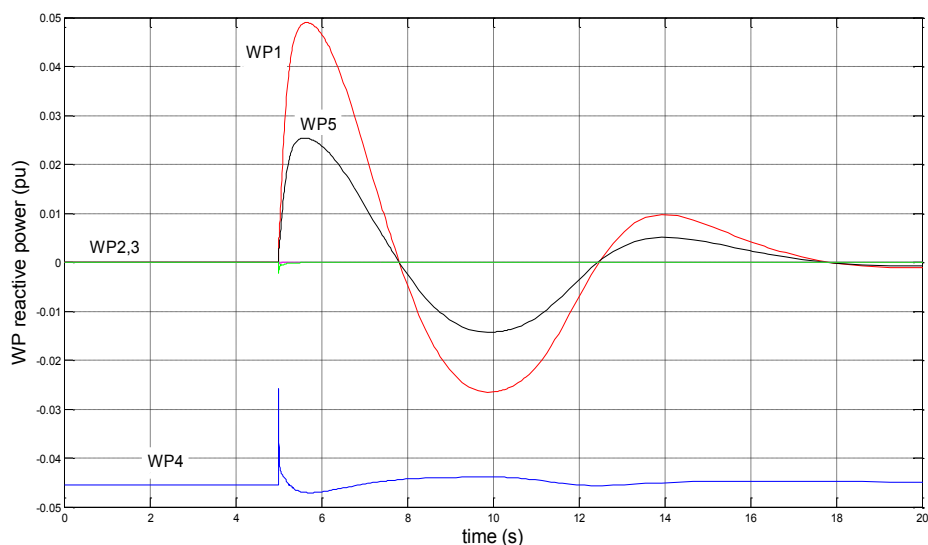


*Σχ. 5.7 Τάσεις ζυγών αιολικών πάρκων - Σενάριο I*



*Σχ. 5.8 Απόκριση ενεργού ισχύος αιολικών πάρκων - Σενάριο I*

Τέλος, στο Σχήμα 5.9 παρατίθεται η παραγωγή άεργου ισχύος από τα αιολικά πάρκα. Το ΑΠ4 που αποτελείται από ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών καταναλώνει άεργο ισχύ όπως φαίνεται από το αρνητικό πρόσημο. Τα ΑΠ1 και ΑΠ5 που αποτελούνται από ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης παρουσιάζουν μια αύξηση της άεργου ισχύος μετά τη διαταραχή. Αυτό οφείλεται στη λειτουργία ελέγχου τερματικής τάσης (TVC) που είναι ενεργοποιημένη στα δύο πάρκα. Έτσι λόγω της πτώσης τάσης, όπως φάνηκε και στο Σχήμα 5.7, τα ΑΠ1 και ΑΠ5 αυξάνουν προσωρινά την έγχυση άεργου ισχύος στο δίκτυο. Τα ΑΠ2 και ΑΠ3 που αποτελούνται από ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα και δεν διαθέτουν την αντίστοιχη λειτουργία ελέγχου τερματικής τάσης δεν παρουσιάζουν κατά τη διαταραχή κάποια μεταβολή στην άεργο ισχύ που εκχέουν στο δίκτυο.



**Σχ. 5.9** Απόκριση άεργου ισχύος αιολικών πάρκων - Σενάριο I

Συνοψίζοντας, για το Σενάριο που αναλύθηκε σε αυτή την ενότητα, το σύστημα θα εξαναγκασζόταν σίγουρα σε αποκοπή φορτίου μετά την απώλεια της αεροστροβιλικής μονάδας. Έτσι, γίνεται αντιληπτό ότι για την ασφαλή επίτευξη μεγάλων ποσοστών αιολικής διείσδυσης, όπως σε αυτό το σενάριο (34%), απαιτείται η συμμετοχή των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στην αδρανειακή απόκριση του συστήματος.

### 5.3. Εισαγωγή εξομοιωτή αδράνειας στο Σενάριο I

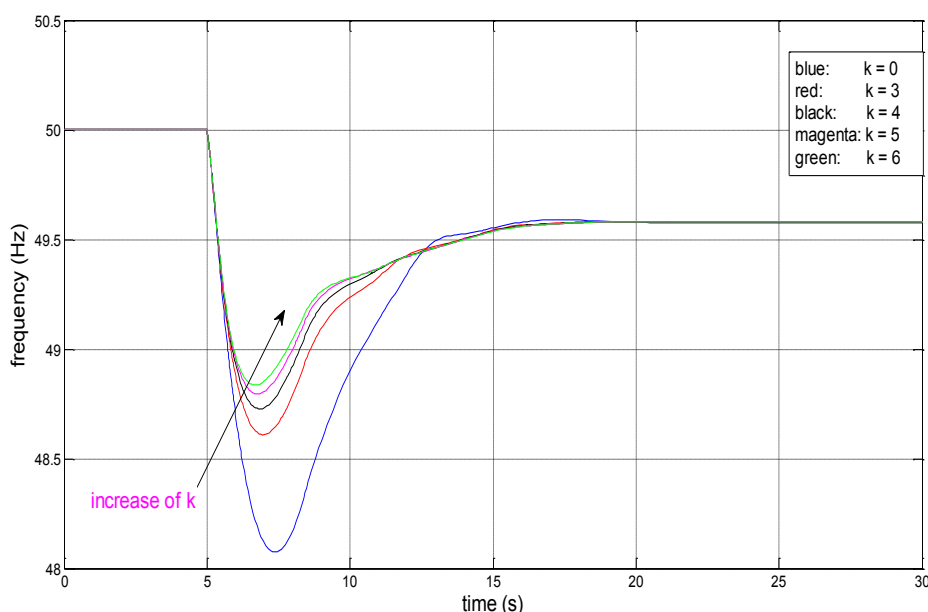
Σε σύγκριση με τα απλά συστήματα που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 4, το σύστημα της Ρόδου είναι αρκετά πιο πολύπλοκο. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει περισσότερες από μία συμβατικές μονάδες που συμμετέχουν στη ρύθμιση συχνότητας, οι οποίες χαρακτηρίζονται από διαφορετικές χρονικές σταθερές και περιορισμούς.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, μετά τη διαταραχή απομένουν οι αεροστροβιλικές μονάδες με τις νηξελογεννήτριες να συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Από τις χρονικές σταθερές που εμπλέκονται στην πρωτεύουσα ρύθμιση, η μεγαλύτερη χρονική σταθερά συναντάται στην αναθέρμανση του ατμοστρόβιλου ( $T_r = 4s$ ), με την οποία επιλέγεται ίση η χρονική σταθερά  $T_w$  του εξομοιωτή αδράνειας. Ακολουθείται δηλαδή η συντηρητική προσέγγιση όσον αφορά την επιλογή της χρονικής σταθεράς  $T_w$  του εξομοιωτή αδράνειας. Σε επόμενη ενότητα, θα εξεταστεί κατά πόσο το αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται για την ίδια επιλογή είναι εξίσου ικανοποιητικό για την περίπτωση του Σεναρίου II, στο οποίο οι ατμοστρόβιλοι δεν διαθέτουν στρεφόμενη εφεδρεία και δεν συμμετέχουν ως εκ τούτου στη ρύθμιση της συχνότητας του συστήματος.

Στο Κεφάλαιο 4 και πιο συγκεκριμένα στον Πίνακα 4.10 βρέθηκε ότι μια ικανοποιητική τιμή για το κέρδος του εξομοιωτή αδράνειας για  $T_w = 4s$  είναι  $k = 4$

έως 6. Επομένως, θα γίνουν δοκιμές γύρω από αυτή την περιοχή τιμών. Επιλέγεται  $T_{pc} = 1s$  (βλ. ενότητα 4.3.3) για τον έλεγχο στροφών των ΑΠ2 και ΑΠ3 που αποτελούνται από ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα. Για τα ΑΠ1 και ΑΠ5, που αποτελούνται από ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης, επιλέγονται οι τελικές τιμές του Πίνακα 4.11 για  $T_w = 4s$  για τις παραμέτρους του ελέγχου στροφών.

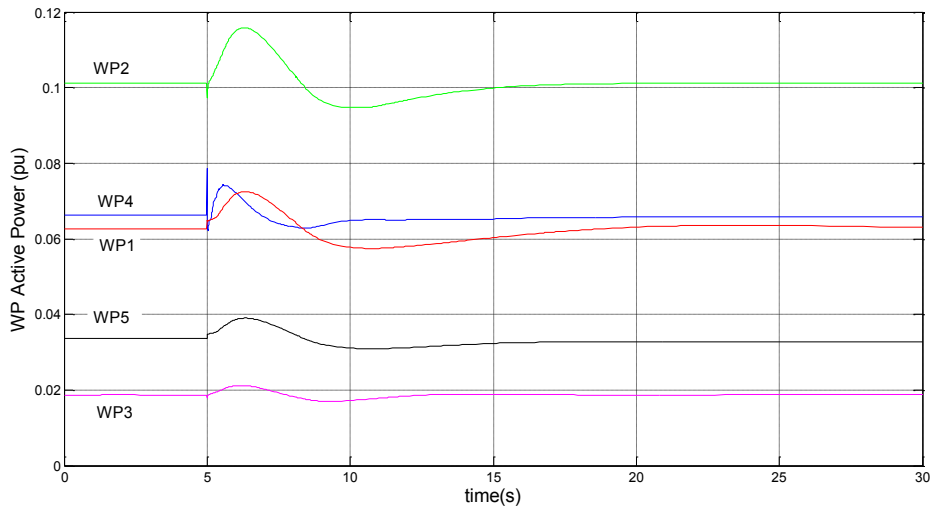
Η απόκριση της συχνότητας του συστήματος σε Hz για μεταβολή του κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας από  $k = 0$  έως  $k = 6$  απεικονίζεται στο Σχήμα 5.10.



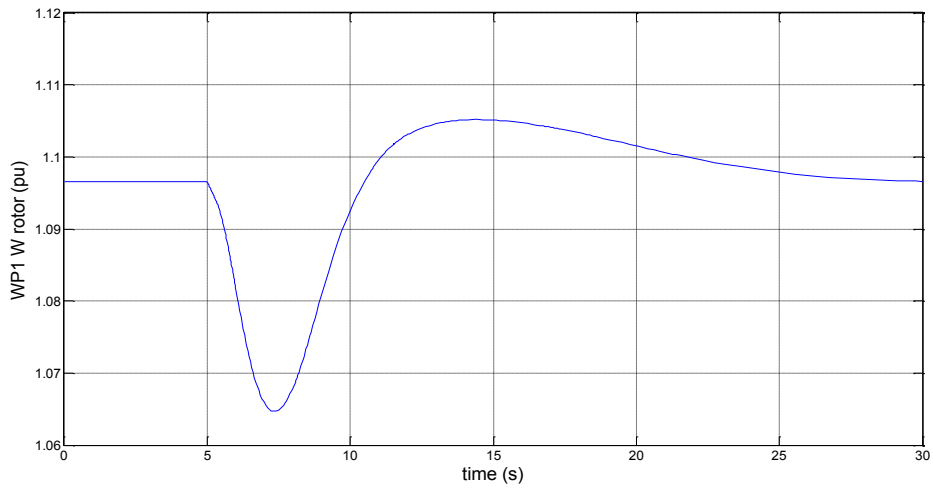
**Σχ. 5.10** Μεταβολή συχνότητας ΣΗΕ Ρόδου για διάφορες τιμές  $k$  – Σενάριο I

Η βελτίωση που παρατηρείται στη μεταβατική βύθιση της συχνότητας είναι σημαντική με την εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας για  $k = 3$ . Μάλιστα, ήδη από αυτή την τιμή επιτυγχάνεται η μέγιστη βύθιση να μην ξεπερνάει τα 48,5Hz. Όπως ήταν αναμενόμενο, η αύξηση του κέρδους από 3 σε 4 επιφέρει περαιτέρω βελτίωση, η οποία είναι σημαντικά μικρότερη, ενώ το ίδιο παρατηρείται και για ακόμα μεγαλύτερη αύξηση του κέρδους. Μια επιλογή  $k = 5$  ή  $k = 6$  επιφέρει ικανοποιητικό αποτέλεσμα (πάνω από τα 48,8Hz που θα μπορούσε στη γενική περίπτωση να αποτελεί και όριο υποσυχνότητας) χωρίς σημαντική διαφορά. Επιλέγεται τελικά η τιμή  $k = 5$  για την οποία, για ρύθμιση των ηλεκτρονόμων στα 48,5Hz, συνεπάγεται ότι αποφεύγεται η αποκοπή φορτίων, ενώ επιτυγχάνεται κι ένα περιθώριο 0,3Hz.

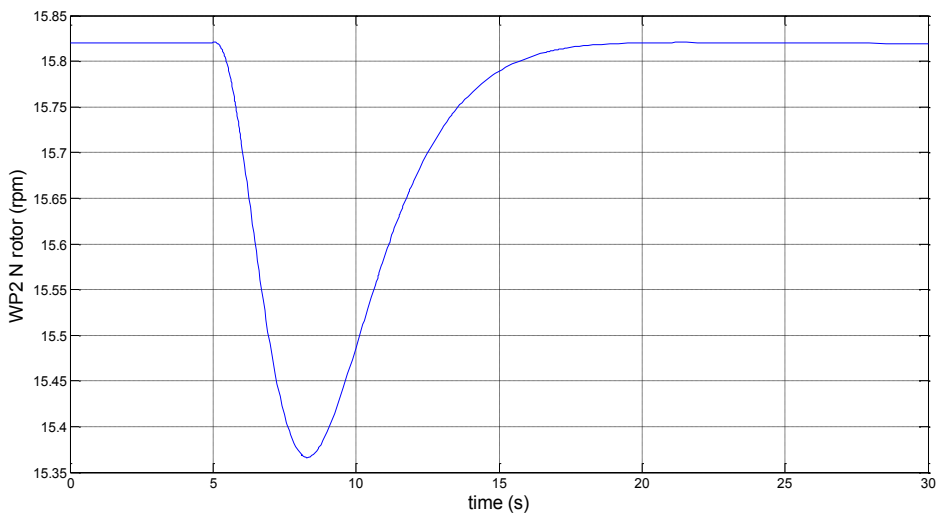
Η βελτίωση αυτή οφείλεται φυσικά στην αύξηση της έγχυσης ενεργού ισχύος των αιολικών πάρκων. Τα χαρακτηριστικά της απόκρισης της ενεργού ισχύος λόγω του εξομοιωτή αδράνειας έχουν αναλυθεί λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 4 και για τα δύο μοντέλα ανεμογεννητριών και γι' αυτό απλά παρατίθενται στο Σχήμα 5.11 για  $T_w = 4s$  και  $k = 5$ . Το ίδιο ισχύει και για την ταχύτητα περιστροφής των δρομέων των ΑΠ1 και ΑΠ2 (Σχήμα 5.12 και 5.13 αντίστοιχα).



**Σχ. 5.11** Ισχύς αιολικών πάρκων με ενεργό εξομοιωτή αδράνειας - Σενάριο I

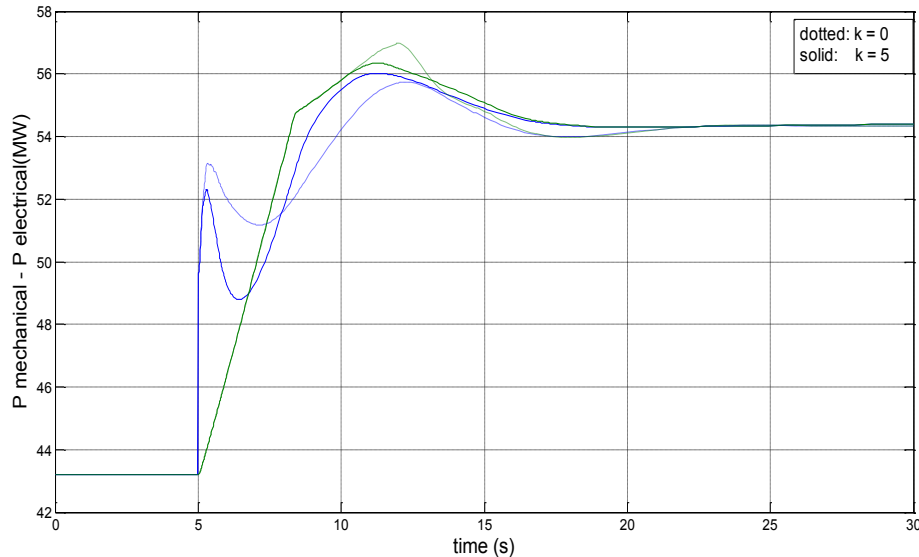


**Σχ. 5.12** Ταχύτητα δρομέα A/Π1 με ενεργό εξομοιωτή αδράνειας- Σενάριο I



**Σχ. 5.13** Ταχύτητα δρομέα A/Π2 με ενεργό εξομοιωτή αδράνειας - Σενάριο I

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.14 η παραγόμενη μηχανική και ηλεκτρική ισχύς των συμβατικών μονάδων του συστήματος με και χωρίς εξομοιωτή αδράνειας. Με εστιγμένη γραμμή παρουσιάζεται η μεταβολή της ηλεκτρικής και μηχανικής ισχύος χωρίς τον εξομοιωτή αδράνειας (όπως στο Σχήμα 5.3), ενώ με συμπαγή γραμμή σχεδιάζονται οι αποκρίσεις που προκύπτουν για ενεργοποίηση του εξομοιωτή αδράνειας με  $T_w = 4s$  και  $k = 5$ .



**Σχ. 5.14** Σύνολο Μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος συμβατικών μονάδων με και χωρίς E/A – Σενάριο I

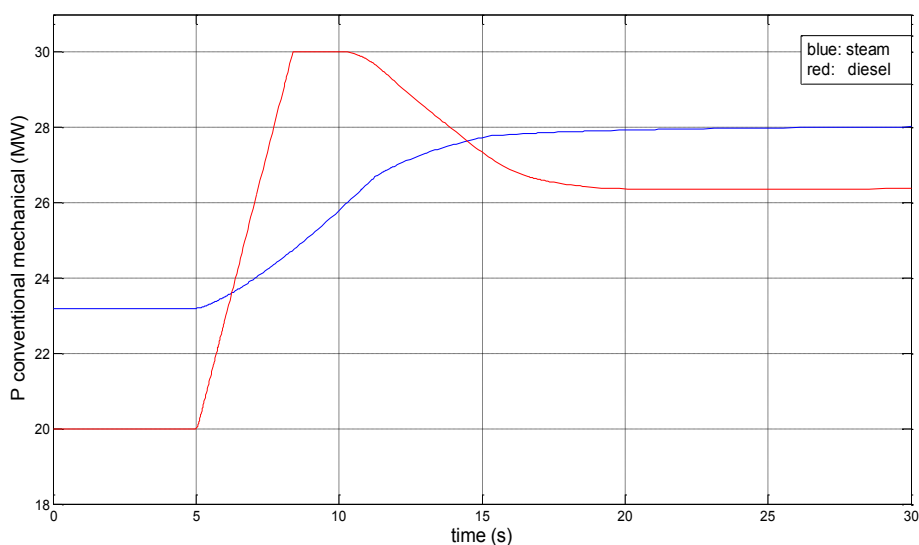
Όπως αναμενόταν, τα αιολικά πάρκα καλύπτουν με την αύξηση της ενεργού ισχύος τους ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας διευκολύνοντας έτσι το έργο των συμβατικών μονάδων. Πιο αναλυτικά, τη στιγμή της διαταραχής αυξάνεται απότομα η συνολική ζητούμενη ηλεκτρική ισχύς από τις συμβατικές μονάδες οδηγώντας σε πτώση της συχνότητας, όπως και στην αρχική περίπτωση. Ωστόσο, ο εξομοιωτής αδράνειας αντιλαμβάνεται αυτή τη βύθιση κι έτσι δίνεται εντολή για αύξηση της ενεργού ισχύος των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών. Η διαφορά μεταξύ της αρχικής (εστιγμένη) και της τελικής (συμπαγής) απόκρισης της ηλεκτρικής ισχύος (μπλε χρώμα) οφείλεται στην αύξηση της ενεργού ισχύος των αιολικών πάρκων (βλ. Σχήμα 5.11). Ο ρυθμός μεταβολής της μηχανικής ισχύος των συμβατικών μονάδων εξακολουθεί να είναι μέγιστος. Έτσι, η συνολική μηχανική ισχύς των συμβατικών μονάδων ξεπερνάει σε τιμή την ηλεκτρική πιο γρήγορα από πριν. Έτσι, το συνολικό εμβαδόν που περικλείεται μεταξύ ηλεκτρικής και μηχανικής ισχύος και το οποίο είναι ανάλογο με τη μέγιστη μεταβατική βύθιση της συχνότητας είναι μικρότερο.

Από το σημείο που η μηχανική ισχύς ξεπερνάει σε τιμή την ηλεκτρική (7s περίπου) και μετά, η συχνότητα αρχίζει να αυξάνεται και οι ανεμογεννήτριες επιταχύνονται στο αρχικό σημείο λειτουργίας τους μειώνοντας την ενεργό ισχύ τους και απορροφώντας ουσιαστικά την ενέργεια που έδωσαν στο δίκτυο κατά τη διάρκεια της αδρανειακής απόκρισης. Αυτό γίνεται αντιληπτό στο Σχήμα 5.14 συγκρίνοντας την απόκριση της ηλεκτρικής ισχύος με και χωρίς τον εξομοιωτή αδράνειας. Μέχρι τα 8s περίπου η συμπαγής γραμμή είναι κάτω από την εστιγμένη. Ωστόσο, μετά τα 8s



η συνολική ζητούμενη ηλεκτρική ισχύς από τις συμβατικές μονάδες είναι μεγαλύτερη καθώς πρέπει να καλύψουν και τη μείωση της ισχύος των αιολικών πάρκων. Αυτό πάντως δεν δημιουργεί πρόβλημα καθώς η μηχανική ισχύς έχει ήδη αυξηθεί σημαντικά και έχει τη δυνατότητα να καλύψει και την επιπλέον ηλεκτρική ισχύ.

Τέλος, όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.15, η μηχανική ισχύς της μονάδας με ντηζελοκινητήρα παραμένει για μικρότερο χρονικό διάστημα στη μέγιστη τιμή της σε σύγκριση με την αρχική απόκριση χωρίς εξομοιωτή αδράνειας (βλ. Σχήμα 5.5) με την εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας, ενώ η παραγωγή μηχανική ισχύς του ατμοστρόβιλου δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα.



Σχ. 5.15 Μηχανική ισχύς συμβατικών μονάδων με E/A – Σενάριο I

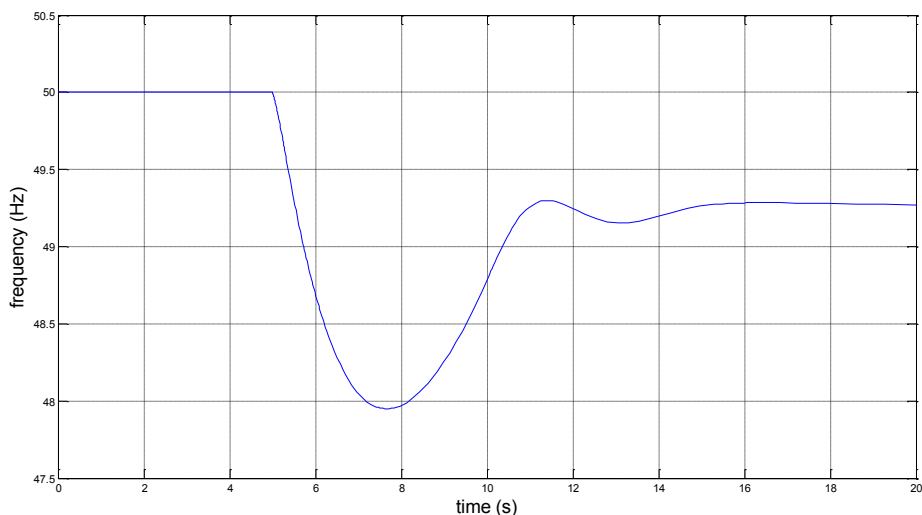
Καταλήγοντας, για το Σενάριο I του συστήματος της Ρόδου, οι προτεινόμενες τιμές του εξομοιωτή αδράνειας για το σύστημα της Ρόδου παρατίθενται στον Πίνακα 5.16.

Πίνακας 5.16 Προτεινόμενες τιμές εξομοιωτή αδράνειας για ΣΗΕ Ρόδου

$T_w$ (s)	k (αμ)	$T_w k$ (αμs)
4	5	20

## 5.4. Προσομοίωση και ανάλυση Σεναρίου II

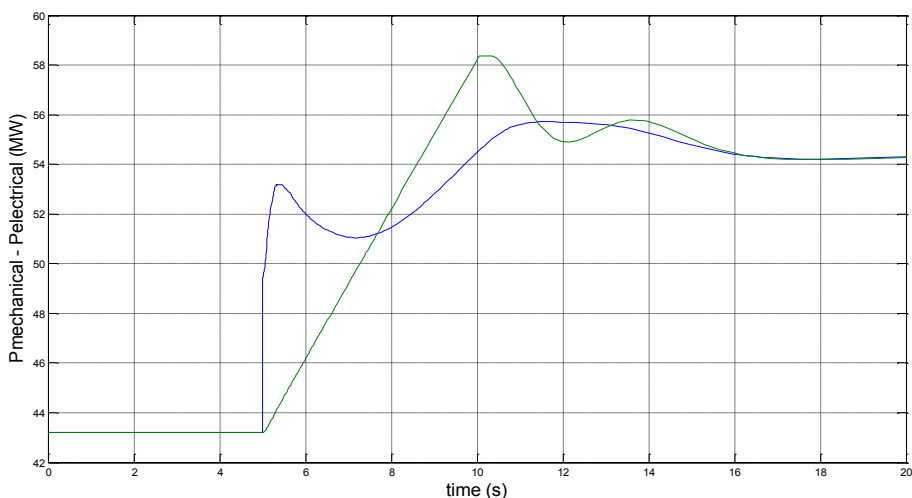
Σε αυτή την ενότητα προσομοιώνεται το Σενάριο II που περιγράφηκε στον Πίνακα 5.15 (χωρίς εφεδρεία των ατμοηλεκτρικών σταθμών). Οι ίδιες θεωρήσεις που έγιναν στο Σενάριο I ισχύουν και για αυτή την περίπτωση. Η απόκριση της συχνότητας του συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.16:



**Σχ. 5.16** Μεταβολή συχνότητας συστήματος Ρόδου – Σενάριο II

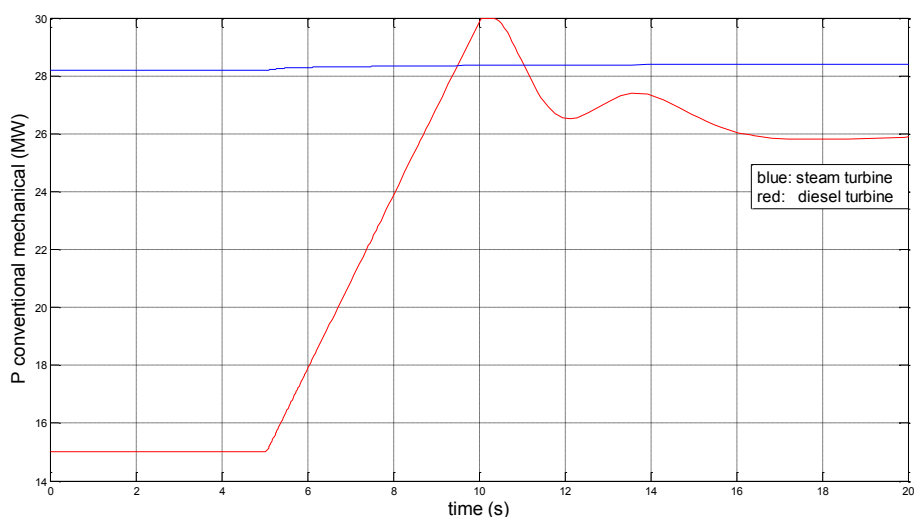
Σε σύγκριση με την αντίστοιχη απόκριση του Σεναρίου I (Σχήμα 5.2) παρατηρείται λίγο μεγαλύτερη μεταβατική βύθιση με τη συχνότητα να φτάνει λίγο κάτω από τα 48Hz περίπου 2,5s μετά τη διαταραχή. Μετά τα 7,5s περίπου η συχνότητα αρχίζει να επαναφέρεται στην τιμή μόνιμης κατάστασης, η οποία είναι ίση με 49,3Hz περίπου. Το σφάλμα μόνιμης κατάστασης είναι μεγαλύτερο σε αυτή την περίπτωση από ότι στο Σενάριο I, επειδή η ισχύς του αεριοστρόβιλου αναλαμβάνεται εξολοκλήρου από την νηξελογεννήτρια και δεν μοιράζεται σε δύο συμβατικές μονάδες.

Στο Σχήμα 5.17 παρατίθενται με μπλε και πράσινο χρώμα αντίστοιχα η συνολική παραγόμενη μηχανική και ηλεκτρική ισχύς των συμβατικών μονάδων παραγωγής. Όπως και στο Σενάριο I, στο διάστημα που παρατηρείται βύθιση της συχνότητας, η ηλεκτρική ισχύς είναι μεγαλύτερη της μηχανικής, ενώ μετά τα 7,5s που παρατηρείται η επαναφορά της συχνότητας, η συνολική παραγόμενη μηχανική ισχύς έχει ξεπεράσει σε τιμή την ηλεκτρική.



**Σχ. 5.17** Παραγόμενη μηχανική και ηλεκτρική ισχύς συμβατικών μονάδων - Σενάριο II

Ο ρυθμός αύξησης της μηχανικής ισχύος σε αυτή την περίπτωση είναι λίγο μικρότερος από ότι για το Σενάριο I κάτι που οφείλεται στο ότι σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει συμμετοχή των ατμοστρόβιλων στην πρωτεύουσα ρύθμιση. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο Σχήμα 5.18 που παρουσιάζεται η μεταβολή της μηχανικής ισχύος για κάθε συμβατική μονάδα ξεχωριστά και δικαιολογεί τη μεγαλύτερη μεταβατική βύθιση της συχνότητας σε σύγκριση με το Σενάριο I.



Σχ. 5.18 Μηχανική ισχύς εναπομενουσών συμβατικών μονάδων - Σενάριο II

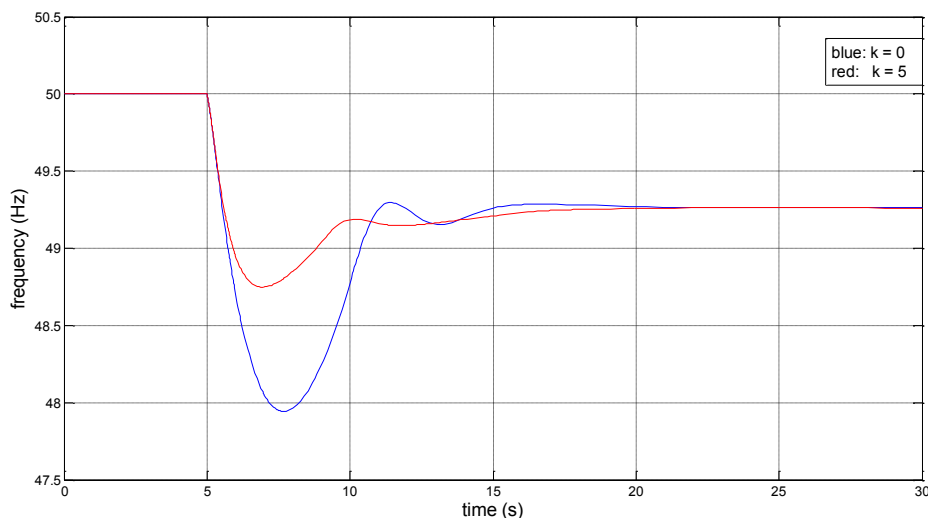
Οι τάσεις των ζυγών καθώς και η συμπεριφορά των αιολικών πάρκων παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με το Σενάριο I και προς χάριν συντομίας παραλείπονται.

Και σε αυτή την περίπτωση, η μεταβατική βύθιση της συχνότητας ξεπερνάει τα ασφαλή όρια λειτουργίας και το ΣΗΕ θα εξαναγκαζόταν σε αποκοπή φορτίου περίπου 1s μετά τη διαταραχή. Συνεπώς η συνεισφορά των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών στην αδρανειακή απόκριση κρίνεται απαραίτητη.

## 5.5. Εισαγωγή εξομοιωτή αδράνειας στο Σενάριο II – Σύγκριση αποκρίσεων για διαφορετική επιλογή παραμέτρων

Όπως αναλύθηκε στο Σενάριο I, ακολουθείται μία συντηρητική προσέγγιση όσον αφορά την επιλογή της χρονικής σταθεράς του εξομοιωτή αδράνειας. Γι' αυτό το λόγο, η επιλογή της χρονικής σταθεράς για το σύστημα της Ρόδου επιλέγεται ίση με  $T_w=4s$  από τη χρονική σταθερά αναθέρμανσης του ατμοστρόβιλου. Για τη συγκεκριμένη τιμή της χρονικής σταθεράς βρέθηκε ότι μια ικανοποιητική τιμή για το κέρδος  $k$  του εξομοιωτή αδράνειας είναι  $k = 5$  για το συγκεκριμένο σύστημα (Πίνακας 5.16). Στο Σχήμα 5.19 σχεδιάζεται η μεταβολή της συχνότητας του

συστήματος με και χωρίς εξομοιωτή αδράνειας. Με μπλε χρώμα σχεδιάζεται η αρχική απόκριση του συστήματος, ενώ με κόκκινο η απόκριση για  $T_w = 4s$  και  $k = 5$ .

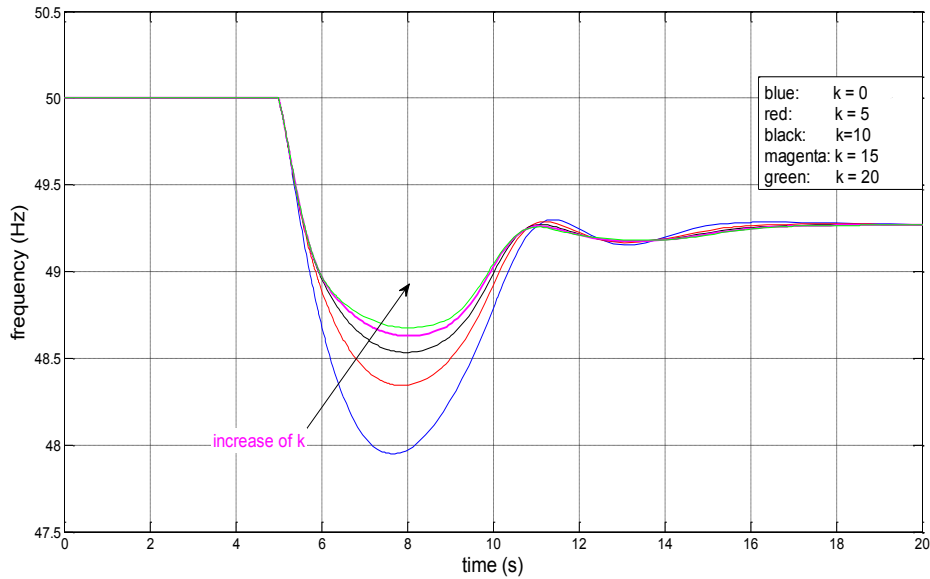


Σχ. 5.19 Συχνότητα συστήματος με και χωρίς εξομοιωτή αδράνειας – Σενάριο II

Και σε αυτή την περίπτωση, μειώνεται σημαντικά η μεταβατική βύθιση, η οποία φτάνει μέχρι τα 48,8Hz περίπου. Όπως και στο Σενάριο I, αποφεύγεται η αποκοπή φορτίου για ρύθμιση των ηλεκτρονόμων στα 48,5Hz, ενώ επιτυγχάνεται κι ένα περιθώριο 0,3Hz περίπου. Συμπεραίνεται ότι η συγκεκριμένη επιλογή συνεισφέρει καθοριστικά στην αξιοπιστία του συστήματος υπό συνθήκες υψηλής αιολικής διεύθυνσης.

Ωστόσο, όπως φάνηκε στην ενότητα 5.4, ο ατμοστρόβιλος δεν διαθέτει στρεφόμενη εφεδρεία και δεν αυξάνει την παραγωγή του ώστε να συνεισφέρει στη ρύθμιση της συχνότητας. Έτσι, η ανάληψη του φορτίου γίνεται αποκλειστικά από τις Ντηζελογεννήτριες. Για το λόγο αυτό, θα γίνει προσομοίωση του συστήματος και για επιλογή της σταθεράς του εξομοιωτή αδράνειας ίση με τη χρονική σταθερά του ρυθμιστή στροφών της ντηζελογεννήτριας, δηλαδή για  $T_w = 0,7s$ . Στη συνέχεια θα συγκριθεί το αποτέλεσμα με την απόκριση που επιτυγχάνεται για τις τιμές του Πίνακα 5.17 για τον εξομοιωτή αδράνειας. Για τις παραμέτρους του ελέγχου στροφών των ανεμογεννητριών ισχύουν οι τιμές που επιλέχθηκαν και κατά την εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας στο Σενάριο I.

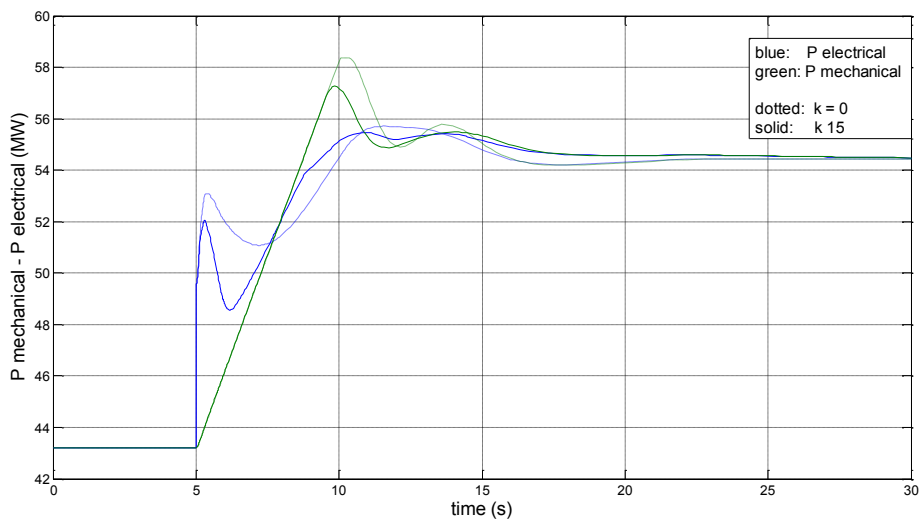
Στο Σχήμα 5.20 σχεδιάζεται με μπλε χρώμα η συχνότητα του συστήματος για  $k = 0$ , με κόκκινο για  $k = 5$ , με μαύρο για  $k = 10$ , με μωβ για  $k = 15$  και με πράσινο για  $k = 20$ . Η βελτίωση που επιτυγχάνεται για αύξηση από  $k = 10$  σε  $k = 15$  είναι σημαντικά μικρότερη, ενώ για ακόμα μεγαλύτερη αύξηση γίνεται σχεδόν αμελητέα.



**Σχ. 5.20** Μεταβολή συχνότητας ΣΗΕ Ρόδου για διάφορες τιμές  $k$  – Σενάριο II

Για  $T_w = 0,7s$  προκύπτει συνεπώς ότι μια ικανοποιητική τιμή είναι για το κέρδος του εξομοιωτή αδράνειας είναι  $k = 15$ .

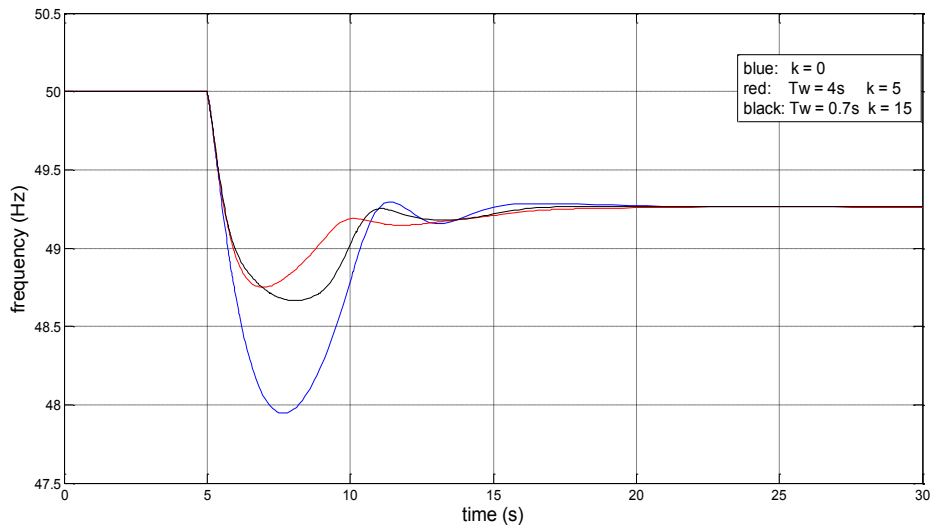
Στο Σχήμα 5.21 απεικονίζεται η συνολική ηλεκτρική και μηχανική ισχύς των συμβατικών μονάδων με και χωρίς τον εξομοιωτή αδράνειας όπου και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μείωση της διαφοράς μεταξύ τους αμέσως μετά τη διαταραχή λόγω της αδρανειακής απόκρισης των ανεμογεννητριών.



**Σχ. 5.21** Παραγόμενη μηχανική και ηλεκτρική ισχύς συμβατικών μονάδων με και χωρίς E/A – Σενάριο II

Στο Σχήμα 5.22 παρατίθεται η απόκριση της συχνότητας για τις παραπάνω τιμές σε σύγκριση με την απόκριση που προέκυψε για τιμές του Πίνακα 5.17. Και για τις δύο περιπτώσεις παρατηρείται ότι η βελτίωση στην απόκριση της συχνότητας είναι σημαντική σε σχέση με την αρχική χωρίς εξομοιωτή αδράνειας. Ωστόσο, η απόκριση που αντιστοιχεί σε  $T_w = 4s$  (κόκκινο χρώμα) παρουσιάζει γενικά καλύτερα

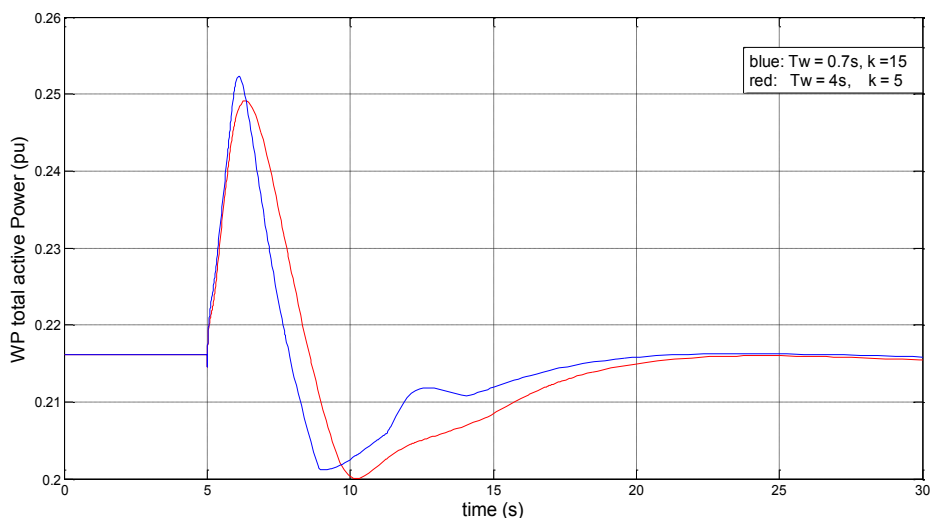
χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζει λίγο μικρότερη μεταβατική βύθιση, ενώ η συχνότητα αρχίζει να επανέρχεται νωρίτερα.



Σχ. 5.22 Σύγκριση απόκρισης συχνότητας για  $T_w = 4s$  και  $T_w = 0,7s$

Αυτό οφείλεται σε δύο παράγοντες. Πρώτον, όπως σημειώθηκε στο Κεφάλαιο 4 (Σχήματα 4.35 και 4.36), ο περιοριστής ρυθμού έχει ιδιαίτερη επίδραση στην εγχεόμενη ισχύ όταν επιλέγεται μικρή χρονική σταθερά εξομοιωτή αδράνειας, ενώ η επίδρασή του για μεγαλύτερες τιμές του  $T_w$  είναι σχεδόν αμελητέα (Σχήμα 4.40). Δεύτερον, η έγχυση ισχύος των αιολικών πάρκων διατηρείται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για την επιλογή  $T_w = 4s$  ( $k = 5$ ). Έτσι το χρονικό περιθώριο που έχουν οι συμβατικές μονάδες για να καλύψουν το φορτίο πριν η ισχύς των αιολικών πάρκων πέσει σε τιμές κάτω από τις αρχικές τους είναι μεγαλύτερο.

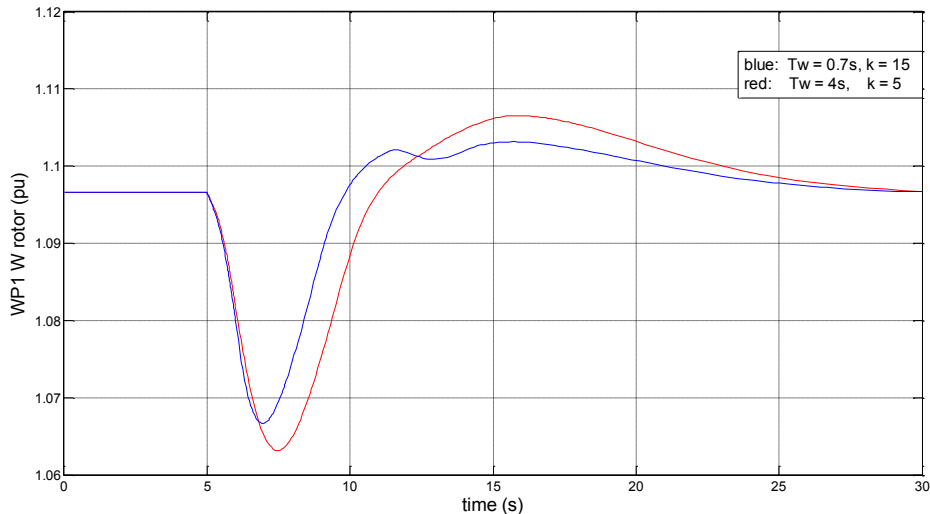
Στο Σχήμα 5.23 παρατίθεται η συνολική ισχύς από τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών του συστήματος (ΑΠ1, ΑΠ2, ΑΠ3, ΑΠ5) για τις δύο διαφορετικές χρονικές σταθερές, όπου επαληθεύονται τα παραπάνω.



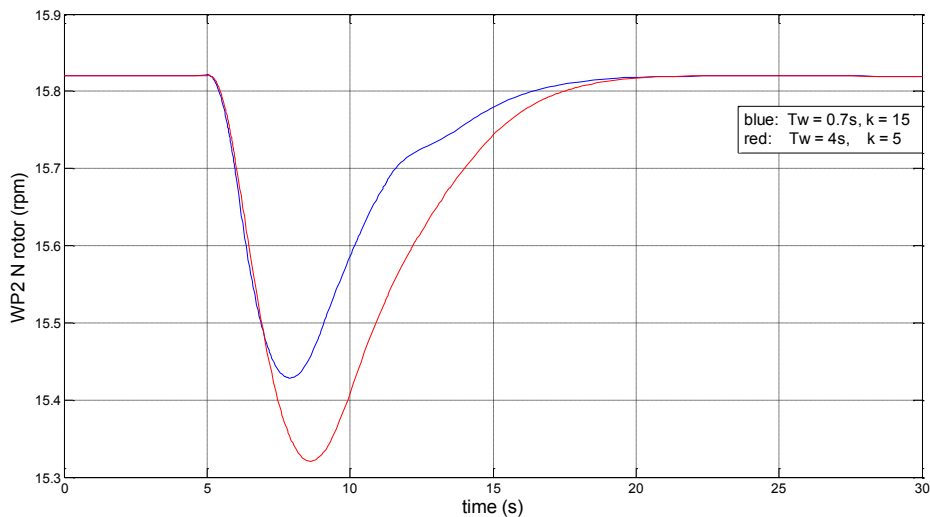
Σχ. 5.23 Συνολική ισχύς αιολικών πάρκων για  $T_w = 4s$  και  $T_w = 0,7s$

Η απόκριση που σχεδιάζεται με κόκκινο χρώμα και αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη χρονική σταθερά παρουσιάζει εξίσου γρήγορη αύξηση της έγχυσης ισχύος, ενώ υποχωρεί σε τιμές μικρότερης της αρχικής περίπου 1s πιο αργά από την απόκριση που αντιστοιχεί στη μικρότερη χρονική σταθερά και σχεδιάζεται με μπλε χρώμα.

Αυτό έχει φυσικά μεγαλύτερη επίπτωση στις ανεμογεννήτριες καθώς η συνολική ενέργεια που εγχέεται κατά τη διάρκεια της αδρανειακής απόκρισης είναι μεγαλύτερη και οδηγεί σε μεγαλύτερη επιβράδυνση των δρομέων, όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.24 και 5.25 για το ΑΠ1 και ΑΠ2 αντίστοιχα.



Σχ. 5.24 Ταχύτητα δρομέα ΑΠ1 για  $T_w = 4s$  και  $T_w = 0,7s$



Σχ. 5.25 Ταχύτητα δρομέα ΑΠ2 για  $T_w = 4s$  και  $T_w = 0,7s$

Η παραπάνω επιβράδυνση ωστόσο, στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική και δεν προκαλεί προβλήματα. Γι' αυτό το λόγο προτιμάται η επιλογή της μεγαλύτερης χρονικής σταθεράς, η οποία αντιστοιχεί στη γενική περίπτωση κι επιφέρει καλύτερο αποτέλεσμα.

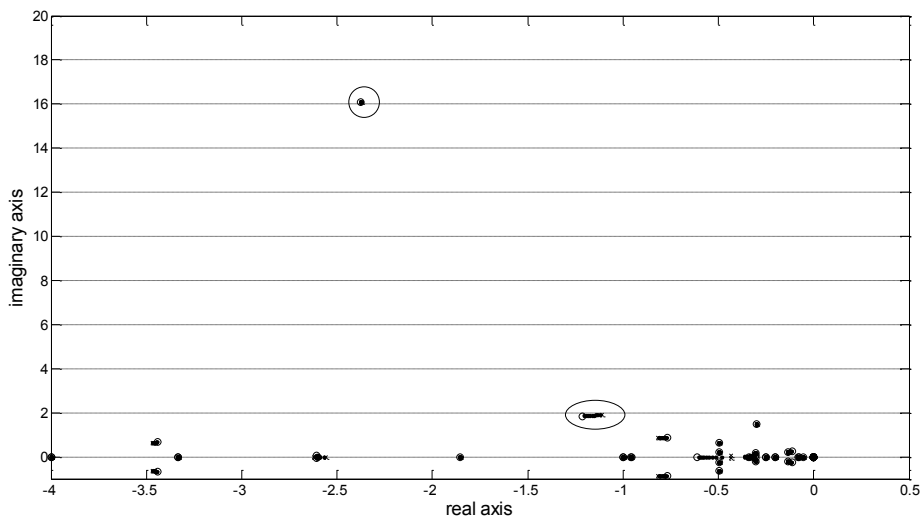
Καταλήγοντας, συμπεραίνεται ότι οι τιμές του Πίνακα 5.18 έχουν εφαρμογή και στην περίπτωση που οι ατμοστροβιλικές μονάδες δεν έχουν διαθέσιμη εφεδρεία.

## 5.6. Γραμμικοποίηση συστήματος Ρόδου

Σε αυτή την ενότητα γίνεται γραμμικοποίηση του συστήματος της Ρόδου και εξετάζεται πώς μεταβάλλεται ο βασικός ταλαντωτικός ρυθμός που σχετίζεται με τη ρύθμιση συχνότητας μετά την εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας.

Η γραμμικοποίηση του συστήματος γίνεται στο σημείο ισορροπίας μετά τη διαταραχή [14]. Δηλαδή έχει αφαιρεθεί η μονάδα με τον αεριοστρόβιλο και η επίλυση του δικτύου γίνεται με αρχικές συνθήκες αυτές που προέκυψαν μετά την προσομοίωση της διαταραχής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση λήφθηκαν ως αρχικές συνθήκες τα αποτελέσματα του Σεναρίου II. Ωστόσο, οι διαφορές ανάμεσα στα δύο σενάρια είναι μικρές και σχεδόν ίδια αποτελέσματα προκύπτουν και αν επιλεγεί το τελικό σημείο λειτουργίας του Σεναρίου I.

Στο Σχήμα 5.26 σχεδιάζονται οι ιδιοτιμές του συστήματος της Ρόδου για  $T_w=4s$  καθώς το κέρδος  $k$  του εξομοιωτή αδράνειας μεταβάλλεται από  $k = 0$  ('x') έως  $k = 20$  ('o'). Η ανάλυση επικεντρώνεται στις ιδιοτιμές με πραγματικό μέρος μεγαλύτερο από -4, στις οποίες περιλαμβάνονται και επισημαίνονται οι κυρίαρχοι ταλαντωτικοί ρυθμοί του συστήματος που συσχετίζονται με τη συχνότητα του συστήματος.



Σχ. 5.26 Ιδιοτιμές συστήματος Ρόδου μετά τη διαταραχή (πραγματικό μέρος  $> -4$ , φανταστικό μέρος  $> 0$ )

Αρχικά, επιβεβαιώνεται η ευστάθεια μόνιμου καταστάσεως με όλες τις ιδιοτιμές του συστήματος να βρίσκονται στο αριστερό ημιεπίπεδο για κάθε τιμή του κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας, ενώ δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη ευαισθησία.

Οι δύο μιγαδικές ιδιοτιμές σημειώνονται και επεξηγούνται στον Πίνακα 5.17 για  $k = 0$ . Από τις δύο ιδιοτιμές μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η δεύτερη ιδιοτιμή



που σχετίζεται με τη ρύθμιση της συχνότητας και παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταβολή καθώς αυξάνεται το κέρδος του εξομοιωτή αδράνειας.

*Πίνακας 5.17 Κυρίαρχοι ταλαντωτικοί ρυθμοί απόκρισης ΣΗΕ Ρόδου*

Ιδιοτιμή	Λόγος απόσβεσης	Αντίστοιχος ρυθμός
$-2,3733 \pm j16,099$	0,145	Ηλεκτρομηχανική ταλάντωση – σύγχρονων μηχανών
$-1,1115 \pm j1,9120$	0,503	Ταλάντωση ρύθμισης συχνότητας συστήματος

Στον Πίνακα 5.18 παρουσιάζεται η τιμή της ιδιοτιμής που σχετίζεται με την ταλάντωση ρύθμισης συχνότητας του συστήματος για αύξηση του κέρδους  $k$  του εξομοιωτή αδράνειας από 0 σε 5.

*Πίνακας 5.18 Μεταβολή ιδιοτιμής ρύθμισης συστήματος για αύξηση του κέρδους του E/A*

k	Ιδιοτιμή	Λόγος απόσβεσης
0	$-1,1115 \pm j1,9120$	0,503
5	$-1,1360 \pm j1,8950$	0,514

Όπως παρατηρείται η εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας με τη συγκεκριμένη τιμή έχει μικρή επιρροή στο γραμμικοποιημένο σύστημα. Ωστόσο, η βελτίωση που παρατηρήθηκε κατά την προσομοίωση είναι ιδιαίτερα σημαντική. Αυτό οφείλεται στο ότι η διαταραχή οδηγεί τα συστήματα σε λειτουργία εκτός της γραμμικής περιοχής, όπως φάνηκε και από το σταθερό ρυθμό αύξησης της μηχανικής ισχύος των συμβατικών μονάδων στην προηγούμενη ενότητα (βλ. Σχήμα 5.15). Έτσι, ο ρυθμός μείωσης της συχνότητας και η μεταβατική βύθιση που προκαλείται στο μη γραμμικοποιημένο σύστημα είναι μεγαλύτερη οδηγώντας έτσι, σε μεγαλύτερη συνεισφορά του εξομοιωτή αδράνειας.

## 5.7. Συμπεράσματα για το σύστημα της Ρόδου

Συνοψίζοντας, η εισαγωγή του εξομοιωτή αδράνειας οδηγεί γενικά σε σημαντική βελτίωση της απόκρισης του συστήματος της Ρόδου. Στην παρούσα διπλωματική προτείνεται η επιλογή της μεγαλύτερης χρονικής σταθεράς από αυτές που σχετίζονται με τη ρύθμιση της συχνότητας μέσω της αύξησης της παραγωγής της μηχανικής ισχύος τους (Πίνακας 5.17). Με τη συγκεκριμένη επιλογή η αδρανειακή υποβοήθηση των ανεμογεννητριών διαρκεί για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα δίνοντας έτσι μεγαλύτερο χρονικό περιθώριο στις συμβατικές μονάδες μέχρι να αυξήσουν τη μηχανική παραγωγή τους και να καλύψουν το επιπλέον φορτίο που τους αναλογεί. Η συγκεκριμένη επιλογή γίνεται για την γενική περίπτωση που όλες οι μονάδες συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση της συχνότητας. Ωστόσο, αποδείχθηκε πως

επιφέρει εξίσου καλό αποτέλεσμα ακόμα και στην περίπτωση που η συγκεκριμένη μονάδα δεν διαθέτει στρεφόμενη εφεδρεία και το επιπλέον φορτίο αναλαμβάνεται εξολοκλήρου από την πιο γρήγορη μονάδα.

Γενικά, όπως φάνηκε και στο 3ο Κεφάλαιο, ένα σύστημα με γρήγορη απόκριση χρειάζεται αδρανειακή υποστήριξη για μικρότερο χρονικό διάστημα από τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, καθώς η ανάληψη φορτίου από τις συμβατικές μονάδες γίνεται συντομότερα. Αντιθέτως, σε ένα σύστημα με σχετικά αργή απόκριση σε μια διαταραχή του ισοζυγίου ισχύος, η αδρανειακή υποστήριξη των ανεμογεννητριών απαιτείται για μεγαλύτερο διάστημα, ώστε να αποφευχθεί η μείωση της αιολικής ισχύος πριν την κάλυψη του φορτίου από τις συμβατικές μονάδες.

Έτσι, οι ανάγκες κάθε αυτόνομου δικτύου όσον αφορά την αδρανειακή υποστήριξη ποικίλλουν. Γι' αυτό το λόγο παρουσιάζεται η ανάγκη για κατάλληλο σχεδιασμό-κατασκευή της ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών ώστε να έχει τη δυνατότητα για παροχή αδρανειακής υποστήριξης είτε για μικρό είτε για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Τέλος, από τη γραμμικοποίηση του συστήματος στο σημείο ισορροπίας μετά τη διαταραχή, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο εξομοιωτής αδράνειας έχει μικρή επίδραση στο γραμμικοποιημένο σύστημα και δεν προκαλεί πρόβλημα στην ευστάθεια μονίμου καταστάσεως του συστήματος.

# Κεφάλαιο 6

## Συμπεράσματα – Μελλοντικές Προοπτικές

### 6.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική έγινε ανάλυση και σχεδίαση ενός εξομοιωτή αδράνειας για ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών. Η ανάγκη για σχεδίαση του εξομοιωτή αδράνειας δημιουργήθηκε από τα προβλήματα που προκάλεσε στα αυτόνομα συστήματα η αύξηση της αιολικής διείδυσης. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε, η αντικατάσταση συμβατικών μονάδων από αιολικά πάρκα με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της αδράνειας του συστήματος και σε μεγάλες αποκλίσεις της συχνότητας από την ονομαστική κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης διαταραχής στο ισοζύγιο ισχύος. Με τον εξομοιωτή αδράνειας, δίνεται η δυνατότητα στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών για προσωρινή συνεισφορά στην αδρανειακή απόκριση καλύπτοντας ένα μέρος της ζητούμενης ηλεκτρικής ισχύος μέχρι να αντιδράσουν οι στρόβιλοι των συμβατικών μονάδων.

Αρχικά περιγράφηκε η αρχή σχεδίασης του εξομοιωτή αδράνειας που ακολουθείται σε αυτή τη διπλωματική. Η ανάλυση έγινε αρχικά σε ένα απλοποιημένο σύστημα για ανάλυση της ευστάθειας συχνότητας με μια ισοδύναμη σύγχρονη γεννήτρια και έναν ιδανικό εξομοιωτή αδράνειας. Αποδείχτηκε ότι με τη συγκεκριμένη αρχή σχεδίασης επιτυγχάνεται η βελτίωση των χαρακτηριστικών της απόκρισης της συχνότητας του συστήματος μετά από μια διαταραχή στο ισοζύγιο μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος. Στη συνέχεια, έγινε εφαρμογή της αρχής σχεδίασης για δύο διαφορετικούς ρυθμιστές στροφών, όπου αποδείχτηκε και πάλι ότι επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση της απόκρισης της συχνότητας του συστήματος. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του κέρδους του εξομοιωτή αδράνειας οδηγεί σε μεγαλύτερη έγχυση ισχύος από τις ανεμογεννήτριες και σε βελτίωση της συχνότητας, μέχρις ότου να εμποδιστεί η περαιτέρω βελτίωση από τον περιορισμό που τέθηκε στην έξοδό του. Η τελική επιλογή των παραμέτρων έγινε σε κάθε περίπτωση από τη χειρότερη αναμενόμενη διαταραχή. Τέλος, έγινε αντιληπτό ότι ένα γρήγορο σύστημα έχει μικρότερη ανάγκη για αδρανειακή υποστήριξη από ένα πιο αργό.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε ο εξομοιωτής αδράνειας στα δύο μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών που περιγράφηκαν στις ενότητες 2.3.6 και 2.3.7. Για αυτή την εφαρμογή λήφθηκαν περαιτέρω περιορισμοί υπόψη ώστε να περιοριστεί η απόκλιση από την κανονική λειτουργία της ανεμογεννήτριας και να μην καταπονηθεί σημαντικά η ανεμογεννήτρια. Έγιναν δοκιμές πρώτα για το μοντέλο της ανεμογεννήτριας πλήρους μετατροπέα και στη συνέχεια για το μοντέλο διπλής τροφοδότησης και στα δύο συστήματα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Πρώτα εξετάστηκε η επίδραση του εξομοιωτή αδράνειας για λειτουργία ανεμογεννήτριας

υπό μερικό φορτίο. Και για τα δύο μοντέλα παρατηρήθηκε ότι, αν και η γενική συμπεριφορά ήταν παρόμοια, το αποτέλεσμα διέφερε από το αντίστοιχο που είχε επιτευχθεί με τον ιδανικό εξομοιωτή αδράνειας. Αυτό οφειλόταν σε δύο παράγοντες. Ο ένας ήταν ο επιπλέον περιορισμός που εισήχθη στο ρυθμό αύξησης της ισχύος του εξομοιωτή αδράνειας και ο δεύτερος παράγοντας ήταν ο έλεγχος στροφών της ανεμογεννήτριας που έτεινε να ανατρέψει το αποτέλεσμα του εξομοιωτή αδράνειας. Όσον αφορά τον έλεγχο στροφών, αποφασίστηκε η καθυστέρησή του και για τα δύο μοντέλα ανεμογεννήτριας, ώστε να μειωθεί η επίδρασή του κατά τη διάρκεια της αδρανειακής απόκρισης. Τελικά, επιτεύχθηκε καλύτερο αποτέλεσμα και στα δύο συστήματα.

Επιπλέον, εξετάστηκε η επίδραση του εξομοιωτή αδράνειας σε περίπτωση λειτουργίας υπό πλήρες φορτίο με γωνία πτερυγίων μεγαλύτερη του μηδενός. Για το μοντέλο της ΑΓΠΜ δεν παρατηρήθηκε κάποιο πρόβλημα στη συνεργασία μεταξύ των δύο σχημάτων ελέγχου. Αντίθετα στο μοντέλο ΑΓΔΤ, παρατηρήθηκαν έντονες ταλαντώσεις οι οποίες μειώθηκαν σε αποδεκτά επίπεδα τροποποιώντας τον έλεγχο της γωνίας βήματος. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι σε λειτουργία υπό ονομαστική ισχύ ενδέχεται να υπάρχουν περιορισμοί για το μέγιστο δυνατό ρεύμα που μπορεί να εγχύσει η ανεμογεννήτρια (ή ο μετατροπέας) στο δίκτυο, που θα περιορίσουν την αδρανειακή απόκριση. Αυτό παρατηρήθηκε στο μοντέλο ΑΓΠΜ όπου ο περιορισμός για το μέγιστο δυνατό ενεργό ρεύμα ήταν αυστηρότερος από τον περιορισμό στην έξοδο του εξομοιωτή αδράνειας.

Τέλος, προσομοιώθηκε το σύστημα της Ρόδου για δύο σενάρια με διαφορετική κατανομή παραγωγής μεταξύ των συμβατικών μονάδων και σημαντική αιολική διείσδυση. Αποδείχθηκε ότι για την απώλεια της μεγαλύτερης συμβατικής μονάδας είναι απαραίτητη η συνεισφορά των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών ώστε να επιτευχθεί η αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος. Εφαρμόζοντας τον εξομοιωτή αδράνειας για τη γενική περίπτωση που όλες οι συμβατικές μονάδες συμμετέχουν στη ρύθμιση συχνότητας επιτεύχθηκε η βελτίωση της απόκρισης της συχνότητας, ενώ υπό προϋποθέσεις αποφεύγεται η ενεργοποίηση των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας. Το ίδιο αποτέλεσμα επιτεύχθηκε και στην περίπτωση που οι αργές μονάδες (από τις οποίες επιλέχτηκε η χρονική σταθερά του εξομοιωτή αδράνειας) δεν συμμετείχαν στην πρωτεύουσα ρύθμιση λόγω έλλειψης στρεφόμενης εφεδρείας.

## 6.2. Μελλοντικές προοπτικές

Αντικείμενο μελλοντικής έρευνας μπορεί να αποτελέσει η βελτιστοποίηση των παραμέτρων των ελέγχων που σχετίζονται άμεσα με τον εξομοιωτή αδράνειας δηλαδή του ελέγχου στροφών και του ελέγχου γωνίας πτερυγίων. Ειδικά για τον έλεγχο γωνίας πτερυγίων του μοντέλου ΑΓΔΤ πρέπει να εξεταστεί κατά πόσο μπορούν να μειωθούν περαιτέρω οι ταλαντώσεις που παρατηρήθηκαν και αν είναι

δυνατόν να επιτευχθεί θετική συνεισφορά του ελέγχου πτερυγίων στην αδρανειακή απόκριση παρόμοια με αυτή που παρατηρήθηκε για το μοντέλο ΑΓΠΜ.

Στην παρούσα διπλωματική, εξετάστηκε η αδρανειακή απόκριση για δύο μοντέλα ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών. Το μοντέλο ΑΓΔΤ έχει σχεδιαστεί με βάση τη μοντελοποίηση συγκεκριμένης εταιρείας, από την οποία και λήφθηκαν τα όρια που τέθηκαν στον εξομοιωτή αδράνειας. Στο Κεφάλαιο 4 αποδείχθηκε ότι για χαλάρωση του περιοριστή ρυθμού και υπό κάποιες προϋποθέσεις μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά το αποτέλεσμα. Έτσι, θα ήταν σημαντικό να γίνει σύγκριση μεταξύ αποτελεσμάτων για διαφορετικά μοντέλα ανεμογεννητριών με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά.

Επιπλέον, θα μπορούσε να γίνει προσομοίωση του συστήματος της Ρόδου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα χρησιμοποιώντας πραγματικές χρονοσειρές ανέμου και διαφορετικά σενάρια κατανομής παραγωγής ώστε να εξεταστεί η επίδραση του εξομοιωτή αδράνειας για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και σε μεταβαλλόμενες απαιτήσεις του δικτύου. Παράλληλα με αυτό, ενδιαφέρον παρουσιάζει η οικονομική ανάλυση της εφαρμογής του εξομοιωτή αδράνειας. Συγκεκριμένα, λόγω της τροποποίησης των διαφόρων σχημάτων ελέγχου της ανεμογεννήτριας (π.χ. καθυστέρηση ελέγχου στροφών), πρέπει να εξεταστεί αν αυτό οδηγεί μεσοπρόθεσμα σε κάποια οικονομική επιβάρυνση των διαχειριστών των αιολικών πάρκων. Φυσικά, για το παραπάνω είναι απαραίτητο να συμπληρωθεί η βιβλιοθήκη WHSSP με ένα μοντέλο ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης που να είναι κατάλληλο για προσομοίωση διαταραχών ανέμου.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η τροποποίηση των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών ώστε να διαθέτουν στρεφόμενη εφεδρεία και να συνεισφέρουν με αυτόν τον τρόπο στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του συστήματος. Μάλιστα ο συνδυασμός των δύο σχημάτων ελέγχου για συμμετοχή στη ρύθμιση συχνότητας (αδρανειακή απόκριση και στρεφόμενη εφεδρεία) θα μπορούσε να επιφέρει ακόμα σημαντικότερο αποτέλεσμα και χρήζει διερεύνησης.

Τέλος, ένα θέμα που θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο έρευνας είναι η ανάπτυξη κεντρικού ελέγχου των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής όσον αφορά τη ρύθμιση συχνότητας. Να εξεταστεί δηλαδή, η δυνατότητα προσαρμογής των παραμέτρων του εξομοιωτή αδράνειας (ή/και άλλων σχημάτων ελέγχου που σχετίζονται με τη ρύθμιση της συχνότητας) στις εκάστοτε συνθήκες του δικτύου. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να δίνεται εντολή από τον διαχειριστή του αιολικού πάρκου σε συντονισμό με τον διαχειριστή του δικτύου για απενεργοποίηση του εξομοιωτή αδράνειας σε κάποιες ή και όλες από τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών λόγω χαμηλής αιολικής διεύθυνσης.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Βουρνάς, Β.Κ. Παπαδιάς, Κ. Ντελκής, “Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας-Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2011.
- [2] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2010.
- [3] P. Kundur, “Power System Stability and Control”, EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994.
- [4] T. Van Cutsem, C. D. Vournas, “Voltage Stability of Electric Power System”, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [5] P. Kundur, et al, “Definitions and Classification of Power System Stability”, IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 1387-1401, May 2004.
- [6] C.D. Vournas, E.G. Potamianakis, C. Moors, T. Van Cutsem, “An educational simulation tool for power system control and stability”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 1, pp. 48-55, February 2004.
- [7] Ε.Γ. Ποταμιανάκης, “Προσομοίωση και Γραμμικοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας για την Ανάλυση Βραχυπρόθεσμης Ευστάθειας Τάσης”, διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, Απρίλιος 2006.
- [8] G. Tsourakis “Induction-Machine Based Wind Energy Conversion Systems: Modeling and Applications”, μεταπτυχιακή εργασία, Universite de Liege, Ακαδημαϊκό έτος 2002-2003.
- [9] Γ. Τσουράκης “Συμβολή της Αιολικής Διείσδυσης στην Ευστάθεια των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας”, διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος 2010.
- [10] Μ.Π. Παπαδόπουλος “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές”, ΕΜΠ, Αθήνα 1997.

- [11] Μ.Π. Παπαδόπουλος, “Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας”, ΕΜΠ, Αθήνα 1994.
- [12] Σ. Παπαθανασίου, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – Σημειώσεις Παραδόσεων”, ΕΜΠ, Αθήνα 2008.
- [13] Ι.Δ. Μάργαρης, “Μοντελοποίηση ανεμογεννητριών για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διεύθυνσης”, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2011.
- [14] Ι.Γ. Σφακιανάκης, “Οργάνωση βιβλιοθήκης μοντέλων για προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με αυξημένη αιολική διεύθυνση και σχεδίαση αδρανειακού ελεγκτή ανεμογεννητριών σε αυτόνομο σύστημα”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2012.
- [15] Σ.Ι. Νάνου, “Μοντέλο Ανεμογεννήτριας με πλήρη μετατροπέα για μελέτες ευστάθειας”, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2009.
- [16] Μ.Α. Κοτλίδα, “Αποκοπή φορτίου για προστασία από αστάθεια τάσεως”, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2013.
- [17] Ι.Κ. Μάντζαρης, διπλωματική εργασία με θέμα “Ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς σταθμού συνδυασμένου κύκλου”, ΕΜΠ, Αθήνα, Νοέμβριος 2005.
- [18] N.D. Hatziaargyriou, A.P. Sakis Meliopoulos, “Distributed Energy Sources: Technical Challenges”, Power Engineering Society Winter Meeting, 2002, 1017-1022
- [19] WECC, IEEE, “Description and Technical Specifications for Generic WTG Models – A Status Report”, Power Systems Conference and Exposition, Phoenix, Arizona, U.S.A., 20-23 March 2011.
- [20] N.W. Miller, J.J. Sanchez-Gasca, W.W. Price, “Dynamic modeling of ge 1.5 and 3.6 mw wind turbine-generators for stability simulations”, Proc. IEEE PES Gen Meeting, Toronto, Canada, Jul 2003.
- [21] W.W. Price, J.J. Sanchez-Gasca, “Simplified Wind Turbine Generator Aerodynamic Models for Transient Stability Studies”, Proc. IEEE PES 2006 Power Systems Conference and Exposition (PSCE), GA, Atlanta, Oct. 2006, 986-992.



- [22] K. Clark, N.W. Miller, J.J. Sanchez-Gasca, “Modeling of GE Wind Turbine-Generators for Grid Studies”, Version 4.5, April 16, 2010.
- [23] “Modeling and dynamic behavior of wind generation as it relates to power control and dynamic performance”, CIGRE Technical Brochure n.328, WG C4.601, P.Pourbeik (convener), August 2007.
- [24] PSS/E 32.0.5, Volume II, Program Application Guide, Siemens-PTI, 2010.
- [25] G. Tsourakis, B.M. Nomikos, C.D. Vournas, “Effect of wind parks with doubly fed asynchronous generators on small-signal stability”, Electric Power Systems Research, 2009, 79(1), 190-200.
- [26] G. Tsourakis, B.M. Nomikos, C.D. Vournas, “Contribution of doubly fed wind generators to oscillation damping”, IEEE Transactions on Energy Conversion, 24(3), 783-791.
- [27] G. Tsourakis, S. Nanou, C. Vournas, “A Power System Stabilizer for Variable-Speed Wind Generators”, 18th IFAC World Congress, 2011, Milano, 11713-11719.
- [28] C.D. Vournas, “Unstable Frequency Oscillations in a Slow-Response Reheat-Turbine Generator”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Jan 1999, 140-144.
- [29] R.C. Dorf, R.H. Bishop, “Σύγχρονα Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου”, 11η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2009.
- [30] Τεχνική έκθεση, “Ανάπτυξη μοντέλων για τη δυναμική προσομοίωση αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων με παρουσία μονάδων ΑΠΕ και την εκτίμηση του ορίου ασφαλούς αιολικής διεύθυνσης”, ΔΕΗ Α.Ε.-ΕΠΙΣΕΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος 2008.
- [31] Τροποποίηση Διατάξεων του Κώδικα Διαχείρισης του Συστήματος και Συναλλαγών ηλ. ενέργειας (Αποφ. Υπ Ανάπτυξης Δ5/ΗΛ/Β/Φ.1.10/1086/10413/13-05-2008, ΦΕΚ Β/937/21-05-2008).

- [32] F.D. Kanellos, N.D. Hatziargyriou, "Control of Variable Speed wind turbines equipped with synchronous or doubly fed induction generators supplying islanded power systems", *IET Renew. Power Gener.*, 3, 2009, 96-108.
- [33] X. Yingcheng, T. Nengling, "Review of contribution to frequency control through variable speed wind turbine", *Renewable Energy*, June 2011, 1671-1677.
- [34] J. Kabouris, N.D. Zouros, G.A. Manos, G.C. Contaxis, C.D. Vournas, "Computational environment to investigate wind integration into small autonomous systems", *Renewable Energy*, Sept. 1999, 61-75.
- [35] G. Lalor, J. Ritchie, S. Rourke, D. Flynn, M.J. O' Malley, "Dynamic Frequency Control with Increasing Wind Generation", *Power Engineering Society General Meeting*, June 2004, 1715-1720.
- [36] G. Lalor, A. Mullane, M.J. O' Malley, "Frequency Control and wind turbine technologies", *IEEE Transactions on Power Systems*, Nov. 2005, 1905-1913.
- [37] R. Doherty, A. Mullane, G. (Lalor) Nolan, D.J. Burke, A. Bryson, M.J. O' Malley, "An Assessment of the Impact of Wind Generation on System Frequency Control", *IEEE Transactions on Power Systems*, Feb. 2010, 452-460.
- [38] J. Ekanayake, N. Jenkins, "Comparison of the Response of Doubly Fed and Fixed-Speed Induction Generator Wind Turbines to Changes in Network Frequency", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Dec. 2004, 800-802.
- [39] M. Kayikçi, J.V. Milanovic', "Dynamic Contribution of DFIG-Based Wind Plants to System Frequency Disturbances", *IEEE Transactions on Power Systems*, May 2009, 859-867.
- [40] M. Marinelli, S. Massucco, A. Mansoldo, M. Norton, "Analysis of Inertial Response and Primary Power-Frequency Control Provision by Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines in a small Power System", *17th Power Systems Computation Conference*, 2011.

- [41] B.H. Chowdhury, Hong. T. Ma, “Frequency Regulation with Wind Power Plants”, IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 2008, 1-5.
- [42] J. Morren, J. Pierik, Sjoerd W.H. de Haan, “Inertial response of variable speed wind turbines”, Electric Power Systems Research, July 2006, 980-987.
- [43] J. Morren, Sjoerd W.H. de Haan, Wil L. Kling, J.A. Ferreira, “Wind Turbines Emulating Inertia and Supporting Primary Frequency Control”, IEEE Transactions on Power Systems, Feb. 2006, 433-434.
- [44] R.G. de Almeida, J.A. Peças Lopes, “Participation of Doubly Fed Induction Wind Generators in System Frequency Regulation”, IEEE Transactions on Power Systems, Aug. 2007, 944-950.
- [45] J. Brisebois, N. Aubut, “Wind Farm Inertia Emulation to fulfill Hydro-Québec's Specific Need”, IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 2011, 1-7.
- [46] N. Rahmat Ullah, T. Thiringer, D. Karlsson, “Temporary Primary Frequency Control Support by Variable Speed Wind Turbines – Potential and Applications”, IEEE Transactions on Power Systems, May 2008, 601-612.
- [47] D. Gautam, L. Goel, R. Ayyanar, V.Vittal, T. Harbour, “Control Strategy to Mitigate the Impact of Reduced Inertia Due to Doubly Fed Induction Generators on Large Power Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, February 2011, 214-224.
- [48] J.M. Mauricio, A. Marano, A. Gomez-Exposito, J.L. Martinez Ramos, “Frequency Regulation Through Variable-Speed Wind Energy Conversion Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, February 2009, 173-180.