



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

Σύγκριση Κλασσικού και Ελέγχου Βασισμένου σε Ασαφή Λογική Ανεμογεννήτριας Μονίμων Μαγνητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Σ. Ρώτα

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2008



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

Σύγκριση Κλασσικού και Ελέγχου Βασισμένου σε Ασαφή Λογική Ανεμογεννήτριας Μονίμων Μαγνητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Σ. Ρώτα

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 17^η Οκτωβρίου 2008.

.....
Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Στ. Ν. Μανιάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Στ. Παπαθανασίου
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2008

.....

Μαρία Σ. Ρώτα

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

Copyright © Μαρία Σ. Ρώτα 2008

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Δεδομένου ότι η αιολική ενέργεια έχει καταστεί μία από τις ταχύτερα αυξανόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το βασικό θέμα των αιολικών συστημάτων μετατροπής ενέργειας είναι πώς να χειρίζεται αποτελεσματικά η ανεμογεννήτρια σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου, αποδίδοντας μέγιστη ισχύ εξόδου.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ουσιαστικά μια λεπτομερή παρουσίαση και μια συγκριτική μελέτη επί των κυριότερων τεχνικών ελέγχου που εμφανίζονται σήμερα για την ανεύρεση σημείων λειτουργίας μέγιστης ισχύος συστήματος ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών. Αρχικά γίνεται περιγραφή των επιμέρους τμημάτων που απαρτίζουν το σύστημα της ανεμογεννήτριας. Γίνεται αναφορά στη γενική θεωρία σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη για να καταλήξουμε, μέσω των παραδοχών που έγιναν στο μοντέλο αναπαράστασης της γεννήτριας. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή και παράθεση των βασικών σχέσεων των περιφερειακών συστημάτων της ανεμογεννήτριας δηλαδή τον τριφασικό ανορθωτή διόδων, τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης και τον SPWM αντιστροφέα.

Στη συνέχεια εξετάζονται δύο κατηγορίες τεχνικών ελέγχου μέγιστης ισχύος, δηλαδή έλεγχος βασισμένος σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής στροφών και αναζήτηση του σημείου μέγιστης ισχύος χωρίς προγενέστερη γνώση χαρακτηριστικών καμπυλών. Στη δεύτερη κατηγορία μελετώνται δύο επιμέρους μέθοδοι, έλεγχος μέσω συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων καθώς και έλεγχος βασισμένος στην ασαφή λογική. Η ανάλυση της λειτουργίας του συστήματος σε κάθε περίπτωση ελέγχου, αλλά και η σύγκριση των μεθόδων αξιολογούνται με βάση τεσσάρων κριτηρίων: τη συμπεριφορά του κάθε συστήματος σε αντίστοιχες μεταβολές του λόγου κατάτμησης του dc/dc μετατροπέα–ανυψωτή, την απόκριση του συστήματος σε μια βηματική μεταβολή της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου, την απόκριση του συστήματος σε μια βηματική μεταβολή της μηχανικής ροπής και την απόκριση του συστήματος σε πραγματικές χρονοσειρές ανέμου. Τέλος, η παρουσίαση και σύγκριση των παραπάνω τεχνικών ελέγχου γίνεται σε θεωρητικό επίπεδο αλλά και σε επίπεδο προσομοίωσης με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Λέξεις Κλειδιά

Ανεμογεννήτριες, Σύγχρονη Μηχανή Μονίμων Μαγνητών, Μέθοδοι Ανεύρεσης Σημείου μέγιστης Ισχύος, Ευριστικός Αλγόριθμος και Έλεγχος Ασαφούς Λογικής.

Abstract

Since wind energy has become one of the fastest growing renewable energy sources, the key issue of wind energy conversion systems is how to effectively handle the wind turbine in a wide range of wind speeds, with maximum output.

This thesis is essentially a detailed presentation and a comparative study on the main control techniques that appear today to find points of maximum power operating system variable wind speed. Initially, the individual parts that make up the system of the wind are described. Reference is made to the general theory of permanent magnet synchronous machine to conclude, through the assumptions made, to the model representation of the generator. A brief description and listing of the basic relations of regional systems of the wind turbine follows, such as the three-phase rectifying diodes, dc/dc boost converter and SPWM dc/ac inverter.

Then, two categories of techniques for maximum power point tracking are examined, maximum power point tracking based on typical speed torque curves and maximum power point tracking without prior knowledge characteristics curves. In the second category two specific methods are studied, control through ongoing changes and comparisons and control based on fuzzy logic. Not only the analysis of system operation in any case control, but also the comparison of the methods are evaluated based on four criteria: the behavior of each system corresponding changes in the duty cycle of dc/dc boost converter, the system response to a stepping change of the average wind speed, the system response to a stepping change of the mechanical torque and the system's response to real time wind series. Finally, the presentation and the comparison of the above techniques of control are not only based on theory but also on simulation using a computer.

Key Words

Wind turbine, Permanent Magnet Synchronous Machine, Maximum Power Point Tracking, Searching Algorithm and Fuzzy Logic Control.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Αντώνιο Κλαδά, Καθηγητή Ε.Μ.Π. για τη ευκαιρία που μου πρόσφερε να ασχοληθώ με την παρούσα εργασία . Η καθοδήγηση του σε όλα τα στάδια εκπόνησης της ήταν για μένα πολύτιμη. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον Υπ. Δρ. Χαράλαμπο Πάτσιο για τη συνεχή υποστήριξη και βοήθεια του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής. Τέλος καθοριστική ήταν η συμβολή του Δρ. Αντωνίου Χανιώτη ο οποίος έχει αναπτύξει το ηλεκτρονικό κύκλωμα και με βοήθησε να εξοικειωθώ με τη διάταξη.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	6
Ευχαριστίες.....	7
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	11
1.1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	11
1.2. Αιολική Ενέργεια.....	11
1.3. Ανεμογεννήτριες.....	13
1.4. Περιγραφή της υπό μελέτη Ανεμογεννήτριας και της εργαστηριακής Διάταξης	14
1.5. Δομή της εργασίας.....	15
Κεφάλαιο 2: Υποσυστήματα Ανεμογεννήτριας	17
2.1. Εισαγωγή	17
2.2. Αεροδυναμικό μέρος	18
2.3. Γεννήτρια Μονίμων Μαγνητών.....	19
2.3.1 Διαμόρφωση Γεννήτριας Μονίμων Μαγνητών και Κυριότερα Λειτουργικά Χαρακτηριστικά.....	19
2.3.2. Μοντέλα Αναπαράστασης της Γεννήτριας Μονίμων Μαγνητών.....	21
2.4. Ηλεκτρονικός Μετατροπέας Ισχύος.....	27
2.4.1 Ανορθωτική γέφυρα διόδων.....	27
2.4.2. Μετατροπέας ανύψωσης τάσης.....	30
2.4.3. Ελεγχόμενο φορτίο.....	31
2.4.4. Τριφασικός Αντιστροφέας Πηγής Τάσης.....	32
2.4.5. Συστήματα ελέγχου μετατροπέων.....	34
2.4.5.1 Σύστημα βελτιστοποίησης απορροφούμενης ισχύος.....	35
2.4.5.2. Σύστημα σταθεροποίησης τάσης.....	35
Κεφάλαιο 3: Συστήματα Ελέγχου Ανεμογεννήτριας Μονίμων Μαγνητών - Μέθοδος Βασισμένη σε Δεδομένες Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας... 37	
3.1. Στόχοι Συστήματος Ελέγχου Ανεμογεννήτριας	37

3.2. Μέθοδος Βασισμένη σε Δεδομένες Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας	39
3.2.1. Θεωρητική Ανάλυση	39
3.2.2. Μοντέλο Προσομοίωσης	41
3.2.3. Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές του ανέμου για ακραίες αρχικές τιμές του λόγου κατάτμησης D	45
3.2.4. Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου.....	48
3.2.5. Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της μηχανικής ροπής	51
3.2.6. Απόκριση του συστήματος σε εξομοιωμένη πραγματική κατάσταση λειτουργίας.....	52
3.2.7. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	60

Κεφάλαιο 4: Μέθοδος Ανίχνευσης του Σημείου Μέγιστης Ισχύος μέσω Μικρών Μεταβολών **62**

4.1. Θεωρητική Ανάλυση	62
4.2. Μοντέλο Προσομοίωσης	65
4.3. Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές του ανέμου για ακραίες αρχικές τιμές του λόγου κατάτμησης D και του βήματος μεταβολής του.	68
4.4. Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου	73
4.5. Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της μηχανικής ροπής... ..	76
4.6. Απόκριση του συστήματος σε εξομοιωμένη πραγματική κατάσταση λειτουργίας.....	78
4.7. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	83

Κεφάλαιο 5: Μέθοδος Προσδιορισμού του Σημείου Μέγιστης Ισχύος Βασισμένη στην Ασαφή Λογική **85**

5.1. Εισαγωγή	85
5.2. Θεωρητική Ανάλυση και Βασικές έννοιες ασαφούς λογικής	86
5.2.1. Ασαφές σύνολο και συνάρτηση συμμετοχής.....	86
5.2.2. Πράξεις ασαφούς λογικής.....	89
5.2.3. Ασαφείς κανόνες (fuzzy rules)	90

5.2.4.	Βασική δομή της ασαφούς λογικής	91
5.3.	Σχεδιασμός του ασαφούς συστήματος ελέγχου και μοντέλο προσομοίωσης.	93
5.4.	Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές του ανέμου για ακραίες αρχικές τιμές του λόγου κατάτμησης D	98
5.5.	Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου	101
5.6.	Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της μηχανικής ροπής.	104
5.7.	Απόκριση του συστήματος σε εξομοιωμένη πραγματική κατάσταση λειτουργίας.....	105
5.8.	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	109

Κεφάλαιο 6: Σύγκριση των τριών συστημάτων ελέγχου 11124

6.1.	Απόκριση των συστημάτων σε βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου.....	111
6.2.	Απόκριση των συστημάτων σε βηματικές μεταβολές της μηχανικής ροπής	113
6.3.	Επίδραση του λόγου κατάτμησης D στη συμπεριφορά των συστημάτων ...	115
6.4.	Απόκριση των συστημάτων σε εξομοιωμένη πραγματική κατάσταση λειτουργίας.....	118

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα 121

7.1.	Συμπεράσματα	121
7.2.	Σημεία Προαγωγής της Επιστήμης	122
7.3.	Εργασίες για Περαιτέρω Διερεύνηση	123

Βιβλιογραφία 124

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και περισσότερο κοινή συνείδηση η ανάγκη αποδοτικότερης χρησιμοποίησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας – ΑΠΕ δηλαδή μορφών εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες. Η ανάγκη για την ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους παρουσιάστηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1973 και παγιώθηκε την τελευταία δεκαετία, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Υστερα από αρκετά χρόνια προσπάθειας των μηχανικών για την ανάπτυξη των ΑΠΕ, ώστε αυτές να αντικαταστήσουν τις συμβατικές μορφές ενέργειας, έχουμε φτάσει σε αρκετά ικανοποιητικό τεχνολογικό επίπεδο τόσο σε επίπεδο έρευνας, όσο και εφαρμογών με αποτέλεσμα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να είναι κατά μεγάλο ποσοστό έτοιμες να αντικαταστήσουν σε κάποιες περιοχές τα συμβατικά καύσιμα. Οι ΑΠΕ αποτελούνται από την αιολική ενέργεια, την υδροηλεκτρική, την ηλιακή, την γεωθερμία καθώς και τη βιομάζα. Από αυτές η αιολική και η υδροηλεκτρική κατέχουν τη πρωτιά όσον αφορά τις εφαρμογές παραγωγής ενέργειας.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι τα ακόλουθα :

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από εξαντλήσιμους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτητοποίησης και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι διάσπαρτες γεωγραφικά και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας.
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα από τις τιμές των συμβατικών καυσίμων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ δημιουργούν σημαντικό αριθμό νέων θέσεων εργασίας, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. θερμοκηπιακές καλλιέργειες με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας).
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

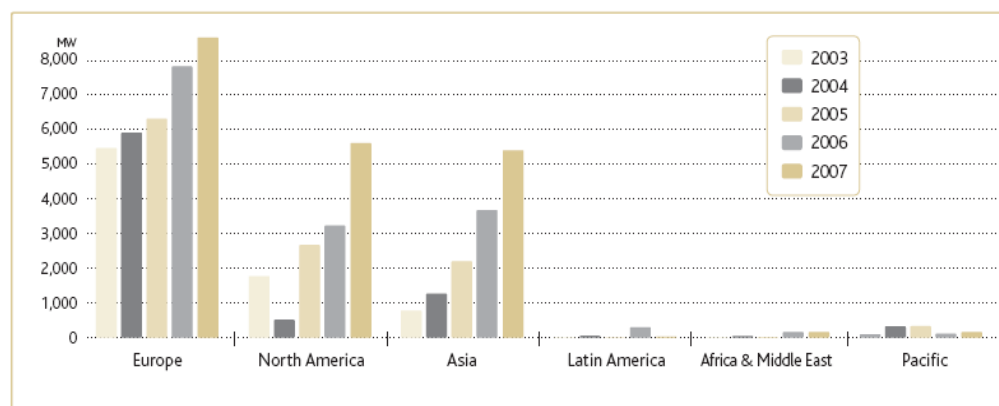
1.2. Αιολική Ενέργεια

Από τις παραπάνω ΑΠΕ , η βιομηχανία της αιολικής ενέργειας έχει παρουσιάσει ραγδαία άνθηση τα τελευταία χρόνια. Ενώ το παγκόσμιο εγκατεστημένο δυναμικό αιολικής ενέργειας ανερχόταν το 1998 σε λίγο περισσότερο από 10.000 MW συνολικά, το 2005 είχε ήδη φθάσει τα 60.000 MW. Το νούμερο αυτό αναμένεται να ανέβει στα 150.000 MW μέχρι το 2012.

Μόνο το 2003, εγκαταστάθηκαν παγκοσμίως νέες ανεμογεννήτριες με δυνατότητα παραγωγής αιολικής ενέργειας άνω των 8.300 MW. Το ένα τρίτο αυτών βρίσκονται στη Γερμανία, το ένα τρίτο στην υπόλοιπη Ευρώπη, και το άλλο στον υπόλοιπο κόσμο. Η Ευρώπη πρόκειται να παραμείνει η κινητήριος δύναμη στην παγκόσμια αγορά αιολικών για τα επόμενα 5 χρόνια.

Ενώ η Ευρώπη παραμένει η μεγαλύτερη αγορά αιολικής ενέργειας, οι νέες εγκαταστάσεις αποτελούν μόνο το 43% του παγκόσμιου συνόλου, κάτω από σχεδόν 75% το 2004. Για πρώτη φορά μετά από δεκαετίες, περισσότερο από το 50% της ετήσιας αιολικής αγοράς ήταν εκτός Ευρώπη, και αυτή η τάση προβλέπεται να συνεχιστεί και στο μέλλον. Ενώ η Ευρώπη, η Βόρεια Αμερική και η Ασία εξακολουθούν να βλέπουν τις πιο σημαντικές προσθήκες στην αιολική εγκατεστημένη ισχύ τους, η Μέση Ανατολή / Βόρεια Αφρική αύξησαν τις αιολικές ενεργειακές εγκαταστάσεις κατά 42%, φθάνοντας σε 538 MW στο τέλος του 2007. Νέο δυναμικό προστέθηκε στην Αίγυπτο, το Μαρόκο και το Ιράν [6].

ANNUAL INSTALLED CAPACITY BY REGION 2003-2007



Σχ 1-1

Η συνολική ετήσια παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς[6]

Η βασική αιτία αυτής της ραγδαίας ανάπτυξης είναι το σχετικά χαμηλό κόστος της αιολικής ενέργειας σε σχέση με τις άλλες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας. Μάλιστα, το κόστος της σχετικής τεχνολογίας είναι πολύ κοντά σε εκείνο της παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, γεγονός που ανοίγει το δρόμο για την εξάπλωση της αιολικής ενέργειας παγκοσμίως. Χάρη στην πρόοδο της τεχνολογίας, το ειδικό κόστος παραγωγής αιολικής ενέργειας έχει ήδη πέσει στο ήμισυ από το 1990, και αναμένεται ότι η απόκλιση μεταξύ του κόστους παραγωγής αιολικής ενέργειας και του κόστους ενέργειας από ορυκτά καύσιμα θα συνεχίσει να μειώνεται.

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου δεν εκπέμπεται διοξείδιο του άνθρακα ή άλλα αέρια που ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα (μονοξείδιο του άνθρακα,

διοξειδίο του θείου, καρκινογόνα μικροσωματίδια κ.α.), όπως συμβαίνει με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε όλη τη διάρκεια της χρήσης της, μία και μόνο ανεμογεννήτρια 1,5 MW μπορεί να εξοικονομήσει περί τους 80.000 τόνους ορυκτού άνθρακα (brown coal). Αυτό σημαίνει ότι όχι μόνο δεν εντείνεται το φαινόμενο του θερμοκηπίου (κάθε κιλοβατώρα που παράγεται από αιολικά πάρκα συνεπάγεται την αποφυγή έκλυσης ενός κιλού CO₂ στην ατμόσφαιρα) αλλά δεν υπάρχουν και αρνητικές συνέπειες στη δημόσια υγεία από την ατμοσφαιρική ρύπανση.

Ωστόσο, δεν υπάρχει ανθρώπινη κατασκευαστική δραστηριότητα που να μην έχει επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η χωροθέτηση των αιολικών πάρκων πρέπει να είναι προσεκτική και να συνοδεύεται από τη αντίστοιχη μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ΜΠΕ) του έργου, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή ενσωμάτωσή τους στο τοπικό περιβάλλον και να ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις τους στην βιοποικιλότητα. Αν η χωροθέτηση των ανεμογεννητριών δεν σχεδιαστεί σωστά, είναι πιθανόν να υπάρξουν αρνητικές συνέπειες για τη βιοποικιλότητα όπως π.χ. προβλήματα που μπορούν να δημιουργηθούν στα πουλιά αν οι ανεμογεννήτριες τοποθετηθούν σε σημαντικές μεταναστευτικές οδούς .

1.3. Ανεμογεννήτριες

Αν και η αρχή λειτουργίας της ανεμογεννήτριας είναι απλή, εν τούτοις παραμένει ένα αρκετά σύνθετο σύστημα στο οποίο συνδυάζονται γνώσεις από πολλούς τομείς. Ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση των πτερυγίων απαιτεί σύνθετες γνώσεις αεροδυναμικής: η δομή του άξονα οδήγησης καθώς και του πύργου της Α/Γ απαιτεί γνώσεις μηχανολογικές και δομικές ενώ το τμήμα των ελεγκτών και το σύστημα προστασίας γνώσεις ηλεκτρολογικές και συστημάτων αυτομάτου ελέγχου.

Οι επικρατέστεροι τύποι ανεμογεννητριών ταξινομούνται κυρίως σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου. Έτσι οι πλέον διαδεδομένοι τύποι είναι οι Α/Γ οριζοντίου άξονα και οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα. Παρ' όλα αυτά στα περισσότερα αιολικά πάρκα ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι ο οριζοντίου άξονα και αυτό γιατί παρουσιάζει καλύτερο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης σε σχέση με την μηχανή κατακόρυφου άξονα. Υπάρχει επιπλέον διαχωρισμός των ανεμογεννητριών ανά κατηγορία. Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα διαχωρίζονται με βάση τον αριθμό των πτερυγίων, τη φορά των πτερυγίων σε σχέση με τη φορά του ανέμου κ.τ.λ. Έτσι όσον αφορά την πρώτη κατηγορία διακρίνονται στους μονόπτερους, δίπτερους, τρίπτερους, πολύπτερους. Όσον αφορά τον προσανατολισμό των πτερυγίων σε σχέση με τον άνεμο διακρίνονται κύρια στους ανάντη και κατάντη.

Τα κυριότερα μέρη από τα οποία αποτελείται μια ανεμογεννήτρια είναι :

- Το μηχανικό σύστημα περιλαμβάνει κυρίως τον ανεμοκινητήρα, αποτελεί δηλαδή το σύστημα μετατροπής της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική. Κύρια μέρη του είναι η έλικα με το σύστημα ελέγχου του βήματος (αν υπάρχει). Συνήθως μεταξύ του ανεμοκινητήρα και της γεννήτριας μεσολαβεί μια διάταξη μεταφοράς κινήσεως η οποία περιλαμβάνει έναν πολλαπλασιαστική στροφών.
- Το ηλεκτρικό σύστημα περιλαμβάνει τη γεννήτρια και ενδεχομένως ένα μετατροπέα ισχύος, που παρεμβάλλεται μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου ή του φορτίου, όπως π.χ. ένα μετατροπέα ισχύος AC/DC/AC για τον έλεγχο της ροής ισχύος.

- Το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας προσαρμόζει τη λειτουργία της προς τις εκάστοτε συνθήκες ανέμου ,επιτηρεί την ασφάλεια ή και μεγιστοποιεί την απόδοση της.

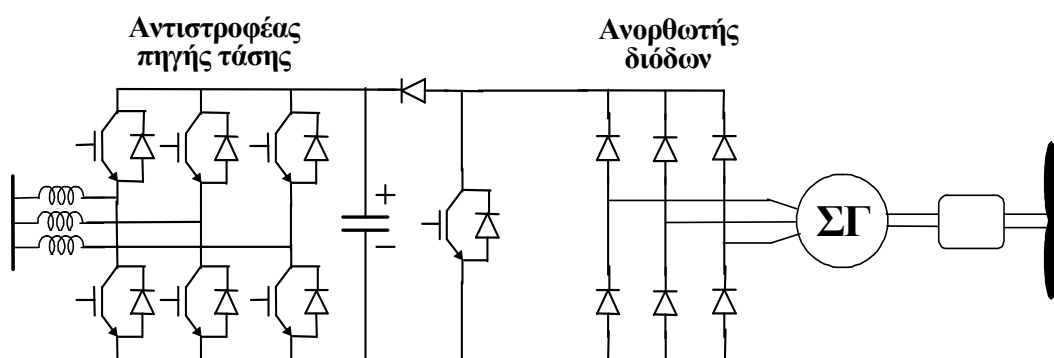
Οι Α/Γ μπορούν να διακριθούν ανάλογα με τις αρχές λειτουργίας και ελέγχου τους. Επομένως, οι Α/Γ μπορούν να είναι:

- σταθερών στροφών (fixed speed), λειτουργώντας σε ένα στενό εύρος ταχύτητας περιστροφής λίγο πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα,
- μεταβλητών στροφών (variable speed), λειτουργώντας σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων πάνω και κάτω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Στις μεταβλητών στροφών, η ταχύτητα περιστροφής βελτιστοποιείται με βάση την τιμή του εισερχόμενου ανέμου με στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης.

Η σύνδεση των ανεμογεννητριών με το δίκτυο σε συστήματα σταθερών στροφών γίνεται απ' ευθείας χωρίς να χρειάζεται κάποια περαιτέρω μετατροπή της ισχύος στην περίπτωση αυτή βέβαια δεν υπάρχει άμεσος έλεγχος της ισχύος που εγχύεται στο δίκτυο. Σε συστήματα μεταβλητών στροφών είναι απαραίτητη η απόξευση της συχνότητας του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους με αυτή του δικτύου. Για το σκοπό αυτό κυρίως είναι απαραίτητη η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος δηλαδή ενός AC/DC/AC μετατροπέα. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με σύστημα μεταβλητών στροφών του οποίου η διάταξη παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

1.4. Περιγραφή της υπό μελέτη Ανεμογεννήτριας και της εργαστηριακής Διάταξης

Στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος του Ε.Μ.Π. έχει κατασκευασθεί και λειτουργεί διασυνδεδεμένο με το δίκτυο ένα δοκίμιο σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών 2.5kW που οδηγείται στο εργαστήριο άμεσα από έναν DC κινητήρα ο οποίος προσομοιώνει τη ροπή του ανεμοκινητήρα.. Η διάταξη που έχει υλοποιηθεί για τη σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο έχει την παρακάτω διαμόρφωση :



Σχ . 1-2

Σχηματικό διάγραμμα συστήματος

Ως εκ τούτου η ροή της ενέργειας περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

- Από κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του ανεμοκινητήρα.

- Από κινητική ενέργεια του ανεμοκινητήρα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια (AC) μέσω της γεννήτριας.
- Από AC μετατρέπεται σε DC μέσω του ανορθωτή και κατόπιν ανυψώνεται η τάση.
- Από DC μετατρέπεται σε AC μέσω του αντιστροφέα και αποδίδεται στο δίκτυο.

Ο ανυψωτής τάσης φαίνεται ελλιπής χωρίς πηνίο, όμως όπως θα φανεί στη σχετική παράγραφο, η αυτεπαγωγή των τυλιγμάτων της γεννήτριας επαρκεί για τη λειτουργία του καθώς λειτουργεί όπως θα λειτουργούσε ένα πηνίο στον ανυψωτή.

Συγκεκριμένα η ανεμογεννήτρια έχει μέγιστη ταχύτητα περιστροφής είναι 100 ΣΑΛ. Η έξοδος της γεννήτριας ανορθώνεται από έναν απλό ανορθωτή διόδων και ανυψώνεται με τη βοήθεια ενός DC/DC μετατροπέα ανύψωσης (boost converter) και ενός πυκνωτή. Ο μετατροπέας αυτός χρησιμοποιείται για να φέρει την τάση εισόδου του αντιστροφέα σε επίπεδα που να καθιστούν δυνατή τη μεταφορά ισχύος. Πρόκειται για αντιστροφέα πηγής τάσης ο οποίος και χρησιμοποιεί τεχνική SPWM για την παραγωγή ημιτονοειδούς τάσης. Επιθυμούμε η διάταξη να παρέχει όσο περισσότερη ενέργεια είναι δυνατό. Για να επιτυγχάνεται αυτό, ο Αντιστροφέας πρέπει να λειτουργεί με όσο γίνεται μεγαλύτερη απόδοση και να εξασφαλίζει ότι η τάση στον πυκνωτή είναι περίπου σταθερή. Μέσω του ανυψωτή είναι εφικτό η τάση του πυκνωτή να αντιστοιχεί σε DC τάση του επιθυμητού επιπέδου στους ακροδέκτες του ανορθωτή και έτσι να ελέγχεται το ρεύμα που δίνει η γεννήτρια άρα και η ροπή της. Επομένως απαιτείται κατάλληλο σύστημα ελέγχου για το ρεύμα που παράγει η γεννήτρια. Έτσι λοιπόν οι δύο μετατροπείς ελέγχονται από δύο μικροεπεξεργαστές οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους.

1.5. Δομή της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη και η σύγκριση του μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας με μια νέα μέθοδο που βασίζεται στην ασαφή λογική. Η εργασία αποτελείται από 7 κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρατίθενται κάποια στοιχεία σχετικά με τις Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αναλύονται τα πλεονεκτήματά τους. Έμφαση δίνεται στην αιολική ενέργεια και στις ανεμογεννήτριες. Ακολουθεί μια σύντομη αναφορά στα σημαντικότερα τμήματα των ανεμογεννητριών και στις κυριότερες κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται. Επίσης περιγράφεται σύντομα η υπό μελέτη Ανεμογεννήτρια και η εργαστηριακή διάταξη.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των επιμέρους τμημάτων που απαρτίζουν το σύστημα της ανεμογεννήτριας. Αρχικά γίνεται αναφορά στο αεροδυναμικό μέρος. Στη συνέχεια γίνεται μια αναφορά στη γενική θεωρία σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη για να καταλήξουμε, μέσω των παραδοχών που έγιναν, στο μοντέλο αναπαράστασης της γεννήτριας. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή και παράθεση των βασικών σχέσεων που ισχύουν για τον τριφασικό ανορθωτή διόδων, τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης και τον SPWM αντιστροφέα.

Στο τρίτο και τέταρτο κεφάλαιο ορίζεται ο στόχος του συστήματος ελέγχου. Παρουσιάζονται οι δύο μέθοδοι παρακολούθησης του σημείου μέγιστης παραγόμενης ισχύος. Πρώτη εξετάζεται η μέθοδος που βασίζεται σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής στροφών και δεύτερη η μέθοδος ανίχνευσης του σημείου μέγιστης

ισχύος μέσω μικρών μεταβολών και συγκρίσεων. Η ανάλυση και των δύο μεθόδων πραγματοποιείται με παράθεση θεωρητικών στοιχείων και εξέταση προσομοιωμένων και πειραματικών δεδομένων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αρχικά γίνεται αναφορά στη γενική θεωρία της ασαφούς λογικής ενώ ακολουθεί παρουσίαση του τρόπου σχεδιασμού του προσομοιωμένου μοντέλου που βασίζεται στη λογική αυτή. Πραγματοποιείται ανάλυση των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο συγκρίνονται όλα τα προσομοιωμένα μοντέλα των αντίστοιχων τριών μεθόδων που αναλύονται στα παραπάνω κεφάλαια. Η ανάλυση της λειτουργίας του συστήματος σε κάθε περίπτωση ελέγχου, αλλά και η σύγκριση των μεθόδων αξιολογούνται με βάση τεσσάρων κριτηρίων: τη συμπεριφορά του κάθε συστήματος σε αντίστοιχες μεταβολές του λόγου κατάτμησης του dc/dc μετατροπέα– ανυψωτή, την απόκριση του συστήματος σε μια βηματική μεταβολή της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου, την απόκριση του συστήματος σε μια βηματική μεταβολή της μηχανικής ροπής και τέλος την απόκριση του συστήματος σε πραγματικές χρονοσειρές ανέμου.

Στο έβδομο κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας και επισημαίνονται τα στοιχεία καινοτομίας της. Επίσης αναφέρονται θέματα με τα οποία δεν ασχολείται η παρούσα διπλωματική εργασία και τα οποία θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενα μελλοντικής ερευνητικής μελέτης.

Τέλος παρατίθενται αναλυτική βιβλιογραφία της εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Υποσυστήματα Ανεμογεννήτριας

2.1. Εισαγωγή

Οι πρώτες κατασκευές που χρησιμοποιήθηκαν για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική αποτελούνταν από ασύγχρονες γεννήτριες σταθερών στροφών με κατάλληλο μηχανικό κιβώτιο πολλαπλασιασμού. Οι στροφές του ανεμοκινητήρα για το λόγο αυτό κινούνταν σε πολύ στενά πλαίσια, οπότε η παραγωγή ισχύος ήταν χαμηλότερη σε σχέση αυτή των μεταβλητών στροφών, ενώ οι διακυμάνσεις του ανέμου προκαλούσαν καταπονήσεις στα μηχανικά μέρη και υποβάθμιση της ποιότητας της παρεχόμενης ισχύος προς το δίκτυο [8].

Για τους παραπάνω λόγους, τα τελευταία χρόνια επικρατεί η τοπολογία της λειτουργίας των ανεμογεννητριών με μεταβλητές στροφές. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών σχεδιάζονται ώστε να επιτυγχάνουν βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων του ανέμου. Μέσω της λειτουργίας με μεταβλητές στροφές γίνεται εφικτό να προσαρμόζεται η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα της ανεμογεννήτριας σε κάθε ταχύτητα ανέμου. Το ηλεκτρικό σύστημα μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών είναι πιο πολύπλοκο από το αντίστοιχο των σταθερών στροφών. Συχνά αποτελείται από μια σύγχρονη γεννήτρια που συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα ισχύος. Με αυτή τη διάταξη επιτυγχάνεται η ανταλλαγή έργου ισχύος με το δίκτυο, η ικανότητα προστασίας από σφάλματα και η μειωμένη καταπόνηση των μηχανικών μερών της ανεμογεννήτριας.

Η τάση στις εφαρμογές μικρής ισχύος είναι η εξάλειψη του κιβωτίου ταχυτήτων, ώστε να περιοριστούν οι μηχανικές καταπονήσεις και βλάβες, με την κατασκευή γεννητριών πολλών πόλων, και η χρήση μονίμων μαγνητών, ώστε να είναι δυνατή η χρήση της γεννήτριας μακριά από το δίκτυο. Τα υλικά των μονίμων μαγνητών παλαιότερα εμφάνιζαν προβλήματα απομαγνήτισης με το χρόνο και σε έντονες πεδιακές μεταβολές. Όμως τα κράματα με σπάνιες γαίες όπως το νεοδύμιο, που χρησιμοποιούνται σήμερα, εμφανίζουν μεγάλη σταθερότητα στα χαρακτηριστικά τους και είναι κατάλληλα για τη χρήση σε ανεμογεννήτριες, αν και εμφανίζουν σχετικά αυξημένο κόστος.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται συνοπτικά ο μετατροπέας αιολικής ενέργειας, η συνολική δηλαδή μηχανή η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια μετατρέποντας τη κινητική ενέργεια του ανέμου. Επίσης αναλύεται η ηλεκτρονική διάταξη που χρησιμοποιείται αφενώς για τη μεγιστοποίηση της προσλαμβανόμενης αιολικής ισχύος και αφετέρου για τη σύνδεση της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο. Συγκεκριμένα το κεφάλαιο αυτό ξεκινά με τη μελέτη και μοντελοποίηση του αεροδυναμικού τμήματος της ανεμογεννήτριας που προσομοιώνεται από έναν DC κινητήρα όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στη συνέχεια περιγράφεται και μοντελοποιείται η γεννήτρια μονίμων μαγνητών. Κατόπιν χρησιμοποιούμε προσομοιώσεις για την εξαγωγή ενός πολύ απλού μοντέλου που όμως περιγράφει

πολύ ικανοποιητικά στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας τη γεννήτρια μαζί με τον ανορθωτή διόδων. Τέλος συνοπτική περιγραφή γίνεται και για τους μετατροπείς ισχύος, δηλαδή για την ανορθωτική γέφυρα διόδων, τον DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης και τον τριφασικό αντιστροφέα πηγής τάσης, καθώς και για τα συστήματα ελέγχου τους.

2.2. Αεροδυναμικό μέρος

Ο αέρας έχει μάζα, αν και χαμηλής πυκνότητας, που όταν έχει ταχύτητα ο προκύπτων άνεμος έχει κινητική ενέργεια. Η ολική ισχύς που υπάρχει στον άνεμο είναι η ισχύς την οποία μπορεί να δεσμεύσει μια αιολική μηχανή. Στην πράξη όμως ένας ανεμοκινητήρας δεν δεσμεύει όλη την παραπάνω ενέργεια αλλά μόνο ένα κλάσμα αυτής. Αυτό συμβαίνει επειδή αφ' ενός μεν ο αέρας πρέπει να απομακρύνεται με κάποια ταχύτητα, αφ' ετέρου δε η φτερωτή του Α/Κ προκαλεί εκτροπή μέρους του αέρα το οποίο την παρακάμπει χωρίς να την διαπεράσει. Η ισχύς που προσλαμβάνεται από τον ανεμοκινητήρα δίνεται από την εξίσωση :

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

όπου $C_p(\lambda)$ είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος ο οποίος είναι συνάρτηση του λόγου :

$$\lambda = \frac{R\omega_R}{V_w} \quad (2-2)$$

όπου

R , η ακτίνα και ω_R η ταχύτητα περιστροφής της έλικας του ανεμοκινητήρα.

ρ , η πυκνότητα του ανέμου, που εξαρτάται από την ατμοσφαιρική πίεση και τη θερμοκρασία, $\rho \approx 1.2 \div 1.3 \text{ kg/m}^3$. Στην παρούσα εργασία λαμβάνεται 1.25 kg/m^3 .

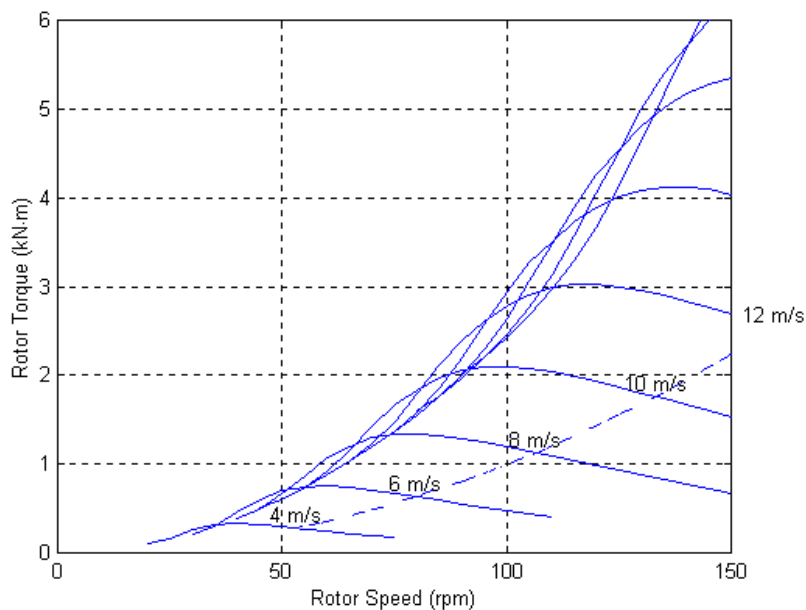
$m = \rho A V_w$, η μάζα του κινούμενου αέρα που περνάει στη μονάδα του χρόνου.

V_w , η ταχύτητα ανέμου (m/s).

A , η επιφάνεια που διαπερνάει κάθετα ο άνεμος και συγκεκριμένα $A = \pi R^2$ είναι το εμβαδόν του κυκλικού δίσκου που διαγράφει η έλικα.

Ο Α. Betz απέδειξε ότι για ένα ιδανικό ανεμοκινητήρα η μέγιστη τιμή C_p είναι 0,593. Στην πράξη λόγω μηχανικών τριβών στροβίλων και αεροδυναμικών ατελειών ο C_p είναι σημαντικά μικρότερος (0,3 – 0,49). Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του για μια συγκεκριμένη τιμή του λόγου λ την λ_{optimum} . Από τη σχέση (2-2), με γνωστή και σταθερή την τιμή του λ , υπολογίζονται για κάθε ταχύτητα ανέμου οι ιδανικές στροφές λειτουργίας.

Για κάθε ανεμοκινητήρα και για διάφορες ταχύτητες ανέμου αντιστοιχούν χαρακτηριστικές ισχύος-στροφών ανεμοκινητήρα. Για κάθε ταχύτητα ανέμου υπάρχει ένα λ για το οποίο η ισχύς σύμφωνα με τη σχέση (2-1) μεγιστοποιείται. Αντίστοιχες χαρακτηριστικές συσχετίζουν τη ροπή με τις στροφές και φαίνονται στο Σχ. 2.1. Στο Σχ. 2-1 διακρίνεται μία διακεκομμένη καμπύλη η οποία αντιπροσωπεύει όλα εκείνα τα σημεία στα οποία για κάθε καμπύλη ταχύτητας ανέμου το γινόμενο ροπή x στροφές μεγιστοποιείται. Αυτό έχει ως άμεσο αποτέλεσμα το σύστημα να εκμεταλλεύεται τόσο καλύτερα την ισχύ του ανέμου όσο πιο κοντά σε αυτή τη χαρακτηριστική κινείται.



Σχ. 2-1

Χαρακτηριστικές ροπές –στροφών ανεμοκινητήρα για διάφορες ταχύτητες ανέμου. Στη διακεκομμένη γραμμή βρίσκονται τα σημεία που αντιστοιχούν σε μέγιστη ισχύ.

2.3. Γεννήτρια Μονίμων Μαγνητών

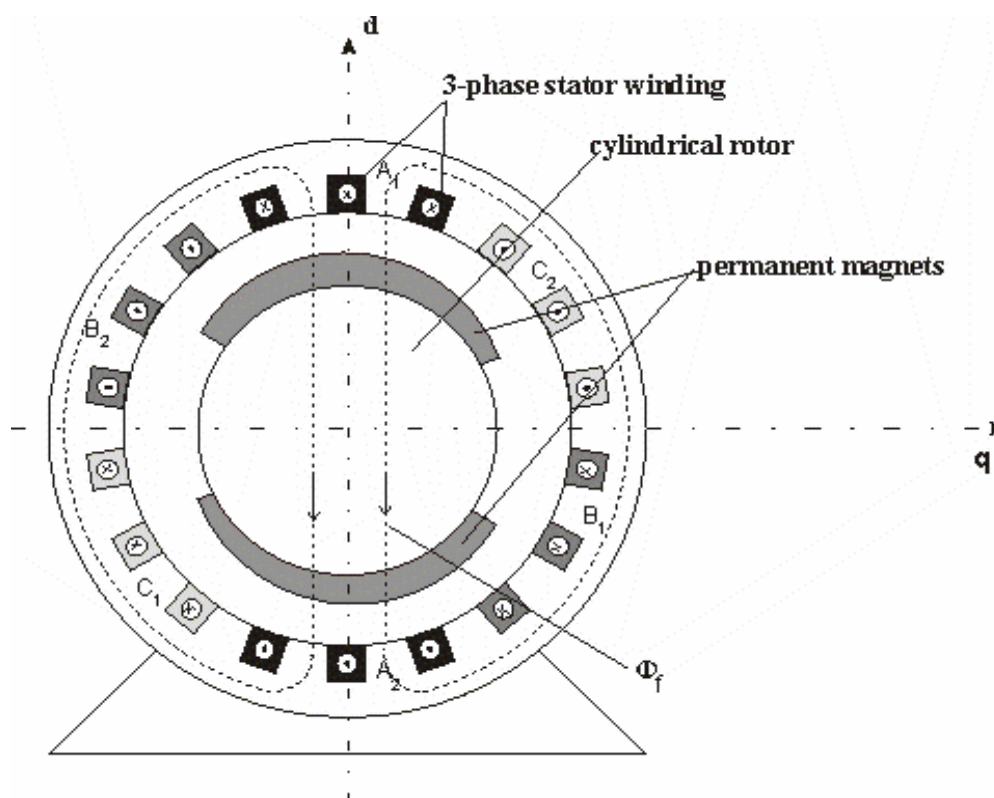
Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο γεννήτριες μονίμων μαγνητών. Πολλά επιστημονικά άρθρα υποστηρίζουν τη χρήση σύγχρονων γεννητριών μονίμων μαγνητών στις ανεμογεννήτριες, λόγω της ιδιότητάς τους να αυτοδιεγείρονται, η οποία επιτρέπει τη λειτουργία υπό υψηλό συντελεστή ισχύος και υψηλή απόδοση. Τα υλικά μονίμων μαγνητών εμφάνιζαν παλαιότερα προβλήματα απομαγνήτισης με το χρόνο και σε έντονες πεδιακές μεταβολές. Όμως τα κράματα όπως το νεοδύμιο που χρησιμοποιούνται σήμερα, εμφανίζουν μεγάλη σταθερότητα στα χαρακτηριστικά τους [13].

2.3.1. Διαμόρφωση Γεννήτριας Μονίμων Μαγνητών και Κυριότερα Λειτουργικά Χαρακτηριστικά

Παρά το γεγονός ότι αυτή τη στιγμή οι επαγωγικές μηχανές κυριαρχούν μαζί με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος στην αγορά των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζεται γύρω από τη μελέτη και κατασκευή μηχανών με μόνιμους μαγνήτες. Η παραγωγή μαγνητικού πεδίου στο διάκενο από μόνιμους μαγνήτες (και όχι με τη χρήση τυλιγμάτων στο στάτη), έχει να επιδείξει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά στην απλότητα της κατασκευής και την μείωση των απωλειών με ταυτόχρονη βελτίωση της απόδοσης.

Οι δύο συνηθέστεροι τύποι μηχανών μονίμων μαγνητών είναι οι σύγχρονες (με ομοιόμορφα στρεφόμενο, ημιτονοειδές καταναμημένο πεδίο στο στάτη) και οι διακοπτικοί, τραπεζοειδής (με πεδίο στο στάτη το οποίο εναλλάσσεται διακοπτικά σε διακριτά βήματα. Η γεννήτρια μονίμων μαγνητών που χρησιμοποιείται στη παρούσα

εργασία ανήκει στην πρώτη περίπτωση και παρουσιάζεται η κάθετη τομή της στο Σχ. 2-3.



Σχ. 2-3

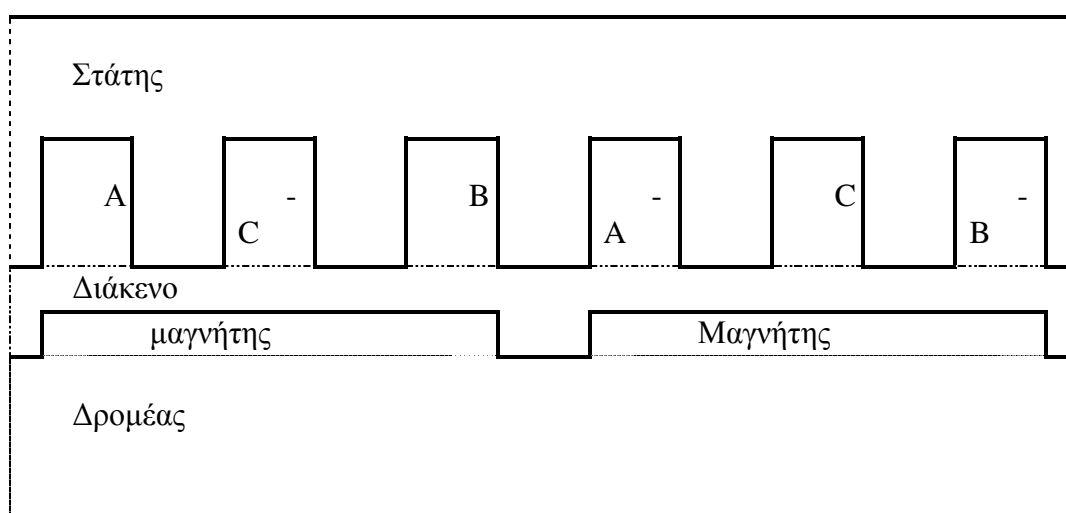
Διατομή γεννήτριας μόνιμων μαγνητών με επιφανειακούς μαγνήτες [11]

Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των μηχανών με μόνιμους μαγνήτες ποικίλουν. Μια τοπολογία που τείνει να επικρατήσει μετά την ανάπτυξη μαγνητικών υλικών υψηλής μαγνήτισης, είναι αυτή των επιφανειακών μαγνητών. Ο δρομέας αποτελείται από ένα σιδηροπυρήνα ο οποίος μπορεί να είναι συμπαγής ή και να έχει κατασκευαστεί από φύλλα σιδήρου. Λεπτοί μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στην επιφάνεια του πυρήνα. Εναλλασσόμενοι μαγνήτες αντίθετης μαγνητικής φοράς παράγουν πυκνότητα ροής ακτινικής κατεύθυνσης διαμέσου του διακένου. Στην εσωτερική επιφάνεια του στάτη υπάρχουν αύλακες στις οποίες τοποθετούνται τυλίγματα. Τα ρεύματα που διαρρέουν αυτά τα τυλίγματα, αλληλεπιδρούν με την πυκνότητα ροής για την παραγωγή ροπής. Η γεννήτρια που χρησιμοποιείται στη διάταξη έχει ονομαστική ισχύ 2kW, ονομαστική φασική τάση 220V, ονομαστική συχνότητα 80Hz και 12 ζεύγη πόλων [1].

Η μέγιστη πυκνότητα ροής διακένου στις επαγωγικές μηχανές είναι της τάξης 0.7-0.9 T, αφού ο κορεσμός των δοντιών του στάτη περιορίζει την πυκνότητα ροής στα 1.4-1.8 T και η σχεδίαση συνήθως οδηγεί σε ίσο εύρος αυλακών και δοντιών. Επομένως ένα ιδανικό μαγνητικό υλικό για χρήση σε σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη, θα έπρεπε να δημιουργεί αντίστοιχα επίπεδα μαγνητικής ροής στο διάκενο.

Μια μηχανή μόνιμων μαγνητών παρέχει συνεχή ροπή μόνο όταν η ταχύτητα συσχετίζεται άμεσα με τη συχνότητα αναφοράς. Η αναφορά μπορεί να είναι είτε μια τριφασική ελεγχόμενη τάση είτε ελεγχόμενο ρεύμα. Πολλές σύγχρονες μηχανές μ.μ. έχουν εγκατεστημένο έναν αισθητήρα στον δρομέα από τον οποίο η γωνία του δρομέα μπορεί να ληφθεί. Τα ρεύματα στάτη παράγουν μια περιστρεφόμενη μαγνητική ροή. Η μαγνητική ροή που οφείλεται στους μόνιμους μαγνήτες είναι

σταθερή όσον αφορά τον δρομέα. Για να παραχθεί ροπή, αυτές οι δύο μαγνητικές ροές δεν μπορούν να κινηθούν όσον αφορά τη μια την άλλη. Αυτό σημαίνει ότι ο δρομέας πρέπει να περιστραφεί με την ίδια ταχύτητα με αυτήν της περιστρεφόμενης ροής που παράγεται από το στάτη. Ο δρομέας ακολουθεί τον περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη με γωνία $-\delta$. Για να λειτουργήσει η μηχανή, ο δρομέας πρέπει πρώτα να φθάσει σε μια σύγχρονη ταχύτητα. Αυτό μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους: με την οδήγηση του στροφέα στη σύγχρονη ταχύτητα (με μια εξωτερική μηχανή), με την έναρξη του δρομέα όπως στις μηχανές επαγωγής, ή με την παροχή του τυλίγματος του στάτη με μεταβλητή συχνότητα, που αρχίζει από μηδέν έως την συχνότητα αναφοράς. Μάλιστα, παρατηρείται ότι η σύζευξη των τυλιγμάτων είναι περίπου στο $-1/3$. Αυτό είναι αναμενόμενο από την κατασκευή της μηχανής, καθώς κάθε πηνίο περιέχει τρία δόντια του στάτη, οπότε κάθε δόντι του στάτη μετέχει σε δύο φάσεις οι οποίες έχουν αντίθετη φορά, όπως φαίνεται στο Σχ. 2-4. Έτσι, κάθε φάση είναι κατά το $-1/3$ εξαρτημένη από την άλλη.



Σχ. 2-4
Διαμόρφωση στάτη και δρομέα μηχανής μονίμων μαγνητών[9]

2.3.2. Μοντέλα Αναπαράστασης της Γεννήτριας Μονίμων Μαγνητών

Το να δημιουργηθεί ένα ακριβές μοντέλο που περιγράφει ηλεκτρικά μία μηχανή μονίμων μαγνητών δεν είναι απλό στη γενική περίπτωση λόγω των μη γραμμικών φαινομένων που παρουσιάζουν τα μαγνητικά υλικά αλλά και των αρμονικών φαινομένων που σχετίζονται με την κατασκευή της γεννήτριας. Παρουσιάζονται δύο εναλλακτικές αναπαραστάσεις για τη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών.

Μοντέλο γενικευμένης θεωρίας ηλεκτρικών μηχανών

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας προκύπτουν χρησιμοποιώντας στρεφόμενο πλαίσιο δύο αξόνων με εφαρμογή της γενικευμένης θεωρίας των ηλεκτρικών μηχανών. Η γεννήτρια δεν διαθέτει τυλίγματα απόσβεσης και μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά ως μοντέλο τέταρτης τάξης .

Ως είσοδο λαμβάνονται:

vas, vbs, vcs : οι τάσεις των ακροδεκτών

T_m : η μηχανική ροπή στον άξονα ,

ενώ ως μεταβλητές κατάστασης λαμβάνονται:

ψ_{qs} , ψ_{ds} : οι συνιστώσες της πεπλεγμένης ροής του στάτη

ω_r : η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα ,

θ_r : η θέση του δρομέα

Ω_s έξοδοι του συστήματος λαμβάνονται

i_{as} , i_{bs} , i_{cs} : τα ρεύματα γραμμής [7]. Παρακάτω παρατίθενται οι εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα. Όλα τα μεγέθη (τάσεις, ρεύματα, πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο, γωνιακή ταχύτητα δρομέα, αντιστάσεις, ροπή) είναι εκφρασμένα σε ανά μονάδα σύστημα με τις βασικές τιμές που δίνονται στη συνέχεια.

Συνιστώσες πεπλεγμένης ροής στάτη:

$$\psi_{qs} = \omega_b \int \left[v_{qs} + \frac{r_s}{X_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_{qs}) - \omega_r \psi_{ds} \right] dt \quad (2-3)$$

$$\psi_{ds} = \omega_b \int \left[v_{ds} + \frac{r_s}{X_{ls}} (\psi_{md} - \psi_{ds}) - \omega_r \psi_{qs} \right] dt \quad (2-4)$$

Όπου

$$\psi_{mq} = \frac{1}{\frac{1}{X_{mq}} + \frac{1}{X_{ls}}} \frac{\psi_{qs}}{X_{ls}} = \frac{X_{mq}}{X_{mq} + X_{ls}} \psi_{qs} \quad (2-5)$$

$$\psi_{md} = \frac{1}{\frac{1}{X_{md}} + \frac{1}{X_{ls}}} \left(\frac{\psi_{ds}}{X_{ls}} + i'_m \right) = \frac{X_{md}}{X_{md} + X_{ls}} \psi_{ds} + \frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} i'_m \quad (2-6)$$

Ρεύματα τυλιγμάτων:

$$i_{qs} = \frac{\psi_{mq} - \psi_{qs}}{X_{ls}} \quad (2-7)$$

$$i_{ds} = \frac{\psi_{md} - \psi_{ds}}{X_{ls}} \quad (2-8)$$

Εξισώσεις κίνησης δρομέα:

$$T_e = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} \quad (2-9)$$

$$\omega_r = \frac{1}{J} \int (T_m - T_e) dt \quad (2-10)$$

$$\theta_r = \int \omega_r dt \quad (2-11)$$

Ανά μονάδα σύστημα:

Βασική τιμή ισχύος: S_b = ονομαστική ισχύς της γεννήτριας

Βασική τιμή τάσης για τις φάσεις abc: $V_{b(abc)}$ = ενεργός (rms) τιμή της φασικής τάσης ανοιχτοκύκλωσης σε ονομαστικές στροφές

Βασική τιμή τάσης για τις μεταβλητές qd0: $V_{b(qd0)} = \sqrt{2} V_{b(abc)}$ = πλάτος της φασικής τάσης.

$$I_{b(abc)} = \frac{S_b}{3V_{b(abc)}}$$

Βασική τιμή ρεύματος γραμμής abc:

$$I_{b(qd0)} = \frac{S_b}{\frac{3}{2}V_{b(qd0)}}$$

Βασική τιμή ρεύματος για τις μεταβλητές qd0:

$$Z_b = \frac{V_{b(abc)}}{I_{b(abc)}} = \frac{3V_{b(abc)}^2}{S_b}$$

Βασική τιμή αντίστασης:

$$Z_b = \frac{V_{b(qd0)}}{I_{b(qd0)}} = \left(\frac{3}{2}\right) \frac{V_{b(qd0)}^2}{S_b}$$

ή ισοδύναμα

$$T_b = \frac{S_b}{\left(\frac{2}{P}\right)\omega_b}$$

Βασική τιμή ροπής: όπου η βασική γωνιακή ταχύτητα ω_b αντιστοιχεί στην ονομαστική ή βασική τιμή (ηλεκτρικής) συχνότητας της μηχανής.

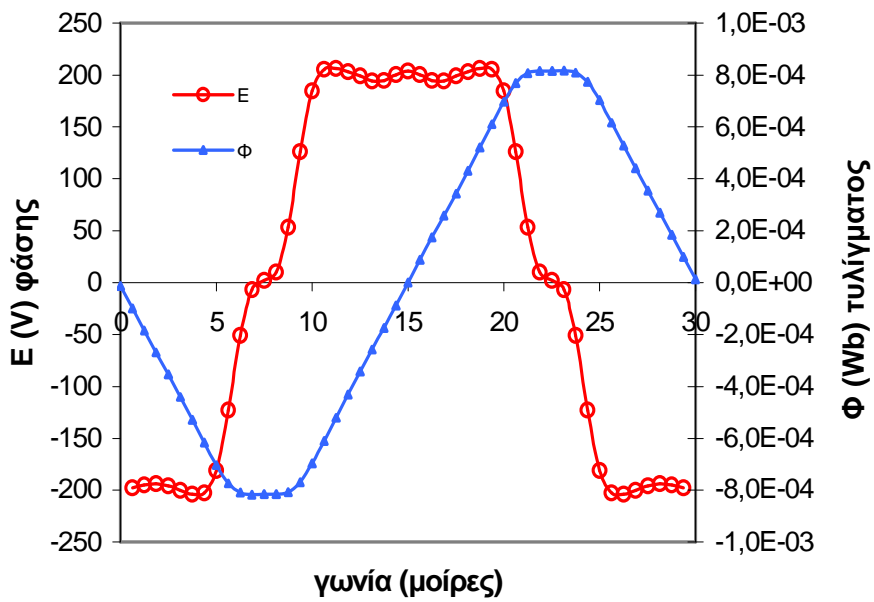
$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_{mb}^2}{S_b} = \frac{\frac{1}{2}\left(\frac{2}{P}\right)^2 J\omega_b^2}{S_b}$$

Ανοιγμένη σταθερά αδράνειας: βασική τιμή μηχανικής ταχύτητας.

όπου ω_{mb} είναι η

Μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος με ηλεκτρεγερτική δύναμη που περιέχει ανώτερες αρμονικές συνιστώσες

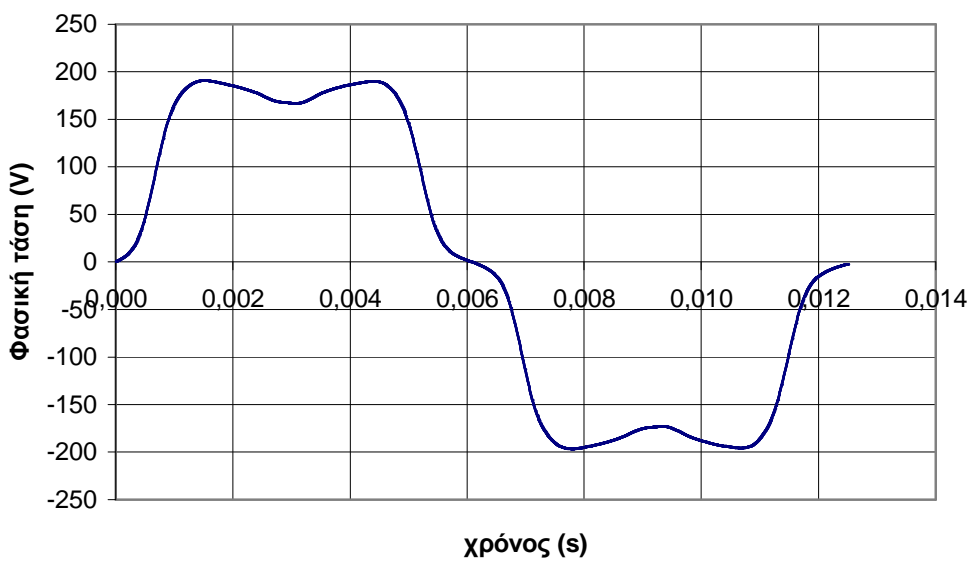
Πρόκειται για κυκλωματικό μοντέλο που περιλαμβάνει ηλεκτρεγερτική δύναμη, αντίσταση και αυτεπαγωγή για κάθε φάση [12]. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη περιέχει αρμονικές συνιστώσες ανώτερης τάξης. Μπορεί να προέρχεται από προσομοίωση σε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, όπως αυτή που φαίνεται στο Σχ. 2-5, οπότε το πλήθος των ανώτερων αρμονικών συνιστωσών περιορίζεται από τη λεπτομέρεια μοντέλου. Αντί αυτής προτιμάται η μετρημένη τάση κενού φορτίου, η οποία ωστόσο δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές, όπως φαίνεται στο Σχ. 2-6, ενώ περιέχει μέχρι 100 ανώτερες αρμονικές συνιστώσες.



Σχ. 2-5

Προσομοίωση ροής τυλίγματος και τάσης φάσης της γεννήτριας μονίμων μαγνητών σε ονομαστικές στροφές

Κενό φορτίο, 400rpm



Σχ. 2-6

Φασική τάση κενού φορτίου δοκιμίου σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών

Τα τυλίγματα του ισοδύναμου κυκλώματος μπορούν να έχουν ως τιμή τη μέση αυτεπαγωγή που προκύπτει από την ανάλυση με μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και τη χρήση εμπειρικών τύπων. Συγκεκριμένα, προσδιορίζονται οι αυτεπαγωγές σκέδασης L_{lq} και L_{ld} , καθέτου και ευθύ άξονα αντίστοιχα, όπως ορίζονται στον τροποποιημένο μετασχηματισμό του Park, σύμφωνα με τους τύπους:

$$L_{lq} \approx L_{lq} \tau_{yl} + L_{eol} \quad (2-12)$$

$$L_{ld} \approx L_{ld} \tau_{yl} + L_{eol} \quad (2-13)$$

όπου οι αυτεπαγωγές $L_{lq\tau\lambda}$ και $L_{ld\tau\lambda}$ για τον κάθετο και ευθύ άξονα αντίστοιχα προκύπτουν από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, ενώ η L_{eol} , δηλαδή η αυτεπαγωγή σκέδασης των άκρων του τυλίγματος, προκύπτει από εμπειρικούς τύπους που λαμβάνουν υπόψη τις διαστάσεις του.

Όμως οι αυτεπαγωγές αυτές συνδέονται με τις αντίστοιχες μαγνητικές αγωγιμότητες με τις σχέσεις:

$$L_{lq\tau\lambda} \approx \frac{3}{2} \frac{P}{2} N_i^2 Plq \quad (2-14)$$

$$L_{ld\tau\lambda} \approx \frac{3}{2} \frac{P}{2} N_i^2 Pld \quad (2-15)$$

όπου N_i είναι ο αριθμός των ελιγμάτων ανά πηνίο (στην παρούσα περίπτωση είναι ίσος με 50), P είναι ο αριθμός των πόλων (ίσος με 24) και Plq , Pld οι μαγνητικές αγωγιμότητες σκέδασης. Οι τελευταίες υπολογίζονται από τους τύπους:

$$Plq = \frac{\Phi_{lq}}{F_{lq}} \quad (2-16)$$

$$Pld = \frac{\Phi_{ld}}{F_{ld}} \quad (2-17)$$

όπου Φ_{lq} και Φ_{ld} η μαγνητική ροή σκέδασης στον κάθετο και ευθύ άξονα αντίστοιχα, ενώ F_{lq} και F_{ld} οι αντίστοιχες μαγνητεγερτικές δυνάμεις.

Οι μαγνητικές ροές υπολογίζονται με βάση τις τιμές του διανυσματικού δυναμικού σε επιλεγμένα σημεία της μηχανής και το μήκος της, ενώ οι μαγνητεγερτικές δυνάμεις λαμβάνονται από την πρώτη αρμονική των αντίστοιχων διαγραμμάτων σε συνάρτηση με το μήκος τόξου. Τα τρεξίματα γίνονται για φόρτιση των τυλιγμάτων στο 150% της ονομαστικής τους με απόντες τους μόνιμους μαγνήτες, λαμβάνοντας έτσι υπόψη τη δυσμενέστερη περίπτωση.

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στα εξής:

$$Plq = 0.257 \cdot 10^{-6} \text{ Wb/AE} \quad \& \quad Pld = 0.256 \cdot 10^{-6} \text{ Wb/AE}$$

$$\Phi_{lq} = 0.10478 \text{ mWb} \quad \& \quad \Phi_{ld} = 0.0523 \text{ mWb}$$

$$L_{lq} \approx 13.928 \text{ mH} \quad \& \quad L_{ld} \approx 13.911 \text{ mH}$$

Επειδή οι αυτεπαγωγές των δύο αξόνων είναι πολύ κοντά μεταξύ τους εκλέγεται ως κατάλληλη η δυσμενέστερη τιμή των 13.928 mH. Η υπολογισμένη τιμή παρουσιάζει σημαντική απόκλιση από τη μετρημένη των 17.3 mH. Η απόκλιση αυτή είναι συνηθισμένη κατά την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων, και οφείλεται σε σφάλμα κατά τη θεώρηση του διακένου. Για τη λειτουργία του κυκλωματικού μοντέλου προτιμάται η μετρημένη τιμή.

Για τον υπολογισμό της ωμικής αντίστασης R_{ph} χρησιμοποιείται η σχέση (2-18), έχοντας ως δεδομένα την ειδική αγωγιμότητα ρ_{Cu} του υλικού (0,0175 $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$), το συνολικό μήκος του LCu και την αντίστοιχη διατομή του $S = 0,785 \text{ mm}^2$.

$$R_{ph} = \rho_{Cu} \frac{L_{Cu}}{S} \quad (2-18)$$

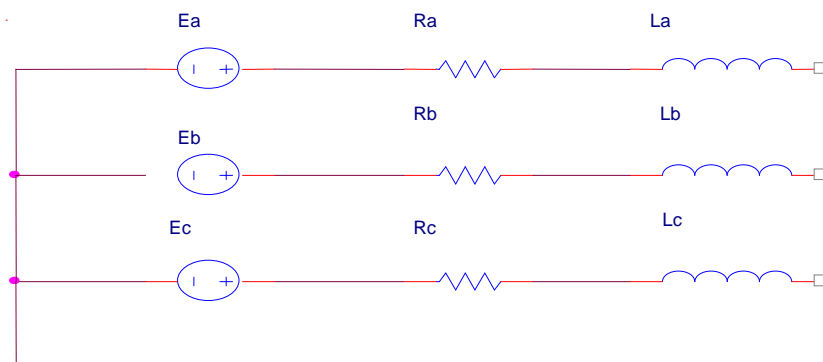
Το μήκος κάθε σπείρας είναι σύμφωνα με τις παραδοχές που έχουν γίνει ως προς τα μήκη ίσο με: $L_{σπείρας} = 0.21486 \text{ m}$

Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη ότι το κάθε πηνίο έχει 50 σπείρες και ότι είναι 12 πηνία συνδεδεμένα σε σειρά ανά φάση, τότε το συνολικό μήκος είναι: $LCu = 128.9 \text{ m}$

Οπότε η αντίσταση κάθε φάσης είναι: $R_{ph} = 2.872 \Omega$ Η τιμή αυτή συμπίπτει με το μέσο όρο των μετρημένων αντιστάσεων των φάσεων, οπότε χρησιμοποιείται αναλλοίωτη στο κυκλωματικό μοντέλο.

Ένας γραμμικός πυρήνας συνδέει μερικώς τα τυλίγματα του ισοδύναμου κυκλώματος, για να προσομοιωθεί η αμοιβαία επαγωγή. Δεν είναι απαραίτητη η χρήση μη γραμμικού πυρήνα, καθώς το μαγνητικό κύκλωμα είναι σχεδιασμένο για αρκετά ισχυρότερη διέγερση. Αυτό έχει σαν αιτία τη βελτιστοποίηση που έχει γίνει κατά τη σχεδίαση σκοπός ήταν η ελαχιστοποίηση του υλικού των μόνιμων μαγνητών, καθώς παρουσιάζει σημαντικό κόστος στο σύνολο υλικών της γεννήτριας. Έτσι προέκυψε μαγνητικό κύκλωμα που θα μπορούσε να δεχτεί περίπου 40% ισχυρότερη διέγερση, αν αυτή ήταν από τύλιγμα (ή υποθετικό ισχυρότερο μαγνήτη). Οι λεπτομέρειες του κυκλώματος φαίνονται στο Σχ. 2-7.

Καθώς η μορφή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης της γεννήτριας αποκλίνει έντονα από αυτή του απλού ημίτονου, το ισοδύναμο κύκλωμα που περιέχει πολλές αρμονικές συνιστώσες (μέχρι 100), υπό τη μορφή χρονικής μεταβολής του σήματος, φαίνεται να έχει σαφές πλεονέκτημα έναντι του μοντέλου που προκύπτει από τη γενικευμένη θεωρία ηλεκτρικών μηχανών. Μεγέθη όπως η ισχύς και η ροπή υπολογίζονται χωρίς σημαντικές αποκλίσεις. Το μοντέλο της γενικευμένης θεωρίας θα μπορούσε να επεκταθεί ώστε να συμπεριλάβει ανώτερες αρμονικές υπό τη μορφή πλαισίων στρεφομένων με πολλαπλάσια ταχύτητα της θεμελιώδους. Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι πρακτικό για πολλές συνιστώσες.



Σχ. 2-7

Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας

$$V_a = \tilde{E}_a - L_a \frac{di_a}{dt} - M \frac{di_b}{dt} - M \frac{di_c}{dt} - R_a \quad (2-19)$$

$$i_b + i_c = -i_a \quad (2-20)$$

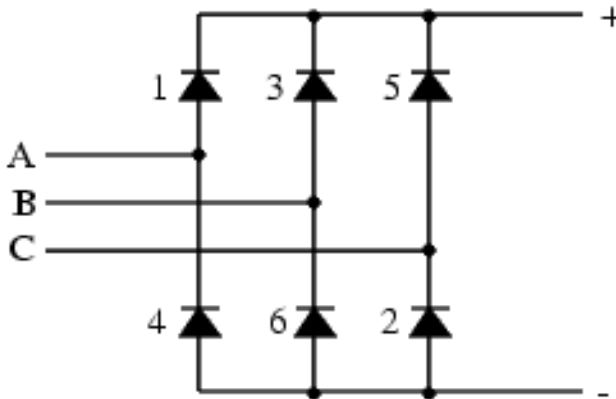
$$V_a = \tilde{E}_a - R_a i_a - (L_a + M) \frac{di_a}{dt} \quad (2-21)$$

Οι εξισώσεις (2-12) – (2-14) εξηγούν την αρνητική τιμή του συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής M . Με κυκλική εναλλαγή των δεικτών προκύπτουν οι εξισώσεις για τις άλλες δύο φάσεις. Η (2-14) προκύπτει από συνδυασμό των (2-12) και (2-13). Όπως φαίνεται από την (2-13), τα ρεύματα δύο φάσεων έχουν μεταξύ τους αντίθετο πρόσημο, αν της τρίτης είναι μηδέν. Επομένως, αφού ο συντελεστής M δείχνει την αναλογία των ρευμάτων των εμπλεκόμενων τυλιγμάτων, θα είναι $M < 0$.

2.4. Ηλεκτρονικός Μετατροπέας Ισχύος

2.4.1. Ανορθωτική γέφυρα διόδων

Η μη ελεγχόμενη τριφασική ανόρθωση σε συνδεσμολογία γέφυρας παρουσιάζεται στο Σχ.2-7. Η αρίθμηση των διόδων έχει γίνει σύμφωνα με την ακολουθία αγωγής των διόδων. Στο Σχ. 2-8 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα της διόδου.

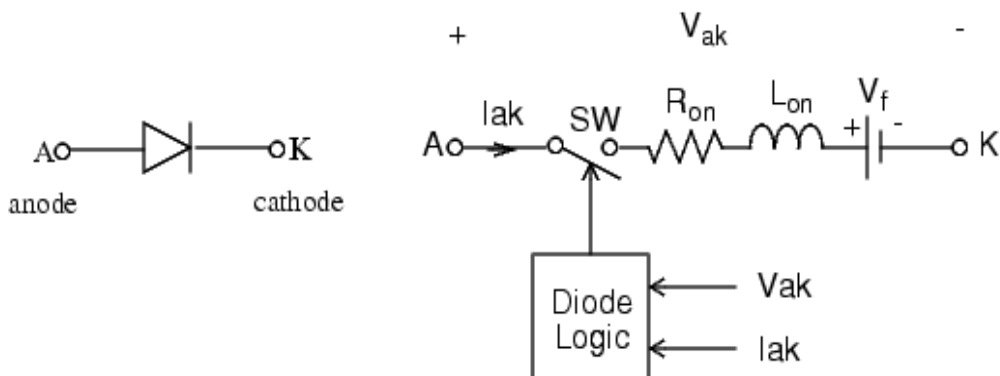


Σχ. 2-8

Μη ελεγχόμενη τριφασική ανορθωτική γέφυρα

Κατά τη λειτουργία αυτής της τριφασικής ανόρθωσης πάντοτε άγει μία διόδος από την πάνω ομάδα των διόδων (D1 ,D3, D5) και μία από την κάτω ομάδα (D2 ,D4, D6). Κάθε φορά που άγει κάθε ζευγάρι για 1/6 του κύκλου λειτουργίας μία πολική τάση εισόδου συνδέεται στα άκρα της εξόδου. Επομένως αφού έχουμε 6 ζευγάρια διόδων να άγουν για ένα κύκλο λειτουργίας , έχουμε και 6 θετικούς παλμούς πολικών τάσεων.

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου της ανόρθωσης δίνεται από τη σχέση: $V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_s$ όπου η V_s : η πολική τάση στα άκρα της γεννήτριας



Σχ. 2-9

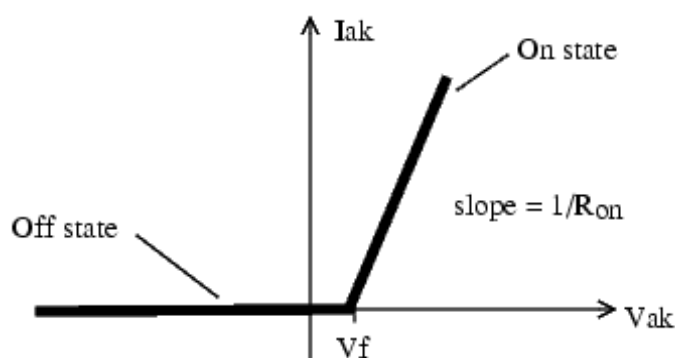
Ισοδύναμο κύκλωμα διόδου

Μια διόδος μπορεί να αναπαρασταθεί στον υπολογιστή σαν ένας ελεγχόμενος διακόπτης σε σειρά με μια πηγή τάσης V_f μια αυτεπαγωγή L_{on} και μια αντίσταση R_{on} .

Οι R_{on} και L_{on} αποτελούν κατασκευαστικά στοιχεία της διόδου και συνήθως έχουν πολύ μικρές τιμές.

Ο διακόπτης ελέγχεται από τη διαφορά δυναμικού στα άκρα της διόδου και το ρεύμα που τη διαρρέει. Όταν η τάση V_{AK} είναι θετική ο διακόπτης κλείνει και η διάδος άγει. Όταν το ρεύμα μηδενιστεί, η διάδος σταματά να άγει και ο διακόπτης ανοίγει. Όσο η τάση V_{AK} είναι αρνητική, η διάδος είναι σε αποκοπή και ο διακόπτης ανοικτός. Όταν η V_{AK} υπερβεί μια αρνητική τιμή που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της, διασπάται και αρχίζει να άγει. Η λειτουργία στην περιοχή διάσπασης δεν συναντάται στους ανορθωτές .

Η πηγή τάσης V_f αντιστοιχεί στη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται στα άκρα της διόδου όταν άγει και ονομάζεται τάση αγωγής. Η τάση αγωγής συνδέεται με το ρεύμα που διαρρέει τη διάοδο σύμφωνα με την καμπύλη του Σχ. 2-10. Θα πρέπει να διευκρινίσουμε ότι η διακοπτική χαρακτηριστική ενός ημιαγωγικού στοιχείου έχει να κάνει με τη δυναμική συμπεριφορά λειτουργίας του όταν αυτό μεταβαίνει από την κατάσταση αποκοπής στην κατάσταση αγωγής και το αντίθετο. Στην πραγματικότητα η καμπύλη είναι εκθετική και όχι γραμμική αλλά μπορεί να προσεγγισθεί από γραμμική για απλοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου.



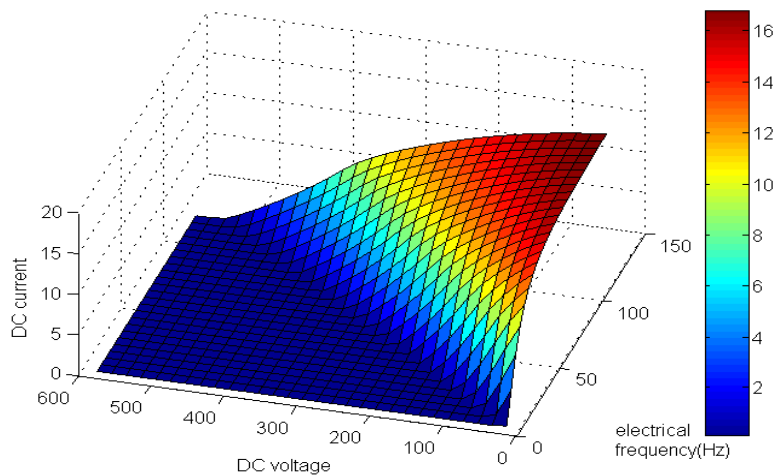
Σχ. 0-10

Γραμμικοποιημένη Καμπύλη Vf-I διόδου

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις που γίνονται με το πακέτο Simulink™ του περιβάλλοντος MATLAB™.

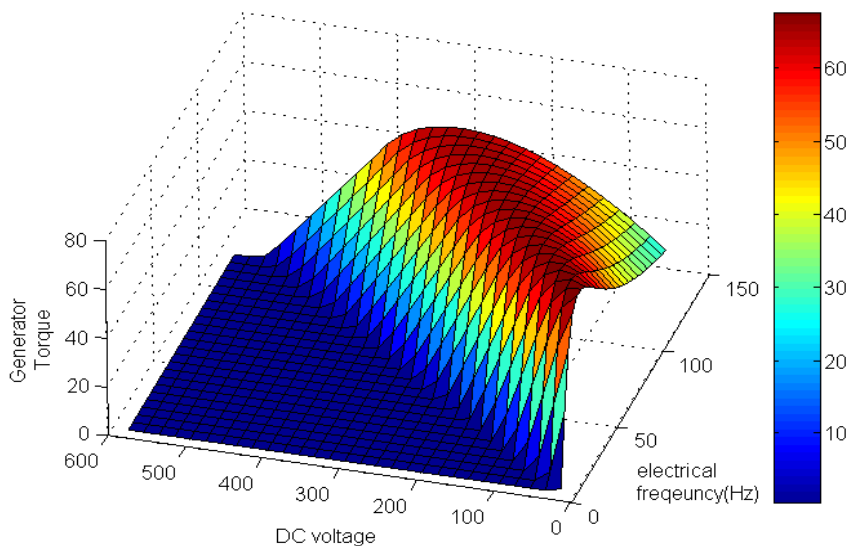
Προηγμένο μοντέλο γεννήτριας – ανορθωτή για χρήση σε προσομοιώσεις

Με σκοπό την αποφυγή συνεχών υπολογισμών ηλεκτρικών λεπτομερειών, εξάγουμε πλήθος σημείων που αντιστοιχούν σε καταστάσεις λειτουργίας κατά τη συνεργασία της γεννήτριας με τον ανορθωτή διόδων χωρίς σημαντικό σφάλμα στα ενδιαφέροντα μεγέθη. Κάτι τέτοιο εφαρμόζεται στην προσομοίωση μηχανικών μεταβατικών φαινομένων, όπου η κλίμακα χρόνου που χρησιμοποιείται καθιστά την ανάλυση των διακοπτικών φαινομένων χρονοβόρα και υπολογιστικά πολύ απαιτητική. Τα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα δεν προσομοιώνονται με αυτόν τον τρόπο, αλλά αυτό δεν εισάγει παρά ασήμαντα σφάλματα.



Σχ. 2-11

Μέσο ανορθωμένο ρεύμα γεννήτριας μονίμων μαγνητών ως συνάρτηση της ηλεκτρικής συχνότητας και της τάσης εξόδου



Σχ. 2-12

Μέση ροπή του άξονα γεννήτριας μονίμων μαγνητών ως συνάρτηση της ηλεκτρικής συχνότητας και της τάσης εξόδου

Έτσι, τα μοντέλα γεννήτριας – ανορθωτή συνδυάζονται ώστε να προκύψουν επιφάνειες που αντιστοιχούν σε λειτουργικές καταστάσεις. Για διάφορες τιμές ηλεκτρικής συχνότητας και τάσης εξόδου λαμβάνεται αφενός το μέσο ανορθωμένο ρεύμα (Σχ. 2-11), αφετέρου η μέση ροπή στον άξονα (Σχ. 2-12) [8].

Με βάση τα παραπάνω, το ηλεκτρικό μοντέλο της μηχανής δέχεται ως είσοδο την ηλεκτρική συχνότητα της μηχανής, που επιβάλλεται από την κινητική της κατάσταση, και τη μέση τάση εξόδου μετά την ανόρθωση και υπολογίζει το ανορθωμένο ρεύμα στην έξοδο, καθώς και τη ροπή που ασκεί η γεννήτρια στον άξονα. Από αυτό το μέγεθος, αλλά και από τη μηχανική ροπή που ασκείται εξωτερικά σε συνδυασμό με την αδράνεια των στρεφομένων μερών, υπολογίζεται η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα

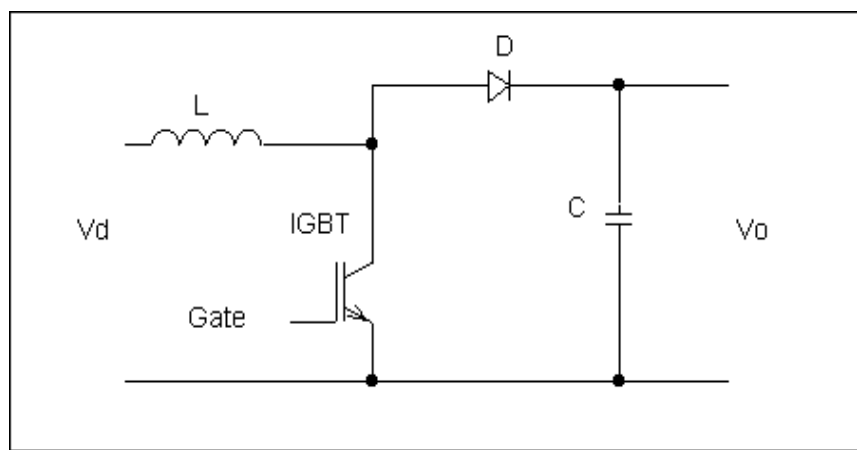
της μηχανής ω_r , όπως δείχνει η σχέση (2-10). Από τη σχέση (2-22) λαμβάνεται η ηλεκτρική συχνότητα των τάσεων και ρευμάτων της μηχανής.

$$f = \frac{\omega_r}{2\pi} \left(\frac{p}{2} \right) \quad (2-22)$$

όπου p οι πόλοι της γεννήτριας.

2.4.2. Μετατροπέας ανύψωσης τάσης

Η τοπολογία που έχει ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης (DC-DC Boost Converter) παρουσιάζεται στο Σχ. .



Σχ. 2-13

Μετατροπέας ανύψωσης τάσης

Ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης είναι ένας μετατροπέας ισχύος με συνεχή τάση εξόδου V_o μεγαλύτερη από την συνεχή τάση εισόδου V_d . Το IGBT που χρησιμοποιούμε έχει εσωτερικά αντιπαράλληλη δίοδο η οποία προστατεύει από αρνητικές αιχμές τάσης. Το ρόλο της αυτεπαγωγής παίζουν τα τυλίγματα της γεννήτριας καθώς η ισοδύναμη ανά φάση αντίδραση της γεννήτριας μονίμων μαγνητών είναι αρκετά μεγάλη ,η σύνδεση σε σειρά με άλλο πηνίο θα ήταν περιττό. Ο πυκνωτής στην έξοδο της διάταξης λειτουργεί ως φίλτρο αποκοπής των αρμονικών της τάσης και συμβάλλει στη διατήρηση σταθερής τάσης εξόδου V_o .

Το ημιαγωγικό στοιχείο IGBT μπορεί να παρασταθεί ισοδύναμα όπως και η δίοδος, δηλαδή σαν ένας ελεγχόμενος διακόπτης σε σειρά με πηγή τάσης V_f , αντίσταση R_{on} και αυτεπαγωγή L_{on} . Το IGBT αρχίζει να άγει όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού του V_{CE} είναι θετική μεγαλύτερη της V_f και το σήμα τάσης στην πύλη του V_{GS} υπερβαίνει την τιμή κατωφλίου $V_{GS(th)}$. Αποκόπτει τη ροή όταν $V_{CE} > 0$ και ταυτόχρονα $V_{GE} < V_{GE(th)}$. Όταν $V_{CE} < 0$ το IGBT είναι σε αποκοπή το οποίο όμως δεν συμβαίνει στην συγκεκριμένη περίπτωση αφού η τάση στην είσοδο του είναι πάντα θετική.

Όταν το IGBT άγει, εφαρμόζεται η τάση εισόδου στο πηνίο L , του οποίου το ρεύμα αυξάνεται για χρονικό διάστημα t_{on} και δίνει ενέργεια στο πηνίο. Η τάση στα άκρα του πηνίου είναι:

$$V_L = V_{in} - V_o \quad (2-23)$$

Όπου V_{in} η τάση εισόδου και V_o η τάση εξόδου. Το ρεύμα του πηνίου αυξάνεται γραμμικά.

Όταν το IGBT σταματήσει να άγει, τότε η ενέργεια η αποθηκευμένη στην αυτεπαγωγή θα μεταφερθεί προς την έξοδο μέσω της διόδου D, μαζί με ενέργεια από την πηγή εισόδου. Επομένως, η τάση της αυτεπαγωγής L προστίθεται με την τάση εισόδου και έτσι εξαναγκάζει το ρεύμα της αυτεπαγωγής να κυκλοφορήσει με φορά προς τον πυκνωτή και τα επόμενα κυκλώματα.

Κατά τη φάση που δεν άγει το IGBT, η τάση στα άκρα του πηνίου είναι:

$$V_L = -V_o \quad (2-24)$$

Ο νόμος του Faraday για την τάση στα άκρα μιας αυτεπαγωγής είναι :

$$V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (2-25)$$

μέσω ολοκλήρωσης για μια διακοπτική περίοδο T_s δίνει:

$$\frac{1}{L} \int_0^{i_s} V_L dt = \int_0^{i_s} di_L = 0 \quad (2-26)$$

Αφού στη μόνιμη κατάσταση η αρχική και τελική τιμή του ρεύματος του πηνίου πρέπει να είναι ίδιες. Για έναν μετατροπέα χωρίς απώλειες η σχέση (2-26) απλοποιείται και επομένως:

$$(V_{in} - V_o) \cdot D \cdot T_s = V_o \cdot (1 - D) \cdot T_s \quad (2-27)$$

$$\overline{V_o} = V_d \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} = \frac{V_d}{1 - D} \quad (2-28)$$

όπου D ο βαθμός χρησιμοποίησης του διακόπτη (Duty Cycle) = t_{on}/T_s

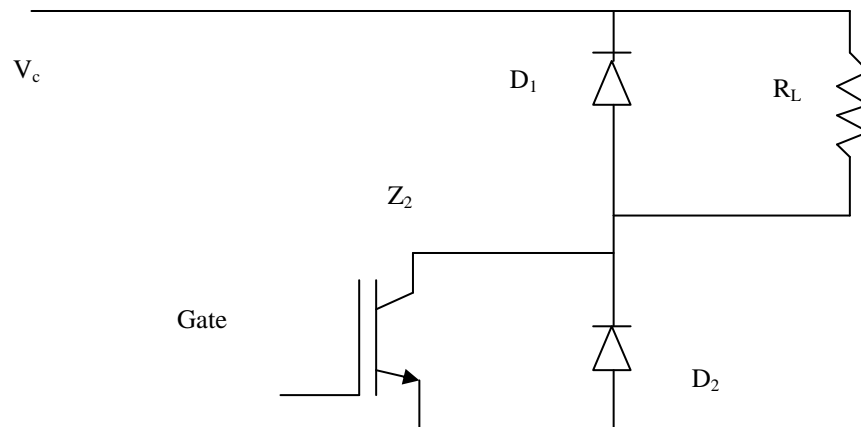
Επιπλέον για το ρεύμα εξόδου ισχύει:

$$\overline{I_o} = \overline{I_s} (1 - D) \quad (2-29)$$

2.4.3. Ελεγχόμενο φορτίο

Για την περίπτωση της απομονωμένης λειτουργίας υπάρχει μεταβλητό φορτίο ελεγχόμενο από το μικροεπεξεργαστή, συνδεδεμένο στους πυκνωτές σταθεροποίησης της τάσης. Το σχετικό κύκλωμα φαίνεται στο

Σχ. .



Σχ. 2-14

Ελεγχόμενο φορτίο για απομονωμένη λειτουργία.

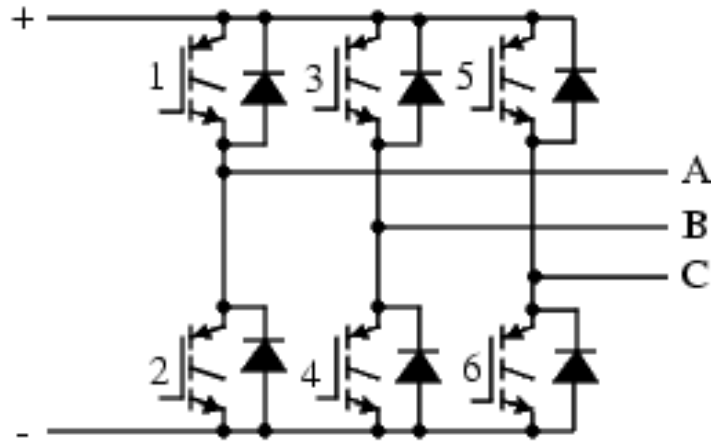
Όταν το IGBT Z2 άγει, ρεύμα περνά από το φορτίο RL. Όταν δεν άγει, η κυκλοφορία ρεύματος μέσα από το φορτίο συνεχίζεται για λίγο μέσα από τη διάοδο ελεύθερης διέλευσης D1. Η διάοδος D2, που βρίσκεται ενσωματωμένη στο Z2, χρησιμεύει ελάχιστα, κυρίως για προστασία του από ανάστροφες τάσεις λόγω αυτεπαγωγών σύνδεσης. Αν D είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης του Z2, IL το ρεύμα προς την αντίσταση και VC η τάση εισόδου, από τους πυκνωτές, τότε ισχύει:

$$\overline{I_L} = \frac{V_C \cdot D}{R_L} \quad (2-30)$$

2.4.4. Τριφασικός Αντιστροφέας Πηγής Τάσης

Ο τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης μετατρέπει τη συνεχή τάση που τροφοδοτείται από τους πυκνωτές της ανυψωτικής διάταξης σε τριφασική εναλλασσόμενη μεταβλητή ενεργής τιμής και μεταβλητής συχνότητας. Κατά συνέπεια ο τριφασικός αντιστροφέας καθιστά δυνατή τη σύνδεση της διάταξης με το δίκτυο.

Το κύκλωμα ενός τυπικού τριφασικού αντιστροφέα με IGBTs φαίνεται στο Σχ. 2-15.



Σχ. 2-15

Κυκλωματικό διάγραμμα τριφασικού αντιστροφέα

Οι ημιαγωγικοί διακόπτες λειτουργούν ως διακόπτες που μπορούν να βρίσκονται είτε σε κατάσταση αγωγής είτε σε κατάσταση αποκοπής. Οι δίοδοι στα άκρα των διακοπών χρειάζονται για επαγωγικά φορτία διότι εξασφαλίζει την κυκλοφορία της άεργου ισχύος καθώς και σε περιπτώσεις πέδησης όπου έχουμε ροή ρεύματος αντίθετης φοράς από εκείνη των ελεγχόμενων διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα.

Η λειτουργία του αντιστροφέα βασίζεται στους θετικούς παλμούς έναυσης που δίνονται στις πύλες 2 κάθε φορά εκ των 6 διακοπτικών στοιχείων με αποτέλεσμα αυτά να μεταβαίνουν στην κατάσταση αγωγής. Συνεπώς συνδέουν την DC τάση εισόδου στα άκρα του φορτίου έτσι ώστε να δημιουργείται στα άκρα του φορτίου ένας θετικός παλμός τάσης V (Volts) και εύρους ίσο με την χρονική διάρκεια αγωγής των αντίστοιχων διακοπτικών στοιχείων. Κατά τη φάση αυτή δεν άγουν οι υπόλοιποι διακόπτες. Στην συνέχεια αφαιρούμε τους παλμούς οδήγησης από τα προηγούμενα διακοπτικά στοιχεία και τα εφαρμόζουμε σε άλλα 2 και ούτω καθεξής.

Η τάση εξόδου του αντιστροφέα αποτελείται από την βασική αρμονική συνιστώσα και από τις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες οι οποίες πρέπει να εξαλειφθούν ή να μειωθούν. Αυτό βέβαια μπορεί να εξαλειφθεί χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο στην έξοδο του αντιστροφέα. Το μέγεθος, το βάρος, και το κόστος του φίλτρου εξαρτώνται από το πλάτος και την συχνότητα της βασικής αρμονικής. Για να αποφύγουμε την χρήση φίλτρου χρησιμοποιούμε μια τεχνική για το σκοπό αυτό, την Ημιτονοειδή Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (SPWM). Σύμφωνα με την τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται τρεις όμοιες ημιτονοειδείς κυματομορφές αναφοράς (μία για κάθε ημιγέφυρα) και μια τριγωνική κυματομορφή φορέα συγχρονισμένες μεταξύ τους. Οι ημιτονοειδείς κυματομορφές παρουσιάζουν διαφορά φάσης 120° η κάθε μία από τις άλλες όπως συμβαίνει σε ένα τυπικό τριφασικό σύστημα. Τα σημεία τομής μεταξύ των κυματομορφών αναφοράς και της κυματομορφής του φορέα, ορίζουν τις κυματομορφές των παλμών έναυσης των IGBTs. Αυτό που επιτυγχάνεται με την τεχνική SPWM είναι η μετατόπιση της κυριαρχούσας ανώτερης αρμονικής συνιστώσας σε συχνότητα πολύ υψηλότερη από αυτή της βασικής αρμονικής συνιστώσας. Η κυριαρχούσα ανώτερη αρμονική είναι η αρμονική η οποία έχει το μέγιστο συντελεστή παραμόρφωσης (Distortion Factor) που δίνεται από τη σχέση:

$$D_n \% = 100 \left(\frac{V_{AB,n}}{n^2} \right) \quad (2-31)$$

Το πλάτος και η τάξη της κυριαρχούσας ανώτερης αρμονικής συνιστώσας δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$V_{(AB,d)\max} = 0.27V_c \quad (2-32)$$

$$d = F_{nc} - 2 \quad (2-33)$$

$$F_{nc} = \frac{F_c}{F_r} \quad (2-34)$$

όπου F_{nc} η ανοιγμένη συχνότητα του φορέα και V_c είναι η DC τάση εισόδου του αντιστροφέα ή στη συγκεκριμένη περίπτωση η τάση στους πυκνωτές στην έξοδο του DC μετατροπέα.

Ο συντελεστής διαμόρφωσης (modulation factor), ο οποίος παίρνει τιμές από 0 έως 1, είναι ο λόγος του πλάτους της κυματομορφής αναφοράς A_r (ημίτονου) προς το πλάτος τη κυματομορφής φορέα A_c (τριγωνικού παλμού) και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$M_f = \frac{A_r}{A_c} \quad (2-35)$$

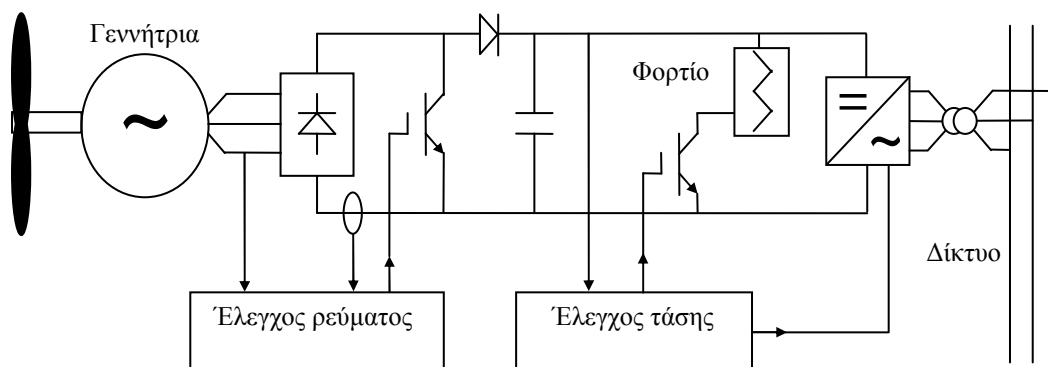
Το πλάτος κυματομορφής φορέα A_c παραμένει σταθερό με αποτέλεσμα αυξομειώνοντας το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς A_r να αυξομειώνονται τα εύρη των παλμών έναυσης και κατά συνέπεια να αυξομειώνεται η ενεργός τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας. Το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας της πολικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα είναι:

$$V_{AB,1} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_c M_f \quad (2-36)$$

Είναι προφανές από τα παραπάνω ότι μεταβάλλοντας το συντελεστή διαμόρφωσης είναι δυνατή η ρύθμιση της τάσης εξόδου του αντιστροφέα στην επιθυμητή τιμή.

2.4.5. Συστήματα ελέγχου μετατροπέων

Υπάρχουν δύο συστήματα ελέγχου, ένα που επιβάλλει στο σύστημα να λειτουργεί υπό μια προκαθορισμένη χαρακτηριστική ροπής στρωφών και ένα δεύτερο που ρυθμίζει τη ροή ενεργού και άεργου ισχύος και εξασφαλίζει τη διατήρηση σταθερής τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα. Στο Σχ.2-16 φαίνεται μια απλοποιημένη παράσταση του συστήματος ελέγχου, όπως έχει υλοποιηθεί στο μικροεπεξεργαστή.

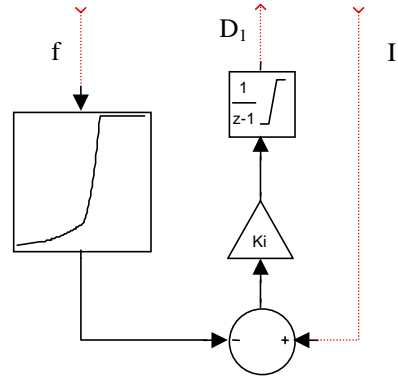


Σχ. 2-16

Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου

2.4.5.1. Σύστημα βελτιστοποίησης απορροφούμενης ισχύος

Το σύστημα αυτό λειτουργεί σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχ. 2-17.



Σχ. 2-17

Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου ρεύματος γεννήτριας

Όπου:

f η ηλεκτρική συχνότητα της γεννήτριας σε Hz.

$D1$ η τιμή του βαθμού χρησιμοποίησης (duty cycle) του IGBT του DC μετατροπέα που κυμαίνεται από 0 ως 1. Αποφεύγονται τιμές άνω του 0.85, καθώς δυσχεραίνουν τη λειτουργία της γεννήτριας.

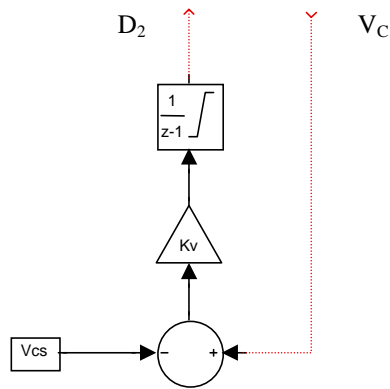
$I1$ το συνεχές ρεύμα στην ανόρθωση, δηλαδή στην πλευρά χαμηλής τάσης του DC μετατροπέα, σε A.

K_i το κέρδος του βρόχου ανάδρασης, περίπου $-0.3855A^{-1}s^{-1}$

Το υποσύστημα αυτό μετρά την ηλεκτρική συχνότητα της γεννήτριας, που είναι πάντα ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και το ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας, το οποίο στην περιοχή λειτουργίας είναι περίπου ανάλογο της ηλεκτρικής ροπής. Βρίσκει από το σχετικό πίνακα αναφοράς το επιθυμητό ρεύμα, το οποίο αντιστοιχεί σε επιθυμητή ροπή, και ανατροφοδοτεί το σφάλμα του σε σχέση με το μετρούμενο, στο ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος, μέσω ενός ελεγκτή I . Αρχικά είχε προταθεί ελεγκτής PI , αλλά η επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων του συστήματος έδειξε ότι είναι προτιμότερη η μεγιστοποίηση του κέρδους I , ακόμα κι αν αυτό σημαίνει μηδενισμό του P . Το συγκεκριμένο σύστημα βρίσκει εφαρμογή όπως θα δούμε αναλυτικότερα στα επόμενα κεφάλαια στην μέθοδο ελέγχου μέγιστης ισχύος που βασίζεται στην χαρακτηριστική ροπής-στροφών.

2.4.5.2. Σύστημα σταθεροποίησης τάσης

Το σύστημα αυτό τίθεται σε λειτουργία όταν η γεννήτρια είναι απομονωμένη από το δίκτυο. Η κατάσταση σύνδεσης ανιχνεύεται αυτόματα. Η δομή του φαίνεται στο Σχ. 2-18.



Σχ. 2-18

Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου τάσης πυκνωτών

Όπου:

V_c η τάση της συστοιχίας των πυκνωτών σε V

D_2 η τιμή του βαθμού χρησιμοποίησης (duty cycle) του διακοπτικού στοιχείου 2 που κυμαίνεται από 0 ως 1

V_{cs} η τάση αναφοράς που είναι σταθερά, σε Volt

K_v το κέρδος του βρόχου ανάδρασης, περίπου 0.0642V-1s-1

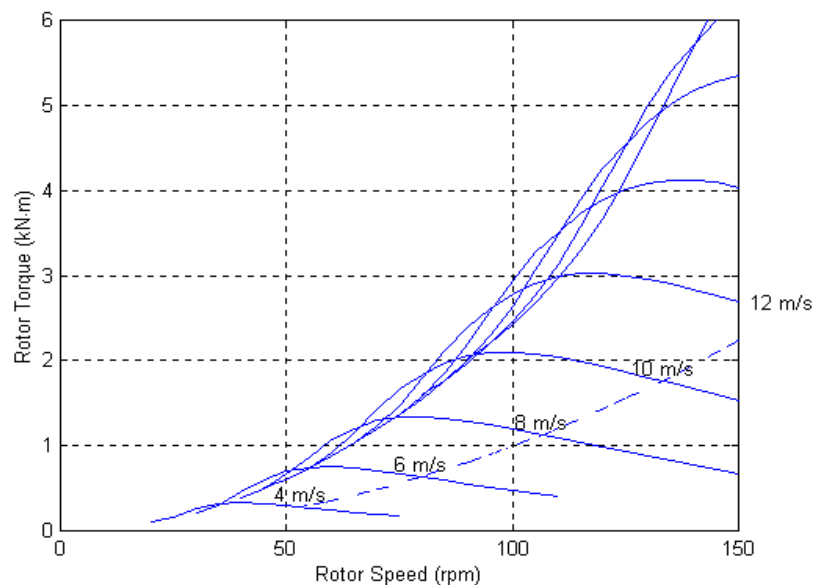
Το παραπάνω σύστημα ελέγχου μεταβάλλει με διαμόρφωση εύρους παλμών τη σταθερή αντίσταση RL έτσι ώστε να απορροφά όση ενεργό ισχύ παράγεται από τη διάταξη γεννήτριας, ανορθωτή και DC μετατροπέα. Το σήμα ελέγχου του δεύτερου διακοπτικού στοιχείου (IGBT) προκύπτει από σύγκριση της τάσης στους πυκνωτές με μία τάση αναφοράς η οποία επιλέγεται σύμφωνα με το επιθυμητό επίπεδο τάσης στην έξοδο του αντιστροφέα.

Κεφάλαιο 3

Σύστημα Ελέγχου Ανεμογεννήτριας Μονίμων Μαγνητών - Μέθοδος Βασισμένη σε Δεδομένες Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας

3.1. Στόχοι Συστήματος Ελέγχου Ανεμογεννήτριας

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο ο ανεμοκινητήρας χαρακτηρίζεται από χαρακτηριστικές ροπής – στροφών για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου όπως αυτές στο Σχ. 3-1. Η μέγιστη ισχύς για κάθε καμπύλη εμφανίζεται σε εκείνα τα λειτουργικά σημεία όπου το γινόμενο ροπή x στροφές μεγιστοποιείται και τα οποία διαμορφώνουν τη διακεκομμένη χαρακτηριστική του Σχ.3-1.



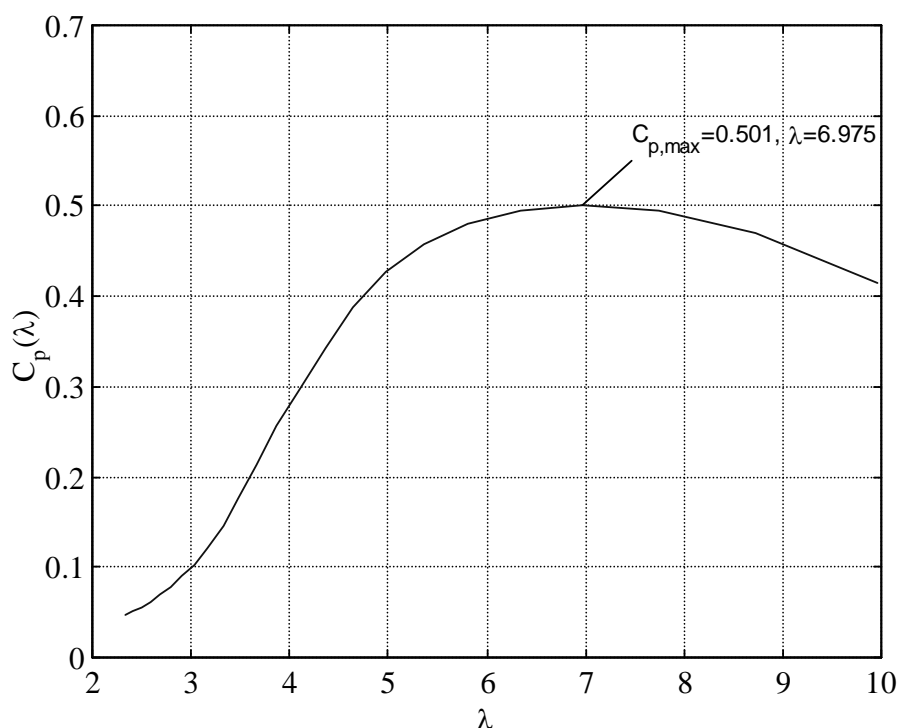
Σχ. 3-1

Χαρακτηριστικές ροπής - στροφών ανεμοκινητήρα για διάφορες ταχύτητες ανέμου. Στη διακεκομμένη γραμμή βρίσκονται τα σημεία μέγιστης ισχύος.

Για να πετύχουν το σκοπό αυτό, οι αλγόριθμοι ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος προσπαθούν να διατηρούν τα λειτουργικά σημεία του συστήματος για κάθε ταχύτητα ανέμου στο μέγιστο συντελεστή ανεμοκινητήρα C_{pmax} ο οποίος όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ισούται περίπου με 0.5 όπως φαίνεται και στο Σχ. 3-2. Με

αυτό τον τρόπο ο ανεμοκινητήρας καταφέρνει να μεγιστοποιεί την ισχύ που δεσμεύει από τον άνεμο.

Τα λειτουργικά σημεία μπορούν να βρίσκονται στη θετική κλίση της καμπύλης (Σχ. 3-2) (στην αριστερή πλευρά του $C_{p,max}$), στη μηδενική κλίση (ουσιαστικά στο $C_{p,max}$) και στην αρνητική κλίση της καμπύλης (στην δεξιά πλευρά του $C_{p,max}$). Εάν ένα λειτουργικό σημείο βρίσκεται στην περιοχή θετικής κλίσης, ο ελεγκτής θα αναλάβει την κατάλληλη δράση έτσι ώστε να το μετακινήσει προς τα δεξιά, πιο κοντά στη βέλτιστη τιμή του λόγου της ταχύτητας των ακροπτερυγίων $\lambda_{optimum}$. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με το να αυξηθούν οι στροφές του κινητήρα μέχρι να βρεθεί το βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Αντίστοιχα, εάν το λειτουργικό στοιχείο βρίσκεται στη δεξιά πλευρά της κορυφής της καμπύλης, πρέπει να μειωθούν οι στροφές. Με αυτή την αρχή, το σημείο λειτουργίας μπορεί να διατηρηθεί στο $C_{p,max}$ και κατ'επέκταση ο



ανεμοκινητήρας να αποδίδει μέγιστη ισχύ για κάθε ταχύτητα ανέμου.

Σχ.3-2

Τυπική μεταβολή του C_p σε σχέση με το λόγο λ για σταθερό β .

Το σημείο μέγιστης ισχύος (maximum power point, MPP) δύναται να ανιχνευθεί με διάφορες τεχνικές και η γεννήτρια να οδηγηθεί σε αυτό με κατάλληλη ρύθμιση των στροφών της μέσω κατάλληλης προσαρμογής του φορτίου της.

Οι τεχνικές που απαντώνται σήμερα στη βιβλιογραφία θα μπορούσαν να χωρισθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Έλεγχος βασισμένος σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες.
- Αναζήτηση του σημείου μέγιστης ισχύος χωρίς προγενέστερη γνώση χαρακτηριστικών καμπυλών.

Στη δεύτερη κατηγορία θα μελετήσουμε δύο επιμέρους μεθόδους ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος:

- Έλεγχος μέσω συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων (perturbation and observation, ή απλά P&O).

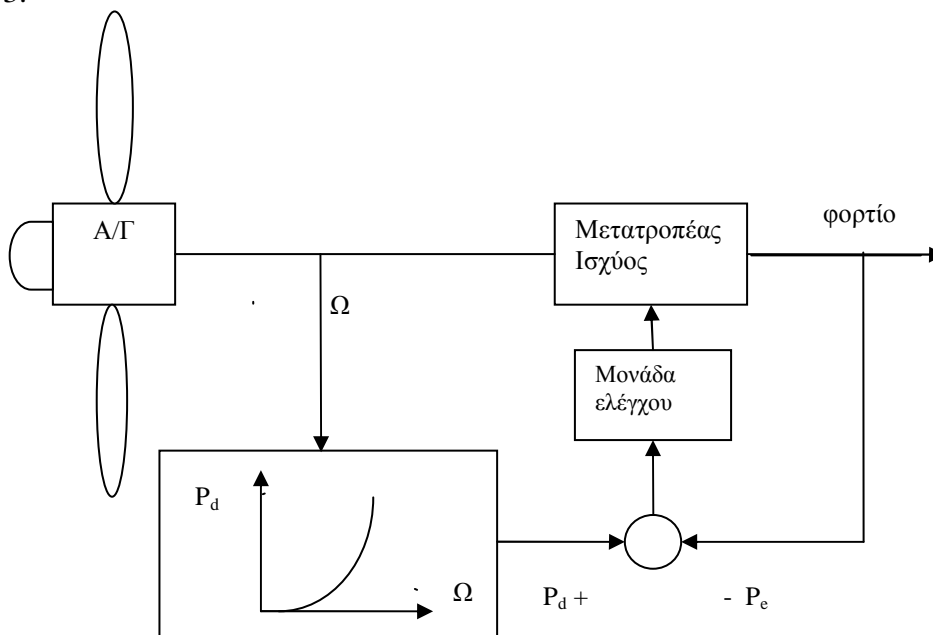
- Έλεγχος βασισμένος στην ασαφή λογική οι οποίες θα αναλυθούν εκτενέστερα στα επόμενα κεφάλαια.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι τρεις αυτές μέθοδοι ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος και παρουσιάζονται τα αντίστοιχα προσομοιωμένα μοντέλα των συστημάτων που υλοποιούν τις μεθόδους αυτές. Προκειμένου να ελεγχθεί η εύρυθμη λειτουργία του κάθε συστήματος αλλά και να συγκριθούν οι μέθοδοι ως προς την αποτελεσματικότητά τους σε διαφορετικές διαταραχές, η αξιολόγηση του κάθε συστήματος περιλαμβάνει τέσσερα μέρη. Αρχικά εξετάζεται η ευαισθησία του κάθε συστήματος τόσο σε μεταβολές του λόγου κατάτμησης του dc/dc μετατροπέα-ανυψωτή όσο και στις αρχικές τιμές που αυτό λαμβάνει. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η απόκριση του συστήματος σε βηματική μεταβολή της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου. Η μεταβολή που επιλέχθηκε πραγματοποιείται για ιδιαίτερα ακραίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου με σκοπό να εξετασθεί η απόκριση του συστήματος υπό ακραίες συνθήκες. Στο τρίτο μέρος παρουσιάζεται η απόκριση του συστήματος σε βηματική μεταβολή της μηχανικής ροπής. Ο λόγος που εξετάζεται αυτή η περίπτωση είναι για να σχηματισθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα για τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος κατά τη μετάβαση του στις διάφορες περιοχές λειτουργίας. Τέλος γίνεται μια αξιολόγηση της απόκρισης του συστήματος σε πραγματικές χρονοσειρές ανέμου οι οποίες ελήφθησαν από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ).

3.2. Μέθοδος Βασισμένη σε Δεδομένες Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας

3.2.1. Θεωρητική Ανάλυση

Η μέθοδο αυτή, η οποία απαντάται και συχνότερα στη πράξη βασίζεται στη γνώση της χαρακτηριστικής μέγιστης ισχύος η λειτουργία της οποίας φαίνεται στο Σχ. 3-3.



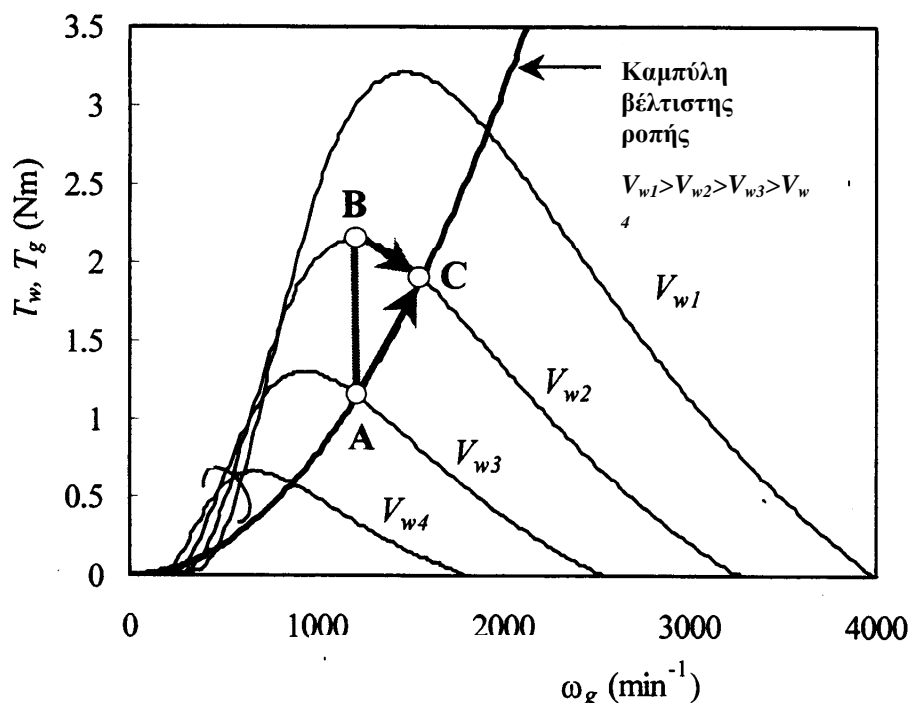
Σχ. 3-3

Σύστημα με έλεγχο μέγιστης ισχύος βασισμένο σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες.

Στο συγκεκριμένο σύστημα η χαρακτηριστική μέγιστης ισχύος βρίσκεται αποθηκευμένη σ' έναν μικροεπεξεργαστή. Η ταχύτητα περιστροφής μετράται και υπολογίζεται η μέγιστη ισχύς που δύναται να αποδοθεί. Αυτή συγκρίνεται με την ισχύ εξόδου της διάταξης και το σφάλμα χρησιμοποιείται ως εντολή για τον έλεγχο ενός μετατροπέα ο οποίος αναλαμβάνει να προσαρμόσει κατάλληλα το φορτίο. Σε παρόμοια συστήματα μετράται η ισχύς εξόδου και η ταχύτητα περιστροφής. Αυτή τη φορά υπολογίζεται η βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής, συγκρίνεται με την παρούσα και το σφάλμα ταχύτητας είναι αυτό που χρησιμοποιείται για να ελέγξει ένα μετατροπέα DC/DC [15].

Σε συστήματα που χρησιμοποιούν σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών το ρεύμα και η τάση εξόδου της γεννήτριας είναι ανάλογα με την ηλεκτρομαγνητική ροπή και την ταχύτητα εξόδου. Έτσι, σε διάφορες περιπτώσεις εξάγεται η χαρακτηριστική βέλτιστης ροπής – ταχύτητας. Η εκάστοτε ταχύτητα και ροπή μετρώνται με βάση την τάση και το ρεύμα αντίστοιχα, υπολογίζεται το βέλτιστο ρεύμα και το σφάλμα μεταξύ βέλτιστου και παρόντος ρεύματος χρησιμοποιείται για να ελέγξει έναν DC/DC μετατροπέα.

Στο Σχ. 3-4 δίνεται ένα παράδειγμα μιας τέτοιας διαδικασίας. Έστω πως ο άνεμος πνέει με ταχύτητα V_{w3} και η ροπή της γεννήτριας (φορτίου) T_g ισορροπεί με αυτή του κινητήρα T_m στο σημείο A. Σε κάποια χρονική στιγμή ο άνεμος αλλάζει την ταχύτητά του σε V_{w2} και η T_m περνάει στο σημείο B αλλά η T_g διατηρείται στο A. Η ταχύτητα της γεννήτριας αυξάνεται σύμφωνα με τη διαφορά $(T_m - T_g)$ μέχρις ότου η δύο ροπές γίνουν ίσες. Ο έλεγχος βέλτιστης ροπής φροντίζει να προσαρμόσει το φορτίο της γεννήτριας έτσι ώστε η T_g να ακολουθήσει τη χαρακτηριστική βέλτιστης ροπής μέχρις ότου επέλθει νέα ισορροπία του συστήματος στο σημείο C.

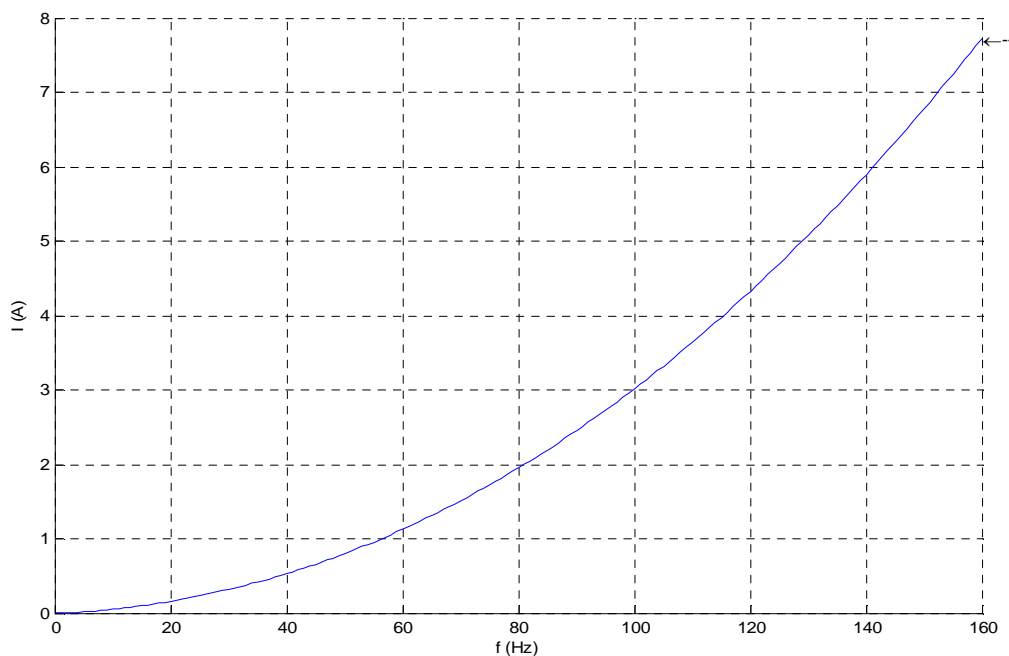


Σχ. 3-4

Διαδικασία αναζήτησης του σημείου μέγιστης ισχύος στην περίπτωση του ελέγχου με χαρακτηριστική. [14]

Στην παρούσα εργασία, η καμπύλη ροπής-στροφών μετατράπηκε σε σχέση ρεύματος – συχνότητας αφού, όπως εξηγείται στην αναφορά [8], η ροπή και το

ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας μονίμων μαγνητών έχουν περίπου γραμμική εξάρτηση. Η αντιστοίχιση στροφών σε ηλεκτρική συχνότητα γίνεται μέσω του αριθμού πόλων της μηχανής. Η μορφή της καμπύλης που χρησιμοποιήθηκε στα προσομοιωμένα και πειραματικά μοντέλα φαίνεται στο Σχ. 3-5.

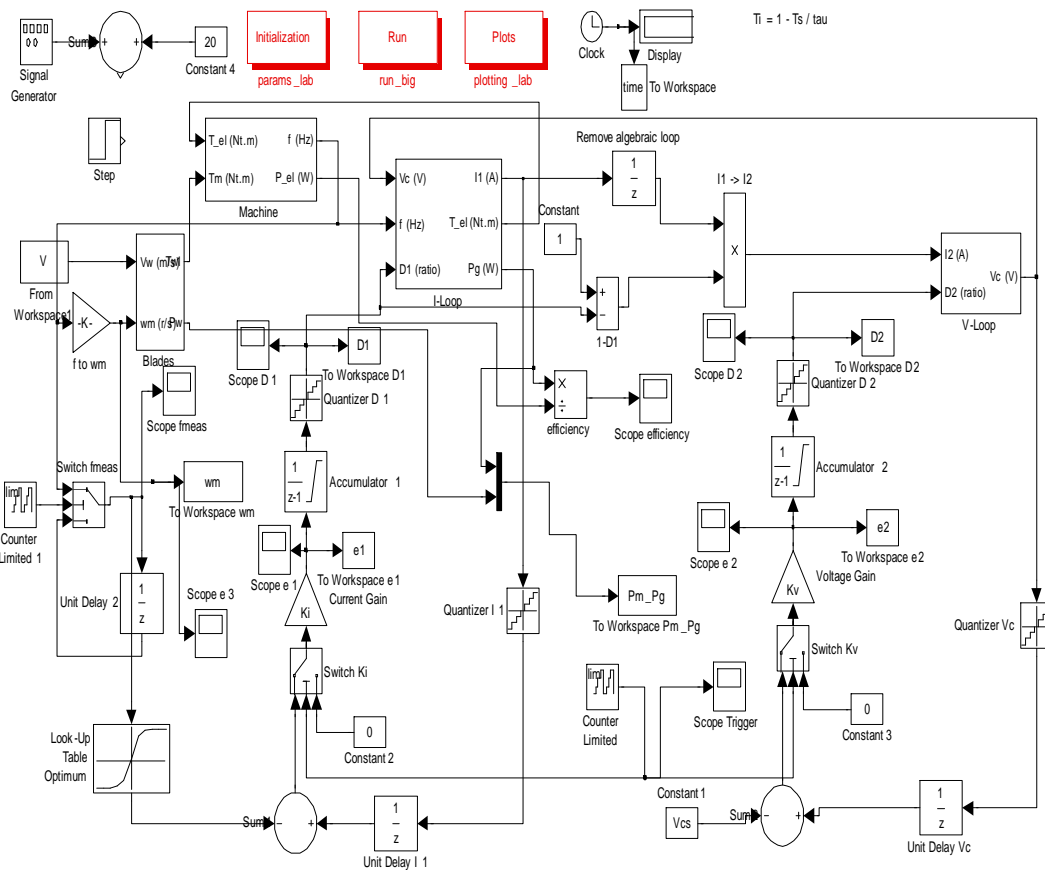


Σχ.3-5

Καμπύλη ρεύματος – συχνότητας προς υλοποίηση από το σύστημα αυτομάτου ελέγχου

3.2.2. Μοντέλο Προσομοίωσης

Για την προσομοίωση του συστήματος έχει δημιουργηθεί [8] ένα απλοποιημένο μοντέλο σε υπολογιστή με τη βοήθεια του προγράμματος Simulink™ με σκοπό την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Το διάγραμμα της μεθόδου που βασίζεται σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες μέγιστης ροπής παρουσιάζεται στο Σχ. 3-6.



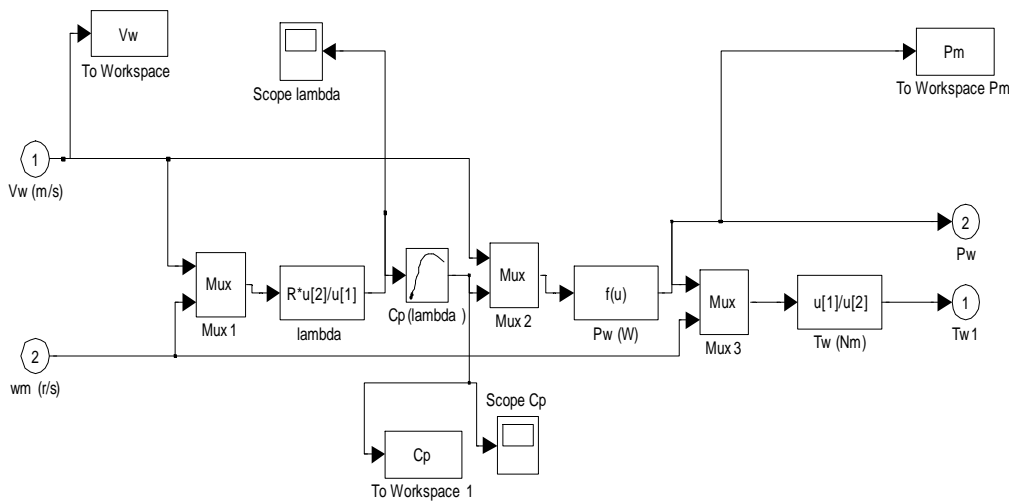
Σχ. 3-6

Πληρες μοντέλο ανεμογεννήτριας και συστήματος ελέγχου με χαρακτηριστική καμπύλη σε Simulink

Το σύστημα αυτό μετρά την ηλεκτρική συχνότητα της γεννήτριας, που είναι πάντα ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και το ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας, το οποίο στην περιοχή λειτουργίας είναι περίπου ανάλογο της ηλεκτρικής ροπής. Βρίσκει από το σχετικό πίνακα αναφοράς το επιθυμητό ρεύμα, το οποίο αντιστοιχεί σε επιθυμητή ροπή, και ανατροφοδοτεί το σφάλμα του σε σχέση με το μετρούμενο, στο ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος, μέσω ενός ελεγκτή I.

Διακρίνονται τα βασικά δομικά στοιχεία “Blades”, “Machine”, “I-Loop” και “V-Loop”.

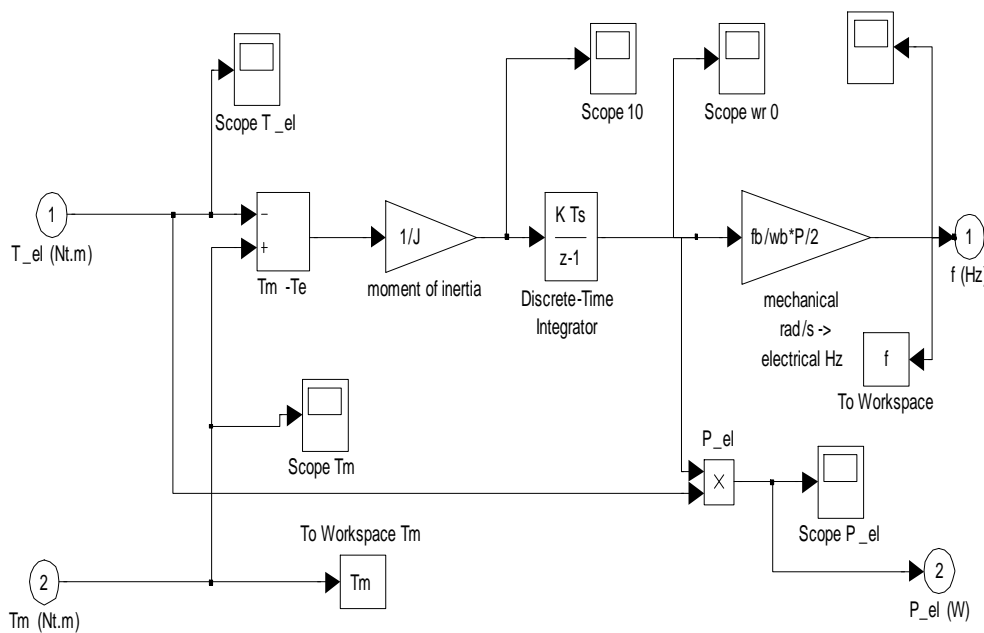
Στο υποσύστημα “Blades”, προσομοιώνεται η διαδικασία υπολογισμού του αεροδυναμικού τμήματος του συστήματος μέσα στο οποίο υπολογίζεται η προσλαμβανόμενη ισχύ από τον άνεμο. Το υποσύστημα (Σχ. 3-7) δέχεται ως εισόδους την ταχύτητα του ανέμου V_w (m/s) και τη γωνιακή ταχύτητα του ανεμοκινητήρα w_m (rad/s), υπολογίζεται ο λόγος ταχύτητας των ακροπερυγίων λ , ο συντελεστής ισχύος του ανεμοκινητήρα C_p και εξάγει τη μηχανική ισχύ P_m και ροπή T_m .



Σχ. 3-7
Το υποσύστημα “blades”

Στο υποσύστημα “Machine”(Σχ.3-8) γίνονται οι υπολογισμοί για το μηχανικό μέρος της γεννήτριας, όπου η στρεφόμενη μάζα επιταχύνεται ή επιβραδύνεται. Δηλαδή το υποσύστημα δέχεται ως εισόδους ηλεκτρομαγνητική ροπή T_{el} και τη μηχανική ροπή T_m της γεννήτριας, υπολογίζει τη μεταξύ τους διαφορά δίνοντας ως εξόδους τη συχνότητα περιστροφής f , υπολογίζοντάς τη σύμφωνα με τον τύπο (3-1) που εκφράζει την εξίσωση κίνησης του δρομέα της γεννήτριας καθώς και την ηλεκτρομαγνητική ισχύ P_{el} . Το υποσύστημα παρουσιάζεται αναλυτικά στο Σχ. 3-8.

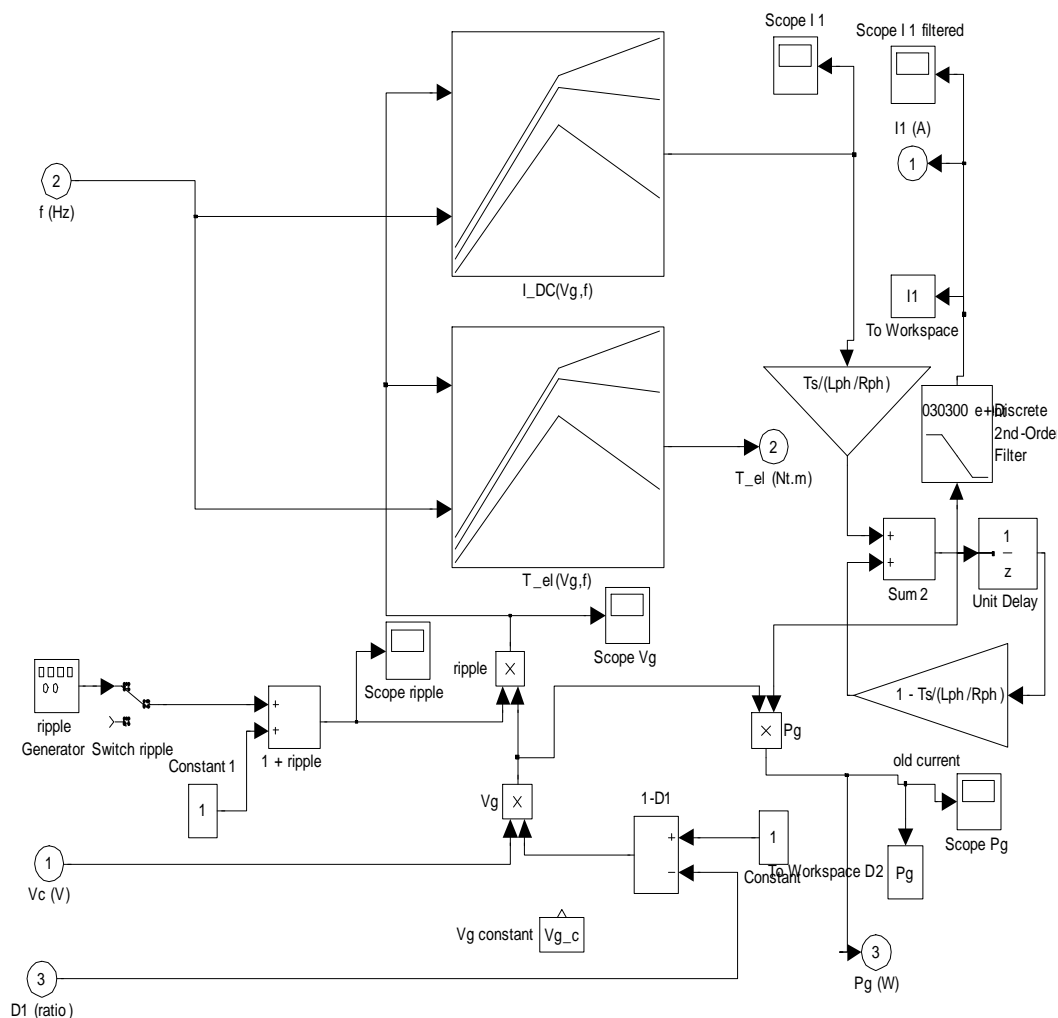
$$f = \frac{1}{2\pi J} \int (T_m - T_e) dt \quad (3-1)$$



Σχ. 3-8
Το υποσύστημα “Machine”

Η μεταβολή της μηχανικής ροπής T_m ή της ισχύος P_m προκύπτει από τον A/K , ως αποτέλεσμα της μεταβολής του ανέμου. Η ηλεκτρική ροπή που παρουσιάζει η γεννήτρια και η παραγόμενη ισχύς P_{el} μπορούν αντίστοιχα να εκφραστούν συναρτήσει της τάσεως και των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της γεννήτριας.

Στο “I-Loop” που φαίνεται στο Σχ. 3-9 υπολογίζεται το ανορθωμένο ρεύμα του ηλεκτρικού μέρους της γεννήτριας, το οποίο συνδέεται με τη ροπή με γραμμική σχέση κοντά στα σημεία λειτουργίας. Δηλαδή το υποσύστημα δέχεται ως εισόδους την συχνότητα f , το λόγο κατάτμησης D_1 ο οποίος καθορίζει τη βέλτιστη ισχύ και την τάση της συστοιχίας των πυκνωτών V_c . Στη συνέχεια η συχνότητα f εισάγεται σε δύο γραφικές παραστάσεις; την $I_{DC}(V_g, f)$ που παρέχει το μέσο ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας μονίμων μαγνητών ως συνάρτηση της συχνότητας f την τάση εξόδου V_g και την $T_{el}(V_g, f)$ η οποία παρέχει τη μέση ροπή του άξονα γεννήτριας μονίμων μαγνητών της ηλεκτρικής συχνότητας f και της τάσης εξόδου V_g . Το στοιχείο αυτό συνεργάζεται άμεσα με το προηγούμενο.

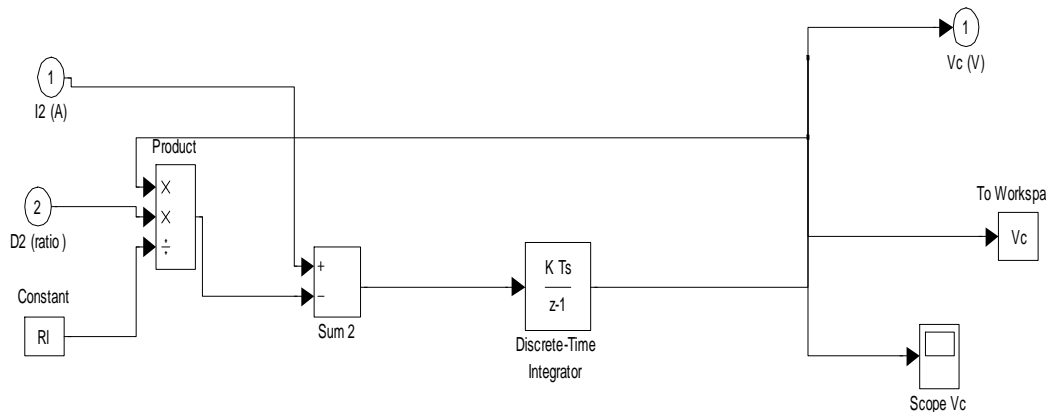


Σχ.3-9

Το υποσύστημα ελέγχου του ανορθωμένου ρεύματος της γεννήτριας

Στο υποσύστημα “V-Loop” που φαίνεται Σχ. 3-10 πραγματοποιούνται υπολογισμοί για την εκφόρτιση των πυκνωτών μέσω της εξωτερικής αντίστασης φορτίου R_L . Το υποσύστημα δέχεται ως εισόδους το ρεύμα στην έξοδο του dc/dc μετατροπέα-ανυψωτή και το λόγο κατάτμησης D_2 του διακοπτικού στοιχείου μέσω

του οποίου σταθεροποιείται η τάση της συστοιχίας των πυκνωτών V_C . Υπολογίζεται και δίνεται ως έξοδος η νέα τάση στα άκρα της αντίστασης η οποία στη συνέχεια θα εισαχθεί εκ νέου στον μικροεπεξεργαστή και θα συγκριθεί με την τάση αναφοράς.



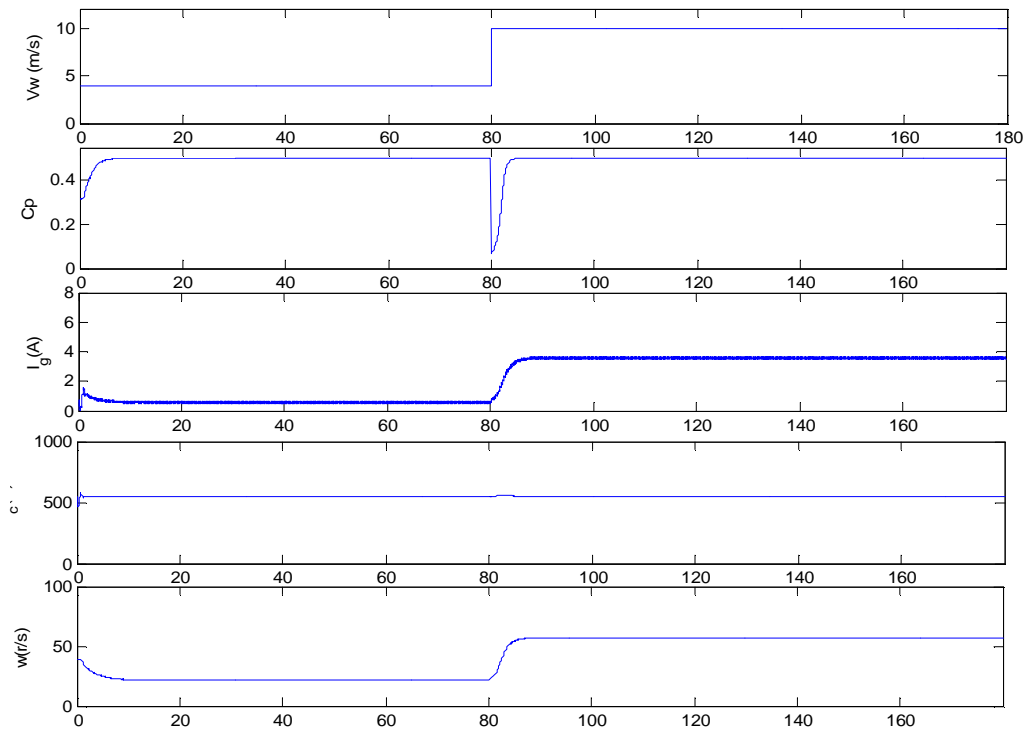
Σχ.3-10

Μέσα στο block ελέγχου ελέγχου της τάσης των πυκνωτών

Τα υπόλοιπα στοιχεία προσομοιώνουν τη λειτουργία των δύο μικροεπεξεργαστών και των περιφερειακών τους, τα οποία παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Υπάρχουν μικρές χρονικές καθυστερήσεις και κβαντισμοί επιπέδου σημάτων, χαρακτηριστικά της ψηφιακής υλοποίησης συστημάτων ελέγχου. Τα στοιχεία αυτά, αν και αλλάζουν ελάχιστα τη συνολική εικόνα του συστήματος, δίνουν χαρακτηριστική χροιά όταν παρατηρούνται λεπτομέρειες της λειτουργίας του.

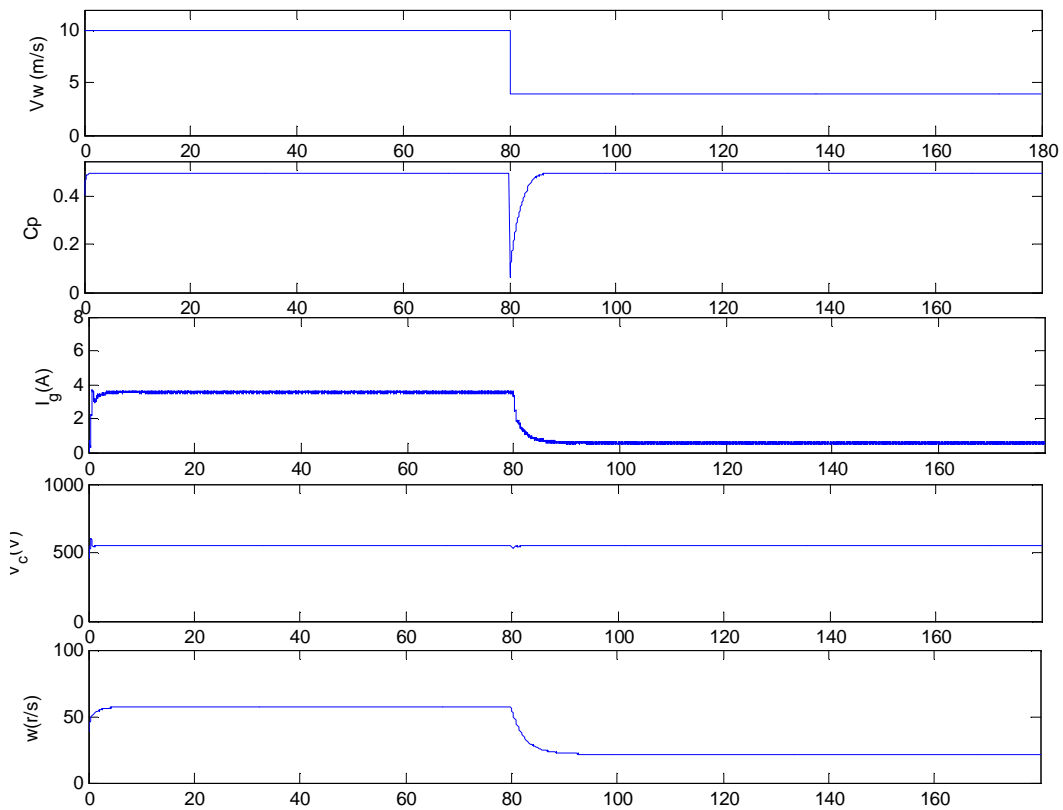
3.2.3. Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές του ανέμου για ακραίες αρχικές τιμές του λόγου κατάτμησης D .

Αξιολογείται η συμπεριφορά του συστήματος για μια μεταβολή στην αρχικοποιημένη τιμή του D αφού ο έλεγχος για την εύρεση της μέγιστης ταχύτητας ανέμου καθορίζεται από τον λόγο κατάτμησης D του DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Η τιμή του D κυμαίνεται από 0 ως 1. Παρακάτω παρουσιάζονται οι αποκρίσεις του συστήματος σε βηματικό άνεμο και με αρχικές τιμές του D 0.1 και 0.9. Λαμβάνονται αυτές οι τιμές ως αρχικές για να δοκιμαστεί πως αντιδρά το σύστημα σε ακραίες αρχικοποιήσεις.



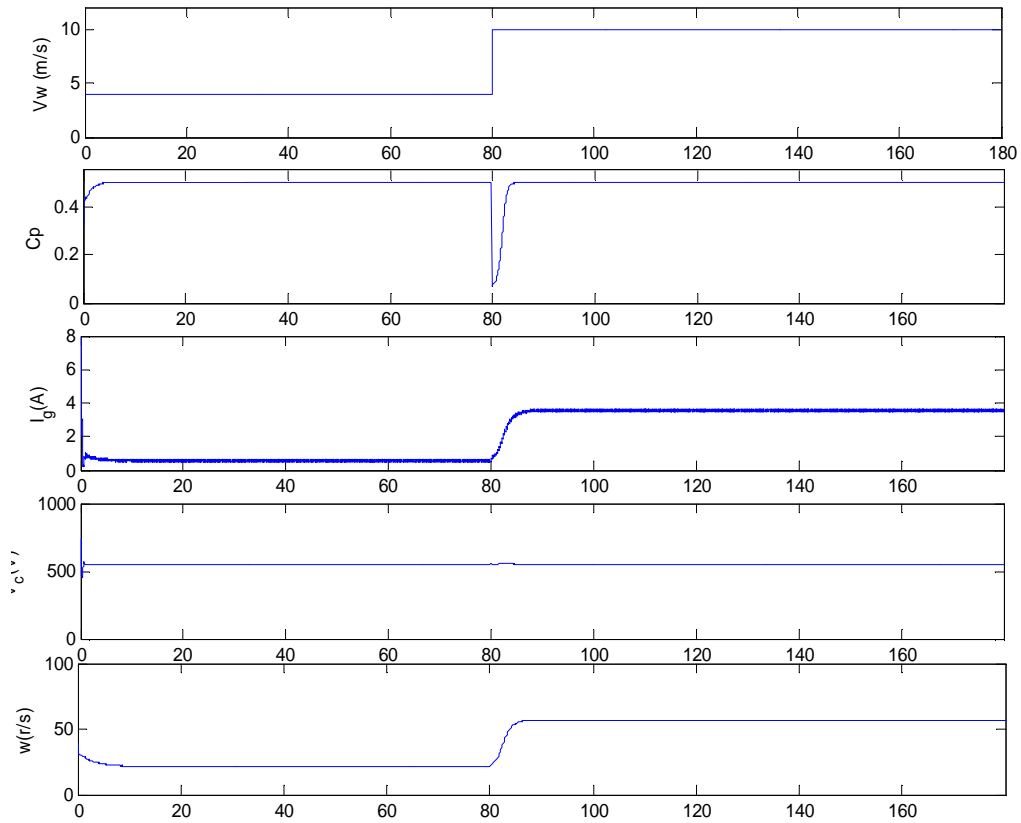
Σχ. 3-11

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s με αρχική τιμή λόγου κατάτμησης 0.1



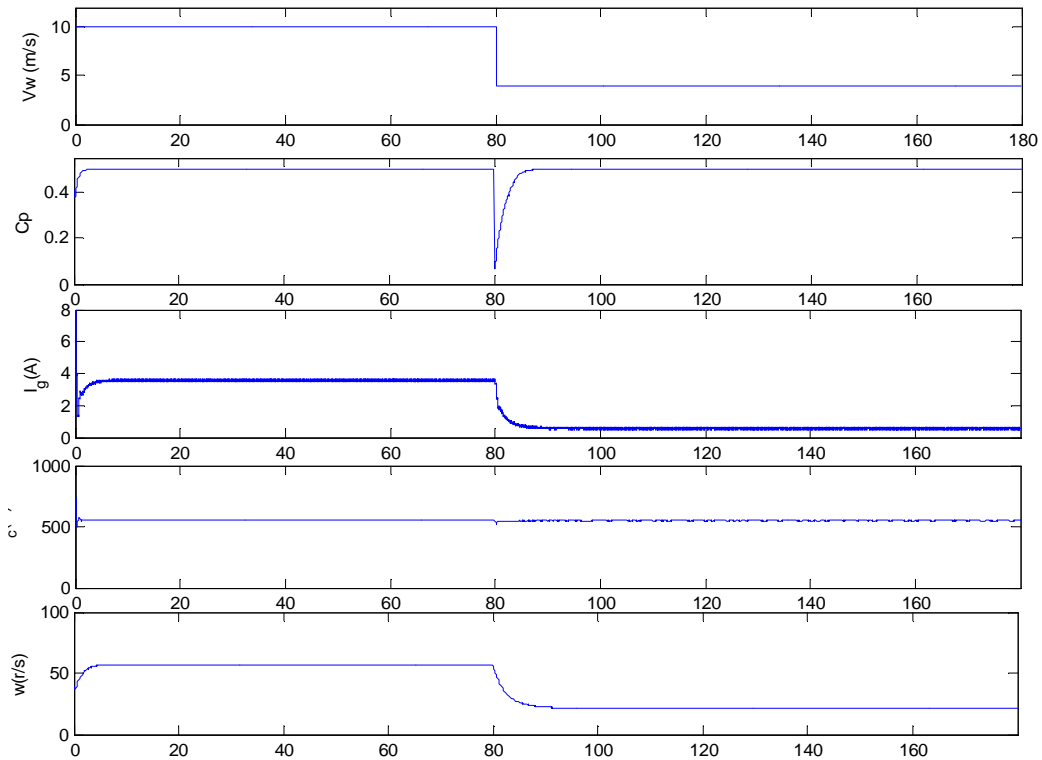
Σχ. 3-12

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 10 m/s σε 4 m/s με αρχική τιμή λόγου κατάτμησης 0.1



Σχ. 3-13

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s με αρχική τιμή λόγου κατάτμησης 0.9



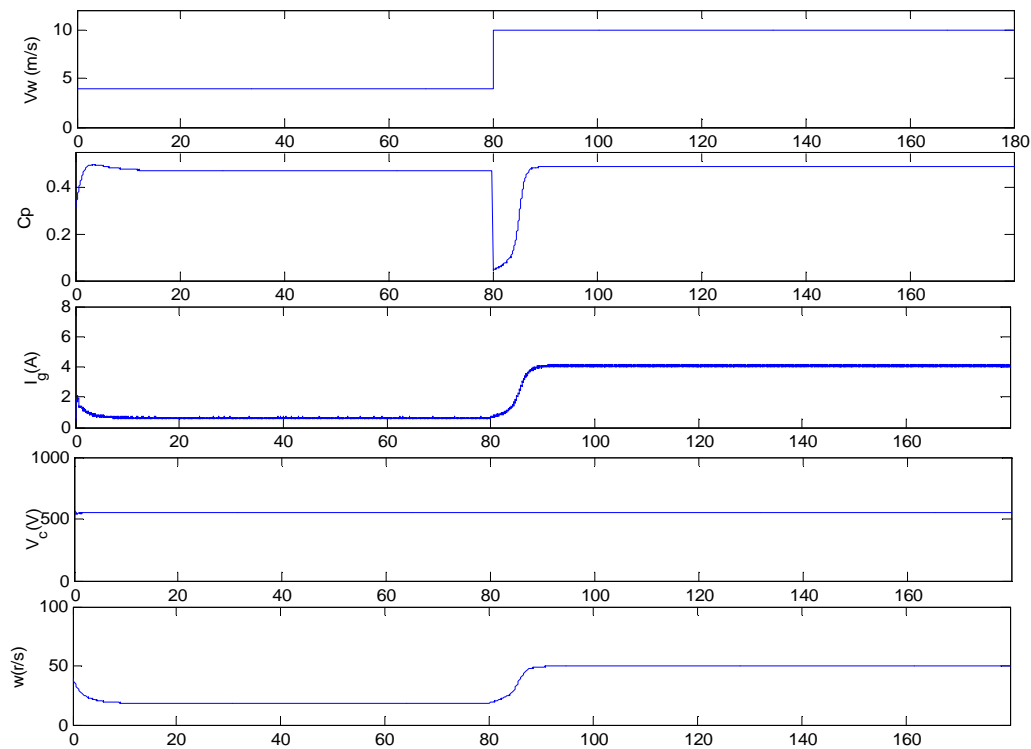
Σχ. 3-14

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 10 m/s σε 4 m/s με αρχική τιμή λόγου κατάτμησης 0.9

Παρατηρείται από το γράφημα του C_p στα Σχ. 3-11 έως 3-14 ότι το σύστημα ανταποκρίνεται στο σκοπό του για ανεύρεση μέγιστης ισχύος σε κάθε περίπτωση. Παρόλα αυτά αξιοσημείωτο είναι ότι και για τις δύο ακραίες αρχικοποιήσεις αλλά κυρίως για αρχικοποίηση $D=0.9$ παρατηρήθηκε ότι στιγμιαία κατά την εκκίνηση παρουσιάζεται υπερέυμα της τάξης των 15A. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την εκκίνηση δίνεται ως είσοδος στον DC/DC μετατροπέα ανώψωσης τάσης, πολύ μεγάλη αρχική τιμή με αποτέλεσμα η ανορθωμένη τάση της γεννήτριας να αποκτά τιμές πολύ μικρές το οποίο και οδηγεί σε υπερέυματα. Παρ'όλο το υπερέυμα που παρουσιάζεται κατά την εκκίνηση, το σύστημα δείχνει να παρουσιάζει βέλτιστη τιμή C_p και άρα να μην εξαρτάται από αρχικές συνθήκες ηλεκτρικών μεγεθών όπως ο λόγος κατάτμησης D . Παρόλα αυτά βρέθηκε ότι η βέλτιστη τιμή αρχικοποίησης είναι 0.4 και αυτή η τιμή χρησιμοποιήθηκε και σε όλες τις προσομοιώσεις.

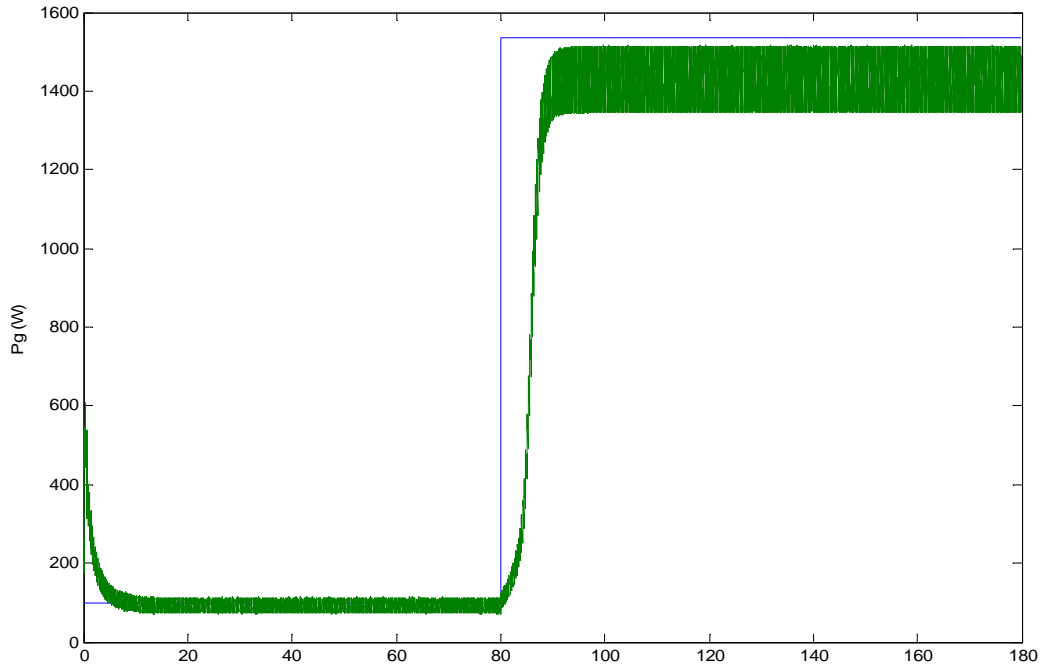
3.2.4. Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου

Στα Σχ. 3-15 έως 3-18 εμφανίζονται τα διαγράμματα των προσομοιωμένων μεγεθών για μεταβατική κατάσταση της τιμής της ταχύτητας ενός σταθερού ανέμου από τα 4 m/sec στα 10 m/sec και αντίστροφα, τη χρονική στιγμή $t = 80$ sec, με τη μέθοδο ανίχνευσης μέγιστης ισχύος βασισμένη στην χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας. Το μοντέλο, εκτός από το ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας και την τάση των πυκνωτών μετά τον dc/dc μετατροπέα, εμφανίζει και άλλα μεγέθη όπως τη γωνιακή ταχύτητα και τον συντελεστή ισχύος του ανεμοκινητήρα. Ως αρχική τιμή των λόγων κατάτμησης D τέθηκαν $D_1=0.4$ και $D_2=0.25$.



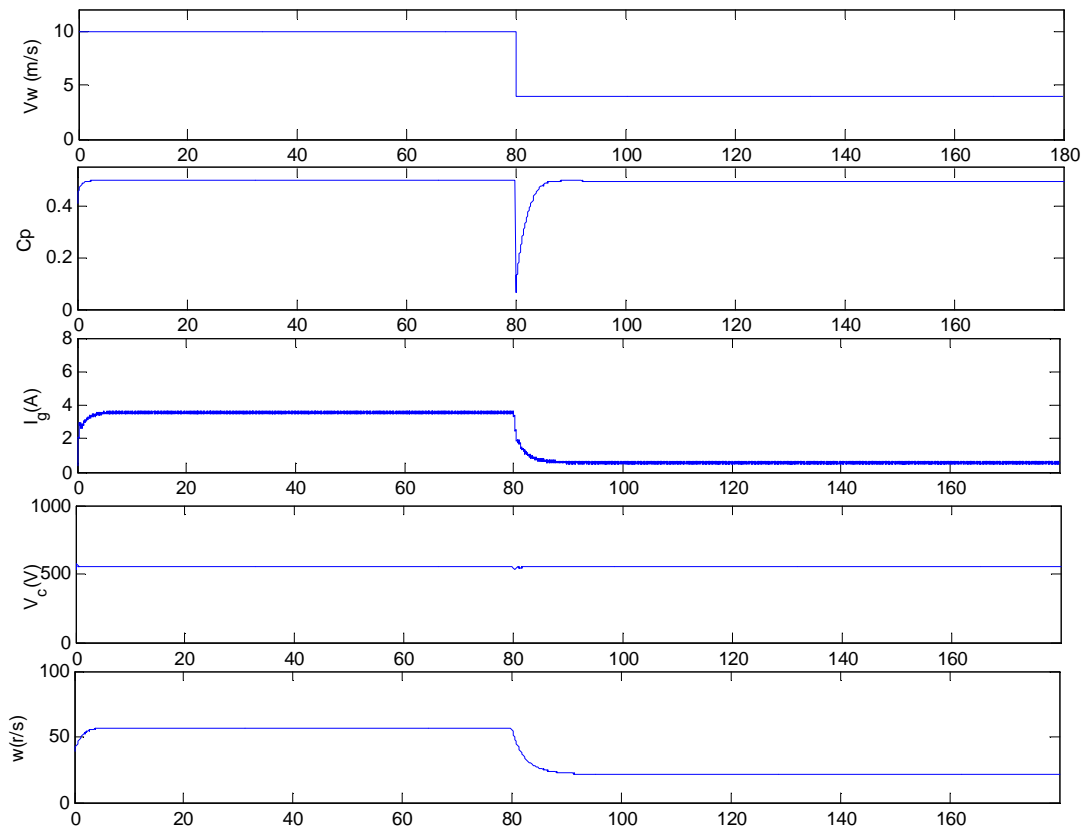
Σχ. 3-15

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s



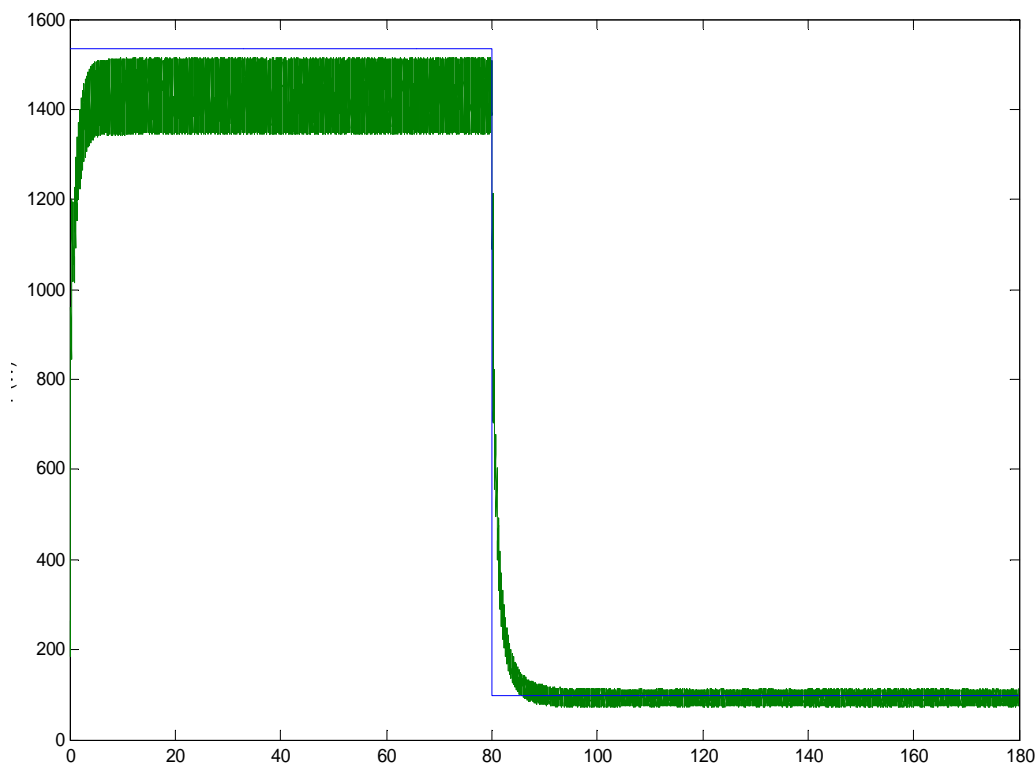
Σχ. 3-16

Προσομοιωμένη ισχύ εξόδου (με πράσινο χρώμα) και θεωρητικά μέγιστη μηχανική ισχύς (με μπλε χρώμα) σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s



Σχ. 3-17

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 10 m/s σε 4 m/s



Σχ. 3-18

Προσομοιωμένη ισχύ εξόδου (με πράσινο χρώμα) και θεωρητικά μέγιστη μηχανική ισχύς (με μπλε χρώμα) σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 10 m/s σε 4 m/s

Στα Σχ. 3-15 και 3-16 στο χρονικό διάστημα από τα 0 έως τα 80 sec το σύστημα λειτουργεί στην περιοχή μέγιστης ισχύος για τη συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου με τιμή 4 m/sec, δίνοντας ισχύ στην έξοδο περίπου 102.4 W. Τη χρονική στιγμή 80 sec το ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας αυξάνεται με συνολικό χρόνο 10 sec μέχρι να σταθεροποιηθεί για ταχύτητα του ανέμου 10 m/sec ενώ ο συντελεστής ισχύος C_p χρειάζεται 8 sec μέχρι να σταθεροποιηθεί στη νέα μέγιστη δυνατή τιμή του. Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου έχει ως αποτέλεσμα και τη σταδιακή αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Η παραγόμενη ισχύς μεταβαίνει γύρω στα 1472 W. Η μικρή κυμάτωση που παρατηρείται στο ανορθωμένο ρεύμα οφείλεται στη διαταραχή που εισάγει η ανόρθωση εξόδου της γεννήτριας μονίμων μαγνητών ενώ η τάση των πυκνωτών είναι σχεδόν σταθερή.

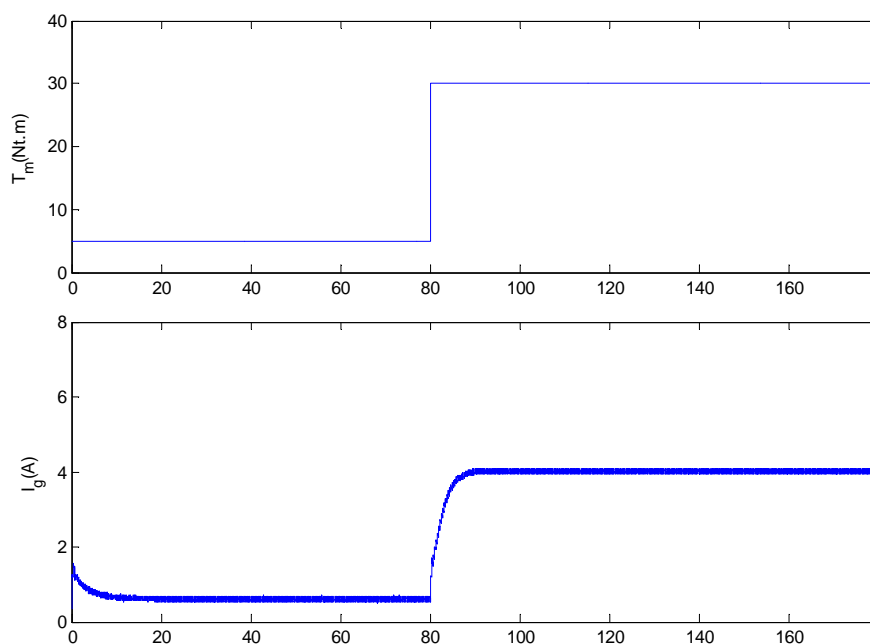
Ομοίως στα Σχ. 3-17 και 3-18 στο χρονικό διάστημα από τα 0 έως τα 80 sec το σύστημα λειτουργεί στην περιοχή μέγιστης ισχύος για ταχύτητα ανέμου 10 m/sec, δίνοντας ισχύ στην έξοδο περίπου 1472W. Τη χρονική στιγμή 80 sec η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται απότομα στα 4 m/sec. Η μείωση της ταχύτητας του ανέμου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ισχύος εξόδου, η οποία μεταβαίνει περίπου στα 102.4 W. Εκείνο που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι η συμπεριφορά του συστήματος είναι σχετικά ασύμμετρη, δηλαδή τα διαγράμματα της ανοδικής μετάβασης είναι διαφορετικά από το καθρέπτισμα των διαγραμμάτων καθοδικής μετάβασης, το οποίο οφείλεται στη μη γραμμική χαρακτηριστική ελέγχου του συστήματος. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι το ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας χρειάζεται 9 sec για να μειωθεί ενώ ο συντελεστής ισχύος C_p χρειάζεται μόλις 4 sec για να βρεθεί στη μέγιστη δυνατή

τιμή του και συνολικά 11 sec για να σταθεροποιηθεί. Την ίδια γρήγορη μεταβολή παρουσιάζει και η ισχύς εξόδου.

Τέλος παρατηρείται ότι και στις δύο μεταβατικές καταστάσεις, είτε στην αύξηση είτε στη μείωση της ταχύτητας του ανέμου, ο συντελεστής ισχύος C_p δεν κατορθώνει να φτάσει την βέλτιστη τιμή του δηλαδή τα 0.5 αλλά να βρίσκεται πολύ κοντά με τιμή 0.49.

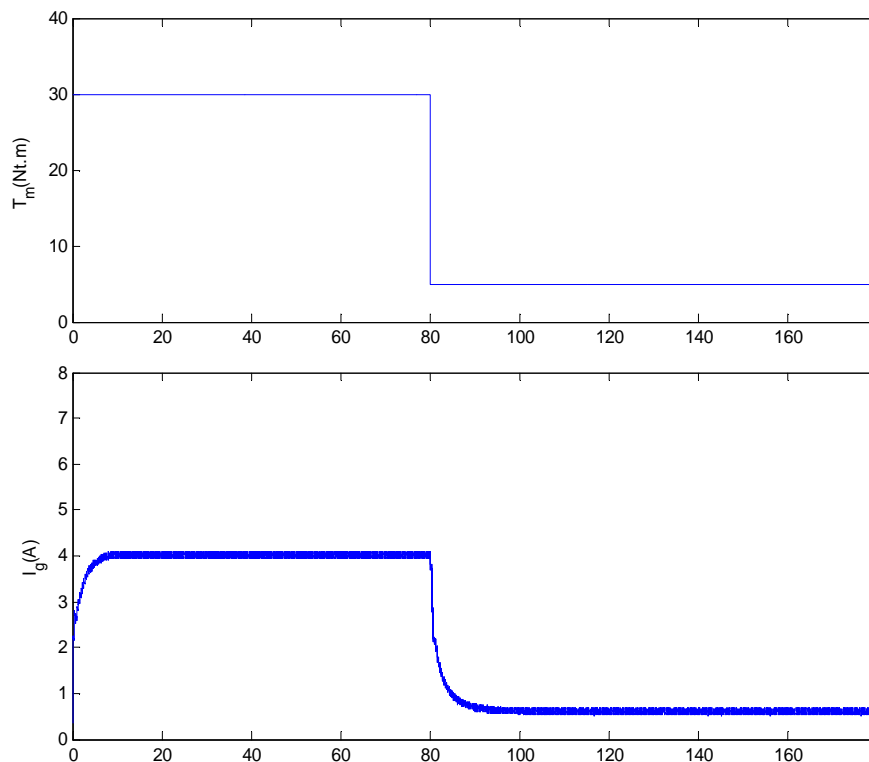
3.2.5. Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της μηχανικής ροπής.

Στα Σχ.3-19 και 3-20 παρουσιάζεται η απόκριση του συστήματος σε βηματική αύξηση και μείωση της μηχανικής ροπής εισόδου χωρίς να υπολογίζεται από το αεροδυναμικό κομμάτι του μοντέλου. Η μεταβολή της μηχανικής ροπής γίνεται από τα 5 Nt.m στα 30 Nt.m και αντίστροφα, τη χρονική στιγμή 80 sec. Με το να εισάγουμε άμεσες εντολές μεταβολής ροπής πετυχαίνουμε πιο γρήγορες μεταβολές στους ελεγκτές αφού παραλείπεται το κομμάτι των πτερυγίων. Παρατηρείται, λοιπόν, στο Σχ. 3-19 ότι το ανορθωμένο ρεύμα αυξάνεται με συνολικό χρόνο 9.5 sec μέχρι να σταθεροποιηθεί και στο Σχ. 3-20 ότι μειώνεται με συνολικό χρόνο 11 sec.



Σχ. 3-19

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ροπή εισόδου από 5 Nt.m σε 30 Nt.m



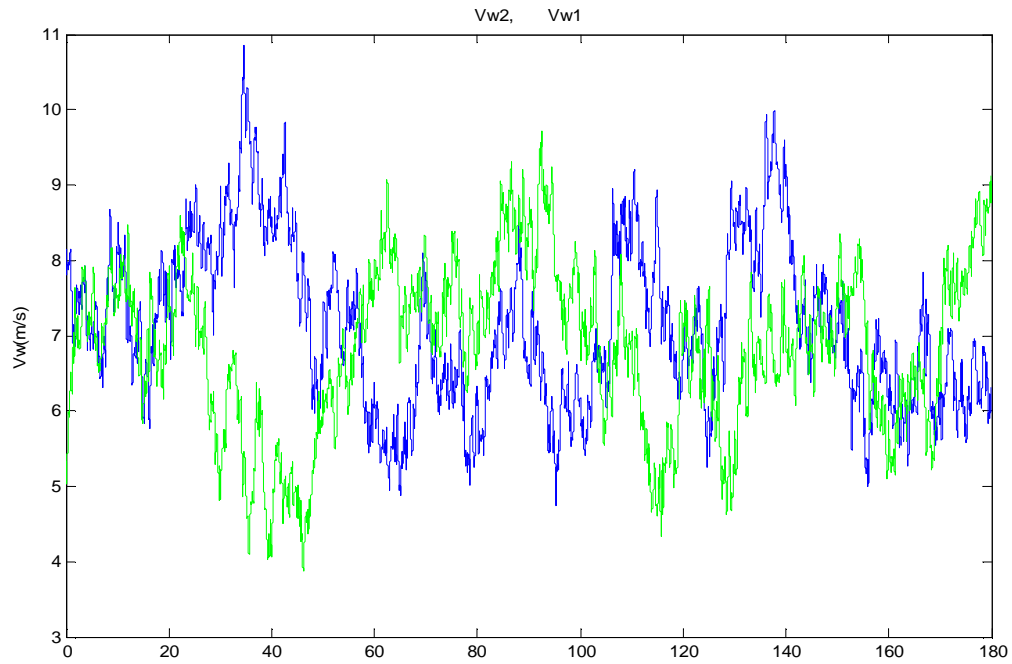
Σχ. 3-20

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ροπή εισόδου από 30 Nt.m σε 5 Nt.m

3.2.6. Απόκριση του συστήματος σε εξομοιωμένη πραγματική κατάσταση λειτουργίας

Αυτό που τελικά ενδιαφέρει στην αξιολόγηση μιας μεθόδου ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος είναι η συμπεριφορά του αντίστοιχου συστήματος σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η ταχύτητα του ανέμου έχει στατιστική διακύμανση χρονικά. Αυτό σημαίνει ότι μια χρονοσειρά ανέμου αποκλείεται να είναι ίδια με μια άλλη, έστω κι αν τα στατιστικά τους μεγέθη, όπως η μέση ταχύτητα και η τυπική της απόκλιση, συμπίπτουν. Ενώ δεν είναι δυνατόν να δοκιμαστούν όλες οι πιθανές χρονοσειρές ανέμου για επαλήθευση του τρόπου λειτουργίας του συστήματος, δύο είναι αρκετές για να δείξουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.

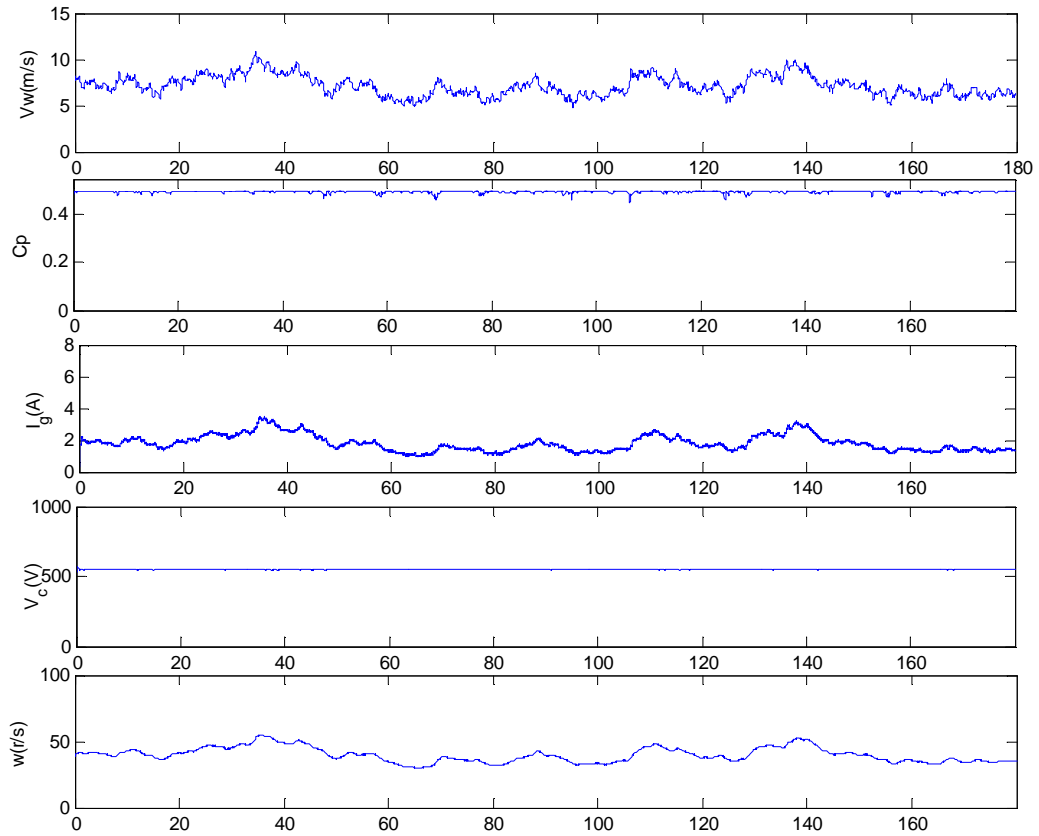
Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστεί το πως συμπεριφέρεται το προσομοιωμένο μοντέλο σε δύο χρονοσειρές ανέμου οι οποίες απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 3-21

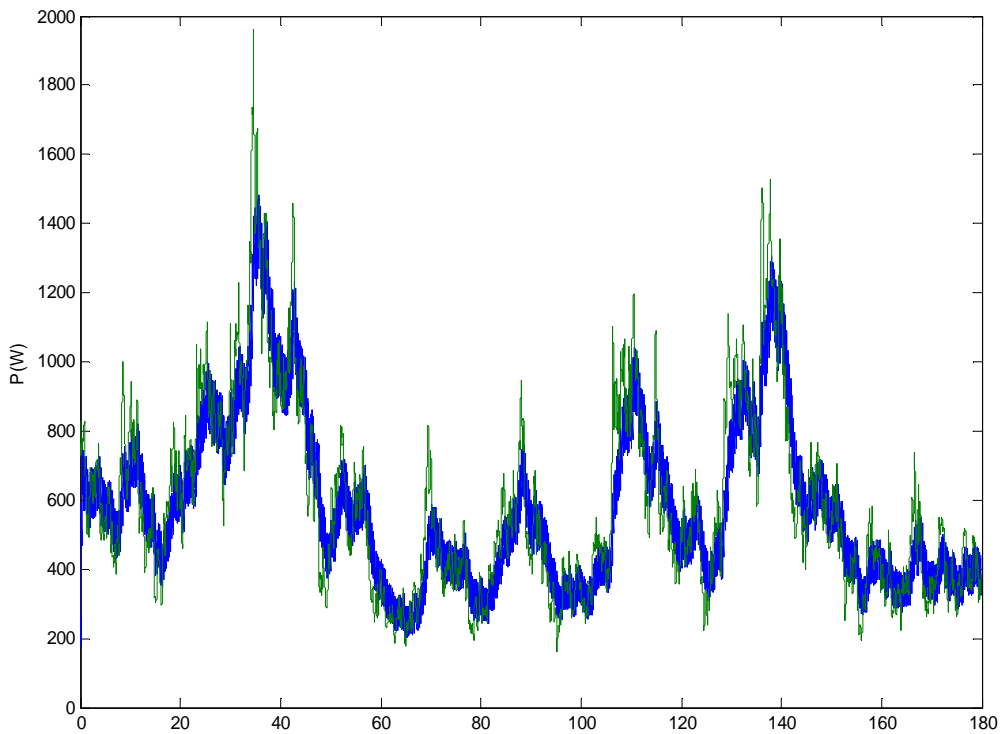
Χρονοσειρές ανέμου V_1 (με πράσινο χρώμα) και V_2 (με μπλε χρώμα) οι οποίες εφαρμόζονται στα προσομοιωμένα και πειραματικά μοντέλα

Όπως είναι φανερό η χρονοσειρά ανέμου V_2 παρουσιάζει πιο απότομες μεταβολές με μέση ταχύτητα ανέμου 7.15 m/s σε σχέση με την χρονοσειρά V_1 η οποία έχει μέση ταχύτητα 6.85 m/s. Αρχικά εισάγεται στο μοντέλο του Σχ. 3-6 η V_2 και πραγματοποιείται η προσομοίωση. Τα μεγέθη που λαμβάνονται έχουν ως εξής:



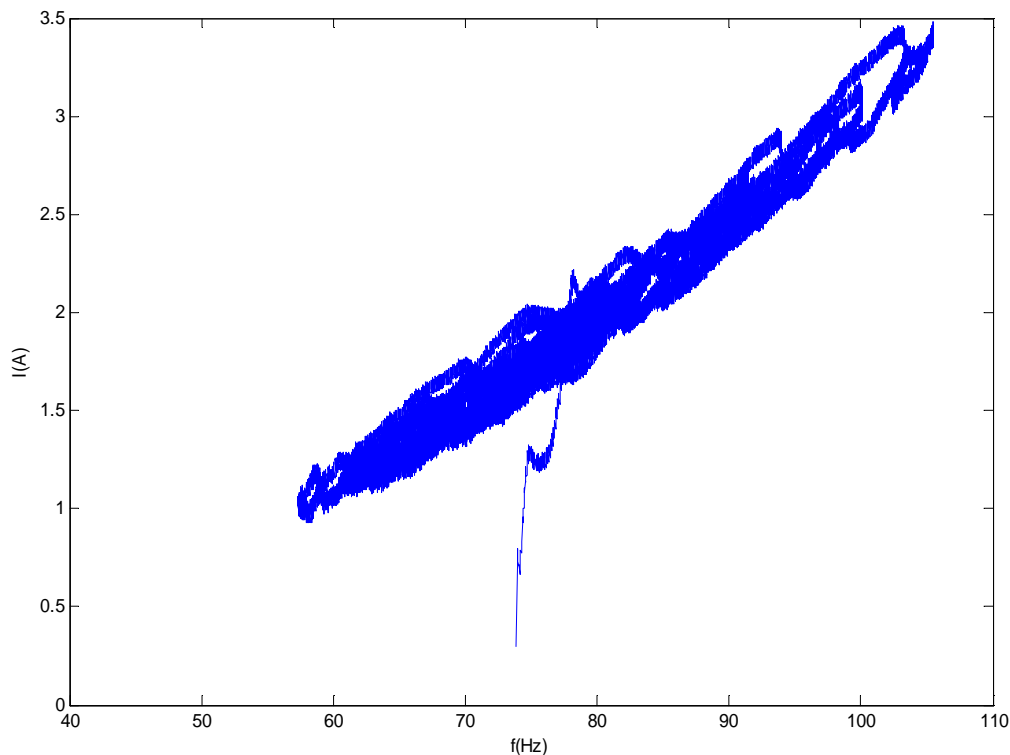
Σχ. 3-22

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας για χρονοσειρά ανέμου V_2



Σχ. 3-23

Προσομοιωμένη ισχύ εξόδου (με μπλε χρώμα) και θεωρητικά μέγιστη μηχανική ισχύς (με πράσινο χρώμα) σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας για χρονοσειρά ανέμου V_2



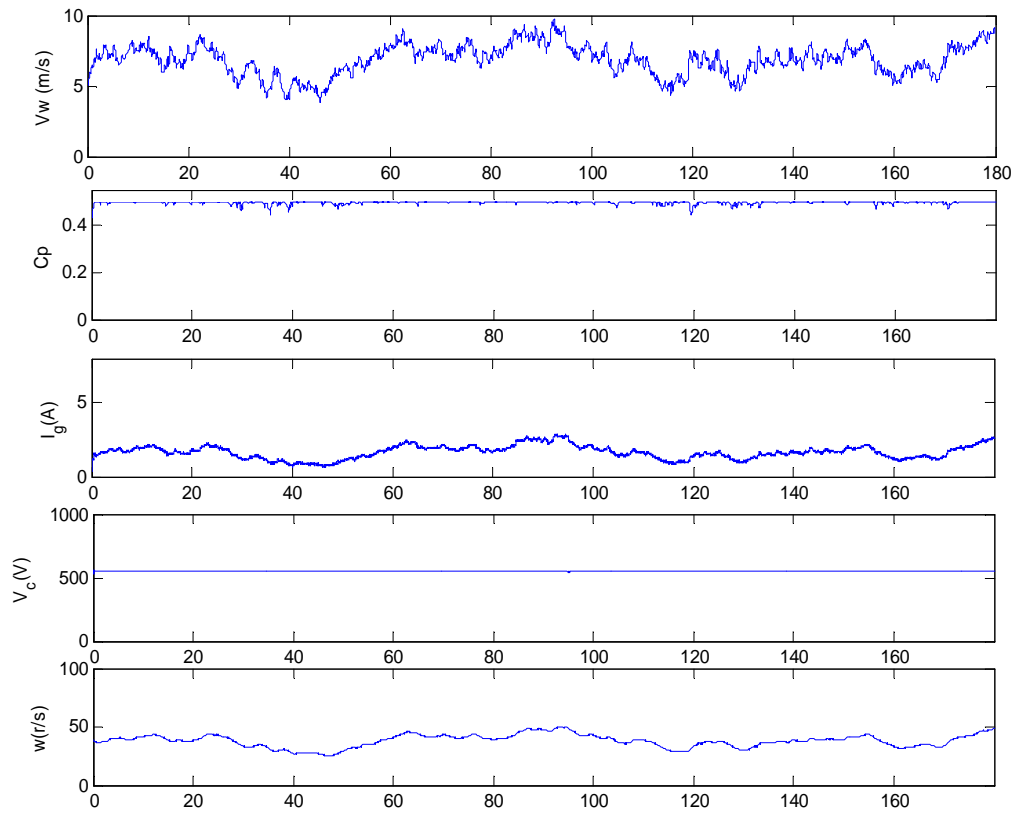
Σχ. 3-24

Χαρακτηριστική καμπύλη ηλεκτρικής συχνότητας – ανορθωμένου ρεύματος γεννήτριας που ο αλγόριθμος επιτυγχάνει για χρονοσειρά ανέμου V_2

Το μοντέλο φαίνεται να μην αυξάνει της στροφές της ανεμογεννήτριας σε ακραίες τιμές αφού έχει μέγιστη γωνιακή ταχύτητα για τη δεδομένη χρονοσειρά ανέμου, 55.3 r/s. Αξιοσημείωτο είναι ότι ο συντελεστής ισχύος καταφέρνει γρήγορα να βρίσκεται σε τιμές πολύ κοντά στη βέλτιστη με αποτέλεσμα να φαίνεται σχεδόν αμετάβλητος.

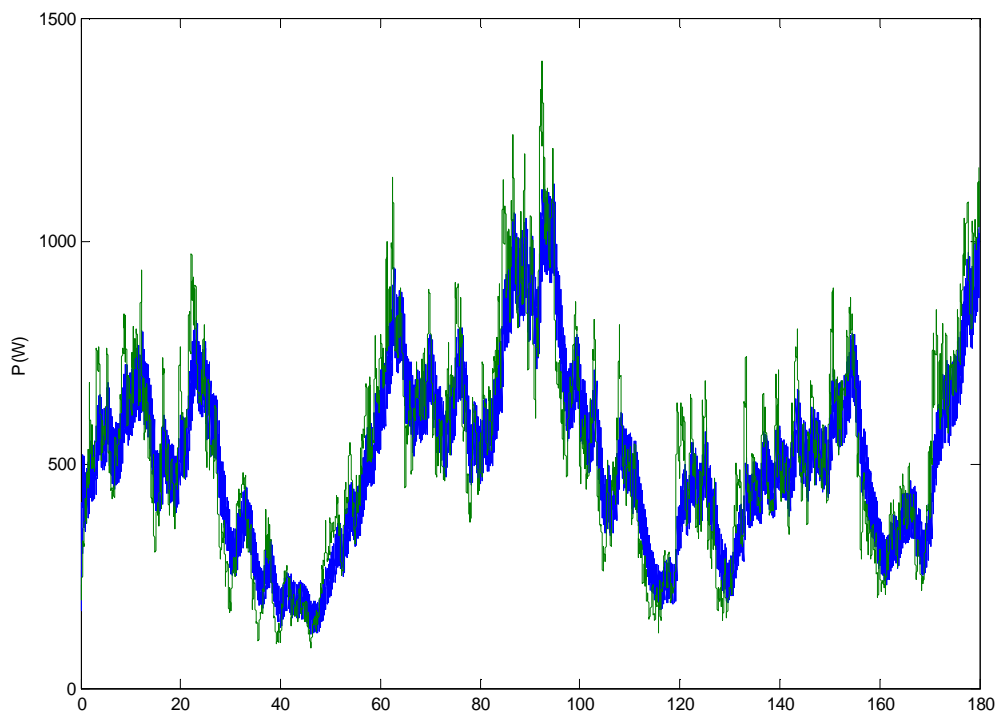
Τέλος η μέση ισχύς εξόδου είναι 582 W, τιμή πολύ κοντά στη μέση μέγιστη ισχύ που θεωρητικά προσλαμβάνει το σύστημα για τη δεδομένη χρονοσειρά και είναι 596.2 W. Στο Σχ. 3-23 παρατηρείται ότι η προσομοιωμένη ισχύς εξόδου ακολουθεί τη θεωρητική ισχύ χωρίς όμως να ανταποκρίνεται και στις απότομες κορυφές της χρονοσειράς. Στο Σχ. 3-24 διακρίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη συχνότητας ρεύματος που τελικά το σύστημα επιτυγχάνει. Μοιάζει αρκετά με την ιδανική χαρακτηριστική που εισάγεται στον μικροεπεξεργαστή (Σχ.3-5) και σε γενικές γραμμές κατορθώνει να βρίσκεται αρκετά κοντά στην ιδανική παρουσιάζοντας όμως μια αστάθεια στο διάστημα 70 με 80 Hz γιατί στο διάστημα αυτό της συχνότητας η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει τις περισσότερες και πιο απότομες μεταβολές.

Στη συνέχεια εισάγεται στο μοντέλο του Σχ. 3-6 η V_1 και πραγματοποιείται η προσομοίωση. Τα μεγέθη που λαμβάνονται έχουν ως εξής:



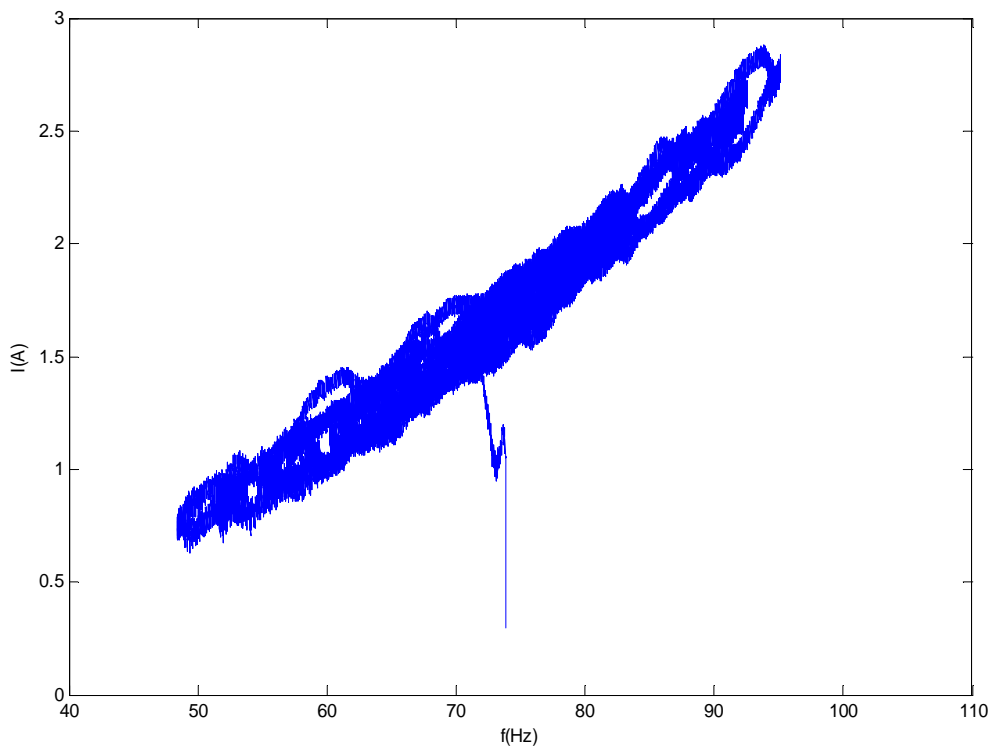
Σχ. 3-25

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας για χρονοσειρά ανέμου V_1



Σχ. 3-26

Προσομοιωμένη ισχύ εξόδου (με μπλε χρώμα) και θεωρητικά μέγιστη μηχανική ισχύς (με πράσινο χρώμα) σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας για χρονοσειρά ανέμου V_1



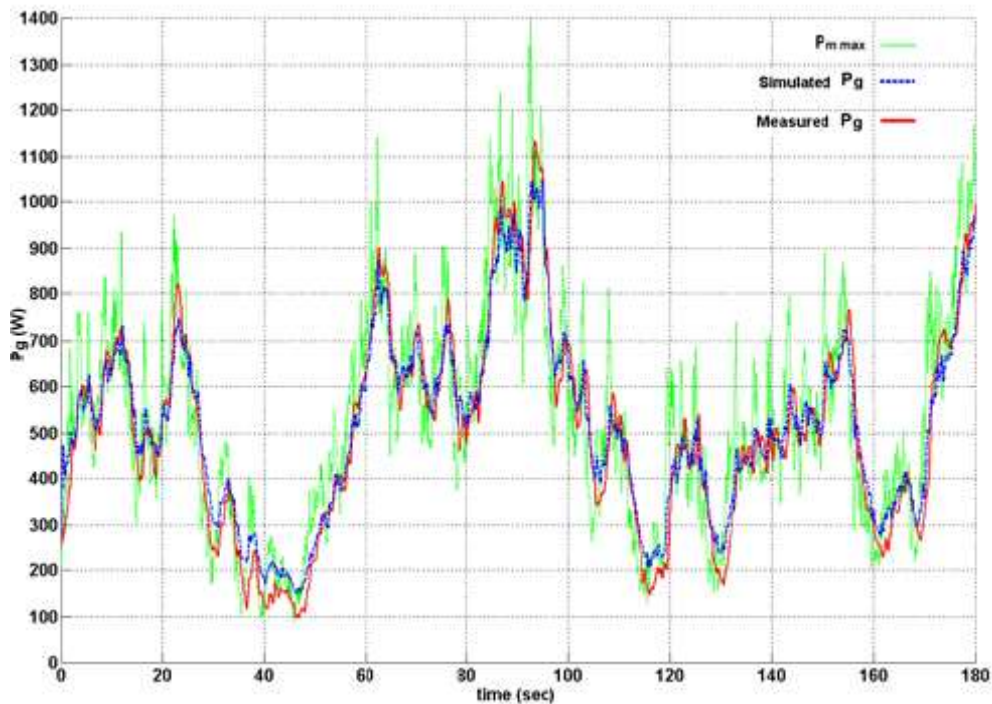
Σχ. 3-27

Χαρακτηριστική καμπύλη ηλεκτρικής συχνότητας – ανορθωμένου ρεύματος γεννήτριας που ο αλγόριθμος επιτυγχάνει για χρονοσειρά ανέμου V_1

Απο τα Σχ. 3-25 έως 3-27 παρατηρείται ότι έχουμε παρόμοια συμπεριφορά του συστήματος για χρονοσειρά ανέμου V_1 σε σχέση με την απόκριση τους συστήματος για χρονοσειρά ανέμου V_2 . Και πάλι το μοντέλο φαίνεται να μην αυξάνει τις στροφές της ανεμογεννήτριας σε ακραίες τιμές αφού έχει μέγιστη γωνιακή ταχύτητα για τη δεδομένη χρονοσειρά ανέμου, 49.83 r/s. Ο συντελεστής ισχύος καταφέρνει να διατηρείται στη βέλτιστη τιμή του. Η μέση ισχύς εξόδου είναι 512,7 W, τιμή πολύ κοντά στη μέση μέγιστη ισχύ εξόδου που είναι 528.4 W. Στο Σχ. 3-26 παρατηρείται ότι η προσομοιωμένη ισχύς εξόδου ακολουθεί την θεωρητική ισχύ καλύτερα από πριν χωρίς όμως να ακολουθεί και πάλι τις απότομες κορυφές της χρονοσειράς. Στο Σχ. 3-27 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη συχνότητας ρεύματος που τελικά το σύστημα επιτυγχάνει. Μοιάζει αρκετά με αυτή του Σχ. 3-24 παρουσιάζοντας πάλι αστάθεια στο διάστημα 70 με 80 Hz .

Είναι φανερό λοιπόν από τα παραπάνω ότι η απόκριση του συστήματος με τη μέθοδο ελέγχου που βασίζεται στην χαρακτηριστική ροπής στροφών για τις χρονοσειρές ανέμου, είναι παρόμοια.

Το σύστημα που σχεδιάστηκε παραπάνω, υλοποιήθηκε και ελήφθησαν μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε πραγματική χρονοσειρά ανέμου. Η εργαστηριακή διάταξη περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ενώ αναλυτική παρουσίαση του πειραματικού συστήματος πραγματοποιείται στην αναφορά [8]. Παρουσιάζονται συνοπτικά τα πειραματικά δεδομένα που ελήφθησαν από το εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας κατά τη διάρκεια του εργαστηριακού πειράματος για απομονωμένη λειτουργία με χρονοσειρά ανέμου V_1 .

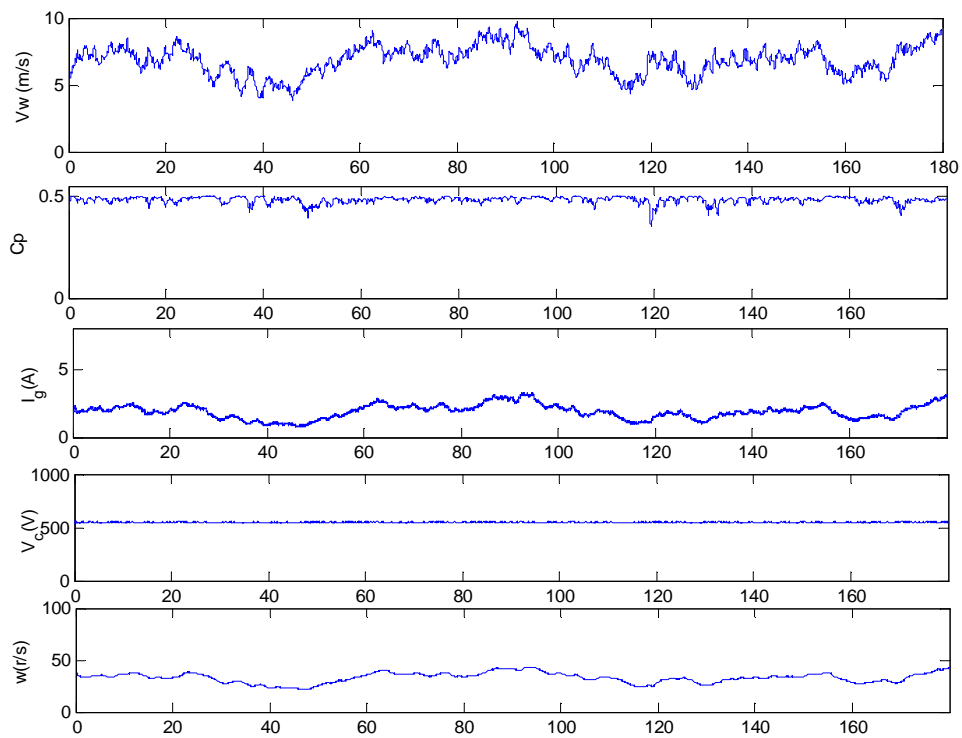


Σχ. 3-28

Μέτρηση ισχύς εξόδου απομονωμένης λειτουργίας για χρονοσειρά ανέμου V_1 [16]

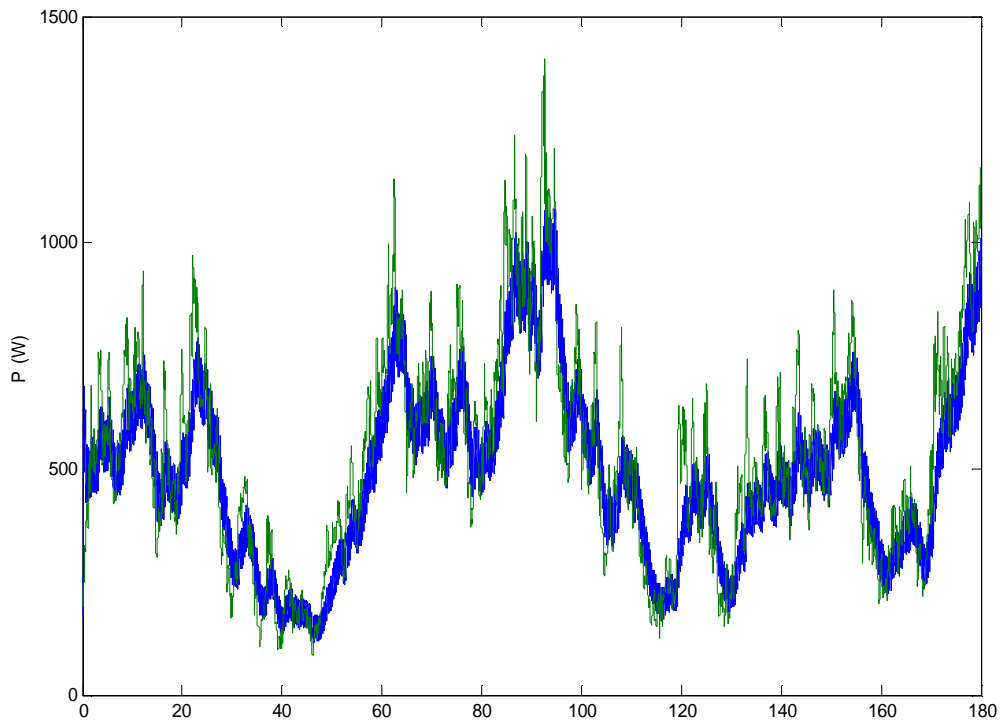
Δεν είναι δυνατόν να παρατηρηθούν σημαντικές διαφορές στη μορφή της προσομοιωμένης και της μετρημένης ισχύος εξόδου. Τα τοπικά μέγιστα και ελάχιστα συμπίπτουν κατά την πλειονότητά τους με μικρή διαφορά ισχύος. Επίσης το σύστημα στην πράξη έχει μέση ισχύ εξόδου 514.8 W ενώ η μέγιστη μηχανική ισχύ έχει τιμή 528.4W. Η ομοιότητα ανάμεσα στην προσομοίωση και μέτρηση απομονωμένης λειτουργίας είναι τέτοια, που ωθούμαστε στο συμπέρασμα ότι οι τρόποι λειτουργίας του συστήματος είναι πανομοιότυποι.

Τα παραπάνω μπορούν να αλλάξουν με τη γήρανση του συστήματος και άρα την χρήση μιας υποβέλτιστης χαρακτηριστικής ροπής - στροφών. Εκτός αυτού τις περισσότερες φορές δεν παρέχονται από τον κατασκευαστή χαρακτηριστικές, με μεγάλη ακρίβεια. Άρα, λοιπόν, θα πρέπει να αξιολογηθεί το πώς συμπεριφέρεται το σύστημα με υποβέλτιστη χαρακτηριστική η οποία εξετάζεται στο προσομοιωμένο μοντέλο με πολλαπλασιασμό της βέλτιστης με την τιμή 1.5. Η τιμή αυτή προέκυψε από τους τύπους (2-1) και (2-2) αν μεταβάλλουμε το λ_{optimum} κατά 10%. Η προσομοίωση πραγματοποιείται για χρονοσειρά ανέμου V_1 . Τα μεγέθη που λαμβάνονται έχουν ως εξής:



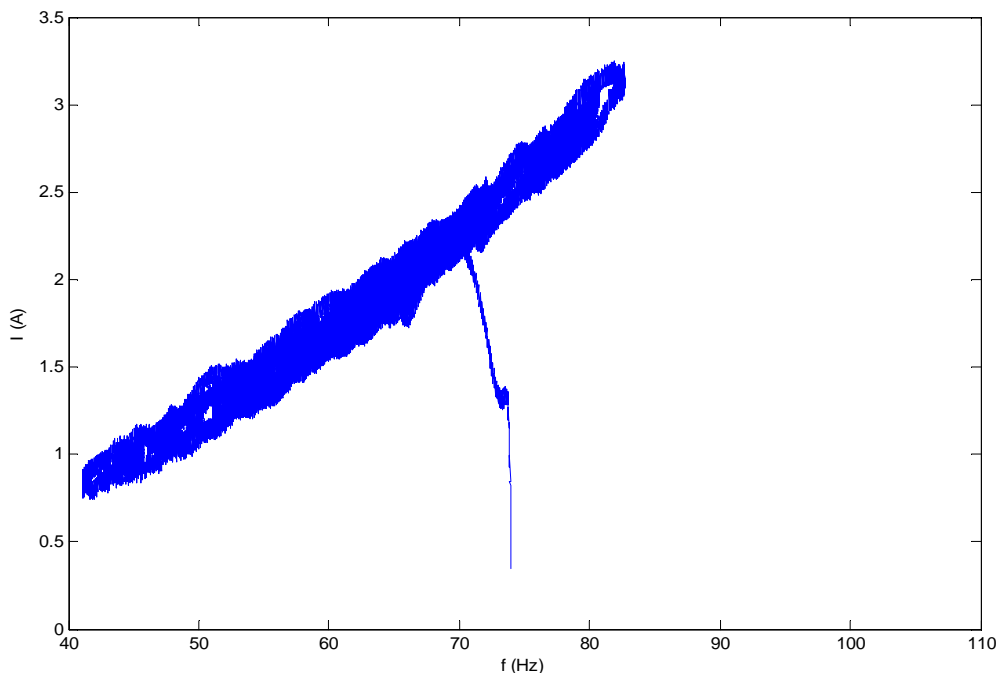
Σχ. 3-29

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας για χρονοσειρά ανέμου V_1 με υποβέλτιστη χαρακτηριστική ροπής στροφών



Σχ. 3-30

Προσομοιωμένη ισχύ εξόδου (με μπλε χρώμα) και θεωρητικά μέγιστη μηχανική ισχύς (με πράσινο χρώμα) σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας για χρονοσειρά ανέμου V_1 με υποβέλτιστη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής στροφών



Σχ. 3-31

Χαρακτηριστική καμπύλη ηλεκτρικής συχνότητας – ανορθωμένου ρεύματος γεννήτριας που ο αλγόριθμος επιτυγχάνει για χρονοσειρά ανέμου V_1 με υποβέλτιστη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής στροφών

Παρατηρούμε από τα Σχ. 3-29 έως 3-31 ότι το σύστημα συμπεριφέρεται παρόμοια με πριν παρουσιάζοντας ανορθωμένο ρεύμα και τάση πυκνωτών χωρίς ιδιαίτερες κυματώσεις. Παρ'όλα αυτά οι στροφές μειώνονται σε σχέση με τη συμπεριφορά του συστήματος για βέλτιστη χαρακτηριστική καμπύλη αφού παρουσιάζει μέση γωνιακή ταχύτητα 32.8 r/s. Όσον αφορά το συντελεστή ισχύος C_p , παρουσιάζει μεγαλύτερη αστάθεια με αποτέλεσμα να μην κατορθώνει να βρίσκεται συνεχώς στην βέλτιστη τιμή 0.5. Αντίστοιχη συμπεριφορά φαίνεται να έχει και η ισχύς εξόδου που αποδίδει η μηχανή με μέση τιμή 490.9 W, εμφανώς μικρότερη τόσο από την θεωρητικά μέγιστη προσλαμβανόμενη ισχύ όσο και από την προηγούμενη προσομοιωμένη τιμή για την ιδανική χαρακτηριστική.

3.2.7. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Το σύστημα δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη πολυπλοκότητα αφού στηρίζει τη λειτουργία του σε δεδομένη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής - στροφών, λειτουργώντας έτσι με ντετερμινιστικό τρόπο. Επίσης, όσον αφορά στην απόκριση του συστήματος, όταν εφαρμόστηκε η ιδανική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής στροφών, ο συντελεστής ισχύος C_p φάνηκε να κυμαίνεται σε τιμές ικανοποιητικές, πολύ κοντά στη βέλτιστη τιμή 0.5. Παράλληλα η ισχύς εξόδου και στις δύο χρονοσειρές ανέμου απέκτησε τιμές πολύ κοντά στις ιδανικές αφού απέδωσε 582W και 512.7W για αντίστοιχες μέγιστες προσλαμβανόμενες τιμές ισχύος 596.2W και 528.4 W. Επίσης το σύστημα παρουσιάστηκε να ανταποκρίνεται γρήγορα σε βηματικές μεταβολές τόσο της ταχύτητας ανέμου όσο και της μηχανικής ροπής

εισόδου με συνολικό μέσο χρόνο αντίστοιχης μεταβολής του ανορθωμένου ρεύματος και του συντελεστή ισχύος, μέχρι να σταθεροποιηθούν, 9.5sec. Πλεονέκτημα αποτελεί και το γεγονός ότι η μέθοδος φαίνεται να μην εξαρτάται σημαντικά από μεταβολές στην αρχική τιμή που λαμβάνει ο λόγος κατάτμησης D.

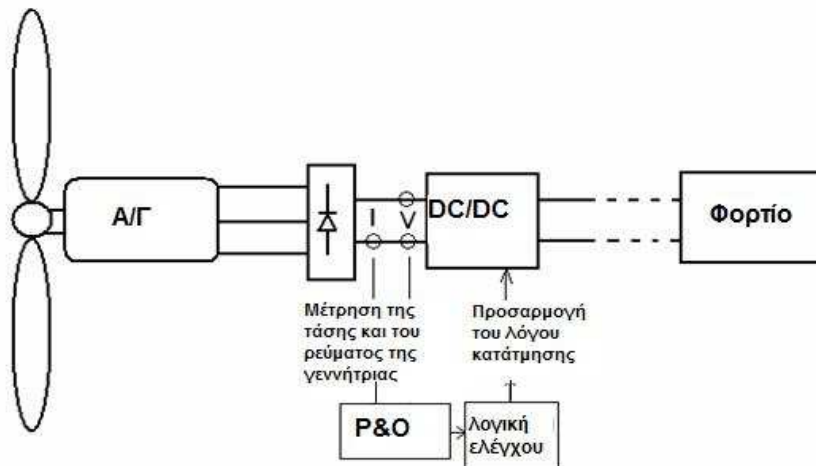
Ωστόσο, σημαντικό μειονέκτημα του συστήματος αποτελεί η εξάρτησή του από μια προκαθορισμένη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής στροφών η οποία και το καθιστά επιρρεπές σε ανακρίβειες εξαιτίας γήρανσης ή πιθανών κακών αρχικών υπολογισμών. Όπως φάνηκε στην παραπάνω ανάλυση, όταν εφαρμόστηκε υποβέλτιστη χαρακτηριστική καμπύλη, το σύστημα παρουσίασε μια αστάθεια στον συντελεστή ισχύος καθώς και πτώση στην μέση ισχύ εξόδου. Για την αποφυγή αυτού του μειονεκτήματος, έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία μέθοδοι οι οποίες δε χρησιμοποιούν δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες. Δύο τέτοιες μέθοδοι θα παρουσιαστούν στα κεφάλαια που ακολουθούν.

Κεφάλαιο 4

Μέθοδος Ανίχνευσης του Σημείου Μέγιστης Ισχύος μέσω Μικρών Μεταβολών

4.1. Θεωρητική Ανάλυση

Η μέθοδος ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος μέσω μικρών μεταβολών δεν χρησιμοποιεί τις χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής - στροφών αλλά πετυχαίνει την εύρεση του επιθυμητού σημείου μέσω συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων (perturbations and observations, P&Os). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή λαμβάνονται ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα μετρήσεις του ανορθωμένου ρεύματος, της τάσης της γεννήτριας και κατ'επέκταση της ισχύος εξόδου. Μέσω του dc/dc μετατροπέα ανυψωτή γίνονται αλλαγές του φορτίου άρα και της ισχύος εξόδου της γεννήτριας. Η νέα ισχύς μετράται και συγκρίνεται με την προηγούμενη τιμή. Ανάλογα με το αν η νέα τιμή της ισχύος είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη ο μετατροπέας λαμβάνει κατάλληλη δράση ώστε να οδηγείται σε αύξηση της ισχύος εξόδου έως το μέγιστο. Η λειτουργία της μεθόδου αυτής φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχ. 4-1

Σύστημα όπου γίνεται αναζήτηση του σημείου μέγιστης ισχύος μέσω συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων [16]

Παρ'όλο που η ταχύτητα ανέμου μεταβάλλεται σχετικά γρήγορα με το χρόνο, η ισχύς που απορροφάται από την ανεμογεννήτρια μεταβάλλεται σχετικά αργά,

εξαιτίας της αργής απόκρισης που έχει το διασυνδεδεμένο σύστημα αέρας - στρόβιλοι/ γεννήτρια. Κατά συνέπεια, το πρόβλημα της μεγιστοποίησης ισχύος εξόδου χρησιμοποιώντας τον λόγο κατάτμησης D (duty cycle) μπορεί να λυθεί σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$D_k = D_{k-1} + C_1 \cdot \frac{\Delta P_{k-1}}{\Delta D_{k-1}} \quad (4-1)$$

όπου το D_k και D_{k-1} είναι οι τιμές του λόγου κατάτμησης για τις επαναλήψεις k και $k-1$, αντίστοιχα (όπου ισχύει $0 < D_k < 1$). Το $\Delta P_{k-1}/\Delta D_{k-1}$ είναι η κλίση της ισχύος εξόδου στην επανάληψη $k-1$ και C_1 μια σταθερά που αντιπροσωπεύει το βήμα αλλαγής.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι αυτή η μέθοδος οδηγεί στη σύγκλιση του σημείου μέγιστης ισχύος σε οποιοδήποτε επίπεδο ταχύτητας ανέμου, είναι επαρκές να αποδειχθεί ότι η σχέση $P(D)$, που σχετίζει την ισχύ εξόδου και τον λόγο κατάτμησης D του dc/dc μετατροπέα, έχει ένα μοναδιαίο ακραίο σημείο που συμπίπτει με το αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος της χαρακτηριστικής ισχύος-στροφών.

Γνωρίζουμε όμως ότι στα σημεία μέγιστης ισχύος θα ισχύει :

$$\frac{dP}{d\Omega} = 0 \quad (4-2)$$

όπου Ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της ανεμογεννήτριας. Η σχέση 3-3 μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{dP}{dD} \cdot \frac{dD}{dV_g} \cdot \frac{dV_g}{d\Omega_e} \cdot \frac{d\Omega_e}{d\Omega} = 0 \quad (4-3)$$

Όπου V_g είναι η ανορθωμένη τάση εξόδου της γεννήτριας και Ω_e είναι η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας.

Σε περίπτωση ανυψωτή μετατροπέα dc/dc, η τάση εισόδου της συσχετίζεται με την τάση εξόδου και τον λόγο κατάτμησης D ως εξής:

$$V_g = (1 - D) \cdot V_o \quad (4-4)$$

$$\frac{dV_g}{dD} = -V_o \neq 0 \quad (4-5)$$

όπου V_o είναι η τάση εξόδου μετά τον dc/dc μετατροπέα ισχύος.

Η γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας συσχετίζεται με τη γωνιακή ταχύτητα του ανεμοκινητήρα ως εξής:

$$\Omega_e = p \cdot \Omega \quad (4-6)$$

$$\frac{d\Omega_e}{d\Omega} = p > 0 \quad (4-7)$$

όπου p είναι ο αριθμός των πόλων της ανεμογεννήτριας .

Η ανορθωμένη τάση εξόδου της γεννήτριας V_g είναι ανάλογη προς τη φασική τάση V_{ph} , ενώ αυξάνεται η τιμή της καθώς αυξάνονται οι στροφές της γεννήτριας και άρα καταλήγουμε στις παρακάτω σχέσεις.

$$\frac{dV_g}{d\Omega_e} > 0 \quad (4-8)$$

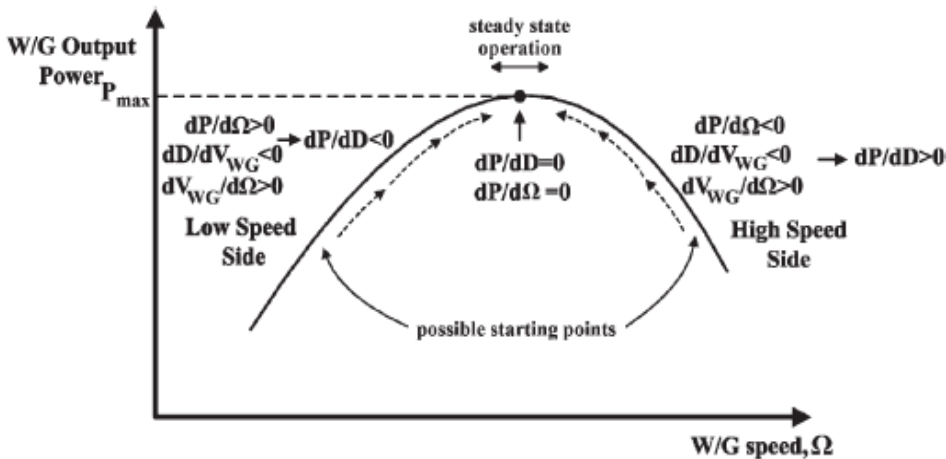
$$\frac{dD}{dV_g} > 0 \quad (4-9)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις 4-2 έως 4-9 προκύπτει ότι:

$$\frac{dP}{d\Omega} = 0 \Leftrightarrow \frac{dP}{dD} = 0 \quad (4-10)$$

Κατά συνέπεια, η σχέση $P(D)$ έχει ένα ακραίο σημείο, που συμπίπτει με το σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου, και άρα η ρύθμιση του λόγου κατάπτωσης D εξασφαλίζει σύγκλιση στο επιθυμητό σημείο υπό οποιαδήποτε ταχύτητα ανέμου.

Δεδομένου τώρα ότι η ρύθμιση του λόγου κατάπτωσης D ακολουθεί την κατεύθυνση της κλίσης dP/dD , όταν $dP/dD > 0$ το D αυξάνεται, με αποτέλεσμα την μείωση της ταχύτητας και την αύξηση της ισχύος, μέχρι να ανιχνευτεί το σημείο μέγιστης ισχύος. Ομοίως όταν $dP/dD < 0$, το D μειώνεται, η ταχύτητα αυξάνεται, μέχρι να ανιχνευτεί το σημείο μέγιστης ισχύος [17]. Στο Σχ.4-2 παρουσιάζεται διαγραμματικά η λειτουργία του αλγορίθμου ανίχνευσης σημείων μέγιστης ισχύος με μικρές αλλαγές.



Σχ. 4-2

Διαδικασία ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος μέσω μικρών μεταβολών του λόγου κατάπτωσης του dc/dc μετατροπέα [17]

Η σχέση (4-1) μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$D_k = D_{k-1} + \Delta D \quad (4-11)$$

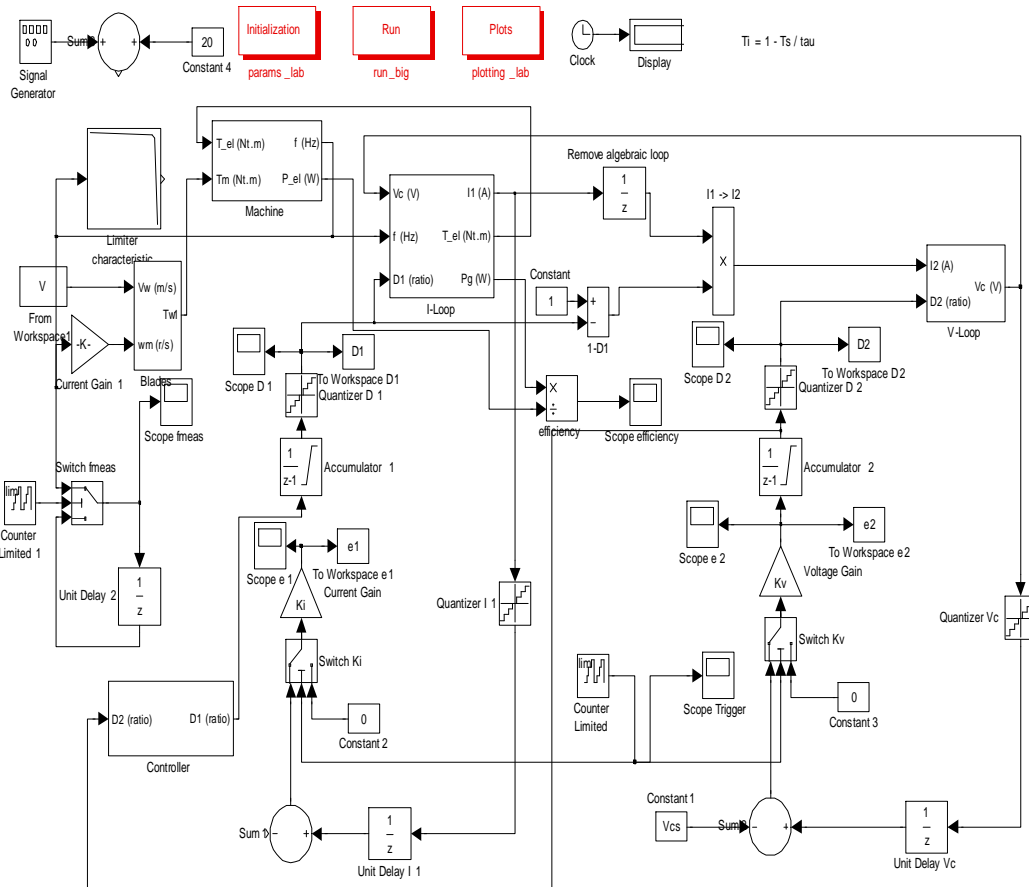
όπου

$$\Delta D = C_1 \cdot \frac{\Delta P_{k-1}}{\Delta D_{k-1}} \quad (4-12)$$

Στη σχέση 4-12 το βήμα ΔD παρουσιάζεται ως ένα μέγεθος που μεταβάλλεται δυναμικά παρ'όλα αυτά στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε το ΔD είναι μια σταθερά που ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του μοντέλου αλλάζει το πρόσημό του.

4.2. Μοντέλο Προσομοίωσης

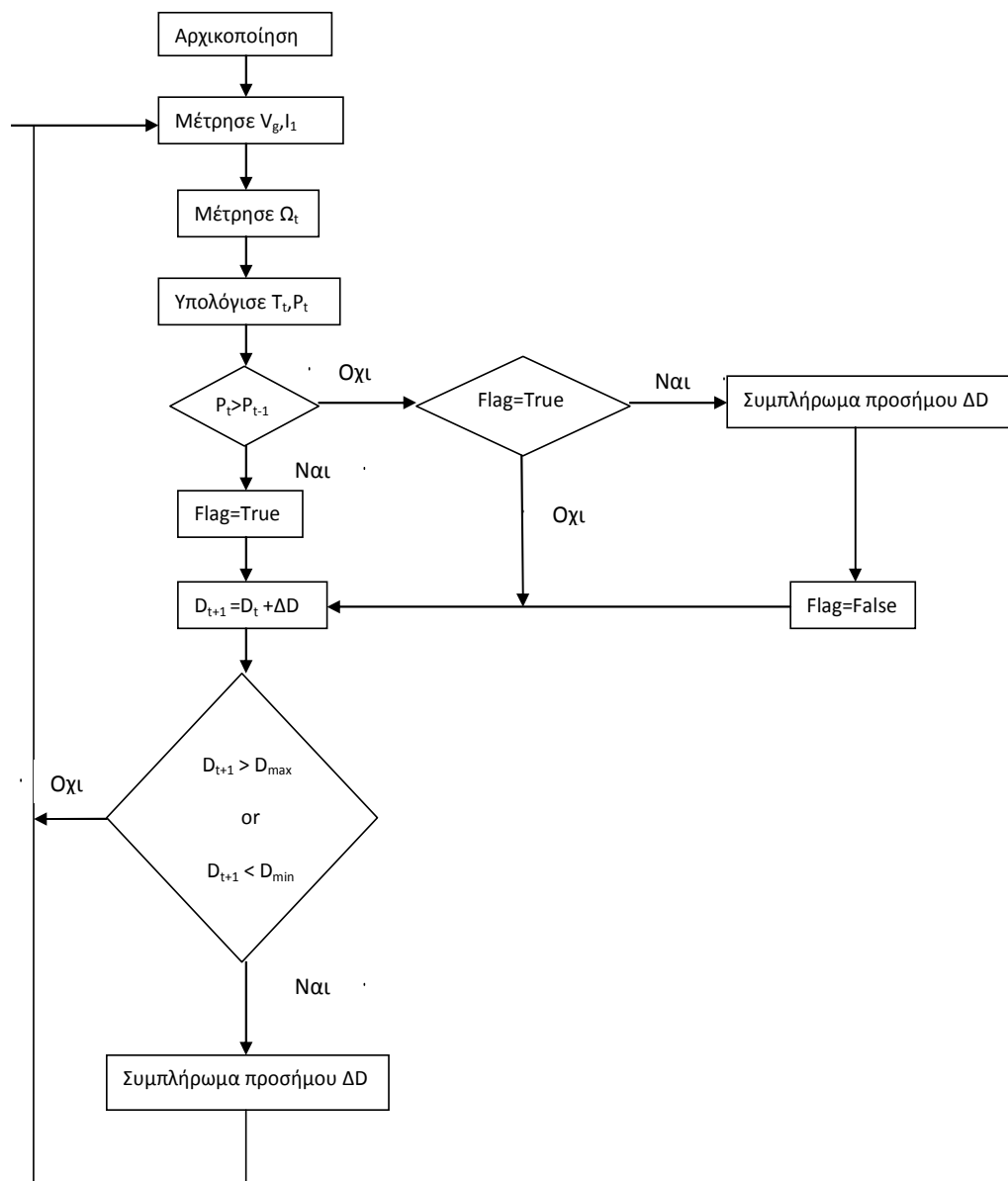
Δημιουργήθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο σε υπολογιστή με τη βοήθεια του προγράμματος Simulink™ με σκοπό την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Το διάγραμμα της μεθόδου ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος μέσω μικρών μεταβολών παρουσιάζεται στο Σχ.4-3.



Σχ. 4-3

Πλήρες μοντέλο ανεμογεννήτριας και συστήματος ελέγχου μέσω μικρών μεταβολών σε Simulink[10]

Το σύστημα μετρά την ανορθωμένη τάση V_g και το ανορθωμένο ρεύμα I_1 της γεννήτριας στην είσοδο του dc/dc μετατροπέα ισχύος και υπολογίζει τη στιγμιαία ισχύ P_t . Η τιμή αυτή συγκρίνεται με την αμέσως προηγούμενη τιμή P_{t-1} . Αν είναι μεγαλύτερη τότε γίνεται μια μικρή μεταβολή στο D προς μία κατεύθυνση (αύξηση ή μείωση), η οποία μεταβολή έχει άμεση επίδραση στο ρεύμα του ανυψωτή άρα και στην ισχύ. Αν είναι μικρότερη τότε η μεταβολή του D γίνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση από την αμέσως προηγούμενη. Έτσι ο ελεγκτής λειτουργεί σε μία λογική «αύξηση της ισχύος ωστόσο η εντολή για αύξηση του D φέρει μείωση και μείωση της ισχύος ωστόσο η εντολή για μείωση του D φέρει και πάλι μείωση.» Παρακάτω φαίνεται ο αλγόριθμος υλοποίησης της μεθόδου ανίχνευσης μέγιστης ισχύος μέσω μικρών μεταβολών.



Σχ. 4-4

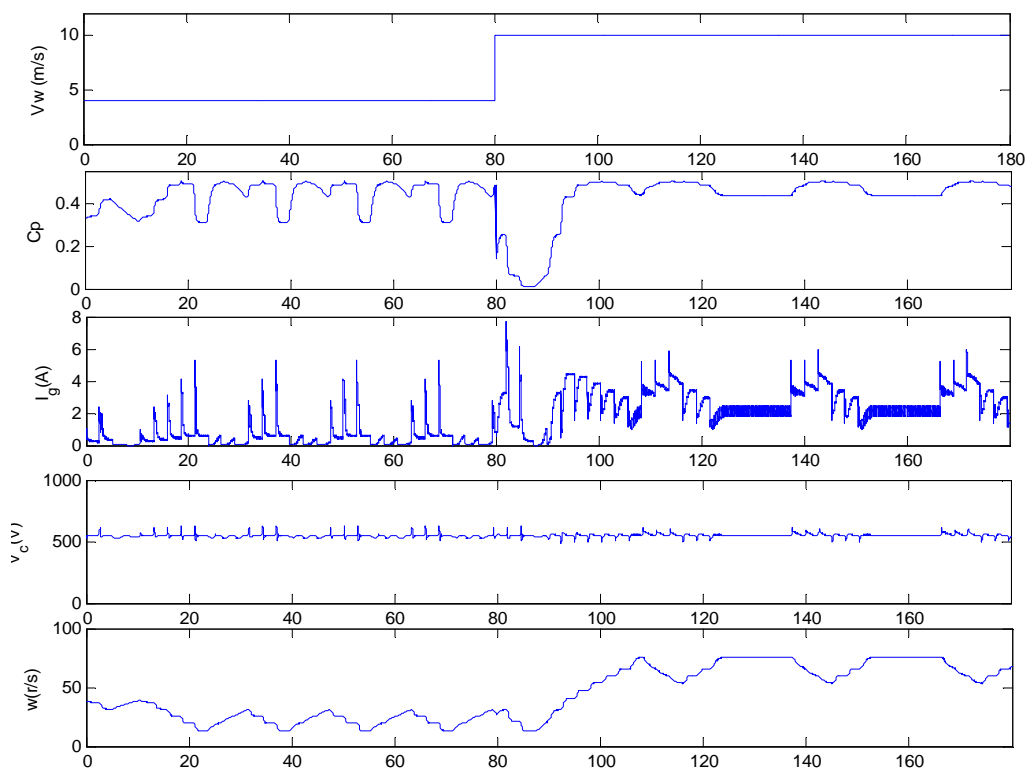
Αλγόριθμος διαδικασίας ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος μέσω μικρών μεταβολών

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς τον ρόλο της σημαίας αναλαμβάνει το block “hit crossing” ενώ παράλληλα καθορίζει πότε θα αλλάζει το πρόσημο του ΔD δίνοντας έναν παλμό κάθε φορά που μια αύξηση της ισχύος φέρει μία μείωση και αντίστοιχα μια μείωση φέρει μία μείωση. Το μέγεθος που μπορεί να ενημερώσει για την αύξηση ή τη μείωση της ισχύος εξόδου είναι ο λόγος κατάτμησης D_2 που διατηρεί σταθερή την τάση των πυκνωτών και άρα της εξόδου.

4.3. Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές του ανέμου για ακραίες αρχικές τιμές του λόγου κατάτμησης D και του βήματος μεταβολής του.

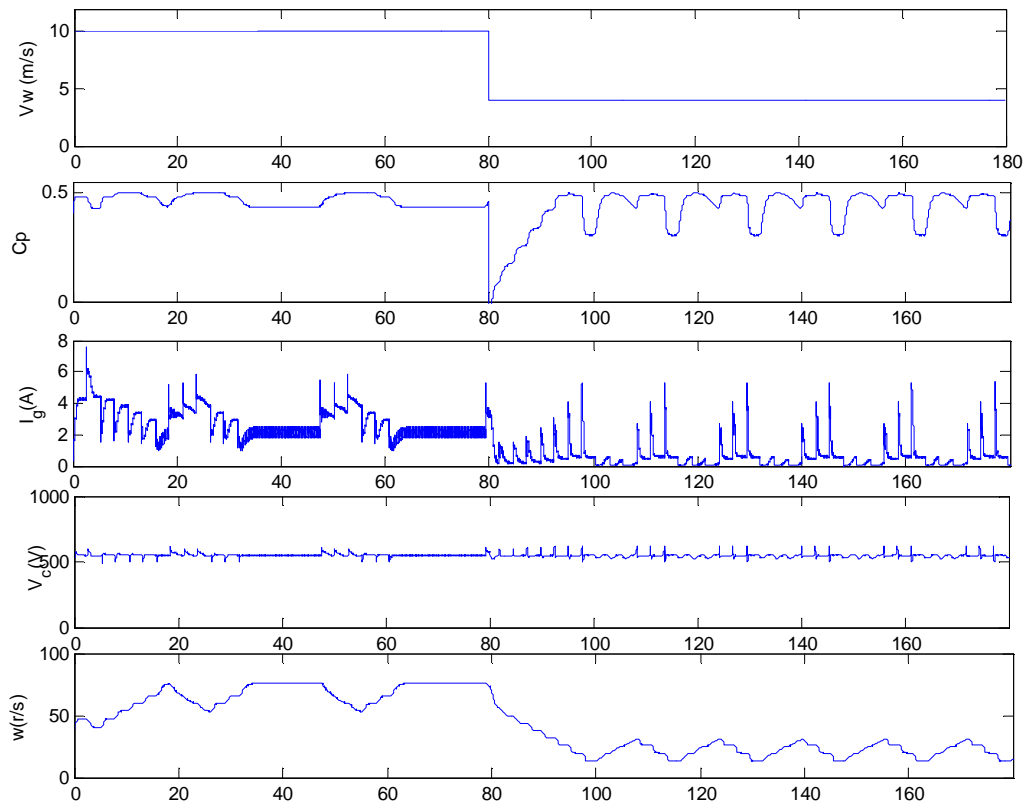
Στη μέθοδο ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος μέσω μεταβολών του λόγου κατάτμησης D , το βήμα ΔD αλλά και ο χρόνος μεταβολής μεταξύ διαδοχικών μεταβολών του D είναι τα μεγέθη που καθορίζουν τη μέγιστη κλίση του D σε σχέση με το χρόνο. Επομένως, αν εφαρμοστεί μικρό βήμα ΔD και μεγάλος χρόνος μεταβολής του D , η κλίση του θα ελαχιστοποιηθεί. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται πολύ μικρές μεταβολές, το σύστημα να σταθεροποιείται σε μια κατάσταση δεδομένου ότι με τόσο μικρές μεταβολές δεν μπορεί να ακολουθήσει τη γρήγορη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο και ουσιαστικά το σύστημα να χάνει τη δυναμική του συμπεριφορά.

Αν θέσουμε για παράδειγμα το $\Delta D=0.1$, τιμή αρκετά μεγάλη δεδομένου ότι το D κυμαίνεται από 0 σε 1 και αρχική τιμή του $D =0.4$, η συμπεριφορά του συστήματος για βηματική μεταβολή του ανέμου διακρίνεται στα Σχ.4-6, 4-7.



Σχ. 4-6

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s με μεταβολή του βήματος του λόγου κατάτμησης $\Delta D=0.1$

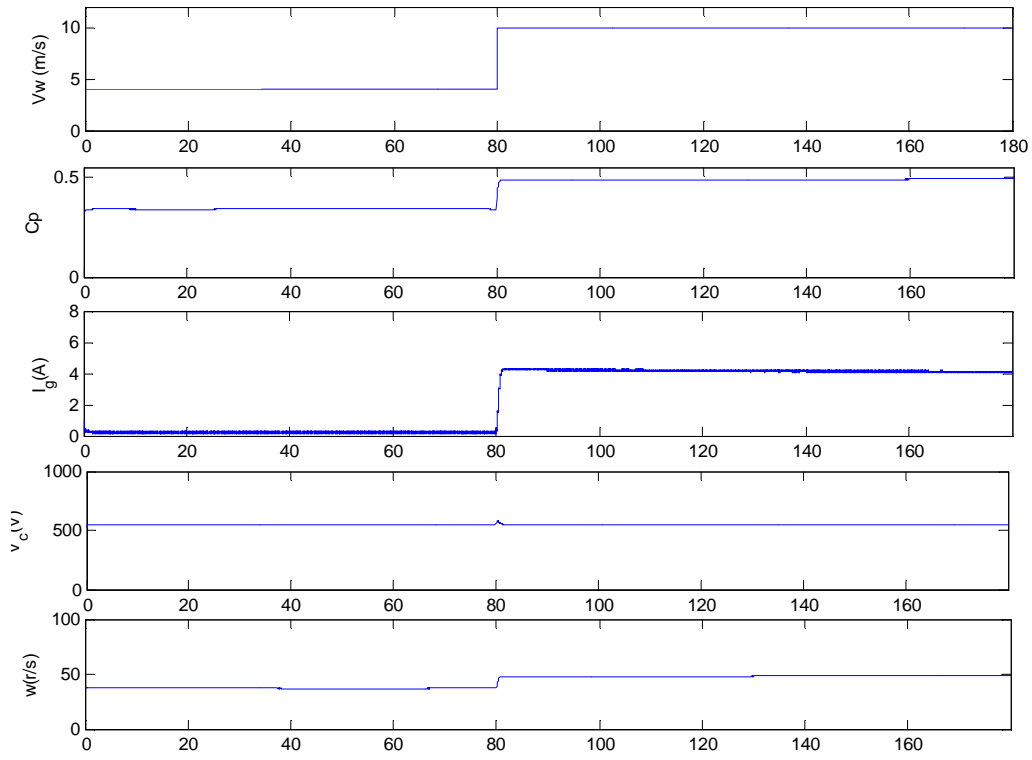


Σχ. 4-7

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 10 m/s σε 4 m/s με μεταβολή του βήματος του λόγου κατάτμησης $\Delta D=0.1$

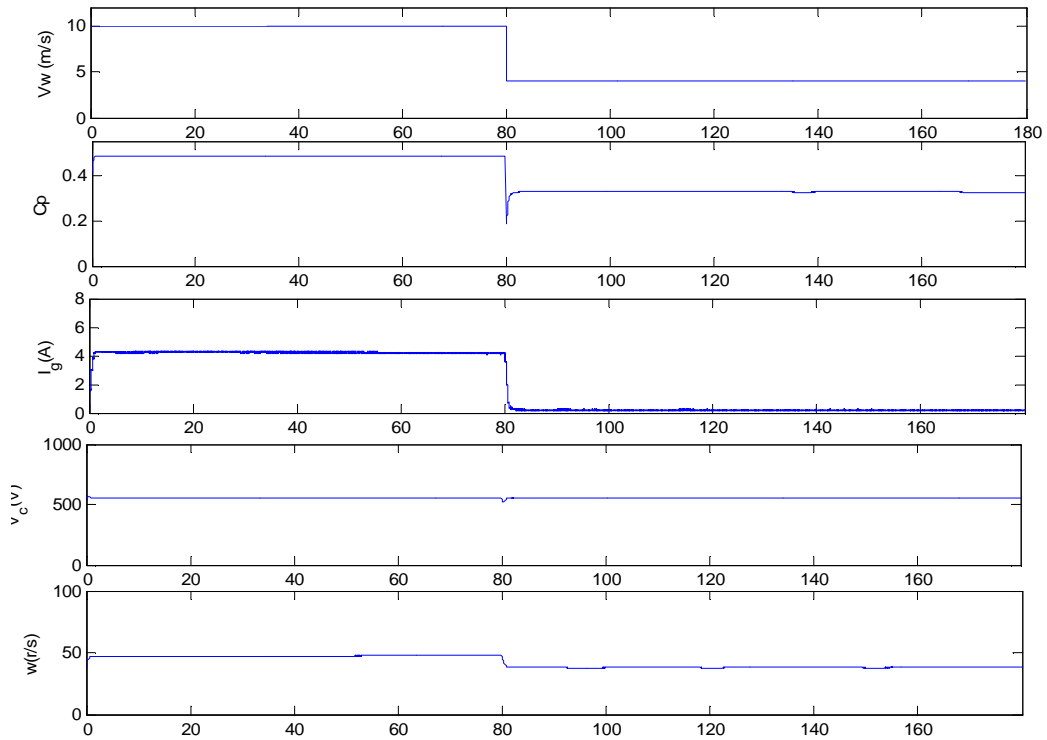
Η συμπεριφορά του μοντέλου είναι ασταθής αφού ακόμη και για σταθερό άνεμο από 0 έως 80 sec ο συντελεστής ισχύος C_p δεν είναι σταθερός αλλά μεταβάλλεται. Η ίδια εικόνα φαίνεται και στις στροφές τις μηχανής ενώ στην τάση και στο ρεύμα της γεννήτριας εισάγονται σημαντικές κυματώσεις. Η απόκριση αυτή οφείλεται στο μεγάλο βήμα αύξησης ή μείωσης του λόγου κατάτμησης οδηγώντας το σύστημα σε αστάθεια αφού με μεγάλες μεταβολές δεν καταφέρνει να επιτύχει μια βέλτιστη ισχύ αλλά συνεχώς να ταλαντώνεται γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος.

Αν τώρα εφαρμοστεί βήμα $\Delta D=0.001$, τιμή πολύ μικρή και αρχική τιμή του $D=0.4$, η απόκριση του συστήματος για βηματική μεταβολή του ανέμου διακρίνεται στα Σχ.4-8, 4-9.



Σχ. 4-8

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s με μεταβολή του βήματος του λόγου κατάτμησης $\Delta D=0.001$

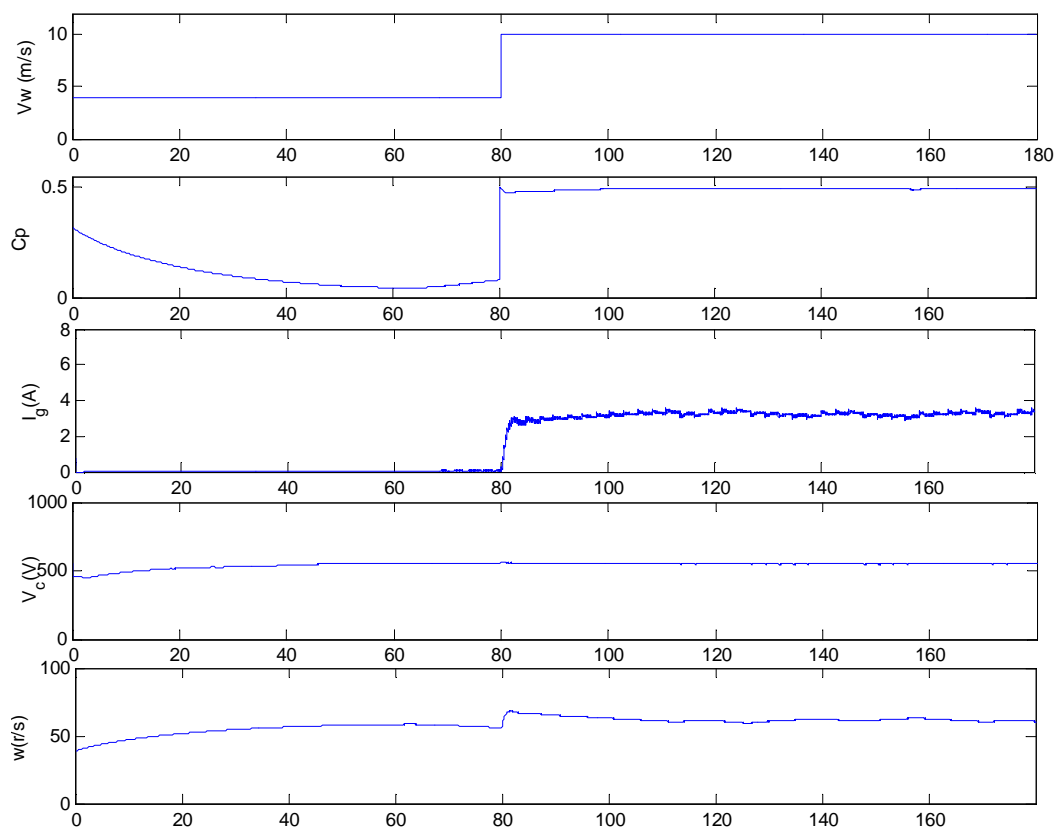


Σχ. 4-9

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 10 m/s σε 4 m/s με μεταβολή του βήματος του λόγου κατάτμησης $\Delta D=0.001$

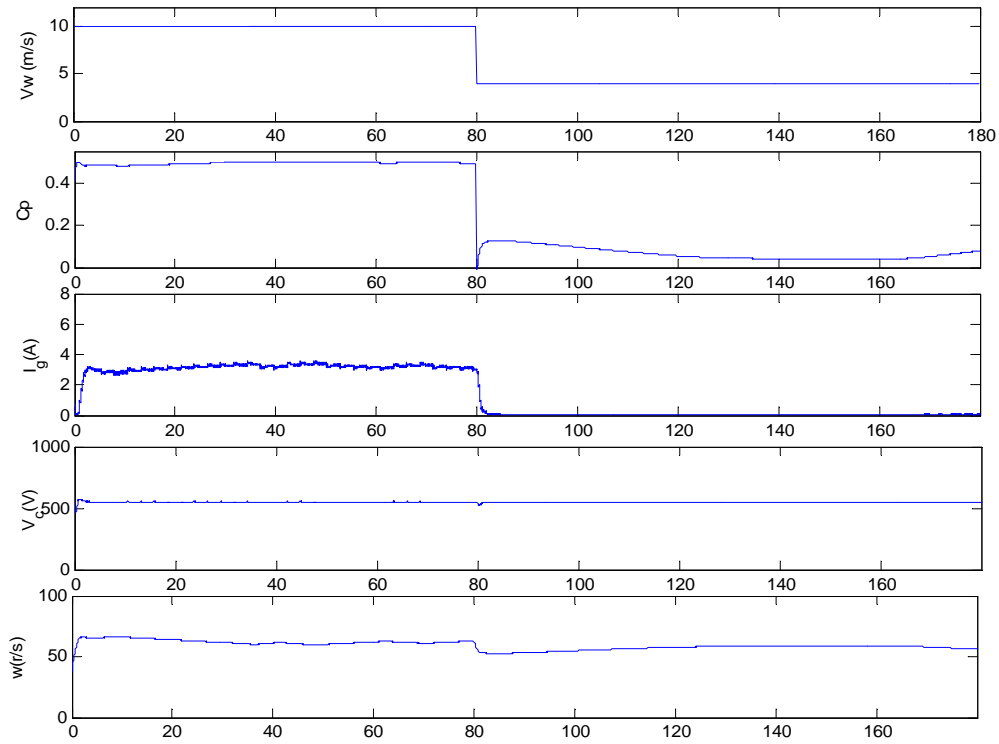
Η απόκριση του συστήματος δείχνει να βελτιώνεται μειώνοντας τις κυματώσεις και την γενική αστάθεια που παρατηρήθηκε για μεγάλο βήμα. Παρ'όλα αυτά, όπως διατυπώθηκε και παραπάνω, μια τόσο μικρή μεταβολή οδηγεί σε μία σταθερότητα με αποτέλεσμα το μοντέλο με τόσο μικρές μεταβολές να μην μπορεί να επιτύχει τη μέγιστη ισχύ.

Στη συνέχεια αξιολογείται η συμπεριφορά του συστήματος αν εφαρμοστεί βηματικός άνεμος με ακραίες αρχικές τιμές του λόγου κατάτμησης D 0.1 και 0.9 και με ένα μέσο βήμα $\Delta D=0.01$. Οι αποκρίσεις διακρίνονται στα Σχ. 4-10 έως 4-13.



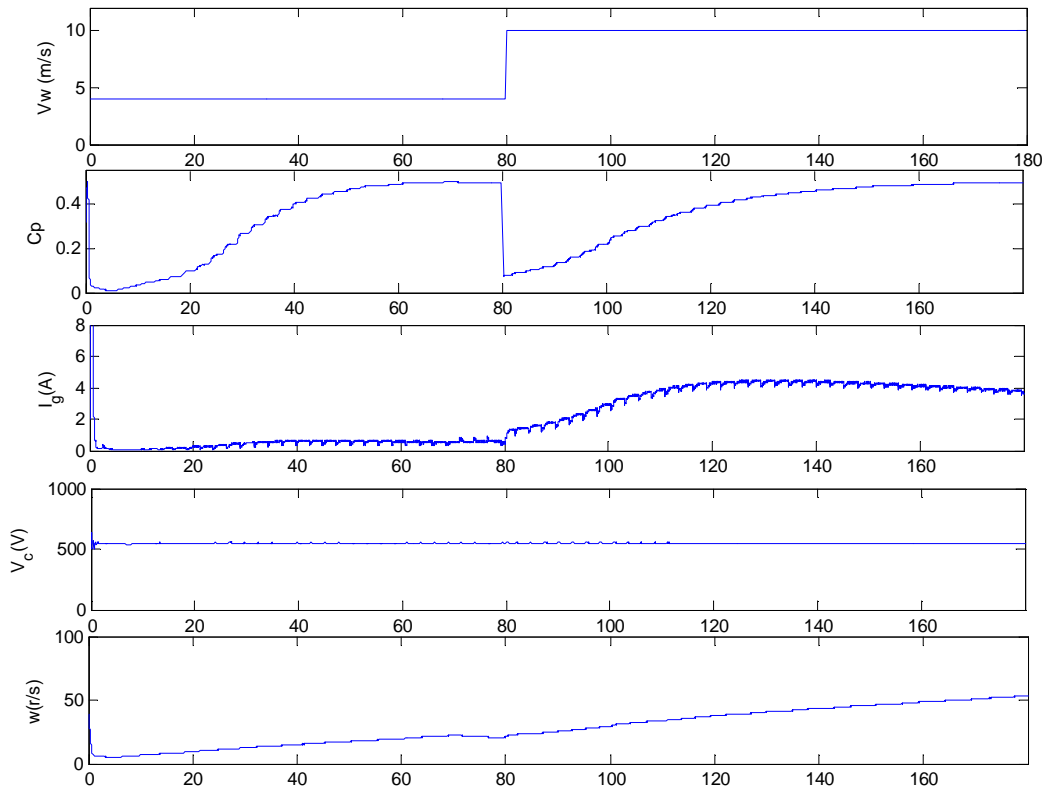
Σχ. 4-10

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s με αρχική τιμή λόγου κατάτμησης 0.1



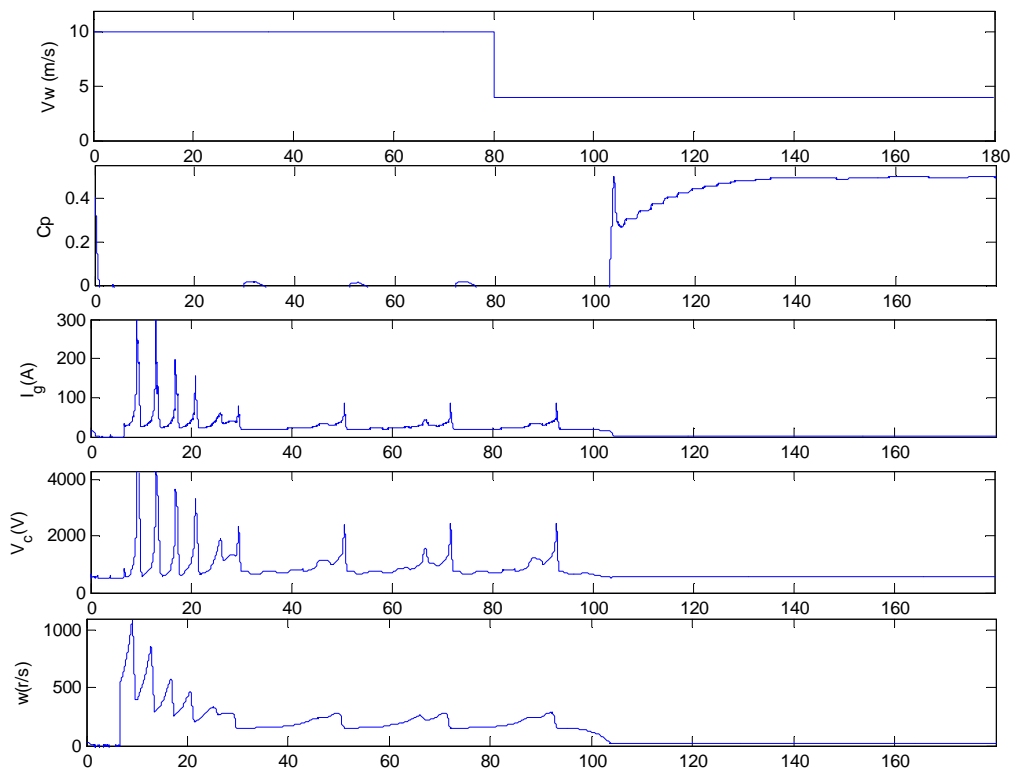
Σχ. 4-11

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 10 m/s σε 4 m/s με αρχική τιμή λόγου κατάτμησης 0.1



Σχ. 4-12

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s με αρχική τιμή λόγου κατάτμησης 0.9



Σχ. 4-13

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 10 m/s σε 4 m/s με αρχική τιμή λόγου κατάτμησης 0.9

Παρατηρείται ότι για αρχική τιμή $D=0.1$ το ο συντελεστής ισχύος C_p μετά τη μεταβολή του ανέμου δεν μπορεί να επανέλθει στη μέγιστη τιμή του αλλά σταθεροποιείται σε μία πολύ μικρότερη. Για $D=0.9$ όπως είναι φανερό οδηγούμαστε σε δυσλειτουργία πια της ανεμογεννήτριας.

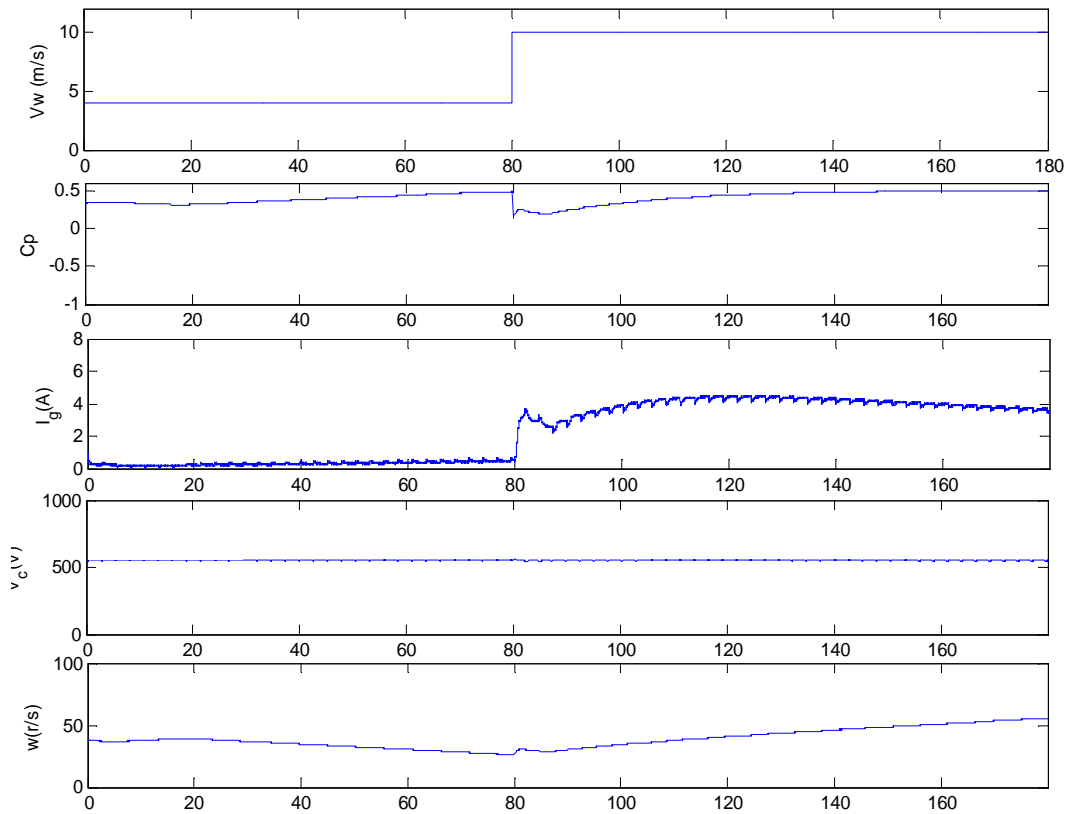
Μια σημαντική παρατήρηση που μπορεί να διατυπωθεί ως απόρροια όλων των παραπάνω είναι ότι το μοντέλο εξαρτάται από την αρχική τιμή που θα λάβει ο λόγος κατάτμησης αλλά και από το βήμα μεταβολής του. Παρατηρήθηκε ότι και οι δύο αυτές συνιστώσες επιδρούν διαφορετικά για κάθε ταχύτητα ανέμου με αποτέλεσμα να μην αποδίδει τη μέγιστη ισχύ το σύστημα για κάθε άνεμο. Για παράδειγμα οι τιμές των D , ΔD που λάβαμε ως βέλτιστες αναφέρονται για ανέμους της τάξης των 6 -10 m/s και όχι για χαμηλότερους αφού το σύστημα σε χαμηλούς ανέμους όπως 4 m/s που εξετάσαμε στις προσομοιώσεις επιτυγχάνει συντελεστή ισχύος C_p μικρότερο από το βέλτιστο ενώ αργεί πολύ (περίπου 90 sec) να βρεθεί στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Έτσι, λοιπόν, βρέθηκε ότι για τις συγκεκριμένες χρονοσειρές ανέμου που χρησιμοποιήθηκαν στα προσομοιωμένα μοντέλα αλλά και στα εργαστηριακά πειράματα, οι τιμές που τελικά αποδίδουν την μέγιστη ισχύ εξόδου είναι: $\Delta D=0.01$ και αρχική τιμή $D=0.4$ [16].

4.4. Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου

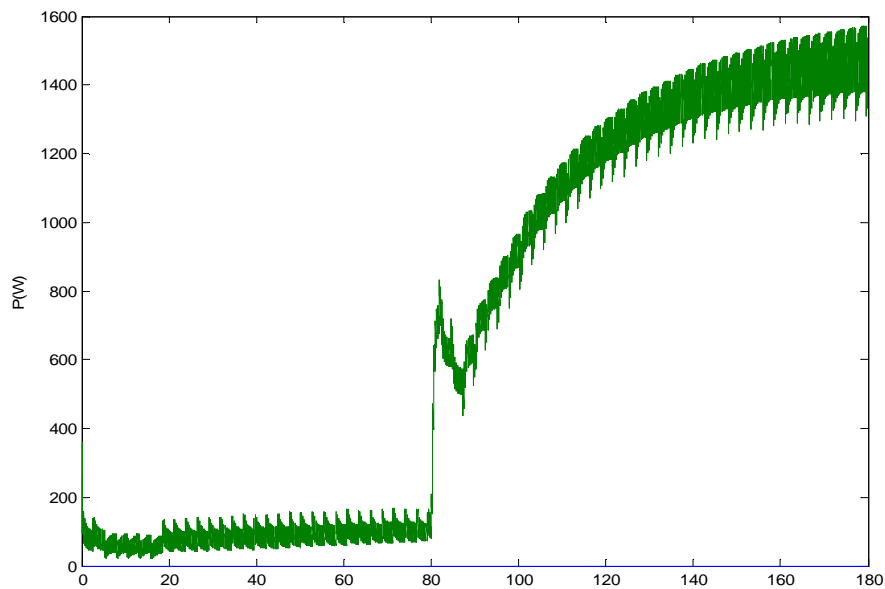
Στα Σχ. 4-14 έως 4-17 εμφανίζονται τα διαγράμματα των προσομοιωμένων μεγεθών για μεταβατική κατάσταση της τιμής της ταχύτητας ενός σταθερού ανέμου από τα 4 m/sec στα 10 m/sec τη χρονική στιγμή $t = 80$ sec, με τη μέθοδο ανίχνευσης

μέγιστης ισχύος βασισμένη σε μικρές μεταβολές. Ως αρχικές τιμές των λόγων κατάτμησης D τέθηκαν $D_1=0.4$, $D_2=0.25$, και το βήμα $\Delta D=0.01$.



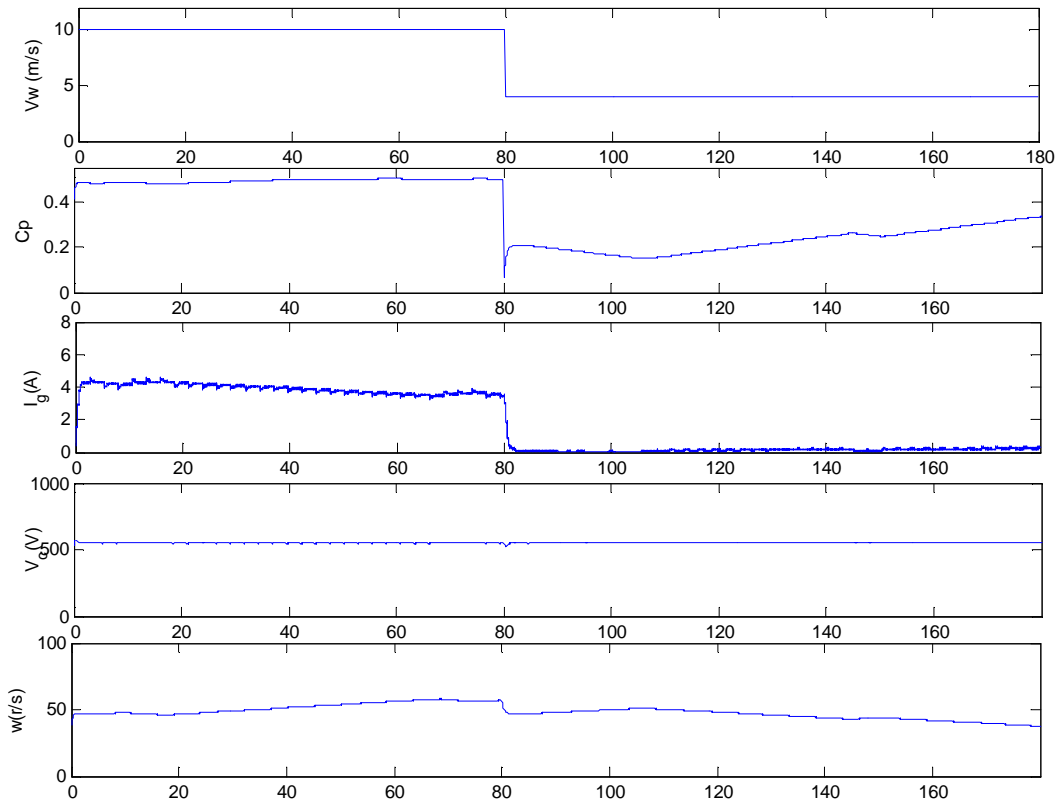
Σχ. 4-14

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s



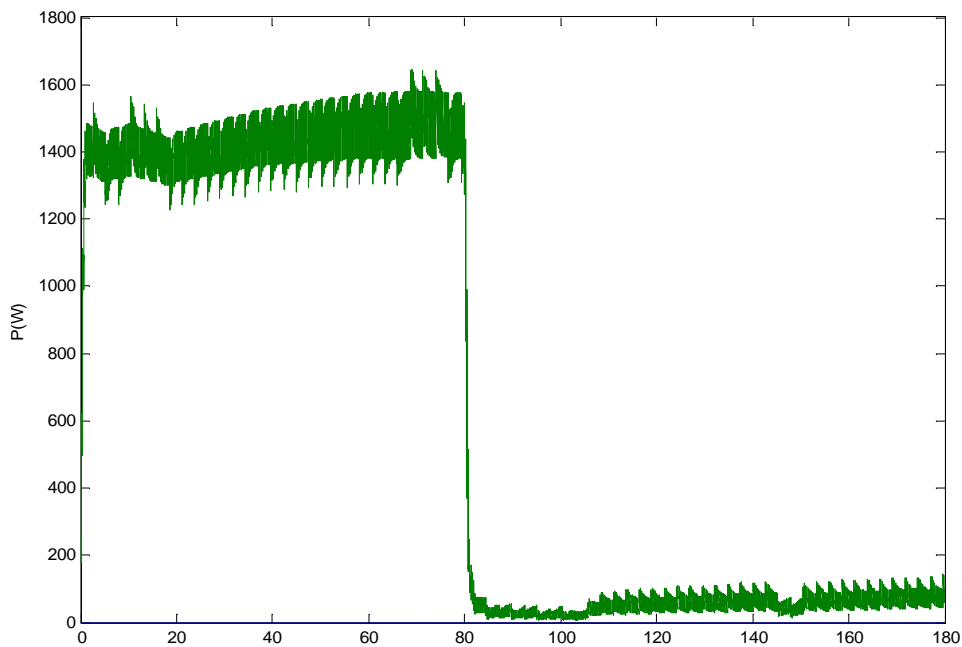
Σχ. 4-15

Προσομοιωμένη ισχύς εξόδου σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s



Σχ. 4-16

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 10 m/s σε 4 m/s



Σχ. 4-17

Προσομοιωμένη ισχύς εξόδου σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 10 m/s σε 4 m/s

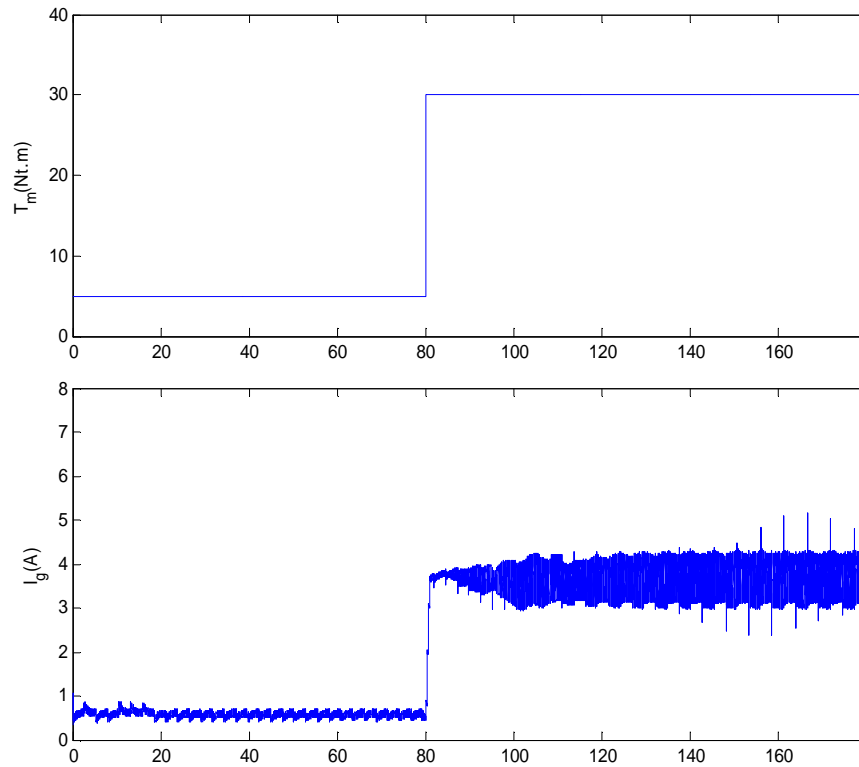
Στα Σχ. 4-14 και 4-15 παρατηρείται ότι σε όλες τις κυματομορφές παρουσιάζονται έντονες διακυμάνσεις οι οποίες οφείλονται στις συνεχείς μικρές αλλαγές και συγκρίσεις σε κάθε βήμα που κάνει ο ελεγκτής. Το ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας έχει σημαντική κυμάτωση ενώ αυξάνεται σε 2 sec μέχρι τη μέγιστη τιμή του χωρίς όμως να μπορεί να σταθεροποιηθεί σε αυτή. Η τάση των πυκνωτών δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη κυμάτωση εξαιτίας της λειτουργίας του διακοπτικού στοιχείου με λόγο κατάτμησης D_2 που αναλαμβάνει να σταθεροποιεί την τάση μέσω εκφόρτισης σε ωμική αντίσταση. Η κυματομορφή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα πριν και μετά την αύξηση δεν είναι σταθερή ενώ οι συνεχείς βηματικές μεταβολές καθιστούν δύσκολη τη διάκριση της στιγμιαίας αύξησης των αντίστοιχων μεγεθών στα 80 sec.

Στο χρονικό διάστημα από 0 έως 80 sec το σύστημα προσπαθεί να λειτουργήσει στην περιοχή μέγιστης ισχύος για ταχύτητα ανέμου με τιμή 4 m/sec. Η μέση ισχύς εξόδου για 4m/s είναι 93.8 W. Παρατηρώντας ότι ο συντελεστής ισχύος C_p αυξάνεται συνεχώς μέχρι να φτάσει πολύ κοντά στη μέγιστη τιμή του στα 80 sec, διακρίνεται μία βαθμιαία αύξηση του C_p . Τη χρονική στιγμή 80 sec η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται στα 10 m/s και ο C_p μειώνεται στιγμιαία. Αξιοσημείωτο είναι ότι αργεί να επανέλθει με αποτέλεσμα να αυξάνεται μέχρι τα 180 sec όπου και έχει τιμή μέγιστη αλλά όχι και τη βέλτιστη. Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου έχει ως αποτέλεσμα και τη σταδιακή αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Η παραγόμενη ισχύς παρουσιάζει έντονη διακύμανση ενώ μόλις στο τέλος της προσομοίωσης κατορθώνει να φτάσει τη μέγιστη ισχύ της. Η μέση ισχύς εξόδου είναι 1449 W.

Ομοίως στα Σχ. 4-16 και 4-17 παρουσιάζεται η απόκριση του συστήματος σε μια στιγμιαία πτώση της ταχύτητας του ανέμου από 10 m/s σε 4 m/s. Η συμπεριφορά του συστήματος είναι παρόμοια με την αντίστοιχη για την βηματική αύξηση του ανέμου. Ο συνολικός χρόνος της πτώσης του ανορθωμένου ρεύματος είναι 2 sec, χρόνος πολύ μικρός. Ο συντελεστής ισχύος C_p κατορθώνει στο χρονικό διάστημα των 0-80 sec να βρίσκεται κοντά στη βέλτιστη λειτουργία ενώ στην συνέχεια παρουσιάζει την ίδια αργή βηματική αύξησή του.

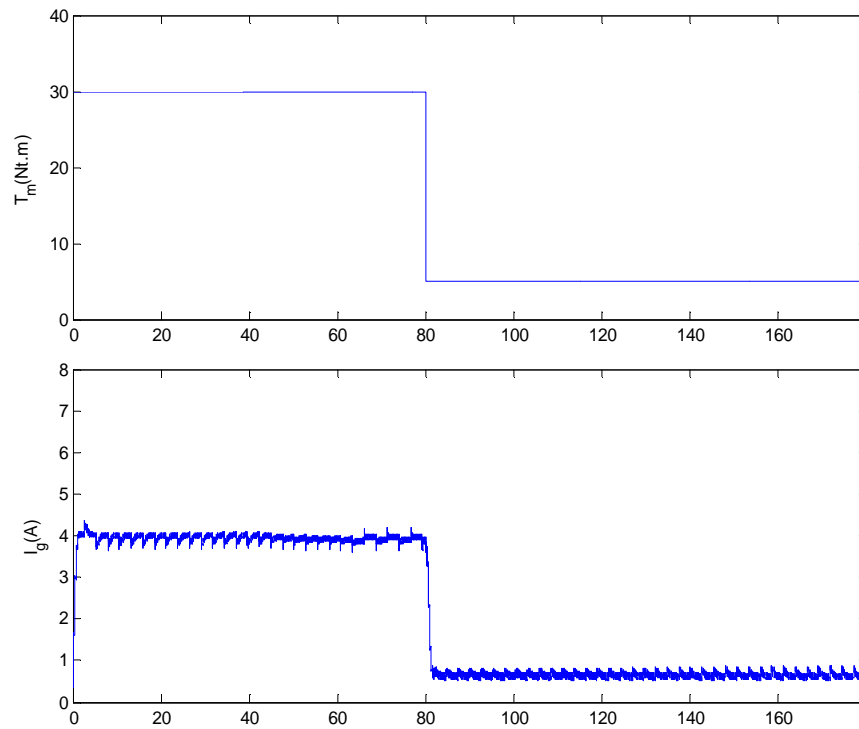
4.5. Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της μηχανικής ροπής

Στα Σχ. 4-18 και 4-19 παρουσιάζεται η απόκριση του συστήματος σε βηματική αύξηση και μείωση της μηχανικής ροπής εισόδου χωρίς να υπολογίζεται από το αεροδυναμικό κομμάτι του μοντέλου. Η μεταβολή της μηχανικής ροπής γίνεται από τα 5 Nt.m στα 30 Nt.m και αντίστροφα, στα 80 sec, μια απότομη μεταβολή γίνεται με σκοπό να ελέγξουμε για άλλη μια φορά το σύστημα σε ακραίες τιμές. Παρατηρείται λοιπόν στο Σχ.3-46 ότι το ανορθωμένο ρεύμα αυξάνεται με συνολικό χρόνο 1.2 sec και στο Σχ. 3-47 ότι μειώνεται με 1.5 sec ενώ χαρακτηρίζεται από έντονη κυμάτωση.



Σχ. 4-18

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ροπή εισόδου από 5 Nt.m σε 30 Nt.m

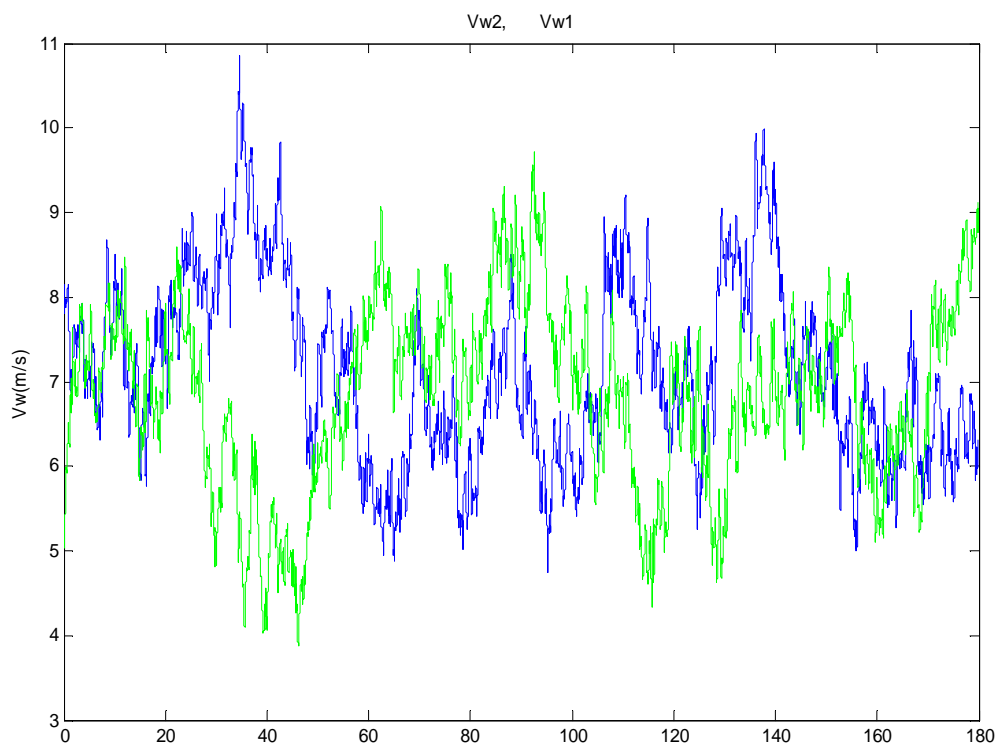


Σχ. 4-19

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ροπή εισόδου από 30 Nt.m σε 5 Nt.m

4.6. Απόκριση του συστήματος σε εξομοιωμένη πραγματική κατάσταση λειτουργίας

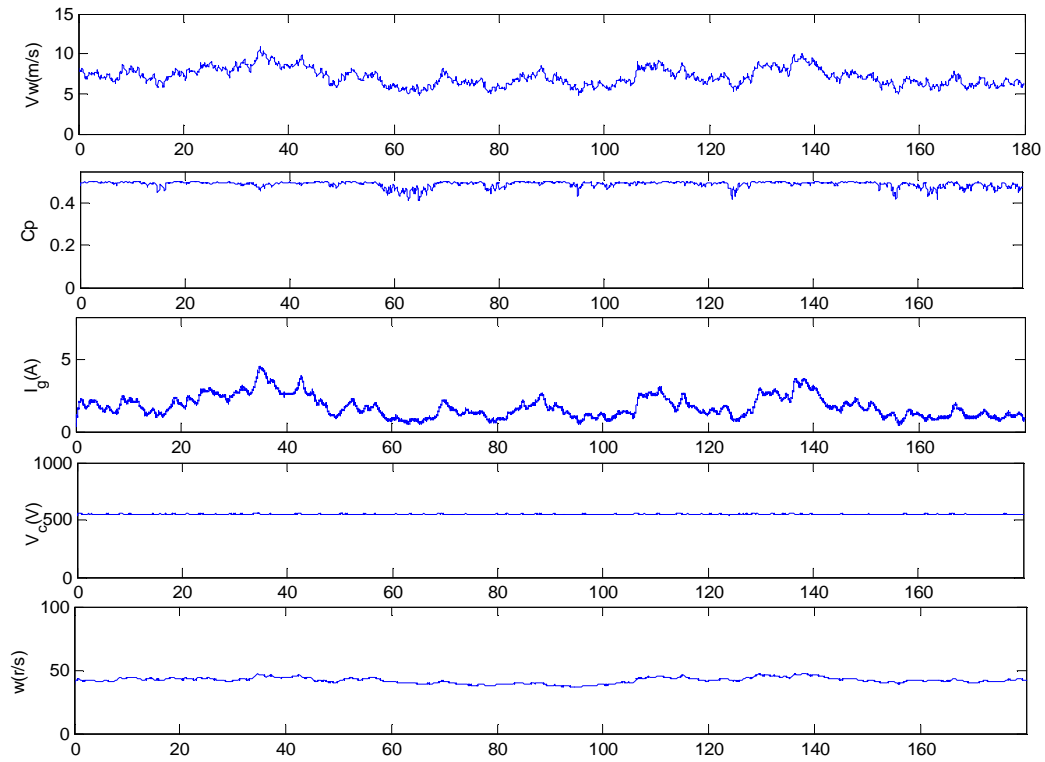
Οι δύο χρονοσειρές ανέμου απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 4-20

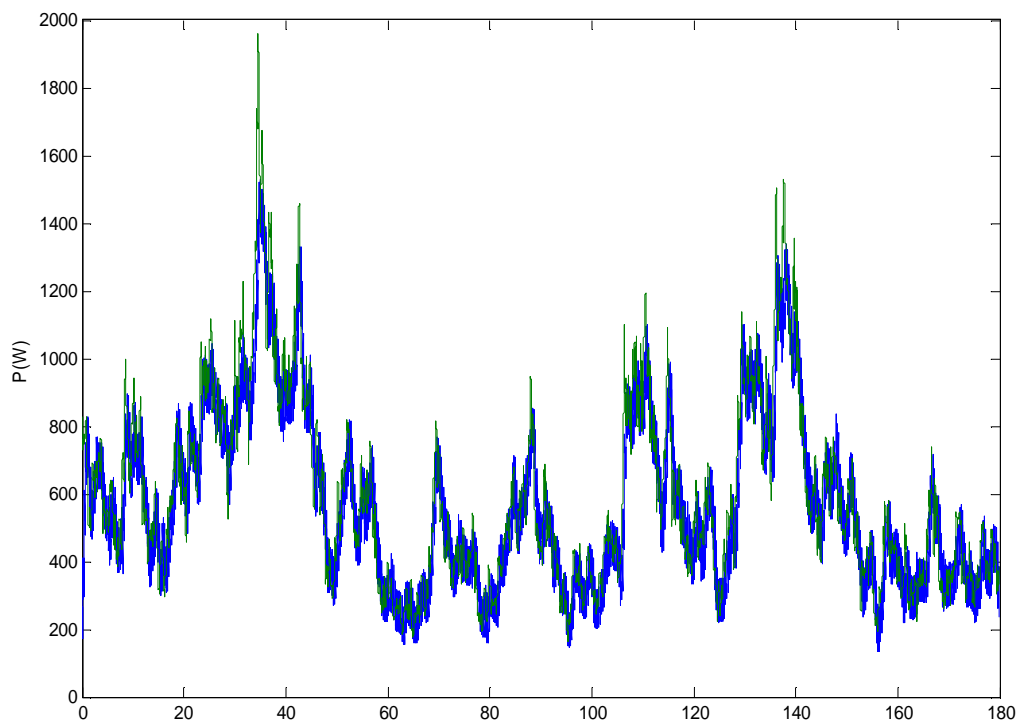
Χρονοσειρές ανέμων V_1 και V_2 οι οποίες εφαρμόζονται στα προσομοιωμένα και πειραματικά μοντέλα.

Αρχικά εισάγεται στο μοντέλο του Σχ. 4-3 η V_2 και πραγματοποιείται η προσομοίωση. Τα μεγέθη που λαμβάνονται έχουν ως εξής:



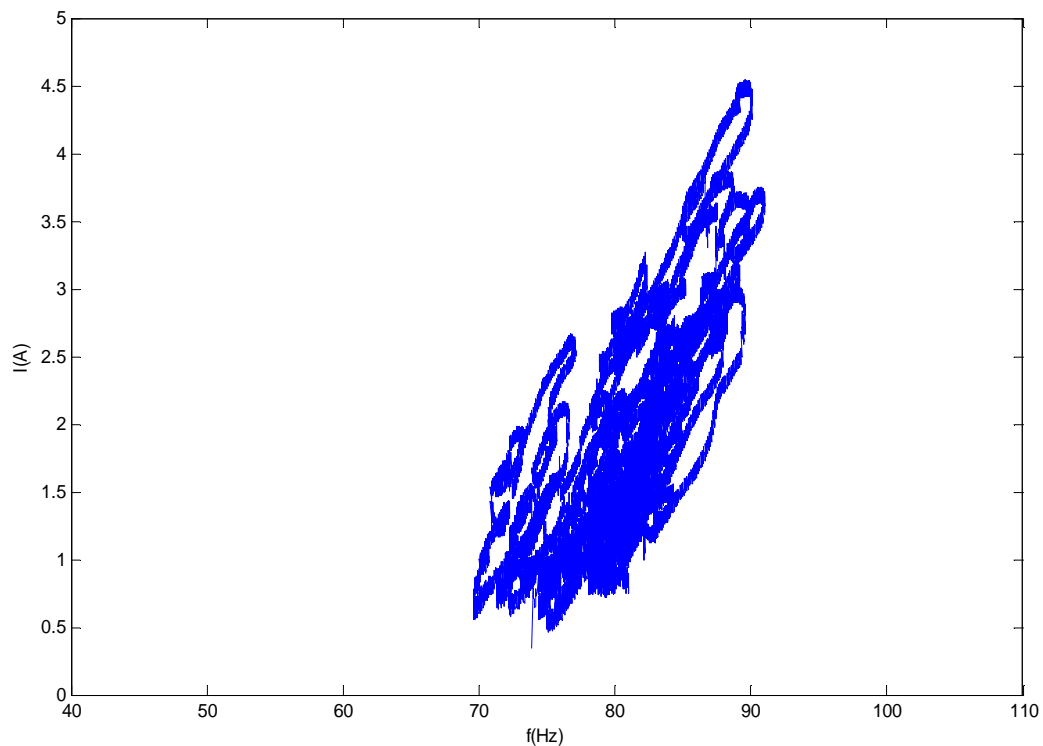
Σχ. 4-21

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας για χρονοσειρά ανέμου V_2



Σχ. 4-22

Προσομοιωμένη ισχύς εξόδου (με μπλε χρώμα) και θεωρητικά μέγιστη μηχανική ισχύς (με πράσινο χρώμα) σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας για χρονοσειρά ανέμου V_2



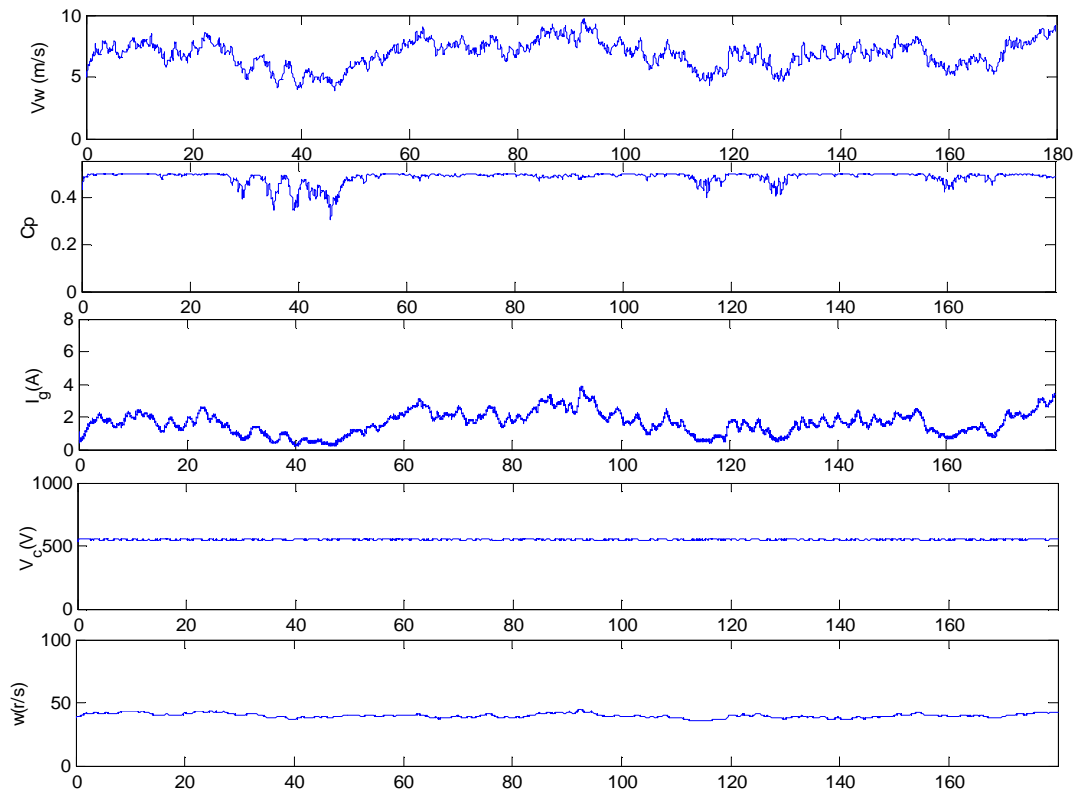
Σχ. 4-23

Χαρακτηριστική καμπύλη ηλεκτρικής συχνότητας – ανορθωμένου ρεύματος γεννήτριας που ο αλγόριθμος επιτυγχάνει για χρονοσειρά ανέμου V_2

Το μοντέλο φαίνεται να μην αυξάνει της στροφές της ανεμογεννήτριας σε ακραίες τιμές αφού έχει μέγιστη γωνιακή ταχύτητα για τη δεδομένη χρονοσειρά ανέμου, 47.6 r/s. Παρατηρείται είναι ότι ο συντελεστής ισχύος καταφέρνει γρήγορα να βρίσκεται σε τιμές πολύ κοντά στη βέλτιστη.

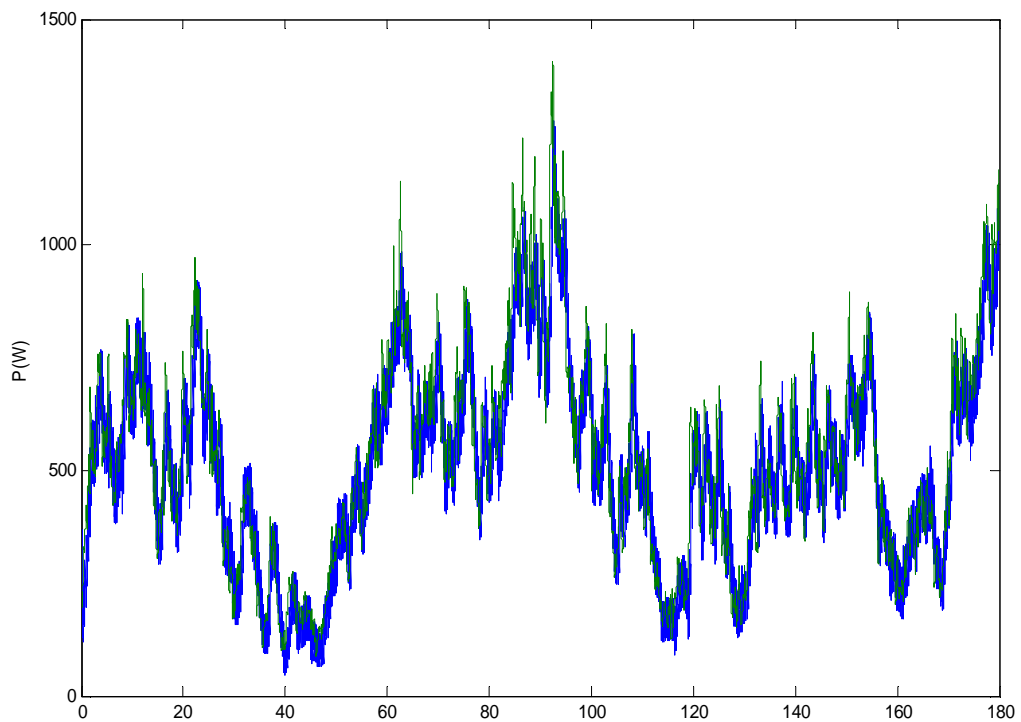
Τέλος η μέση ισχύς εξόδου είναι 574.8 W, τιμή κοντά στη μέση μέγιστη θεωρητική ισχύ που πρέπει να προσλαμβάνει το σύστημα για τη δεδομένη χρονοσειρά η οποία είναι 596.2 W. Στο Σχ.4-22 παρατηρείται ότι η προσομοιωμένη ισχύς εξόδου ακολουθεί την θεωρητική ισχύ και στις απότομες κορυφές της χρονοσειράς. Στο Σχ. 4-23 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη συχνότητας ρεύματος που τελικά το σύστημα επιτυγχάνει. Δεν μοιάζει με την ιδανική χαρακτηριστική αφού διακρίνεται από μεγάλο φάσμα τιμών. Αυτή η συμπεριφορά είναι αναμενόμενη αφού το μοντέλο δεν βασίζεται στη λογική της χαρακτηριστικής καμπύλης ροπής στροφών αλλά σε διαφορετικό αλγόριθμο.

Εισάγεται στο μοντέλο του Σχ. 4-3 η V_1 και πραγματοποιείται η προσομοίωση. Τα μεγέθη που λαμβάνονται έχουν ως εξής:



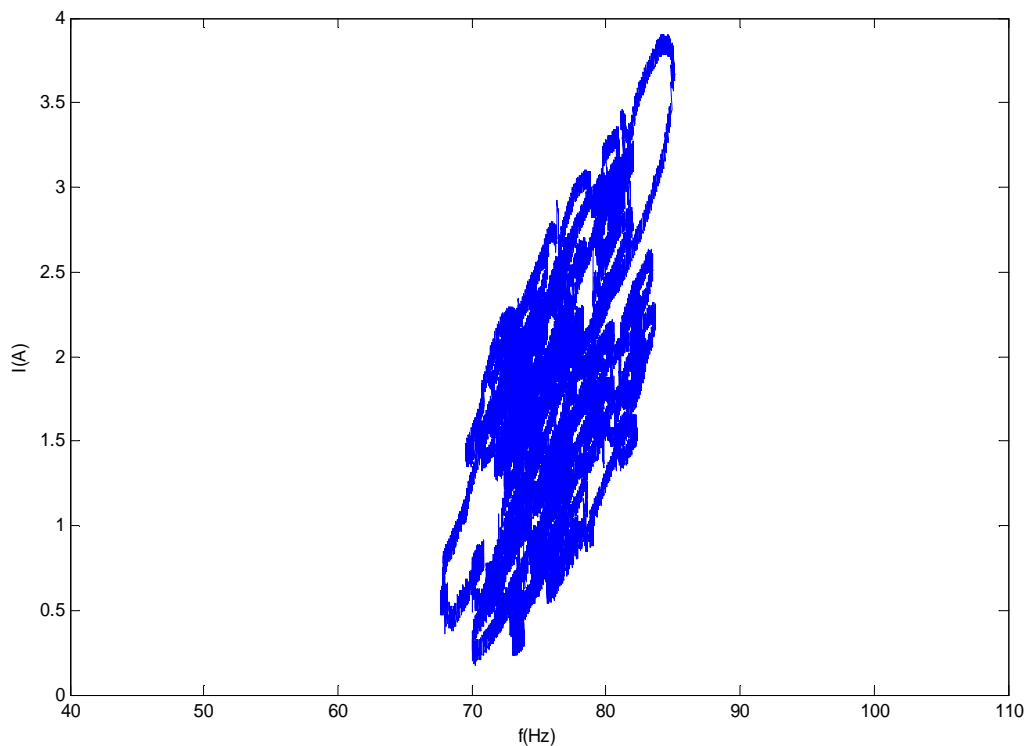
Σχ. 4-24

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας για χρονοσειρά ανέμου V_1



Σχ. 4-25

Προσομοιωμένη ισχύ εξόδου (με μπλε χρώμα) και θεωρητικά μέγιστη μηχανική ισχύς (με πράσινο χρώμα) σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας για χρονοσειρά ανέμου V_1

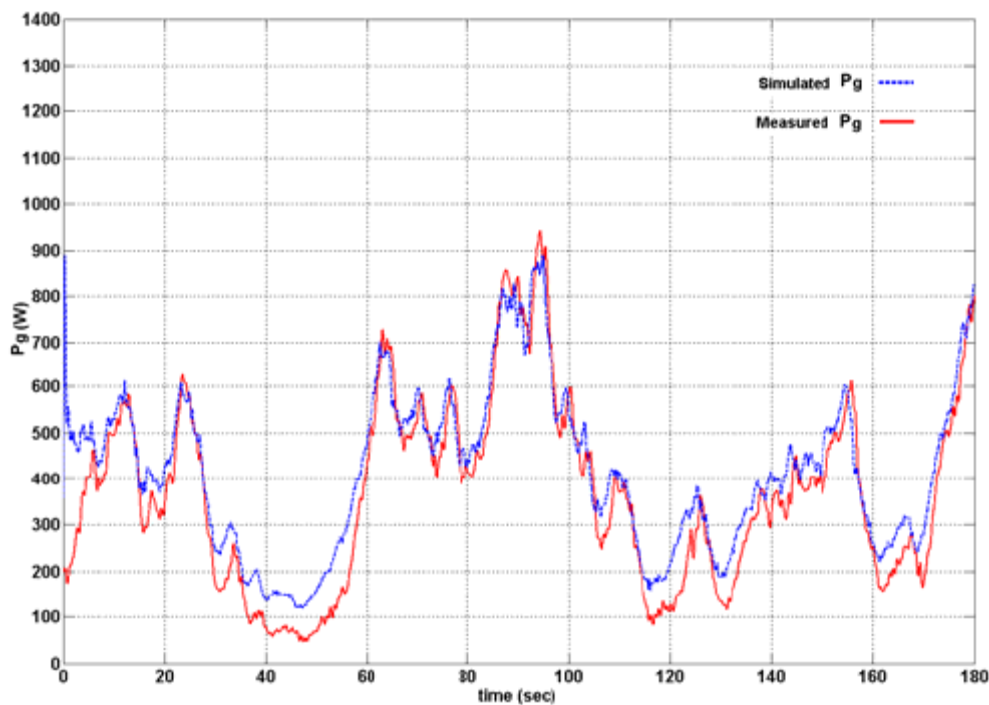


Σχ. 4-26

Χαρακτηριστική καμπύλη ηλεκτρικής συχνότητας – ανορθωμένου ρεύματος γεννήτριας που ο αλγόριθμος επιτυγχάνει για χρονοσειρά ανέμου V_1

Από τα Σχ. 4-24 έως 4-26 παρατηρείται ότι έχουμε παρόμοια συμπεριφορά του συστήματος για χρονοσειρά ανέμου V_1 με την απόκριση τους συστήματος για χρονοσειρά ανέμου V_2 . Και πάλι το μοντέλο φαίνεται να μην αυξάνει της στροφές της ανεμογεννήτριας σε ακραίες τιμές αφού έχει μέγιστη γωνιακή ταχύτητα για τη δεδομένη χρονοσειρά ανέμου, 44.55 r/s. Ο συντελεστής ισχύος καταφέρνει να διατηρείται στη βέλτιστη τιμή του. Η μέση ισχύ εξόδου είναι 508.6 W, τιμή πολύ κοντά στη μέση μέγιστη ισχύ εξόδου που πρέπει να αποδίδει το σύστημα για τη δεδομένη χρονοσειρά η οποία είναι 528.4 W. Στο Σχ. 4-25 παρατηρείται ότι η προσομοιωμένη ισχύ εξόδου ακολουθεί την θεωρητική ισχύ. Στο Σχ. 4-26 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη συχνότητας ρεύματος που τελικά το σύστημα επιτυγχάνει. Μοιάζει αρκετά με αυτή του Σχ. 4-23

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας στο εργαστηριακό πείραμα για απομονωμένη λειτουργία για χρονοσειρά ανέμου V_1 .



Σχ. 4-27

Μέτρηση ισχύς εξόδου απομονωμένης λειτουργίας για χρονοσειρά ανέμου V_1

Το σύστημα στην πράξη έχει μέση ισχύ εξόδου 459.7 W σημαντικά μικρότερη από τη μέγιστη μηχανική ισχύ με τιμή 528.4W και 48.9 W μικρότερη από την προσομοιωμένη. Παρατηρείται λοιπόν ότι το μοντέλο στην πράξη υστερεί του προσομοιωμένου με κίνδυνο σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου να αποδίδει πολύ μικρή ισχύ και να αργεί να επανέλθει όπως παρατηρείται από το Σχ 4-27.

4.7. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Η μέθοδος ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος μέσω συνεχών συγκρίσεων και αλλαγών δεν επηρεάζεται από ανακρίβειες της χαρακτηριστικής καμπύλης της ανεμογεννήτριας και τυχόν αλλαγές αυτής με την πάροδο του χρόνου. Επίσης, το μοντέλο υλοποίησης της μεθόδου δεν είναι πολύπλοκο ως προς τον σχεδιασμό αλλά και τη λειτουργία του.

Ωστόσο, η επιλογή του βήματος μεταβολής του λόγου κατάτμησης ΔD καθώς και της αρχικής τιμής του D είναι εξαιρετικής σημασίας για τη συμπεριφορά του συστήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καθίσταται το σύστημα επιρρεπές σε πιθανές ακατάλληλες αρχικοποιήσεις του λόγου D . Η καταλληλότητα ή μη των συγκεκριμένων τιμών εξαρτάται από την εκάστοτε κατάσταση του συστήματος όπως π.χ. παρούσα ταχύτητα ανέμου, αριθμός στροφών κ.λ.π.. Έτσι, μία αρχικοποίηση με υψηλή τιμή του λόγου D για χαμηλό άνεμο και τη μηχανή βρισκόμενη σε αδράνεια, θα είχε ως αποτέλεσμα το σύστημα να μη μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά όπως φάνηκε και στο Σχ. 4-13. Όσον αφορά στην επιλογή του βήματος ΔD , συμπεραίνουμε πως ένα μικρό βήμα δίνει ένα πιο αργό αλλά ακριβέστερο στην παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος σύστημα, ενώ ένα μεγάλο ΔD δίνει ένα γρήγορο αλλά λιγότερο ακριβές σύστημα.

Μειονέκτημα του συστήματος είναι επίσης οι σημαντικές κυματώσεις, οι οποίες παρατηρούνται τόσο στις κυματομορφές του ανορθωμένου ρεύματος όσο και της ισχύος εξόδου. Τέλος, όταν εφαρμοσθεί στην είσοδο του συστήματος εξομοιωμένος άνεμος, το σύστημα φαίνεται να ακολουθεί το σημείο μέγιστης ισχύος, ωστόσο σε δεδομένη χρονική στιγμή όταν η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται απότομα το σύστημα δείχνει να μην ανταποκρίνεται ικανοποιητικά.

Κεφάλαιο 5

Μέθοδος Προσδιορισμού του Σημείου Μέγιστης Ισχύος Βασισμένη στην Ασαφή Λογική

5.1. Εισαγωγή

Το 1965 ο καθηγητής L.A. Zadeh διατύπωσε για πρώτη φορά τη θεωρία της ασαφούς λογικής (fuzzy logic) υποστηρίζοντας ότι οι περισσότερες ανθρώπινες σκέψεις είναι ασαφείς, και ότι η δυαδική λογική δεν είναι σε θέση να προσομοιώσει αυτό τον τρόπο σκέψης. Αυτή η θεωρία πρότεινε τη συνάρτηση συμμετοχής, η οποία κάλυπτε ένα πεδίο ορισμού και έπαιρνε τιμές σε όλο το διάστημα $[0, 1]$. Δέκα χρόνια αργότερα άρχισε να προκαλεί το ενδιαφέρον των επιστημόνων και σταδιακά αναγνωρίστηκε ευρέως από την επιστημονική κοινότητα, έχοντας ως κύρια εφαρμογή τον έλεγχο συστημάτων. Οι κύριοι λόγοι που συνέβαλαν στην αποδοχή των ασαφών συστημάτων ελέγχου σχετίζονταν με την ευκολία του σχεδιασμού τους και την απλότητά τους, καθώς και με την ιδιότητά τους να ελέγχουν πολύπλοκες και συνεχώς μεταβαλλόμενες διαδικασίες.

Με τον παραδοσιακό τρόπο η σχεδίαση ενός ελεγκτή είναι βασισμένη στην απόλυτη περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου του συστήματος προς έλεγχο. Σ' αυτή την περίπτωση ένα ευφυή κατά κάποιο τρόπο σύστημα ελέγχου, το οποίο να δίνει λύση για μια μεγάλη περιοχή μεταβολής δεδομένων είναι απαραίτητο. Η ασαφής λογική σε αντίθεση με τη δυαδική λογική ασχολείται με συστήματα τα οποία έχουν μια ασάφεια, μια αβεβαιότητα. Η ασαφής λογική τείνει να μιμηθεί την ανθρώπινη σκέψη, η οποία τις περισσότερες των περιπτώσεων είναι ασαφής. Στην δυαδική λογική ένα αντικείμενο ανήκει σε μια σαφή κατηγορία ή δεν ανήκει. Στην άλλη περίπτωση της ασαφούς λογικής ένα αντικείμενο μπορεί να είναι σε οποιαδήποτε κατηγορία έχει οριστεί αλλά με μια τιμή που το χαρακτηρίζει και η οποία παίρνει τιμές στο διάστημα $[0, 1]$. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει την ασαφή λογική να διαχειρίζεται αβέβαιες καταστάσεις και ασαφείς έννοιες όπως υπάρχουν στη φύση.

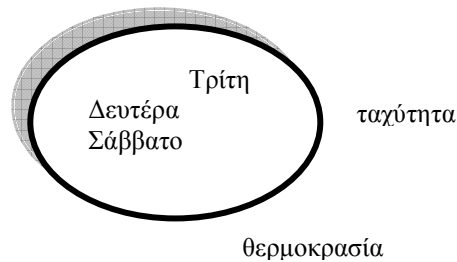
Μέσω ενός συνόλου απλών λεκτικών κανόνων (linguistic rules), η ασαφής λογική μπορεί να μοντελοποιήσει τη γνώση και την εμπειρία ενός πεπειραμένου χρήστη. Έτσι διαμορφώνεται ένα σύστημα βασισμένο στη γνώση (knowledge based system) το οποίο οδηγεί σε απλούστερα μοντέλα που είναι πιο εύχρηστα και πιο κοντά στη ανθρώπινη λογική. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εφικτός ο έλεγχος συστημάτων ακόμα και σε συνθήκες λειτουργίας στις οποίες οι κλασικές μέθοδοι ελέγχου αποτυγχάνουν [1].

5.2. Θεωρητική Ανάλυση και Βασικές έννοιες ασαφούς λογικής

5.2.1. Ασαφές σύνολο και συνάρτηση συμμετοχής

Ένας βασικός όρος της ασαφούς λογικής είναι το ασαφές σύνολο (fuzzy set). Ένα ασαφές σύνολο είναι ένα σύνολο του οποίου τα όρια δεν είναι απόλυτα καθορισμένα και το οποίο περιέχει στοιχεία με διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής.

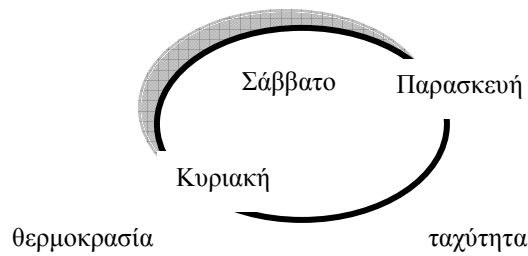
Για να γίνει πιο κατανοητή η έννοια του ασαφούς συνόλου, θα περιγραφεί αρχικά η έννοια του κλασσικού συνόλου (crisp set). Ένα κλασσικό σύνολο περιλαμβάνει ή όχι ένα συγκεκριμένο στοιχείο. Για παράδειγμα, το σύνολο «ημέρες της εβδομάδας», Σχ. 5-1, αδιαμφισβήτητα περιέχει τα στοιχεία Δευτέρα, Τρίτη και Σάββατο. Το ίδιο σύνολο αδιαμφισβήτητα δεν περιλαμβάνει τα στοιχεία ταχύτητα, θερμοκρασία. Ο παραπάνω ορισμός του συνόλου είναι σύμφωνος με την αριστοτελική λογική, η οποία υποστηρίζει ότι το X ανήκει είτε στο σύνολο « A » είτε στο σύνολο «όχι A ».



Σχ. 5-1

Απεικόνιση του κλασσικού συνόλου «ημέρες της εβδομάδας».

Στη συνέχεια, ας θεωρήσουμε το σύνολο «ημέρες του σαββατοκύριακου». Το Σχ. 5-2 αποτελεί μια προσπάθεια ταξινόμησης των ημερών του σαββατοκύριακου. Όλοι θα συμφωνήσουν ότι το Σάββατο και η Κυριακή ανήκουν σ' αυτό. Όσον αφορά στην Παρασκευή όμως; Οι περισσότεροι τη θεωρούμε μέρος του σαββατοκύριακου, σύμφωνα με τη λογική όμως δε θα έπρεπε να την τοποθετήσουμε σε αυτό το σύνολο. Θα μπορούσαμε να τοποθετήσουμε την Παρασκευή στο όριο ανάμεσα στα σύνολα «ημέρες του σαββατοκύριακου» και «όχι ημέρες του σαββατοκύριακου», θεωρώντας την στοιχείο και των δύο συνόλων. Η λογική των κλασσικών συνόλων δε θα επέτρεπε μια τέτοια κατάσταση. Η ανθρώπινη εμπειρία όμως υποστηρίζει ότι το να κατατάσσουμε μια έννοια στο όριο μεταξύ δύο συνόλων αποτελεί μια καθημερινή πραγματικότητα. Η ασαφής λογική είναι ουσιαστικά μια γενίκευση της δίτιμης (Boolean) λογικής. Αν αντιστοιχίσουμε στο «αληθές» την αριθμητική τιμή '1' και στο «ψευδές» την τιμή '0', μπορούμε να πούμε ότι η ασαφής λογική επιτρέπει και ενδιάμεσες τιμές όπως το '0.2' και το '0.8'. Για παράδειγμα:

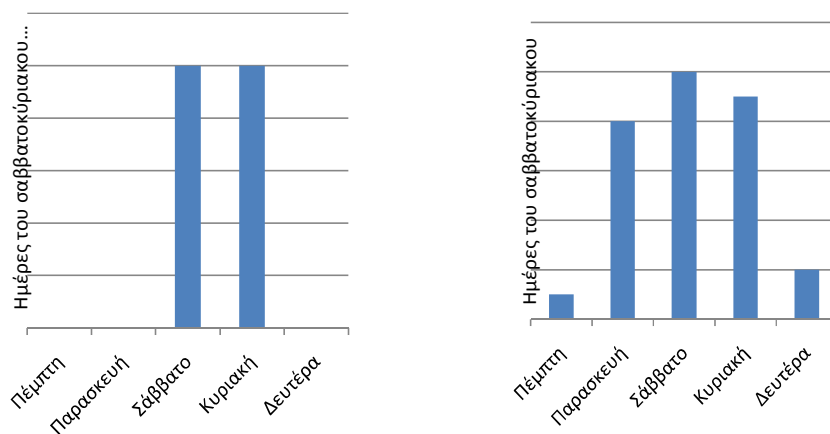


Σχ. 5-2

Απεικόνιση του ασαφούς συνόλου «ημέρες του σαββατοκύριακου».

- Ανήκει το Σάββατο στο σαββατοκύριακο;
- 1 (ναι ή «αληθές»).
- Ανήκει η Τρίτη στο σαββατοκύριακο;
- 0 (όχι ή «ψευδές»).
- Ανήκει η Παρασκευή στο σαββατοκύριακο;
- 0.8 (κατά το μεγαλύτερο μέρος ναι, αλλά όχι εντελώς).
- Ανήκει η Κυριακή στο σαββατοκύριακο;
- 0.95 (ναι, αλλά όχι όσο και το Σάββατο).

Στο Σχ. 5-3, στα αριστερά φαίνεται το διάγραμμα της συμμετοχής κάποιων ημερών της εβδομάδας στο σύνολο «ημέρες του σαββατοκύριακου» με τον κλασσικό ορισμό του συνόλου, ενώ στα δεξιά με τον ασαφή ορισμό.



α) κλασσικός ορισμός

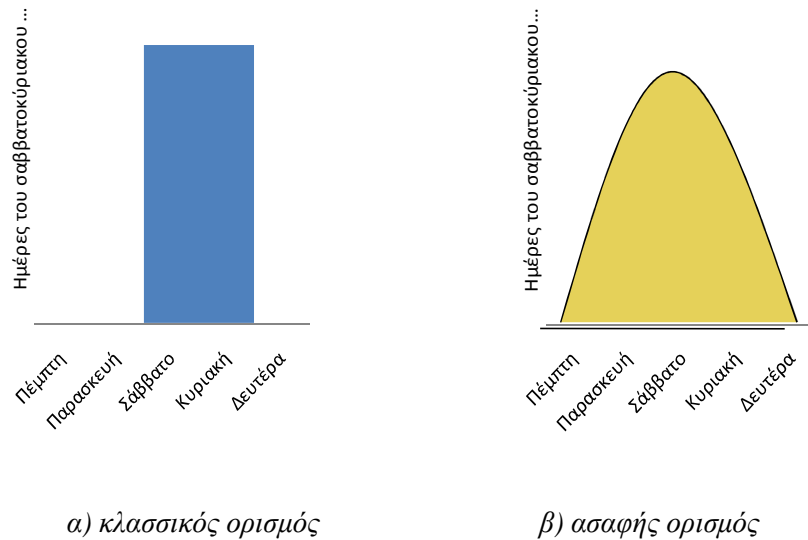
β) ασαφής ορισμός

Σχ. 5-3

Διάγραμμα συμμετοχής στο σύνολο «Ημέρες του Σαββατοκύριακου» (διακριτή μορφή).

Αν στα παραπάνω διαγράμματα ο άξονας των ημερών πάρει συνεχείς τιμές τα διαγράμματα θα έχουν την μορφή του Σχ. 5-4. Έτσι, μπορούμε να ορίσουμε το βαθμό στον οποίο κάθε δεδομένη στιγμή ανήκει στο σαββατοκύριακο. Στο διάγραμμα στα αριστερά παρατηρούμε ότι στα μεσάνυχτα της Παρασκευής ο βαθμός συμμετοχής

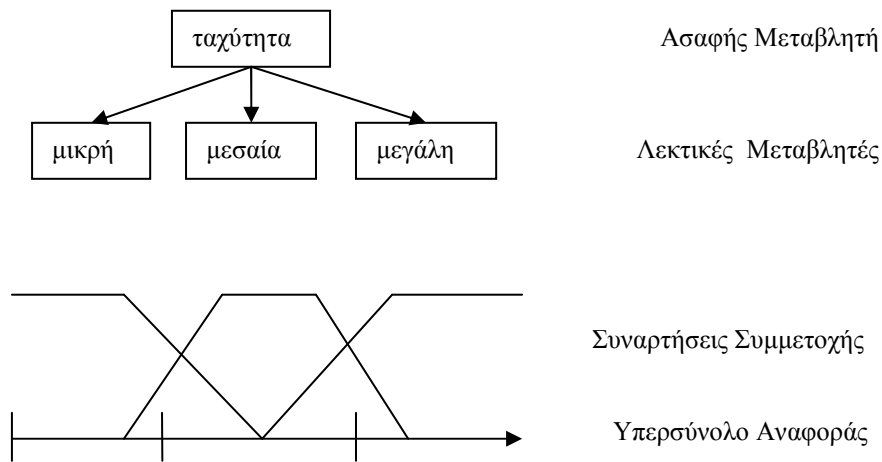
στο σύνολο «ημέρες του σαββατοκύριακου» αλλάζει βηματικά από το '0' στο '1'. Αυτός είναι βέβαια ένας τρόπος να ορίσουμε το σαββατοκύριακο, αλλά δεν αντιπροσωπεύει τον ορισμό που η πλειοψηφία των ανθρώπων έχει στο νου της για το σαββατοκύριακο.



Σχ. 5-4
Διάγραμμα συμμετοχής στο σύνολο «Ημέρες του Σαββατοκύριακου» (συνεχής μορφή).

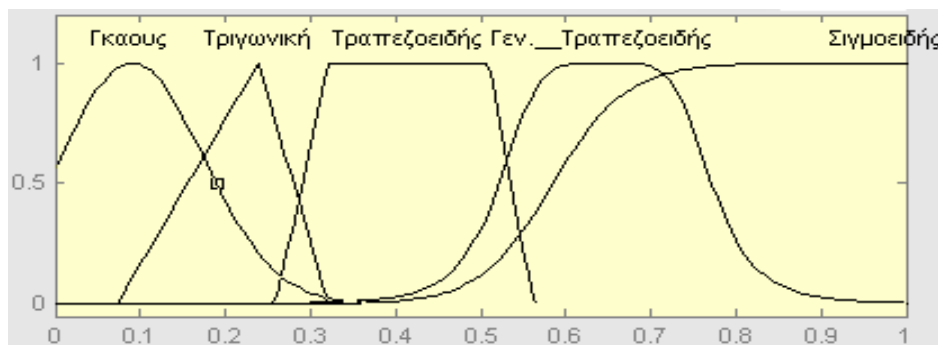
Η καμπύλη στο διάγραμμα στα δεξιά παρουσιάζει πιο ομαλές μεταβολές και εκφράζει το γεγονός ότι η Παρασκευή και κατά ένα μικρό βαθμό και η Δευτέρα συμμετέχουν στην έννοια σαββατοκύριακο και αξίζουν ένα βαθμό συμμετοχής στο σύνολο «Ημέρες του Σαββατοκύριακου». Η καμπύλη αυτή είναι γνωστή ως συνάρτηση συμμετοχής (membership function). Μια συνάρτηση συμμετοχής, η οποία συνήθως συμβολίζεται με το γράμμα μ , είναι μια καμπύλη η οποία ορίζει σε ποιο βαθμό κάθε στοιχείο του ασαφούς συνόλου αντιστοιχίζεται σε ένα βαθμό συμμετοχής στο σύνολο ανάμεσα στο '0' και το '1'. Το σύνολο στο οποίο παίρνει τιμές η κάθε είσοδος αναφέρεται ως το υπερσύνολο αναφοράς της (universe of discourse). Το διάστημα για το οποίο η συνάρτηση συμμετοχής παίρνει θετικές τιμές ονομάζεται σύνολο στήριξης (support set) [10].

Στη συνέχεια ακολουθεί ένα ακόμα παράδειγμα κλασικών και ασαφών συνόλων, ώστε να εξηγηθούν καλύτερα οι βασικές έννοιες της ασαφούς λογικής. Έστω η ασαφής μεταβλητή «ταχύτητα». Αυτή μπορεί να περιγραφεί από τις λεκτικές μεταβλητές (linguistic variables) «μικρή», «μεσαία» και «μεγάλη», Σχ. 5-5. Σε κάθε μια από τις λεκτικές μεταβλητές αντιστοιχεί ένα ασαφές σύνολο που περιγράφεται από τη συνάρτηση συμμετοχής του.



Σχ. 5-5
Όροι της ασαφούς λογικής.

Οι τιμές των συναρτήσεων συμμετοχής ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$. Η μορφή των συναρτήσεων συμμετοχής ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή. Οι συνηθέστερες μορφές συναρτήσεων συμμετοχής είναι η τριγωνική, η τραπεζοειδής και η γκαουσιανή, Σχ. 5-6.



Σχ. 5-6
Μορφές συναρτήσεων συμμετοχής.

5.2.2. Πράξεις ασαφούς λογικής

Οι βασικές πράξεις της δυαδικής λογικής ισχύουν και στη θεωρία της ασαφούς λογικής, και παρατίθενται παρακάτω:

Ένωση:

Η ένωση δύο ασαφών συνόλων A και B είναι ένα ασαφές σύνολο C το οποίο συμβολίζεται με $C=A \cup B$. Η συνάρτηση συμμετοχής του C προκύπτει από τις συναρτήσεις συμμετοχής των A και B όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\mu_{A \cup B} = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (5-1)$$

Αυτή σχετίζεται με τη λογική πράξη OR.

Τομή:

Η τομή δύο ασαφών συνόλων A και B είναι ένα ασαφές σύνολο C το οποίο συμβολίζεται με $C=A \cap B$. Η συνάρτηση συμμετοχής του C προκύπτει από τις συναρτήσεις συμμετοχής των A και B όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\mu_{A \cap B} = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (5-2)$$

Αυτή σχετίζεται με τη λογική πράξη AND.

Συμπλήρωμα:

Το συμπληρωματικό ενός ασαφούς συνόλου A είναι ένα ασαφές σύνολο A το οποίο συμβολίζεται με I_A . Η συνάρτηση συμμετοχής προκύπτει όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\mu_{I_A} = 1 - \mu_A(x) \quad (5-3)$$

Αυτή σχετίζεται με τη λογική πράξη NOT.

5.2.3. Ασαφείς κανόνες (fuzzy rules)

Οι πράξεις σε έναν ασαφή ελεγκτή είναι βασισμένες σε μία προγραμματιζόμενη σχηματική απεικόνιση η οποία μιμείται τον ανθρώπινο τρόπο άντλησης πληροφοριών. Σε αντίθεση με τη χρήση πολύπλοκων μαθηματικών σχέσεων στο ασαφή έλεγχο ως νόμοι, χρησιμοποιούνται οι κανόνες IF-THEN. Ένας ασαφής κανόνας έχει δύο μέρη την υπόθεση (if-πρόταση) και το συμπέρασμα (then-πρόταση). Η ασαφής υπόθεση μπορεί να είναι συνδυασμός πολλών απλών υποθέσεων με τη χρήση πολλών λογικών τελεστών όπως είναι AND (τομή), OR (ένωση), NOT (άρνηση).

Οι ασαφείς κανόνες γενικά περιγράφονται ως εξής :

If x is A and y is B then z is C

όπου x,y είναι οι ασαφή είσοδοι του συστήματος, z η ασαφής έξοδος του συστήματος A,B, και C είναι λεκτικές τιμές (ασαφή σύνολα).

Ο καθορισμός πολλών ασαφών κανόνων φαίνεται παρακάτω:

R₁: If x is A₁ and y is B₁ then z is C₁

R₂: If x is A₂ and y is B₂ then z is C₂

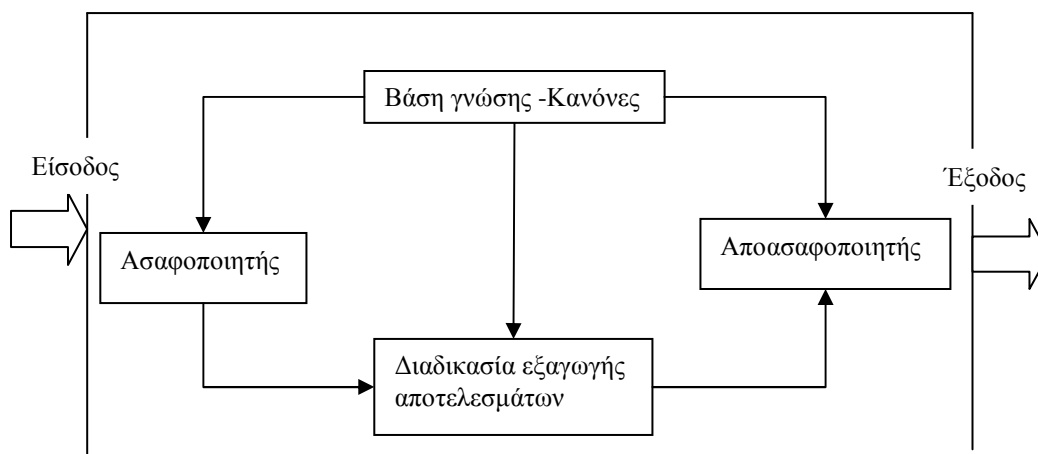
R₃: If x is A₃ and y is B₃ then z is C₃

R_n: If x is A_n and y is B_n then z is C_n

Επειδή κάθε κανόνας χρησιμοποιεί διαφορετικές παραμέτρους για τη διαδικασία υπολογισμού, από κάθε κανόνα προκύπτει διαφορετική έξοδος. Αν έχουμε μόνο μία είσοδο και επτά κανόνες, τότε θα είχαμε επτά συνδυασμούς ασαφών κανόνων. Αν είχαμε δύο εισόδους σε περίπτωση που θέλαμε να ελέγξουμε την τάση εξόδου του μετατροπέα, με τους αντίστοιχους επτά κανόνες, τότε θα είχαμε σαράντα εννέα διαφορετικούς συνδυασμούς ασαφών κανόνων.

5.2.4. Βασική δομή της ασαφούς λογικής

Μια διαδικασία ενός αλγορίθμου ελέγχου, ο οποίος χρησιμοποιεί ασαφή λογική, ονομάζεται Ασαφής Έλεγχος. Ο ασαφής ελεγκτής ουσιαστικά αφομοιώνει την ανθρώπινη συμπεριφορά και αντίδραση συνήθως αυτή του σχεδιαστή του. Ο συμβατικός έλεγχος είναι βασισμένος σε ένα μαθηματικό μοντέλο του συστήματος. Συνήθως το μαθηματικό μοντέλο αυτό είναι άγνωστο, δύσκολο να προκύψει ή ακόμα και να μελετηθεί. Ο ασαφής ελεγκτής μπορεί να χωριστεί σε τρεις μονάδες όπως φαίνεται στο Σχ. 5-7. Αυτά είναι ο Ασαφοποιητής (Fuzzifier), η Διαδικασία Αποτελεσμάτων (Inference Unit) και τέλος ο Αποασαφοποιητής (Defuzzifier).



Σχ. 5-7

Δομή του ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπερασμάτων.

Α. Ασαφοποιητής: Στο στάδιο της ασαφοποίησης, ο ασαφοποιητής μετατρέπει τις φυσικές μεταβλητές της διαδικασίας σε ασαφείς. Οι είσοδοι του συστήματος ασαφοποιούνται, στην περιοχή ορισμού τους, από προκαθορισμένα ασαφή σύνολα με λεκτικές μεταβλητές. Η συνάρτηση συμμετοχής και ο βαθμός συμμετοχής εξαρτώνται από την ακρίβεια που έχει οριστεί κατά τη σχεδίαση του συστήματος.

Β. Εξαγωγή συμπερασμάτων: Η μονάδα λήψης αποφάσεων διεκπεραιώνει τις λειτουργίες εξαγωγής συμπερασμάτων στους ασαφείς κανόνες. Πραγματοποιεί μια εξονυχιστική ανίχνευση όλων των κανόνων στη βάση γνώσης, με σκοπό να υπολογίσει το βαθμό συμμετοχής. Οι κανόνες με μικρό βαθμό συμμετοχής συμβάλουν ελάχιστα στην τελική απόφαση, ενώ οι κανόνες με μεγάλο βαθμό συμμετοχής είναι κυρίαρχοι. Τα τελικά ασαφή σύνολα εξόδου εξαρτώνται από τον τύπο της συνεπαγωγής που θα επιλεγεί. Οι δημοφιλέστερες συνεπαγωγές είναι οι συνεπαγωγές του Mamdani και του Larsen. Οι συνεπαγωγές κατά Mamdani χρησιμοποιούν το καρτεσιανό γινόμενο τομής ενώ οι συνεπαγωγές κατά Larsen το καρτεσιανό αλγεβρικό γινόμενο. Επίσης υπάρχει και η συνεπαγωγή Sugeno η οποία παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με τη συνεπαγωγή Mamdani. Η κύρια διαφορά τους σχετίζεται με τις συναρτήσεις συμμετοχής της εξόδου. Στο μοντέλο Sugeno οι συναρτήσεις μεταφοράς της εξόδου είναι γραμμικές ή σταθερές.

- Συνεπαγωγή του Mamdani:

$$\mu_R(x, y) = \mu_{A \cap B} = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (5-4)$$

- Συνεπαγωγή του Larsen:

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(y) \quad (5-5)$$

- Συνεπαγωγή Sugeno:

Ένας τυπικός κανόνας ασαφούς συστήματος Sugeno μηδενικής τάξεως έχει τη μορφή: Αν το x είναι A και το y είναι B, τότε το z = p*x + q*y + r, όπου A και B ασαφή σύνολα και p, q και r σταθερά.

Γ. Αποασαφοποιητής: Το τελευταίο βήμα του αλγορίθμου ενός ασαφούς ελεγκτή είναι η από-ασαφοποίηση (defuzzification) της ασαφούς εισόδου σε σαφή τιμή. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές από-ασαφοποίησης. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι στη βιβλιογραφία που αναφέρεται στην ασαφή λογική, τα ονόματα των μεθόδων από-ασαφοποίησης διαφέρουν από συγγραφέα σε συγγραφέα. Γι' αυτό το λόγο στις μεθόδους από-ασαφοποίησης που αναφέρονται παρακάτω θα πρέπει να δοθεί σημασία περισσότερο στον ορισμό της μεθόδου και όχι στο όνομα της. Οι συνηθέστερες μέθοδοι από-ασαφοποίησης είναι οι ακόλουθες:

- Απο-ασαφοποίηση μεγίστου (maximum defuzzifier):

Στην τεχνική αυτή εξετάζεται η σύνθετη συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου του ελεγκτή και επιλέγεται ως έξοδος η τιμή της μεταβλητής y όπου $\mu_Y(y)$ είναι μέγιστο. Συνεπώς

$$y_{\max} = \max \mu_Y(y) \quad (5-6)$$

Η μέθοδος δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ειδικά όταν υπάρχουν πολλαπλά μέγιστα.

- Απο-ασαφοποίηση με μέσο όρο των μεγίστων (Mean of Maxima defuzzifier)-MOM:

Στην τεχνική αυτή εξετάζεται η συνάρτηση συμμετοχής $\mu_Y(y)$ για να βρεθούν οι τιμές (εφόσον υπάρχουν) του y όπου $\mu_Y(y)$ είναι μέγιστη. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών της εξόδου που αντιστοιχούν στη συνθήκη αυτή, δηλαδή:

$$y_{MOM} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \max \mu_Y(y) \quad (5-7)$$

Στην περίπτωση που υπάρχει μόνο ένα μέγιστο, η τεχνική αυτή συμπίπτει με την προηγούμενη.

- Απο-ασαφοποίηση κέντρου βάρους (Centre of Gravity – COG):

Στην τεχνική αυτή υπολογίζεται το κέντρο βάρους όλων των συναρτήσεων συμμετοχής των I κανόνων που έχουν ενεργοποιηθεί, σταθμισμένων με τον βαθμό εκπλήρωσης σ_i κάθε κανόνα. Το τελικό αποτέλεσμα στην περίπτωση που οι συναρτήσεις είναι συμμετρικές είναι:

$$y_{COG} = \frac{\sum_{i=1}^I \sigma_i \mu_i(y)}{\sum_{i=1}^I \mu_i(y)} \quad (5-8)$$

Όλες οι παραπάνω τεχνικές έχουν στόχο την εύρεση σαφούς τιμής της εξόδου του ελεγκτή (δηλαδή τη μεταβλητή ελέγχου) από τη σύνθετη συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου.

5.3. Σχεδιασμός του ασαφούς συστήματος ελέγχου και μοντέλο προσομοίωσης

Σε αυτή την παράγραφο αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τον σχεδιασμό του ελεγκτή ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος σύμφωνα με την ασαφή λογική.

- *Ασαφοποίηση -Καθορισμός εισόδων και εξόδων και Συναρτήσεων Συμμετοχής*

Η διαδικασία αναζήτησης του σημείου μέγιστης ισχύος εκτελείται μέσω ρύθμισης του λόγου κατάτμησης D του οποίου η μεταβολή έχει άμεση επίδραση στο ρεύμα του ανυψωτή και άρα στην ισχύ εξόδου της γεννήτριας. Το σύστημα μετρά την ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας και την συγκρίνει με την αμέσως προηγούμενη. Αν είναι μεγαλύτερη τότε γίνεται μια μεταβολή του λόγου κατάτμησης D προς μια κατεύθυνση (αύξηση ή μείωση), αν είναι μικρότερη τότε η μεταβολή του D γίνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση από την αμέσως προηγούμενη. Για να βρει ο ελεγκτής ποια ήταν η κατεύθυνση που είχε πριν την εντολή, εισάγεται στο σύστημα εκτός από τη μεταβολή της ισχύος εξόδου και η μεταβολή του λόγου κατάτμησης D. Έτσι ο ελεγκτής λειτουργεί σε μία λογική «αύξηση του λόγου D έως ότου η εντολή για αύξηση φέρει μείωση της ισχύος και μείωση του λόγου D ωστόσο η εντολή για μείωση φέρει πάλι μείωση της ισχύος»[18], [19]. Στο Σχ 4-8 παρουσιάζεται σχηματικά ο ελεγκτής με τις εισόδους και εξόδους του.

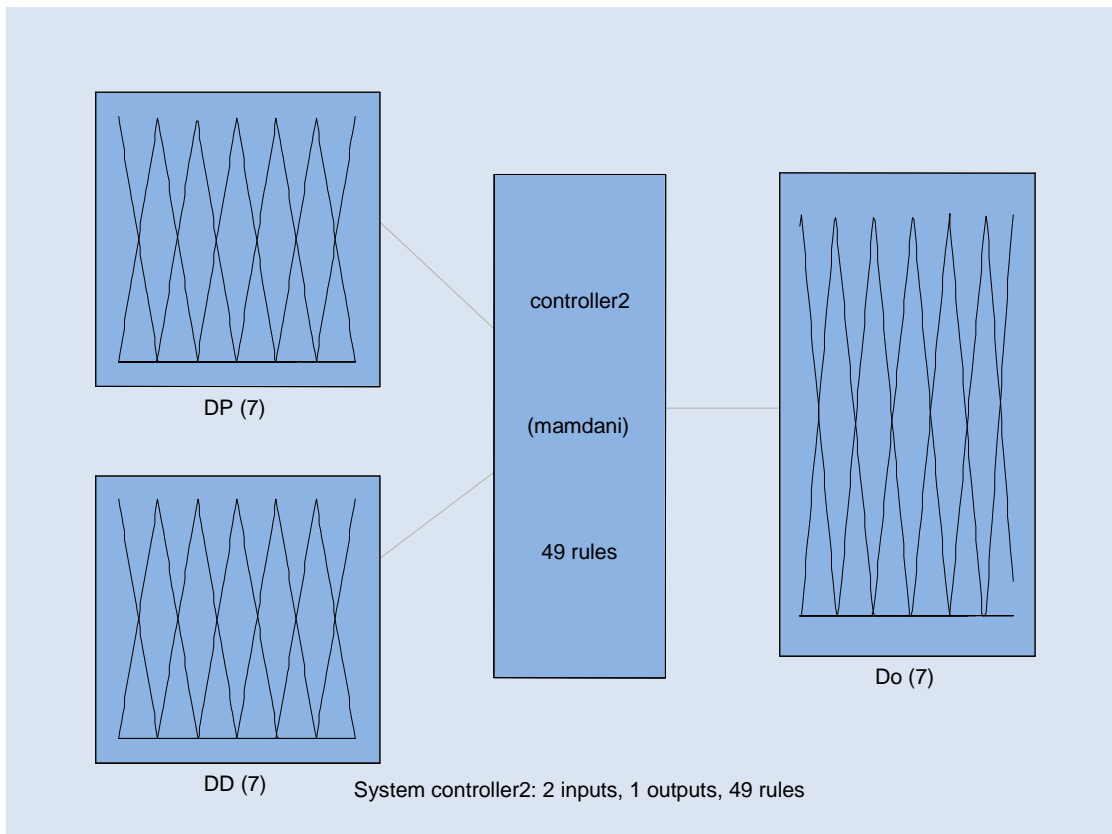
Συμπερασματικά οι εισοδοί του ελεγκτή είναι οι ακόλουθες:

ΔP_g : η μεταβολή της ισχύος εξόδου P_g την χρονική στιγμή t από την τιμή της τη χρονική στιγμή t-1, $\Delta P_g = P_g(t) - P_g(t-1)$.

ΔD : η μεταβολή λόγου κατάτμησης D την χρονική στιγμή t από την τιμή της τη χρονική στιγμή t-1, $\Delta D = D(t) - D(t-1)$.

και η έξοδος του είναι :

D: ο λόγος κατάτμησης του DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης.

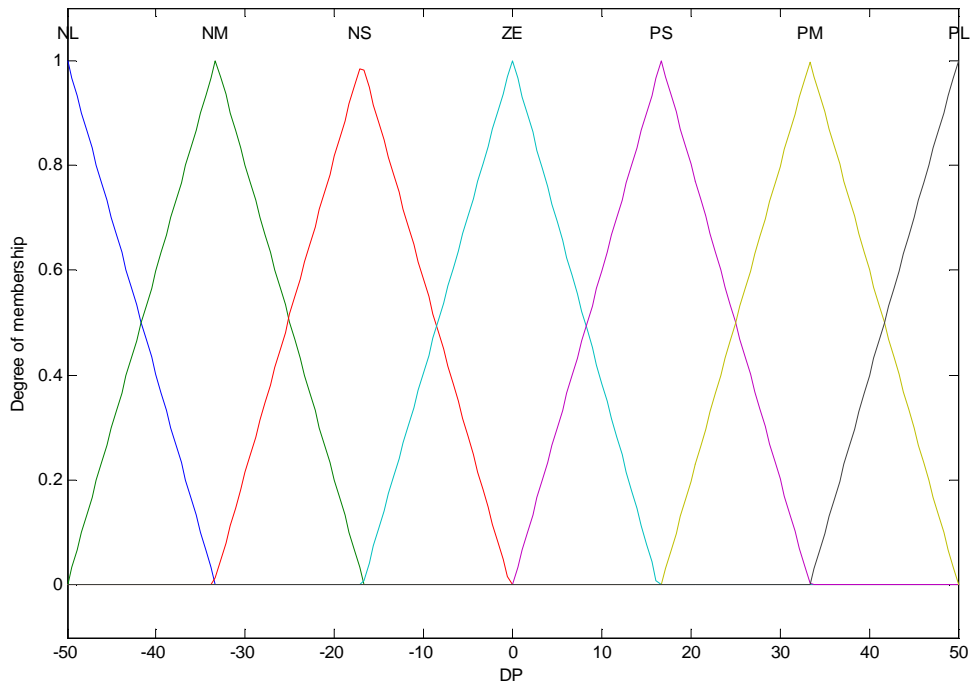


Σχ.5-8

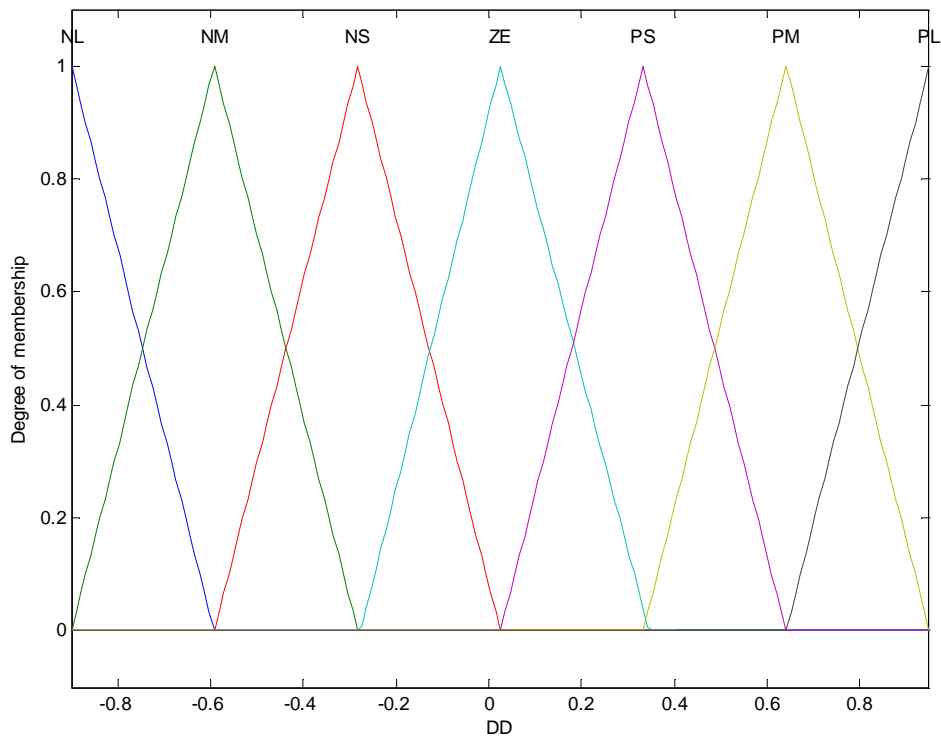
Σχηματικό διάγραμμα του ασαφή ελεγκτή

Οι Συναρτήσεις Συμμετοχής των εισόδων ΔP_g και ΔD καθώς και της εξόδου D φαίνονται στα Σχ. 5-9 έως 5-11. Χρησιμοποιούνται επτά ασαφή σύνολα για κάθε μέγεθος με τις παρακάτω λεκτικές μεταβλητές: NL(Negative Large), NM(Negative Medium), NS(Negative Small), ZE(Zero), PS(Positive Small), PM(Positive Medium), PL(Positive Large).

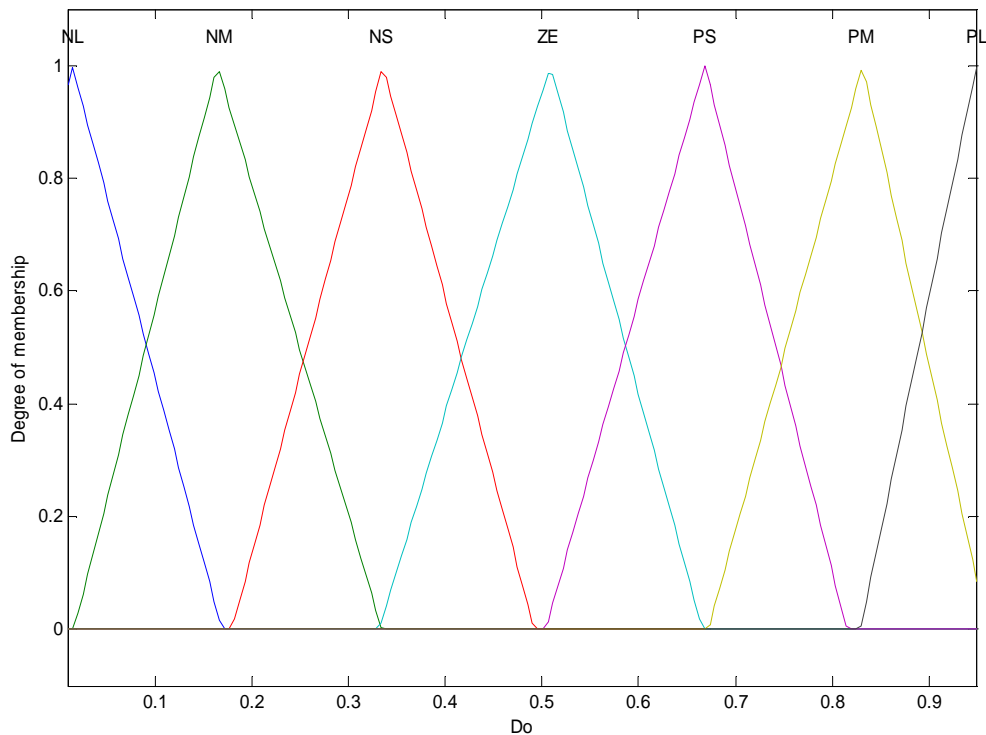
Στην παρούσα μελέτη, προτιμήθηκαν οι τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής λόγω της εύκολης εφαρμογής αλλά και της γρήγορης επεξεργασίας τους. Η λογική των τριγωνικών συναρτήσεων συμμετοχής και των ασαφών συνόλων φαίνεται στο Σχ. 4-9. Έστω ότι η μεταβολή της ισχύος εξόδου ΔP_g είναι -50 W , τότε ανήκει αποκλειστικά στην περιοχή NL (Negative Large). Αν η μεταβολή της ισχύος εξόδου ΔP_g είναι -42 W , ανήκει στην περιοχή NL (Negative Large) κατά 50% και στην περιοχή NM (Negative Medium) κατά ένα άλλο 50%. Η αλλαγή στη δυαδική λογική (από μια περιοχή σε μια άλλη) γίνεται με τις τιμές 0 και 1. Εδώ μπορούμε να πούμε ότι η αλλαγή περιοχής γίνεται στην τιμή -42 από NL (Negative Large) σε NM (Negative Medium) αλλά όχι με τιμές 0 και 1 αλλά με την τιμή 50%. Αντίστοιχη είναι και η λογική για τη συνάρτηση συμμετοχής της μεταβολής του λόγου κατάτμησης ΔD . Το επιλεγμένο εύρος τιμών της μεταβολής της ισχύος εξόδου ΔP_g είναι από -50 έως 50 ενώ της μεταβολής του λόγου ΔD είναι από -0.9 έως 0.95 . Τα εύρη αυτά επιλέχθηκαν με βάση την προσομοιωμένη λειτουργία των αντίστοιχων μεγεθών του μοντέλου που βασίζεται στην χαρακτηριστική καμπύλη ροπής –στροφών καθώς επίσης και από το εύρος τιμών στο οποίο λειτουργούν.



Σχ.5-9
Συναρτήσεις συμμετοχής της ασαφούς μεταβλητής εισόδου DP_g



Σχ.5-10
Συναρτήσεις συμμετοχής της ασαφούς μεταβλητής εισόδου DD



Σχ.5-11

Συναρτήσεις συμμετοχής της ασαφούς μεταβλητής εξόδου D

- *Διαδικασία Εξαγωγής Αποτελεσμάτων*

Κατά την διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων προτιμήθηκε ο Mamdani από τον Sugeno τύπο ασαφή ελεγκτή γιατί η συνεπαγωγή Mamdani αναμένει οι συναρτήσεις συμμετοχής της εξόδου να είναι ασαφή σύνολα. Αντίθετα τα συστήματα Sugeno-τύπων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαμορφώσουν οποιοδήποτε σύστημα συμπεράσματος στο οποίο οι συναρτήσεις συμμετοχής της εξόδου είναι καθεμία γραμμική ή σταθερά το οποίο δεν μπορεί να εφαρμοσθεί στο παρόν σύστημα γιατί το μοντέλο είναι πολύπλοκο και μη γραμμικό.

Ο ελεγκτής ασαφούς λογικής, ο οποίος είναι τοποθετημένος πρέπει να αποφασίζει κάθε φορά τον καλύτερο τρόπο ελέγχου του φυσικού συστήματος. Η απόφαση παίρνεται με την ασαφή διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων. Οι γνώσεις που απαιτούνται βρίσκονται στη βάση ασαφών κανόνων από τους if-then κανόνες που έχουν οριστεί. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά 7 από τους 49 κανόνες που χρησιμοποιεί ο ελεγκτής ενώ στον Πίνακα 5-1 συνοψίζονται και οι 49 κανόνες.

Ασαφείς κανόνες:

- 1^{ος} Κανόνας: If ΔP_g is NL and ΔD is NL, then D is NL.
- 2^{ος} Κανόνας: If ΔP_g is NL and ΔD is NM, then D is NL.
- 3^{ος} Κανόνας: If ΔP_g is NL and ΔD is NS, then D is NM.
- 4^{ος} Κανόνας: If ΔP_g is NL and ΔD is ZE, then D is PL.
- 5^{ος} Κανόνας: If ΔP_g is NL and ΔD is PS, then D is PM.
- 6^{ος} Κανόνας: If ΔP_g is NL and ΔD is PM, then D is PL.
- 7^{ος} Κανόνας: If ΔP_g is NL and ΔD is PL, then D is PL.

Σύνολο Ασαφών Κανόνων							
ΔD/ΔP	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PM	NS	NM	NL	NL
NM	PL	PM	PS	NS	NS	NM	NL
NS	PM	PS	PS	ZE	NS	NS	NL
ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
PS	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
PM	NL	NM	NS	PS	PS	PM	PL
PL	NL	NL	NM	PS	PM	PL	PL

Πίνακας 5-1

Συνοπτικός πίνακας κανόνων του ασαφή ελεγκτή

Η διαδικασία εξαγωγής συμπεράσματος με βάση τις εκάστοτε σαφείς τιμές εισόδου και τις συναρτήσεις συμμετοχής που διεγείρουν, όπως περιγράφηκαν παραπάνω, πραγματοποιούνται με δύο τρόπους:

α) Με την πράξη *min*, κατά την οποία λαμβάνεται υπόψη ο μικρότερος βαθμός εκπλήρωσης των εκάστοτε διεγερμένων συναρτήσεων συμμετοχής, ο οποίος γίνεται και τιμή διέγερσης της συνάρτησης συμμετοχής του συμπεράσματος

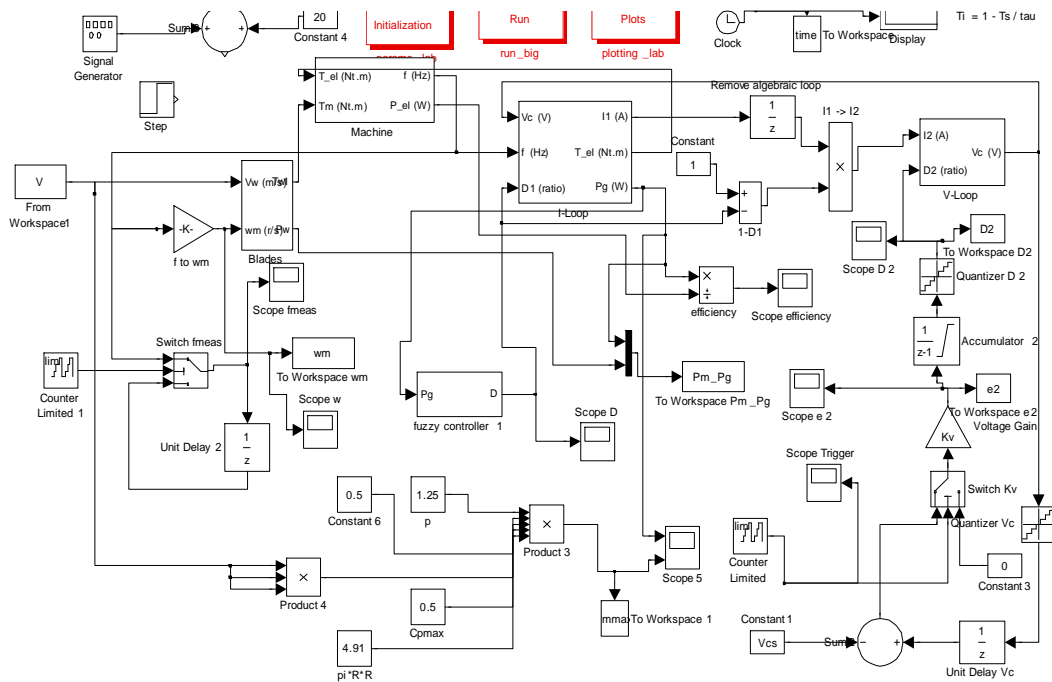
β) Με την πράξη *prod*, κατά την οποία γίνεται κλιμακοποίηση των συναρτήσεων εξόδου. Επειδή όμως στην παρούσα εξαγωγή συμπεράσματος έχουν τον ίδιο βάρος 1 για όλους τους κανόνες στο σύστημα, ουσιαστικά δεν έχει σημασία ποια διαδικασία θα χρησιμοποιηθεί.

Η διαδικασία σύνθεσης που χρησιμοποιείται είναι η *max* έτσι ώστε το τελικό αποτέλεσμα της εξόδου για κάθε συνδυασμό διεγερμένων κανόνων να προκύπτει με τον τελεστή *max*.

- *Αποασαφοποίηση*

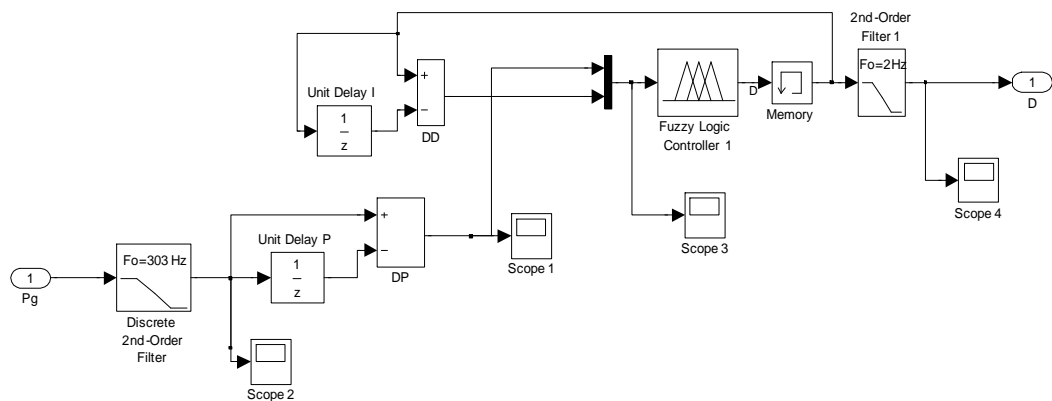
Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος απο-ασαφοποίησης είναι μέθοδος απο ασαφοποίησης κέντρου βάρους.

Η υλοποίηση του ασαφή ελεγκτή πραγματοποιήθηκε σε υπολογιστή με τη βοήθεια του Fuzzy Logic Toolbox του προγράμματος Simulink™ με σκοπό την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος [5]. Το διάγραμμα της μεθόδου ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος που βασίζεται στην ασαφή λογική παρουσιάζεται στο Σχ. 5-12 ενώ στο Σχ. 5-13 παρουσιάζεται το αντίστοιχο block όπως παρουσιάζεται στο πρόγραμμα Simulink™.



Σχ. 5-12

Πλήρες μοντέλο ανεμογεννήτριας και συστήματος ελέγχου με ασαφή λογική σε Simulink

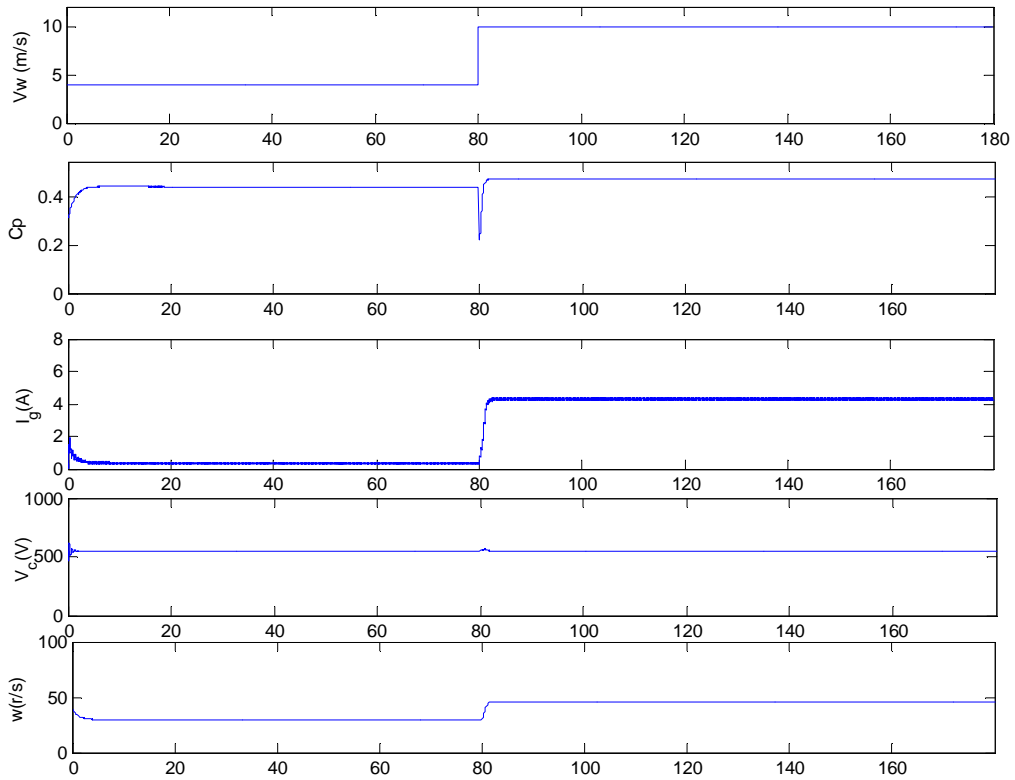


Σχ. 5-13

Το υποσύστημα ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος με βάση την ασαφή λογική

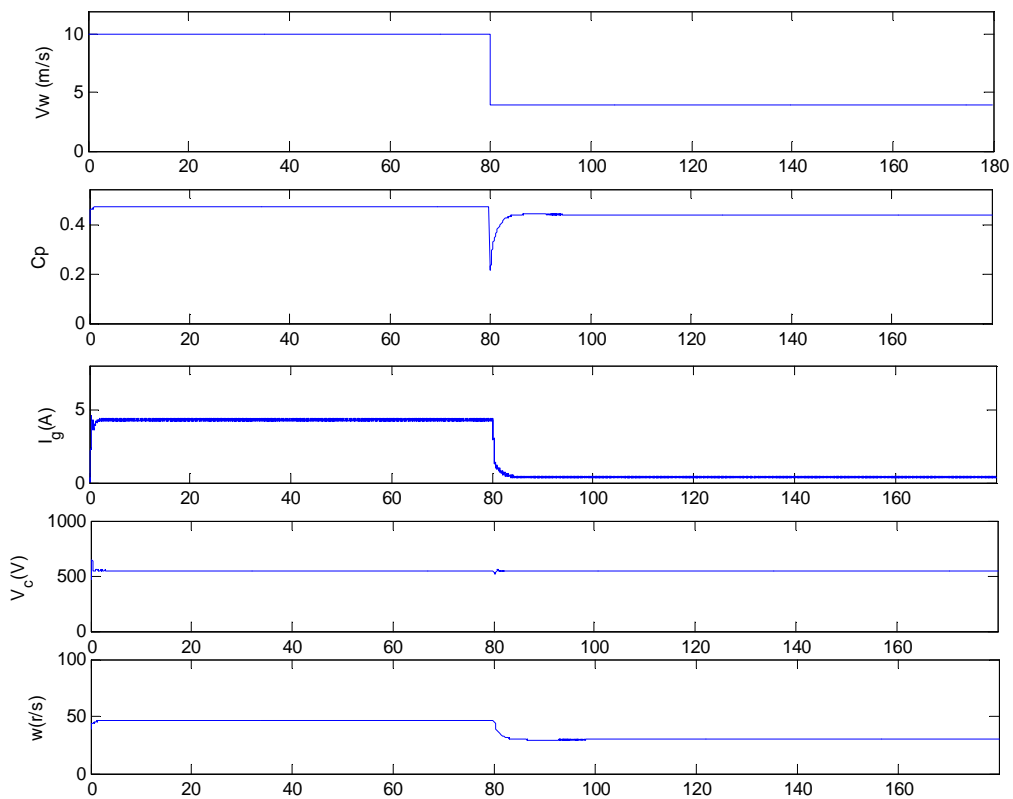
5.4. Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές του ανέμου για ακραίες αρχικές τιμές του λόγου κατάτμησης D .

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αποκρίσεις του συστήματος σε βηματικό άνεμο και με αρχικές τιμές του λόγου κατάτμησης D 0.1 και 0.9. Λαμβάνονται αυτές οι τιμές ως αρχικές για να εξετασθεί πως το σύστημα αντιδρά σε ακραίες αρχικοποιήσεις. Η αρχική τιμή μεταβάλλεται όπως φαίνεται στο Σχ.5-13 από το block ‘memory’.



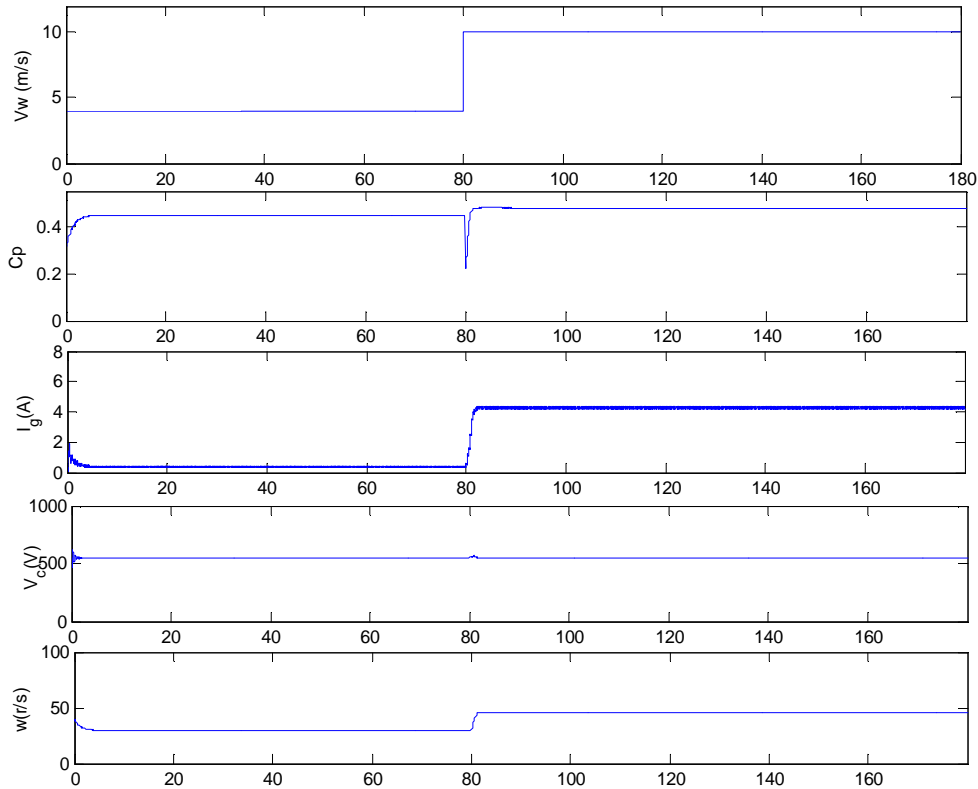
Σχ. 5-14

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s με αρχική τιμή λόγου κατάτμησης 0.1



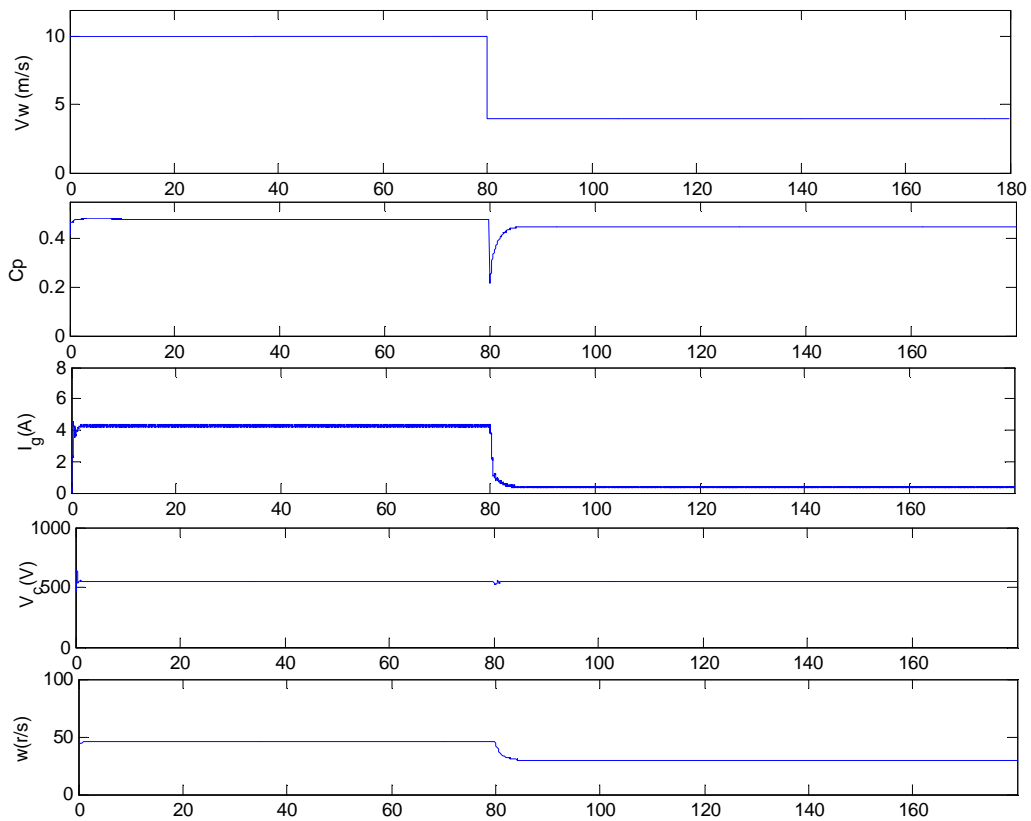
Σχ. 5-15

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 10 m/s σε 4 m/s με αρχική τιμή λόγου κατάτμησης 0.1



Σχ. 5-16

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s με αρχική τιμή λόγου κατάτμησης 0.9



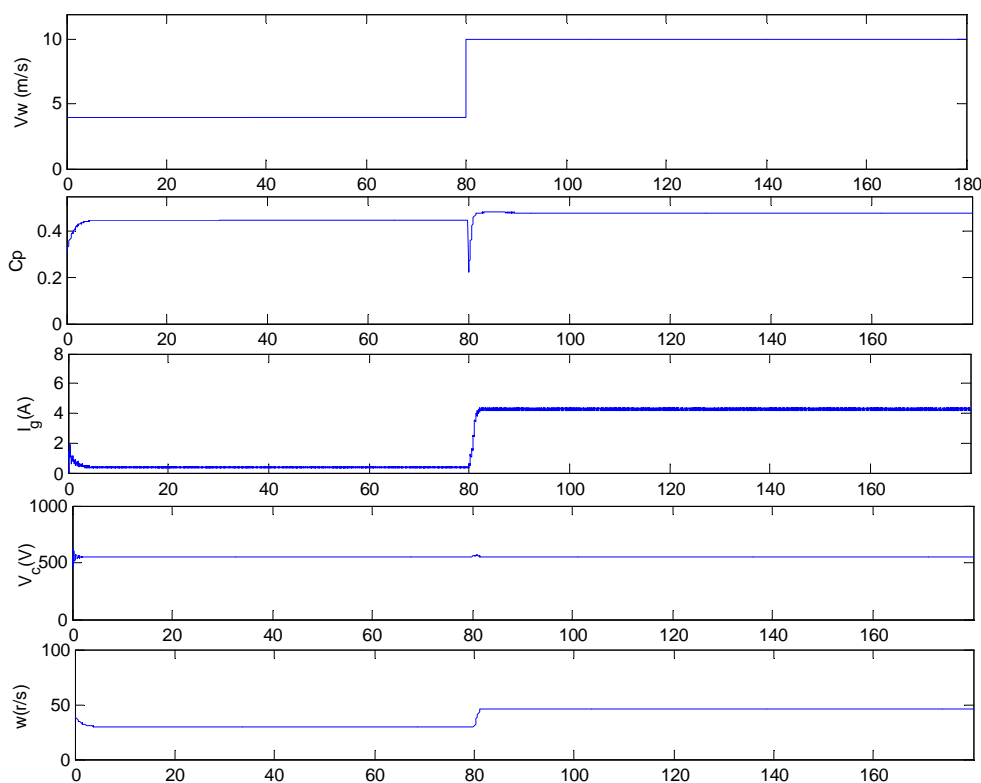
Σχ. 5-17

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 10 m/s σε 4 m/s με αρχική τιμή λόγου κατάτμησης 0.9

Παρατηρείται από τα Σχ. 5-14 έως 5-17 ότι η ομοιότητα των αποκρίσεων για $D=0.1$ και $D=0.9$ είναι τέτοια, που ωθούμαστε στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο είναι ανεξάρτητο από την αρχική τιμή του λόγου κατάτμησης D . Η ανεξαρτητοποίηση από την αρχική τιμή του D οφείλεται στο ότι ο ελεγκτής βασίζεται σε συγκεκριμένους κανόνες και εξάγει τον D μέσα σε ένα προκαθορισμένο εύρος τιμών. Ανάλογα με την κάθε φορά κατάσταση λειτουργίας, ο ελεγκτής μπορεί να μεταβάλλει πολύ ή λίγο τον λόγο D δηλαδή να μεταβάλλει την τιμή του δυναμικά και άρα να ανακάμψει την όποια διαταραχή πιο αποτελεσματικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οποιαδήποτε αρχική τιμή του D να μην επηρεάζει την λειτουργία του συστήματος αφού με δυναμική μεταβολή μπορεί το σύστημα να ακολουθήσει το σημείο μέγιστης ισχύος.

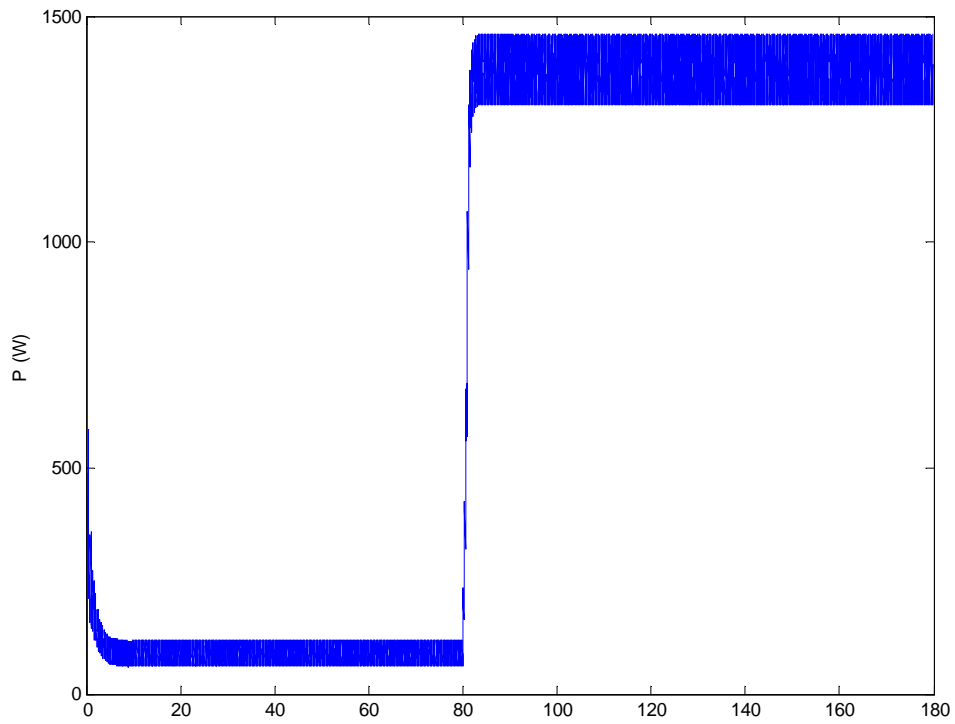
5.5. Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου

Στα Σχ. 5-18 έως 5-21 εμφανίζονται τα διαγράμματα των προσομοιωμένων μεγεθών για μεταβατική κατάσταση της τιμής της ταχύτητας ενός σταθερού ανέμου από τα 4 m/sec στα 10 m/sec τη χρονική στιγμή $t = 80$ sec, με τη μέθοδο ανίχνευσης μέγιστης ισχύος βασισμένη στην ασαφή λογική. Ως αρχικές τιμές των λόγων κατάτμησης D τέθηκαν $D_1=0.4$, $D_2=0.25$.



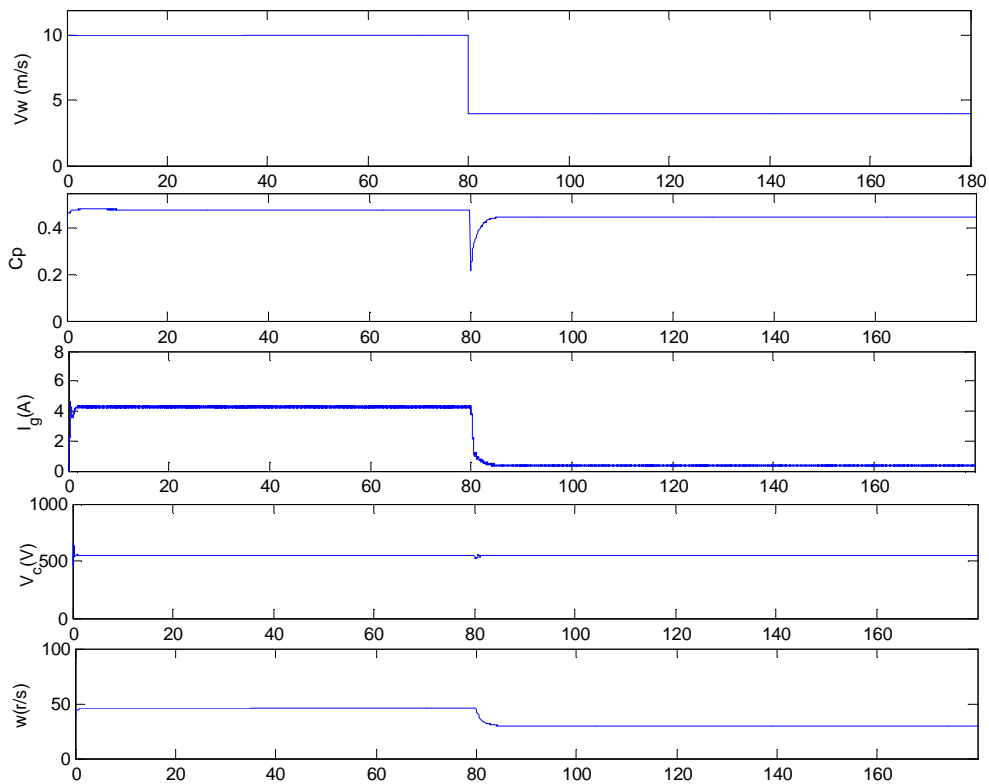
Σχ. 5-18

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s



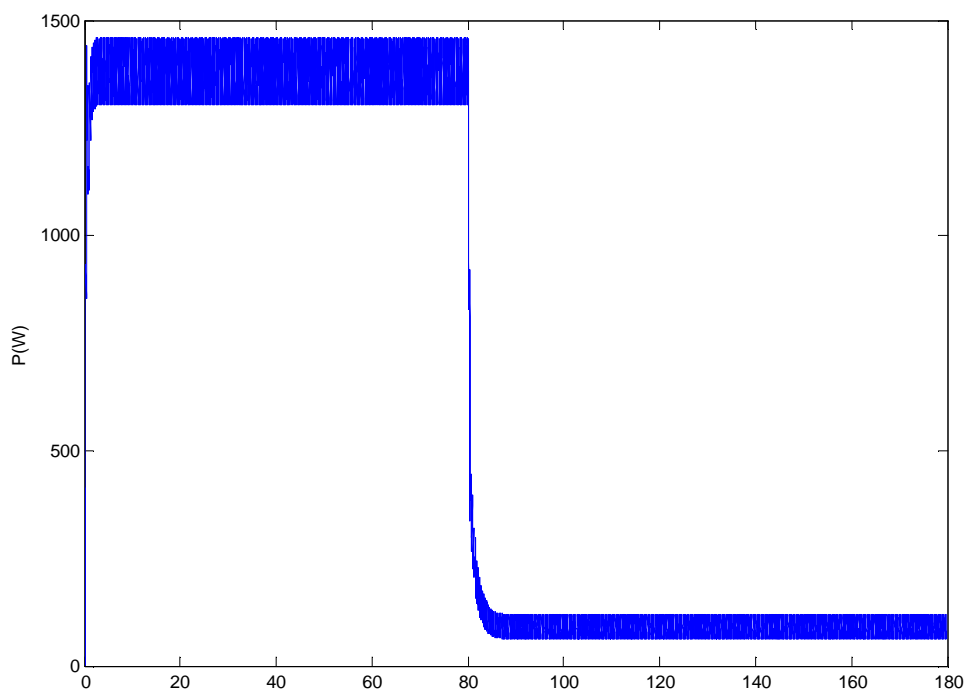
Σχ. 5-19

Προσομοιωμένη ισχύς εξόδου σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s



Σχ. 5-20

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 10 m/s σε 4 m/s



Σχ. 5-21

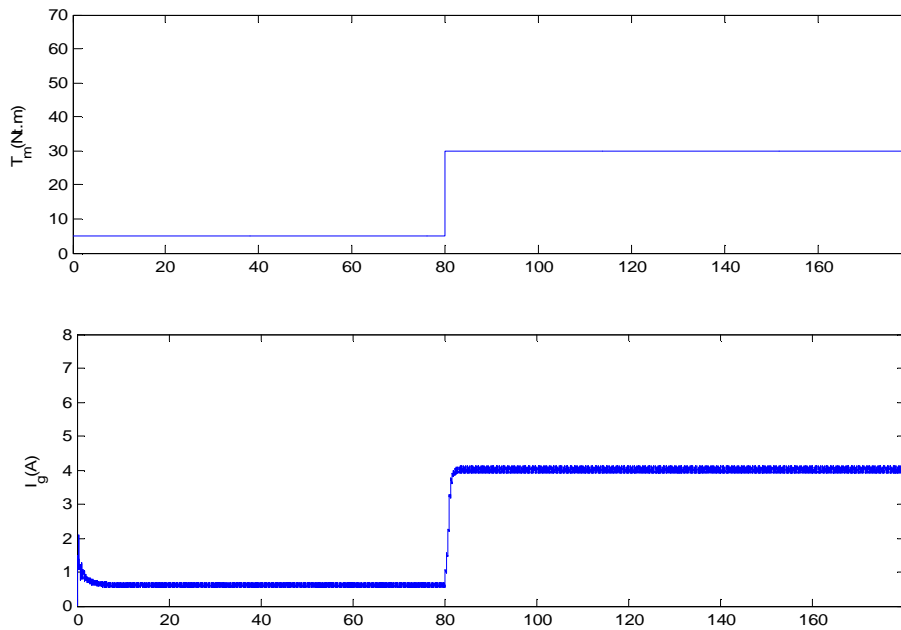
Προσομοιωμένη ισχύς εξόδου σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 10 m/s σε 4 m/s

Στα Σχ. 5-18 και 5-19 στο χρονικό διάστημα από τα 0 έως τα 80 sec το σύστημα λειτουργεί στην περιοχή μέγιστης ισχύος για τη συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου με τιμή 4 m/sec αφού ο συντελεστής ισχύος C_p σταθεροποιείται στην τιμή 0.45 πολύ κοντά στη βέλτιστη 0.5, δίνοντας μέση ισχύ εξόδου περίπου 93 W. Τη χρονική στιγμή 80 sec το ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας αυξάνεται με συνολικό χρόνο 2 sec μέχρι να σταθεροποιηθεί για ταχύτητα του ανέμου 10 m/sec, ενώ ο συντελεστής ισχύος C_p 2 sec μέχρι να σταθεροποιηθεί στη νέα τιμή 0.48 σχεδόν βέλτιστη. Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου έχει ως αποτέλεσμα και τη σταδιακή αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Η παραγόμενη ισχύς μεταβαίνει γύρω στα 1377 W.

Ομοίως στα Σχ. 5-20 και 5-21 στο χρονικό διάστημα από τα 0 έως τα 80 sec το σύστημα λειτουργεί στην περιοχή μέγιστης ισχύος για ταχύτητα ανέμου 10 m/sec, δίνοντας ισχύ στην έξοδο περίπου 1377 W. Τη χρονική στιγμή 80 sec η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται απότομα στα 4 m/sec. Η ισχύς εξόδου μεταβαίνει περίπου στα 93W. Εκείνο που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι η συμπεριφορά του συστήματος είναι σχεδόν συμμετρική εξαιτίας της γραμμικής συμπεριφοράς που εισάγουν οι κανόνες του ελεγκτή. Παρατηρείται λοιπόν ότι το ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας έχει σταθερά χρόνου συνολικό χρόνο μείωσης 5 sec, ενώ ο συντελεστής ισχύος C_p χρειάζεται 4.5 sec για να σταθεροποιηθεί. Τη ίδια γρήγορη μεταβολή παρουσιάζει και η ισχύς εξόδου.

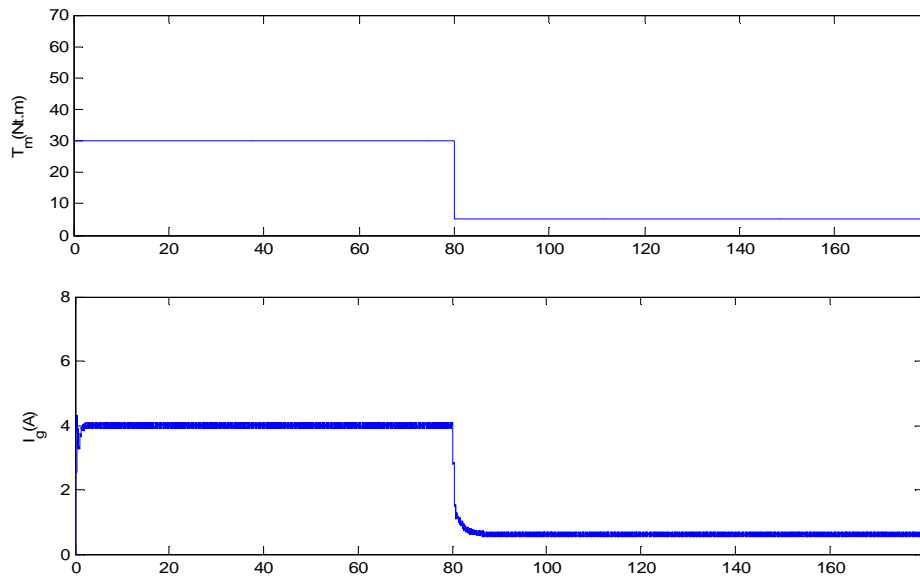
5.6. Απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της μηχανικής ροπής

Στα Σχ. 5-22 και 5-23 παρουσιάζεται η απόκριση του συστήματος σε βηματική αύξηση και μείωση της μηχανικής ροπής εισόδου χωρίς να υπολογίζεται απο το αεροδυναμικό κομμάτι του μοντέλου. Η μεταβολή της μηχανικής ροπής γίνεται από τα 5 Nt.m στα 30 Nt.m και αντίστροφα, στα 80 sec. Παρατηρείται, λοιπόν, στο Σχ.5-22 ότι το ανορθωμένο ρεύμα αυξάνεται με συνολικό χρόνο 2 sec και στο Σχ. 5-23 ότι μειώνεται συνολικό χρόνο 5 sec.



Σχ. 5-22

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ροπή εισόδου από 5 Nt.m σε 30 Nt.m

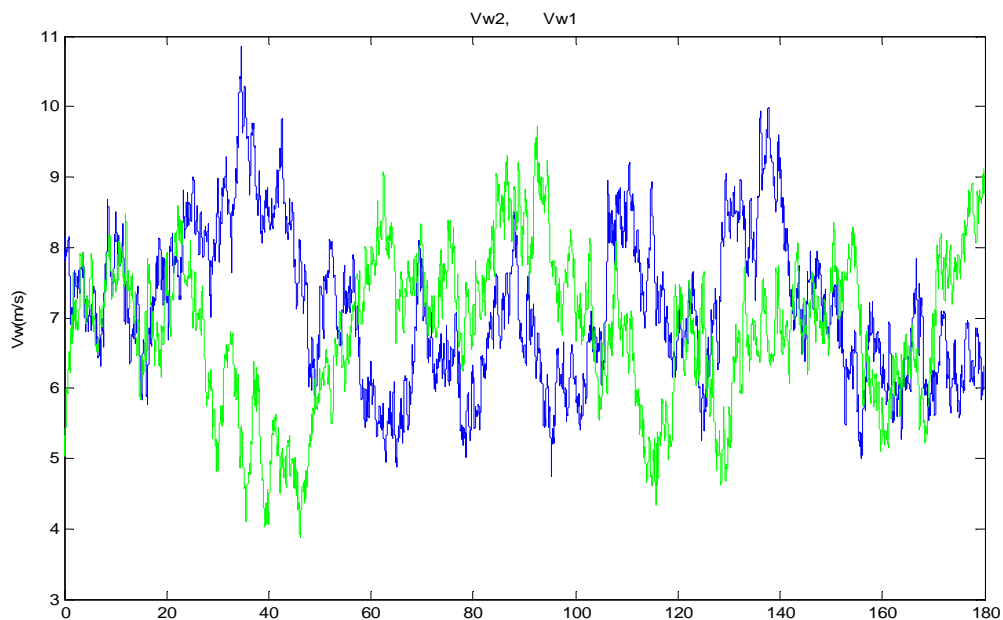


Σχ. 5-23

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας σε μεταβατική κατάσταση για ροπή εισόδου από 30 Nt.m σε 5 Nt.m

5.7. Απόκριση του συστήματος σε εξομοιωμένη πραγματική κατάσταση λειτουργίας

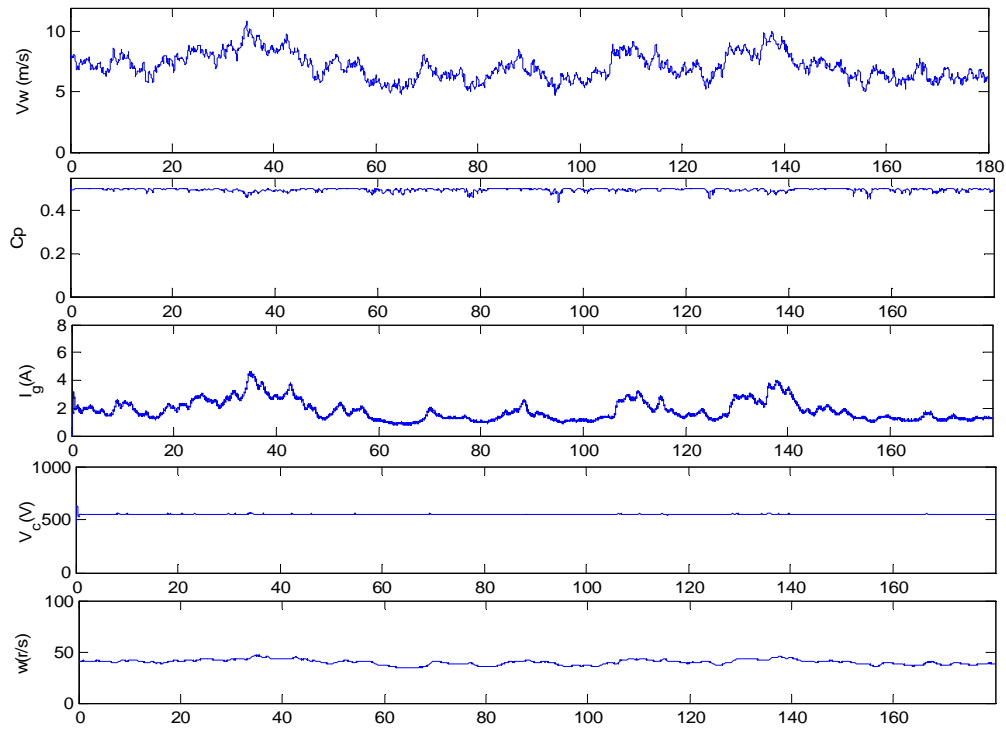
Οι δύο χρονοσειρές ανέμου απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 5-24

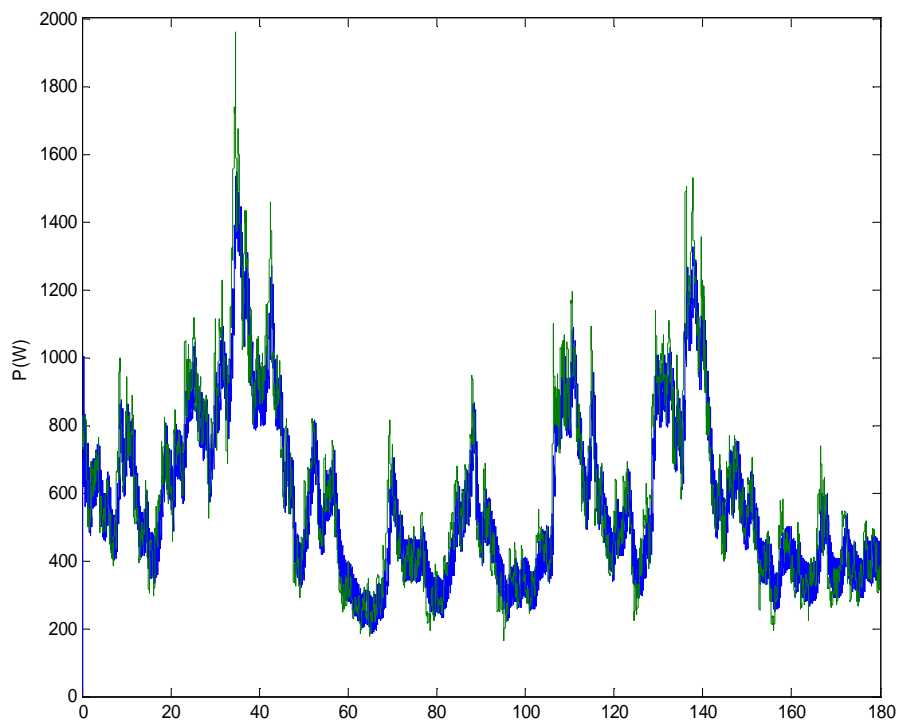
Χρονοσειρές ανέμων V_1 και V_2 οι οποίες εφαρμόζονται στα προσομοιωμένα και πειραματικά μοντέλα

Αρχικά εισάγεται στο μοντέλο του Σχ. 5-12 η V_2 και πραγματοποιείται η προσομοίωση. Τα μεγέθη που λαμβάνονται έχουν ως εξής:



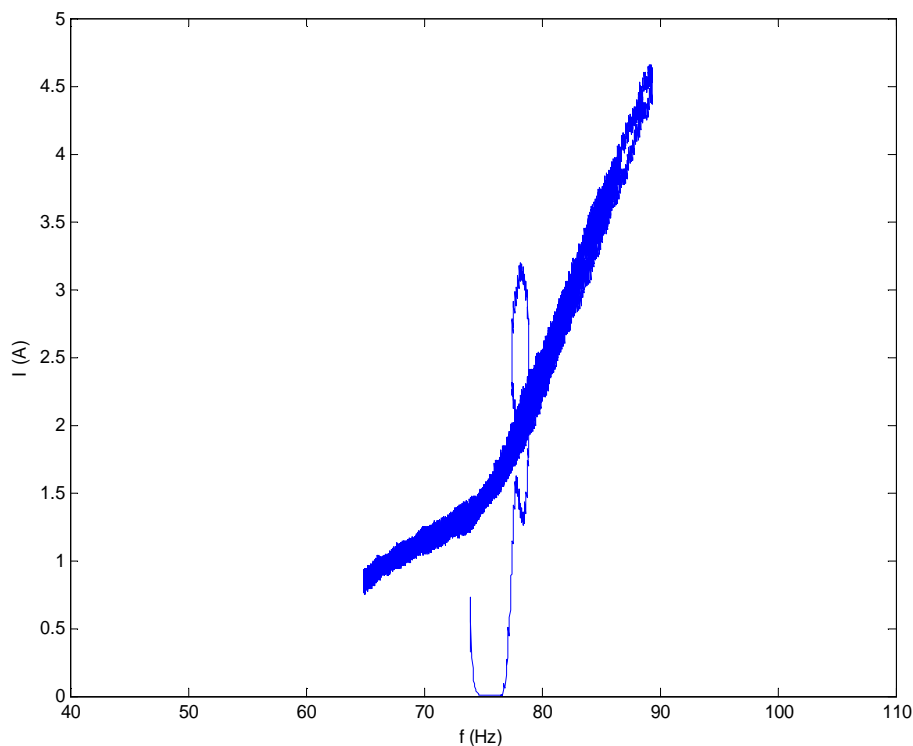
Σχ. 5-25

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας για χρονοσειρά ανέμου V_2



Σχ. 5-26

Προσομοιωμένη ισχύς εξόδου (με μπλε χρώμα) και θεωρητικά μέγιστη μηχανική ισχύς (με πράσινο χρώμα) σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας για χρονοσειρά ανέμου V_2

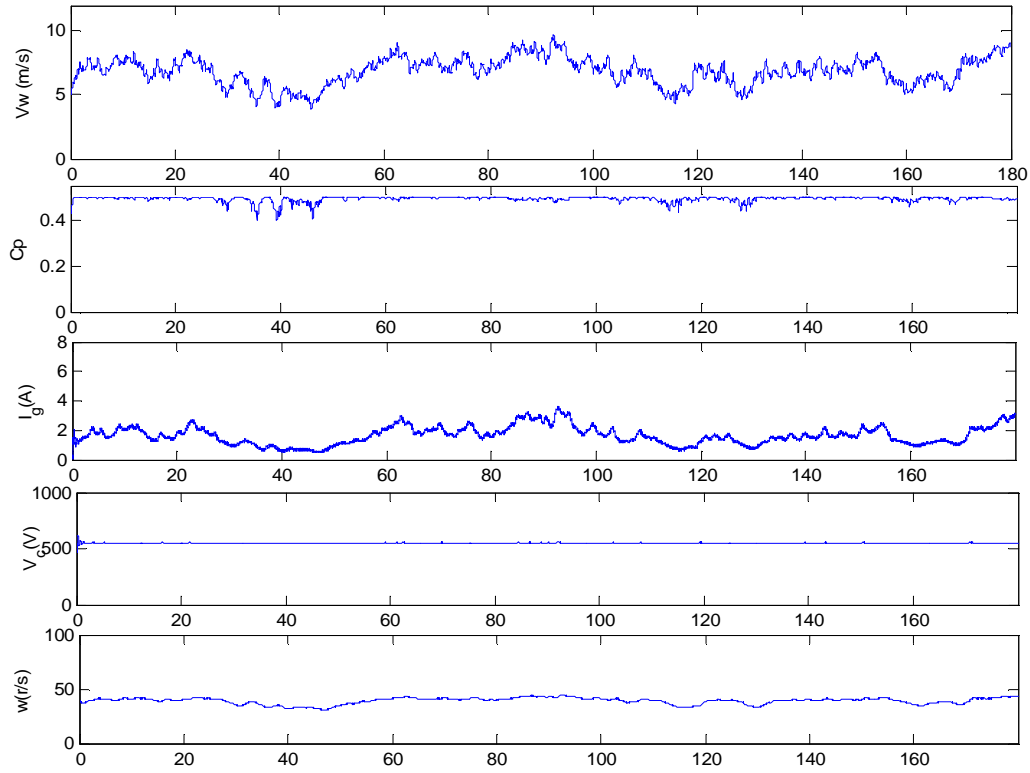


Σχ. 5-27

Χαρακτηριστική καμπύλη ηλεκτρικής συχνότητας – ανορθωμένου ρεύματος γεννήτριας που ο αλγόριθμος επιτυγχάνει για χρονοσειρά ανέμου V_2

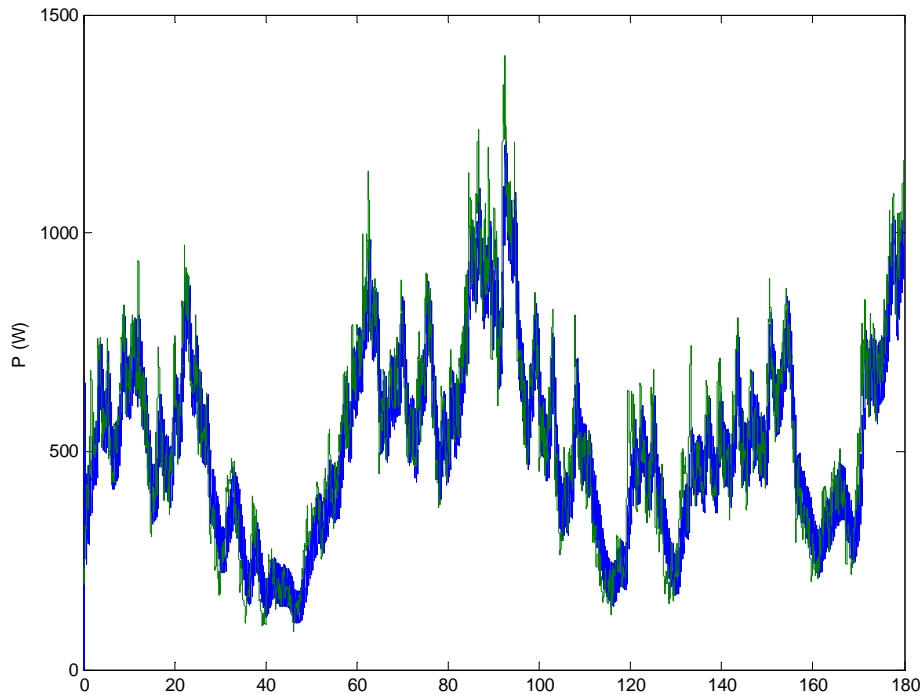
Το μοντέλο έχει μέγιστη γωνιακή ταχύτητα για τη δεδομένη χρονοσειρά ανέμου, 46.8 r/s. Παρατηρείται είναι ότι ο συντελεστής ισχύος καταφέρνει γρήγορα να βρίσκεται σε τιμές πολύ κοντά στη βέλτιστη με μέση τιμή 0.495. Η μέση ισχύς εξόδου είναι 575.86 W, τιμή κοντά στη μέση μέγιστη ισχύ εξόδου, που πρέπει να αποδίδει το σύστημα, η οποία είναι 596.2 W. Στο Σχ.5-26 παρατηρείται ότι η προσομοιωμένη ισχύς εξόδου ακολουθεί τη θεωρητική ισχύ ακόμη και στις απότομες κορυφές της χρονοσειράς. Στο Σχ. 5-27 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη συχνότητας ρεύματος στην οποία τελικά το σύστημα λειτουργεί. Η καμπύλη μοιάζει με την ιδανική χαρακτηριστική ακόμα και με τη μικρή αστάθεια που παρουσιάζει. Αυτή η συμπεριφορά είναι αναμενόμενη λόγω του ελεγκτή ο οποίος δέχεται την μεταβολή του ανορθωμένου ρεύματος και δίνει άμεσα εντολές για μεταβολή του λόγου κατάτμησης, λογική που μοιάζει με αυτήν της μεθόδου που δέχεται έτοιμη την χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος -στροφών.

Στη συνέχεια εισάγεται στο μοντέλο του Σχ. 5-12 η V_1 και πραγματοποιείται η προσομοίωση. Τα μεγέθη που λαμβάνονται έχουν ως εξής:



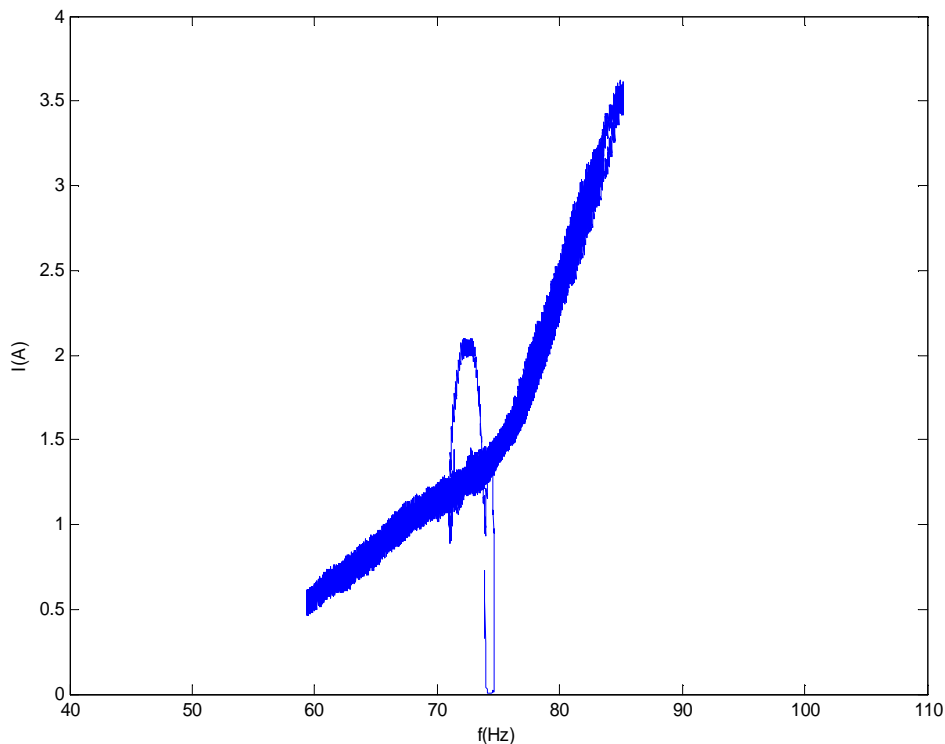
Σχ. 5-28

Προσομοίωση σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας για χρονοσειρά ανέμου V_1



Σχ. 5-29

Προσομοιωμένη ισχύς εξόδου (με πράσινο χρώμα) και θεωρητικά μέγιστη μηχανική ισχύς (με μπλε χρώμα) σε Simulink απομονωμένης λειτουργίας για χρονοσειρά ανέμου V_1



Σχ. 5-30

Χαρακτηριστική καμπύλη ηλεκτρικής συχνότητας – ανορθωμένου ρεύματος γεννήτριας που ο αλγόριθμος επιτυγχάνει για χρονοσειρά ανέμου V_1

Απο τα Σχ. 5-28 έως 5-29 παρατηρείται ότι έχουμε παρόμοια συμπεριφορά του συστήματος για χρονοσειρά ανέμου V_1 με την απόκριση του συστήματος για χρονοσειρά ανέμου V_2 . Και πάλι το μοντέλο φαίνεται να μην αυξάνει της στροφές της ανεμογεννήτριας σε ακραίες τιμές αφού έχει μέγιστη γωνιακή ταχύτητα για τη δεδομένη χρονοσειρά ανέμου, 44.59 r/s. Ο συντελεστής ισχύος καταφέρνει να διατηρείται στη βέλτιστη τιμή του με μέση τιμή 0.49. Η μέση ισχύ εξόδου είναι 512.74 W, τιμή πολύ κοντά στη μέση μέγιστη ισχύ εξόδου που πρέπει να αποδίδει το σύστημα για τη δεδομένη χρονοσειρά η οποία είναι 528.4 W. Στο Σχ. 5-29 παρατηρείται ότι η προσομοιωμένη ισχύς εξόδου ακολουθεί την θεωρητική ισχύ. Στο Σχ. 5-30 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη συχνότητας ρεύματος που τελικά το σύστημα επιτυγχάνει. Μοιάζει αρκετά με αυτή του Σχ. 5-27.

5.8. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι, αρχικά, η ανεξαρτητοποίηση από δεδομένη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – στροφών και άρα από πιθανές ανακρίβειες αυτής. Από την παραπάνω ανάλυση μπορεί να εξαχθεί το πλεονέκτημα ότι το μοντέλο ανταποκρίνεται πολύ γρήγορα πράγμα που γίνεται αντιληπτό σε βηματικές μεταβολές της ροπής εισόδου αλλά και της ταχύτητας του ανέμου. Το ανορθωμένο ρεύμα αυξάνεται με συνολικό χρόνο 2 sec και μειώνεται σε χρόνο 5 sec. Αντίστοιχη είναι και η συμπεριφορά του συντελεστή ισχύος C_p . Αξιοσημείωτο είναι, επίσης, ότι το

σύστημα δεν εξαρτάται από την αρχική τιμή του λόγου κατάτμησης D και συνεπώς δεν καθίσταται επιρρεπές σε ακατάλληλες αρχικοποιήσεις.

Ωστόσο, μειονέκτημα μπορεί να αποτελέσει το γεγονός πως παρατηρείται μικρό σφάλμα μόνιμης κατάστασης στο συντελεστή ισχύος C_p για χαμηλές τιμές του ανέμου. Μάλιστα παρατηρήθηκε πως όσο πιο χαμηλός ο άνεμος τόσο πιο πολύ αποκλίνει η τιμή του C_p από την βέλτιστη χωρίς βέβαια να υπάρχει σημαντική διαφορά στις τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής ισχύος C_p . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ασαφής λογική ενδείκνυται περισσότερο σε μη γραμμικά συστήματα παρά σε γραμμικά. Έτσι λοιπόν σε υψηλούς ανέμους η χαρακτηριστική ροπής στροφών είναι περισσότερο μη γραμμική απ'ότι σε χαμηλότερους ανέμους με αποτέλεσμα να παρουσιάζει το σύστημα αυτή τη συμπεριφορά.

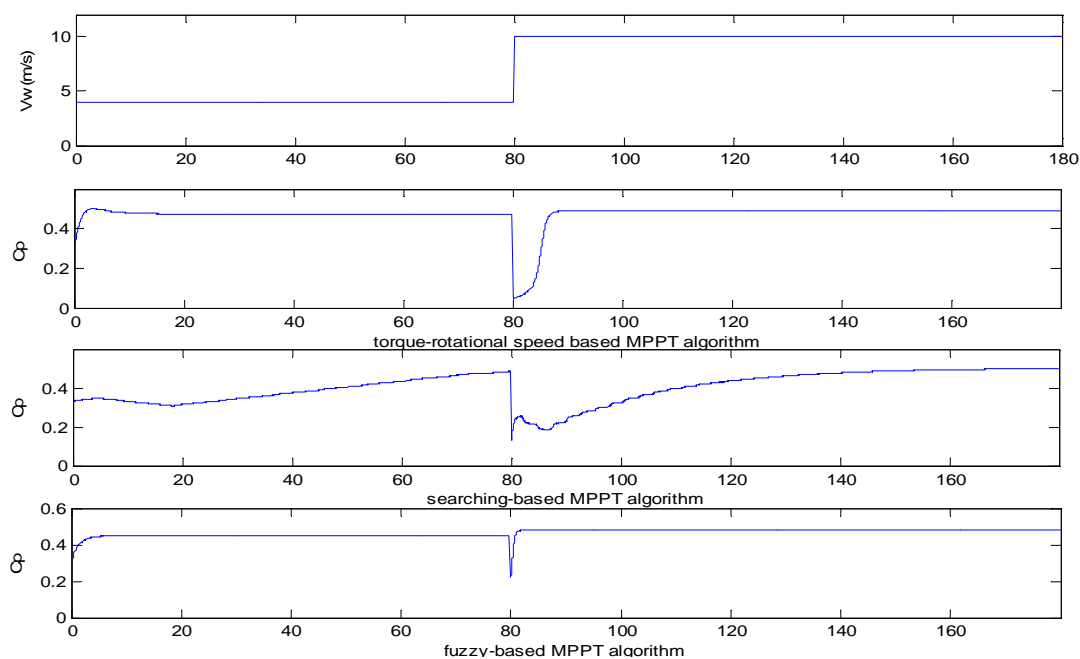
Κεφάλαιο 6

Σύγκριση των τριών συστημάτων ελέγχου

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα συνοψισθούν τα κυριότερα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν μέχρι αυτό το σημείο, ώστε να πραγματοποιηθεί η σύγκριση των τριών συστημάτων ελέγχου που προτείνονται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η σύγκριση θα πραγματοποιηθεί με κριτήρια την απόκριση των συστημάτων των αντίστοιχων ελεγκτών. Λόγω του ότι δεν έχει κατασκευαστεί στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών ελεγκτής ασαφούς λογικής η σύγκριση των μεθόδων θα περιοριστεί στα προσομοιωμένα μοντέλα.

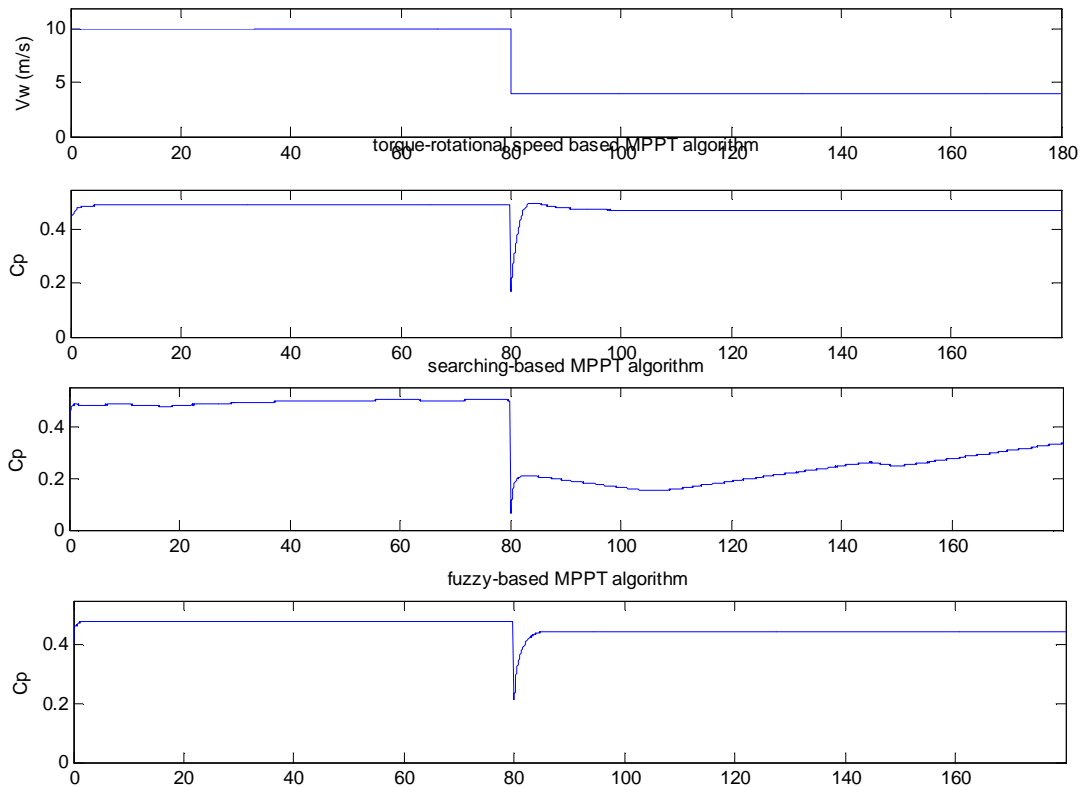
6.1. Απόκριση των συστημάτων σε βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου

Αρχικά τα συστήματα αναλύθηκαν ως προς την απόκριση τους σε βηματική αύξηση και μείωση της ταχύτητας του ανέμου σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Σκοπός ήταν να εξαχθούν αναλυτικά συμπεράσματα για την συμπεριφορά των συστημάτων σε διαφορετικούς ανέμους πριν μελετηθούν οι μέθοδοι σε πραγματικές χρονοσειρές ανέμου. Στο Σχ. 6-1 παρουσιάζεται σε ένα διάγραμμα η συμπεριφορά του συντελεστή ισχύος C_p και των τριών μεθόδων ελέγχου για βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου από 4 σε 10 m/s ενώ στο Σχ. 6-2 για μείωση του ανέμου από 10 σε 4 m/s.



Σχ. 6-1

Προσομοιωμένη σε Simulink κυματομορφή του συντελεστή ισχύος C_p σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s και για τις τρεις μεθόδους ελέγχου



Σχ. 6-2

Προσομοιωμένη σε Simulink κυματομορφή του συντελεστή ισχύος C_p σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 10 m/s σε 4 m/s και για τις τρεις μεθόδους ελέγχου

Δεδομένου ότι κύριος σκοπός μιας μεθόδου ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος είναι να λαμβάνει ο συντελεστής ισχύος τη βέλτιστη τιμή 0.5 και άρα να επιτυγχάνει μέγιστη ισχύ για κάθε ταχύτητα ανέμου μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μέθοδος που βασίζεται στην χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-στροφών παρουσιάζει την πλέον επιθυμητή συμπεριφορά. Στην περίπτωση της μεθόδου αυτής, ο C_p επιτυγχάνει τιμή πολύ κοντά στο 0.5 και για τις δύο ταχύτητες ανέμου σε συνολικό μέσο χρονικό διάστημα της τάξης των 9.5 sec και για τις δύο μεταβολές. Αντίθετα, η μέθοδος που βασίζεται στις συνεχείς αλλαγές δεν καταφέρνει να πλησιάσει τη βέλτιστη τιμή. Τέλος η μέθοδος που βασίζεται στην ασαφή λογική σταθεροποιεί τον συντελεστή ισχύος σε σύντομο χρονικό διάστημα (2 sec για αύξηση και 4.5 sec για μείωση) αλλά για κάθε ταχύτητα του ανέμου ο C_p παρουσιάζει και μια απόκλιση στην τιμή του. Αυτό οφείλεται όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο στο γεγονός ότι η ασαφής λογική ενδείκνυται σε συστήματα μη γραμμικά. Όσο μεγαλύτερος ο άνεμος τόσο μεγαλύτερη και η μη γραμμικότητα που παρουσιάζει η χαρακτηριστική ροπής στροφών, τόσο η τιμή που πετυχαίνει ο συντελεστής ισχύος βρίσκεται πιο κοντά στη βέλτιστη τιμή 0.5. Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται οι συνολικοί χρόνοι απόκρισης του συντελεστή C_p σε βηματική αύξηση και μείωση της ταχύτητας του ανέμου και για τις τρεις μεθόδους.

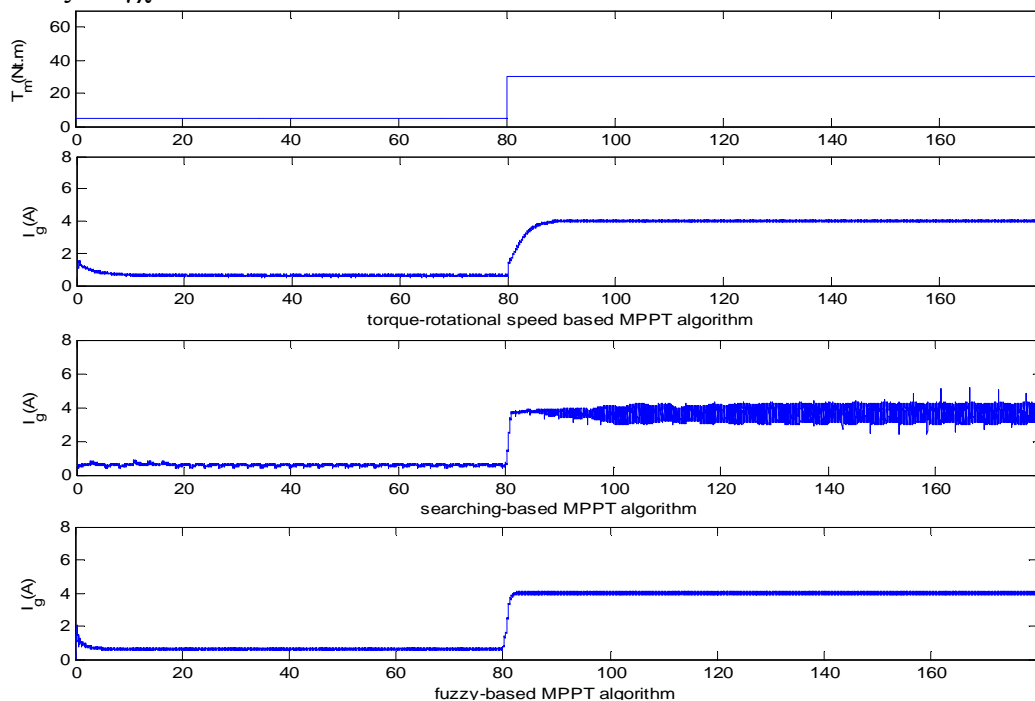
Χρόνοι Απόκρισης του Συντελεστή C_p για Μεταβολές της Ταχύτητας Ανέμου			
V_w	Ελεγκτής με δοσμένη χαρακτηριστική ροπής στροφών	Ελεγκτής βασιζόμενος σε συνεχείς αλλαγές	Ελεγκτής βασιζόμενος σε ασαφή λογική
4m/s- 10m/s	8 sec	80 sec	2 sec
10m/s-4m/s	11 sec	80 sec	4.5 sec

Πίνακας 6-1

Χρόνοι απόκρισης του συντελεστή ισχύος C_p σε μεταβατικές καταστάσεις ταχύτητας ανέμου και για τις τρεις μεθόδους ελέγχου

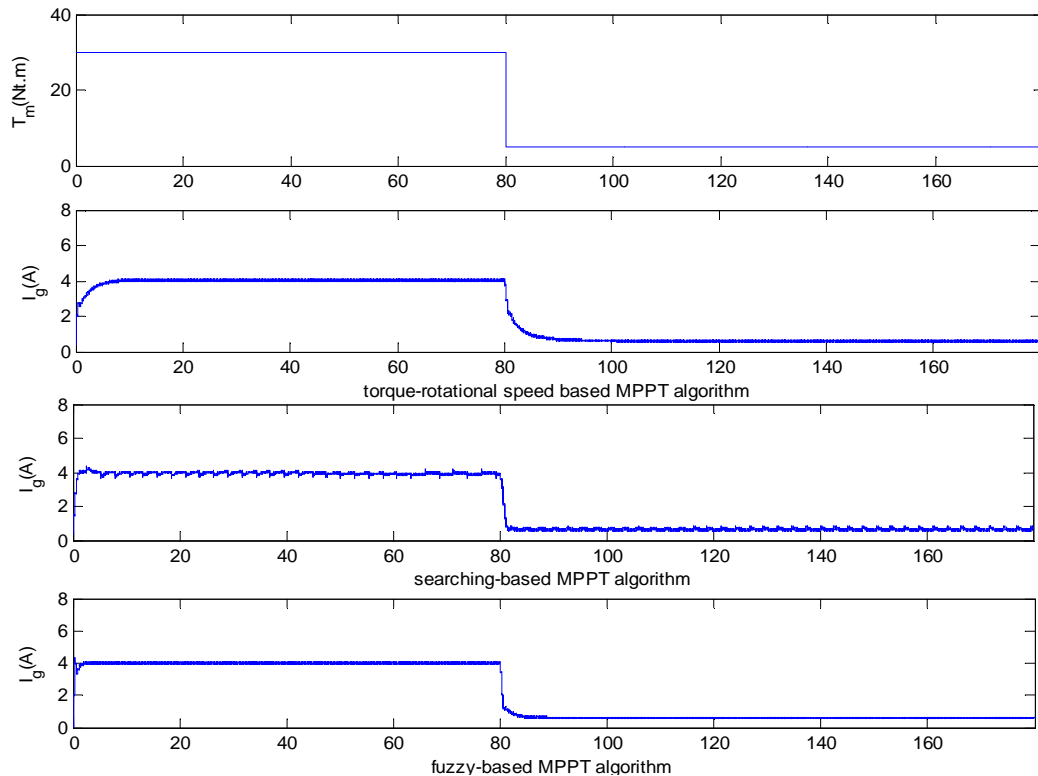
6.2. Απόκριση των συστημάτων σε βηματικές μεταβολές της μηχανικής ροπής

Για να εξεταστεί πως συμπεριφέρεται κάθε σύστημα χωρίς την επίδραση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, δόθηκαν εντολές μηχανικής ροπής εισόδου. Για κάθε μεταβολή της ροπής, ελήφθησαν οι αντίστοιχες αποκρίσεις του ανορθωμένου ρεύματος της γεννήτριας, όπως φαίνεται στα Σχ. 6-3 και 6-4 και για τις τρεις μεθόδους ελέγχου.



Σχ. 6-3

Μεταβολή του ανορθωμένου ρεύματος σε σχέση με το χρόνο για βηματική αύξηση της ροπής εισόδου από 5 σε 30 Nt.m και για τις τρεις μεθόδους ελέγχου.



Σχ. 6-4

Μεταβολή του ανορθωμένου ρεύματος σε σχέση με το χρόνο για βηματική αύξηση της ροπής εισόδου από 30 σε 5 Nt.m και για τις τρεις μεθόδους ελέγχου.

Συναρτήσε της απόκρισης του ανορθωμένου ρεύματος αλλά και του συντελεστή ισχύος, ο οποίος μελετήθηκε παραπάνω, συγκρίνονται τα συστήματα ως προς την ταχύτητά τους να ανταποκρίνονται σε διαταραχές.

Παρατηρώντας την απόκριση των τριών συστημάτων στις περιπτώσεις των βηματικών μεταβολών της ροπής εισόδου από 5 σε 30 Nt.m και αντίστροφα, διακρίνουμε ότι το μοντέλο που λειτουργεί με την χαρακτηριστική καμπύλη είναι πιο αργό στην απόκριση του ανορθωμένου ρεύματος της γεννήτριας, σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα, με συνολικό χρόνο 9.5 sec για αύξηση και 11 sec για μείωση της μηχανικής ροπής. Το σύστημα που λειτουργεί με βάση την ασαφή λογική χρειάζεται συνολικό χρόνο 2 sec για να αυξηθεί και 5 sec για να μειωθεί. Την πιο γρήγορη απόκριση φαίνεται να έχει η μέθοδος η οποία πραγματοποιείται μέσω συνεχών αλλαγών με συνολικό χρόνο αύξησης 1.2 sec και μείωσης 1.5 sec. Παρατηρείται, επίσης, ότι το σύστημα με τον ασαφή ελεγκτή υπερέχει ως προς την μείωση των κυματώσεων που εμφανίζονται στο ανορθωμένο ρεύμα. Στον Πίνακα 6-2 συνοψίζονται οι συνολικοί χρόνοι απόκρισης του ανορθωμένου ρεύματος της γεννήτριας σε βηματική αύξηση και μείωση της μηχανικής ροπής εισόδου και για τις τρεις μεθόδους ελέγχου.

Χρόνοι Απόκρισης του Ανορθωμένου Ρεύματος Γεννήτριας για Μεταβολές της Μηχανικής Ροπής			
T_m	Ελεγκτής με δοσμένη χαρακτηριστική ροπής στροφών	Ελεγκτής βασιζόμενος σε συνεχείς αλλαγές	Ελεγκτής βασιζόμενος σε ασαφή λογική
5Nt.m-30Nt.m	9.5 sec	1.2 sec	2 sec
30Nt.m-5Nt.m	11 sec	1.5 sec	5 sec

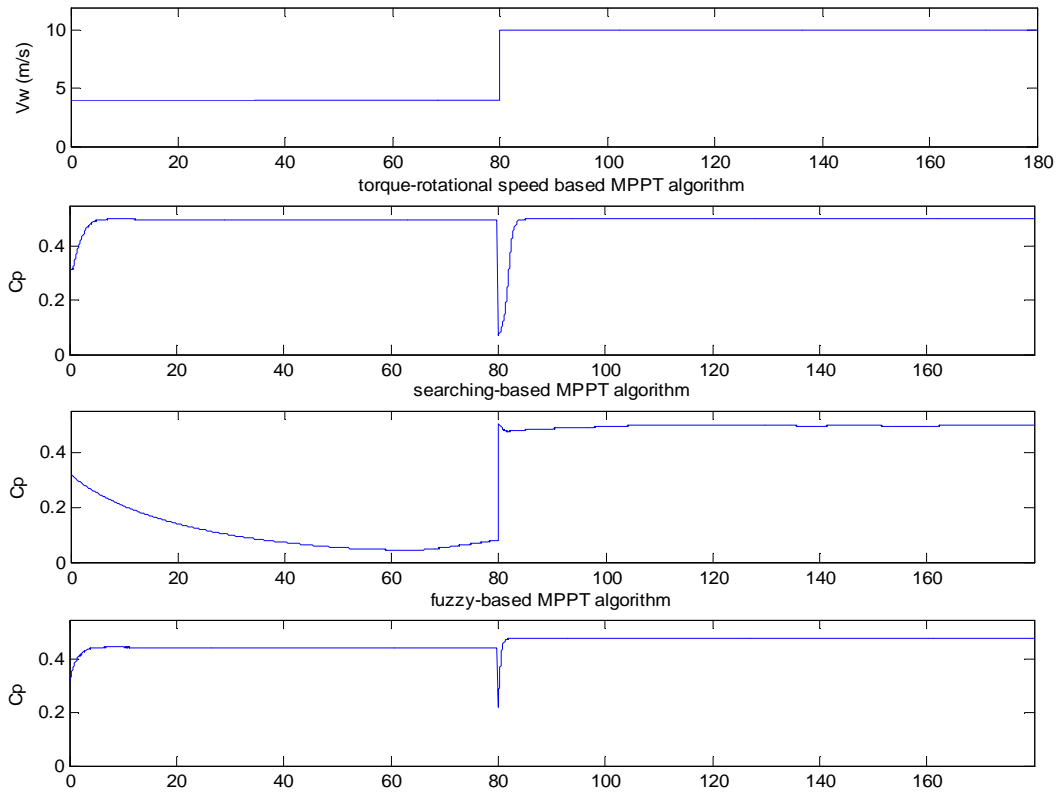
Πίνακας 6-2

Χρόνοι απόκρισης του ανορθωμένου ρεύματος σε μεταβατικές καταστάσεις της ροπής εισόδου και για τις τρεις μεθόδους ελέγχου

Σύμφωνα, λοιπόν, με τους χρόνους απόκρισης του συντελεστή ισχύος για μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου και με τους χρόνους απόκρισης του ανορθωμένου ρεύματος για μεταβολές της ροπής εισόδου μπορούμε να συμπεράνουμε ποια μέθοδος είναι η πιο γρήγορη. Παρ'όλο που η μέθοδος συνεχών αλλαγών παρουσιάζεται να μεταβάλλει γρήγορα το ανορθωμένο ρεύμα του συστήματος, ο συντελεστής ισχύος C_p δεν καταφέρνει να πλησιάσει την βέλτιστη τιμή σε σύντομο χρονικό διάστημα. Άρα η πιο γρήγορη μέθοδος φαίνεται να είναι αυτή που βασίζεται στην ασαφή λογική. Αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού ο ελεγκτής ασαφούς λογικής ανάλογα με τις εισόδους του, δίνει τιμές στο λόγο D με την βοήθεια απλών κανόνων IF-THEN, χωρίς να ανατρέχει σε δοσμένη χαρακτηριστική καμπύλη, να αναζητά σε ποιο σημείο λειτουργίας βρίσκεται ή να μεταβάλλει συνεχώς με μικρές μεταβολές τον λόγο D .

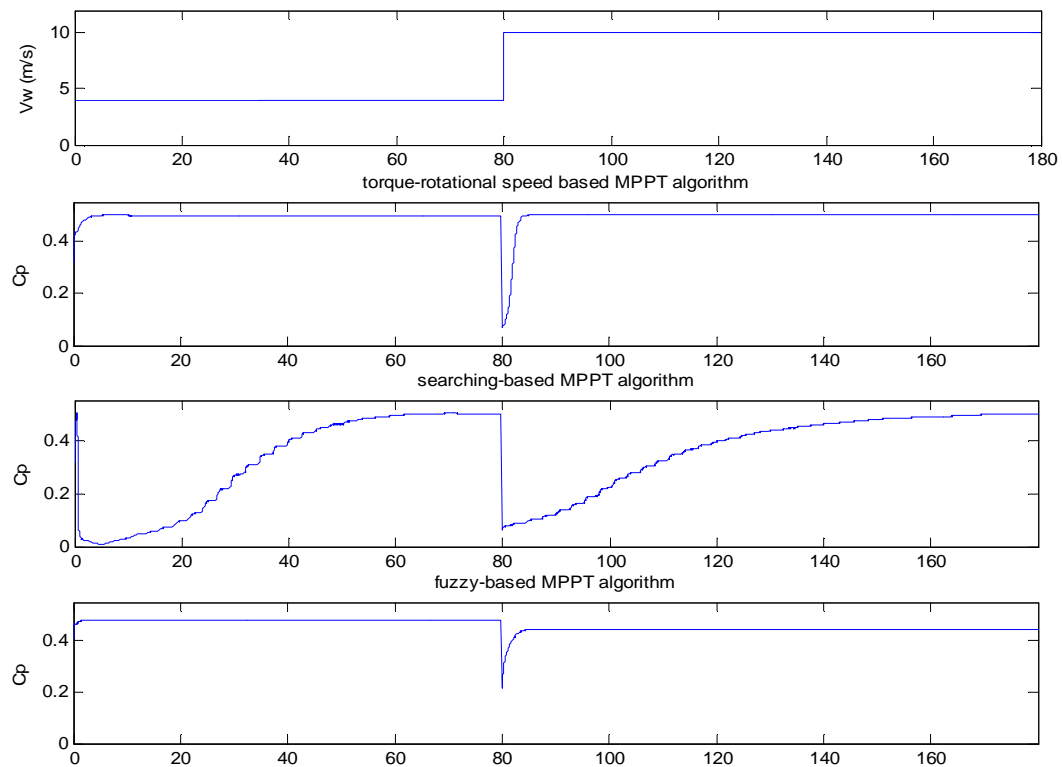
6.3. Επίδραση του λόγου κατάτμησης D στη συμπεριφορά των συστημάτων

Ένα άλλο κριτήριο σύμφωνα με το οποίο μπορούμε να συγκρίνουμε τα τρία συστήματα είναι το κατά πόσο εξαρτώνται από μεταβολές των αρχικών τιμών του λόγου κατάτμησης D του μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Στα Σχ.6-5 και 6-6 απεικονίζεται η συμπεριφορά του συντελεστή ισχύος C_p όταν ρυθμίζονται ως αρχικές τιμές του D 0.1 και 0.9 και για τις τρεις μεθόδους ελέγχου.



Σχ. 6-5

Προσομοιωμένη σε Simulink κυματομορφή του συντελεστή ισχύος C_p σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s με αρχική τιμή λόγου κατάπτωσης 0.1 και για τις τρεις μεθόδους ελέγχου

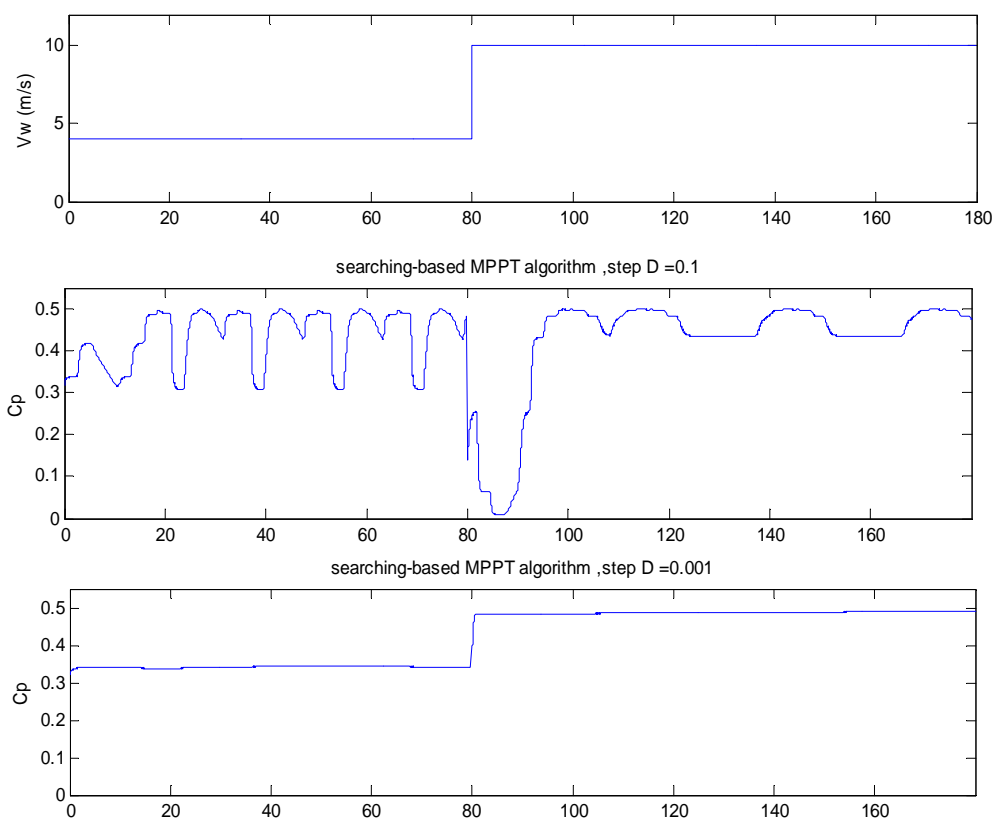


Σχ. 6-6

Προσομοιωμένη σε Simulink κυματομορφή του συντελεστή ισχύος C_p σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s με αρχική τιμή λόγου κατάπτωσης 0.9 και για τις τρεις μεθόδους ελέγχου

Παρατηρείται, λοιπόν, ότι το σύστημα που λειτουργεί με βάση τον ελεγκτή ασαφούς λογικής όπως επίσης και το σύστημα με δοσμένη χαρακτηριστική καμπύλη δεν επηρεάζονται από ακατάλληλες αρχικές τιμές του λόγου κατάτμησης D . Την ίδια συμπεριφορά, όμως, δεν παρουσιάζει το σύστημα το οποίο βασίζεται σε συνεχείς αλλαγές. Αυτό είναι λογικό δεδομένου ότι όταν ο ελεγκτής συνεχών αλλαγών ξεκινήσει με ακατάλληλη αρχική τιμή του λόγου D , δεν μπορεί να προκαλέσει δυναμικές μεταβολές του όπως οι άλλοι δύο ελεγκτές ακριβώς επειδή μεταβάλλεται με σταθερό βήμα.

Όστόσο, εκτός από την αρχική τιμή του λόγου D , εξαιρετικής σημασίας για τη συμπεριφορά του συστήματος που βασίζεται στις συνεχείς αλλαγές είναι και η επιλογή του βήματος μεταβολής του λόγου κατάτμησης ΔD . Η συμπεριφορά του συστήματος για διαφορετικές τιμές βήματος ΔD παρουσιάζεται στο Σχ. 6-7. Όσον αφορά στην επιλογή του βήματος ΔD , συμπεραίνουμε πως ένα μικρό βήμα δίνει ένα πιο αργό αλλά ακριβέστερο στην παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος σύστημα, ενώ ένα μεγάλο ΔD δίνει ένα γρήγορο αλλά λιγότερο ακριβές σύστημα.

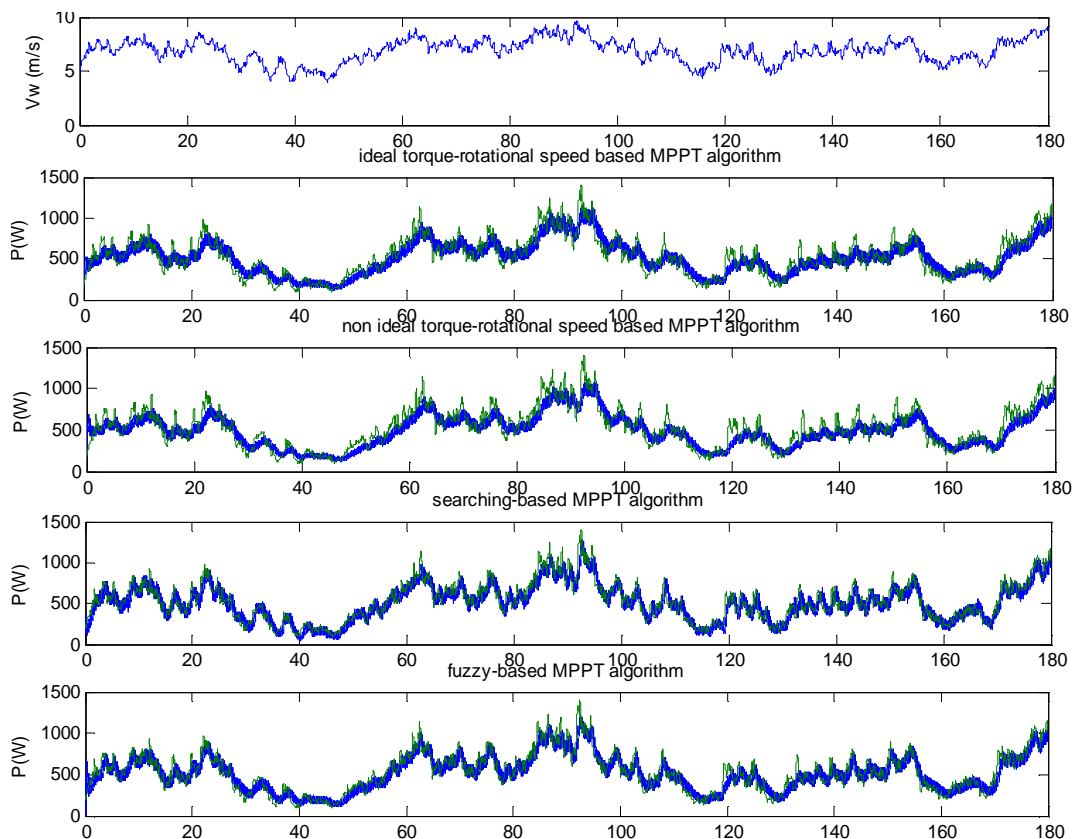


Σχ. 6-7

Προσομοιωμένη σε Simulink κυματομορφή του συντελεστή ισχύος C_p σε μεταβατική κατάσταση για ταχύτητα ανέμου από 4 m/s σε 10 m/s με αρχική τιμή λόγου κατάτμησης 0.4 και βήμα ΔD 0.001 και 0.1 για την μέθοδο των συνεχών αλλαγών

6.4. Απόκριση του συστήματος σε εξομοιωμένη πραγματική κατάσταση λειτουργίας

Για την κατανόηση της συμπεριφοράς των συστημάτων σε πραγματικό εξομοιωμένο άνεμο, η μελέτη βασίστηκε σε δύο χρονοσειρές ανέμου V_2 και V_1 οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω κεφάλαια. Η χρονοσειρά ανέμου V_2 παρουσιάζεται με μεγαλύτερες διακυμάνσεις στην ταχύτητα ανέμου σε σχέση με την V_1 . Παρ'όλα αυτά οι συμπεριφορές των συστημάτων και για τις δύο χρονοσειρές ανέμου είναι παρόμοιες γι'αυτό και παρακάτω παρατίθενται οι κυματομορφές της ισχύος εξόδου, για την ανεμοσειρά V_1 , για όλες τις μεθόδους στο Σχ. 6-8.



Σχ. 6-8

Μεταβολή της ισχύος εξόδου σε σχέση με το χρόνο για χρονοσειρά ανέμου V_1 και για τις τρεις μεθόδους ελέγχου.

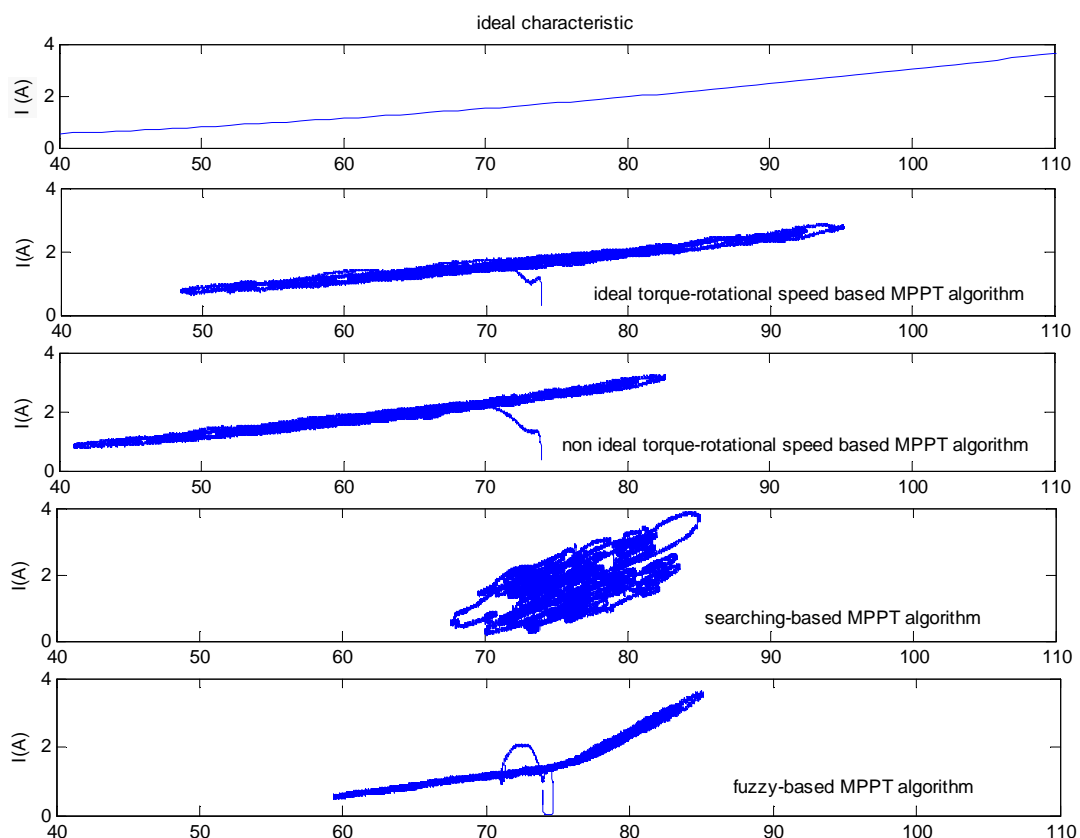
Όταν στη είσοδο του συστήματος εφαρμοσθεί η ανεμοσειρά V_1 η μέση ισχύς εξόδου του συστήματος με τον ασαφή ελεγκτή είναι 512.74 W, τιμή μεγαλύτερη από τη μέση ισχύ εξόδου του μοντέλου με τις συνεχείς αλλαγές (508.6 W) αλλά πολύ κοντά σε αυτή του μοντέλου που λειτουργεί με τη βέλτιστη χαρακτηριστική (512.7 W). Παρ'όλο που το σύστημα με δεδομένη χαρακτηριστική φαίνεται να είναι το μοντέλο που αποδίδει τη μέγιστη ισχύ εξόδου διακρίνεται από το μειονέκτημα της εξάρτησης από δεδομένη χαρακτηριστική καμπύλη. Απο την ανάλυση που έγινε για υποβέλτιστη καμπύλη εισόδου, η ισχύς που εξήχθη από το σύστημα είναι 490.9 W, τιμή πολύ μικρότερη απ'όλες τις ισχύεις εξόδου των άλλων μεθόδων. Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται οι ισχύεις εξόδου για τη χρονοσειρά ανέμου V_1 για όλες τις μεθόδους ελέγχου.

Μέσες Τιμές Ισχύος Εξόδου					
V_w	Θεωρητικά μέγιστη μέση προσλαμβανόμενη ισχύς	Ελεγκτής με δοσμένη βέλτιστη χαρακτηριστική ροπής στροφών	Ελεγκτής με δοσμένη υποβέλτιστη χαρακτηριστική ροπής στροφών	Ελεγκτής βασισμένος σε συνεχείς αλλαγές	Ελεγκτής βασισμένος σε ασαφή λογική
V_1	528.4 W	512.7 W	490.9 W	508.6 W	512.74 W

Πίνακας 6-3

Μέσες ισχύεις εξόδου για χρονοσειρά ανέμου V_1 και για τις τρεις μεθόδους ελέγχου

Έμφαση θα πρέπει να δοθεί και στις χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-συχνότητας στις οποίες τελικά τα μοντέλα κατορθώνουν να λειτουργήσουν μετά από κάθε έλεγχο. Στο Σχ. 6-9 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές κάθε μεθόδου.



Σχ. 6-9

Χαρακτηριστικές καμπύλες ηλεκτρικής συχνότητας – ανορθωμένου ρεύματος γεννήτρια για χρονοσειρά ανέμου V_1 και για τις τρεις μεθόδους

Πιο κοντά στην ιδανική χαρακτηριστική φαίνεται να λειτουργούν το σύστημα με δοσμένη την χαρακτηριστική καμπύλη ροπής - στροφών. Παράλληλα το σύστημα με δοσμένη υποβέλτιστη χαρακτηριστική λειτουργεί σε μια μετατοπισμένη

χαρακτηριστική καμπύλη όπως γίνεται εμφανές από το Σχ. 6-9. Επιπλέον ικανοποιητική μπορεί να χαρακτηριστεί η συμπεριφορά του συστήματος που βασίζεται στην ασαφή λογική αφού παρουσιάζει μια καμπύλη με μικρό φάσμα τιμών και αρκετά κοντά στην ιδανική. Ωστόσο, το σύστημα που βασίζεται στις συνεχείς συγκρίσεις και αλλαγές λειτουργεί σε μεγάλο φάσμα τιμών γύρω από την ιδανική λειτουργία. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των μικρών συνεχών μεταβολών του λόγου D οι οποίες οδηγούν και σε μεγάλο εύρος τιμών λειτουργικών καταστάσεων.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

7.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκαν, αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν τρεις μέθοδοι αναζήτησης σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος που συναντώνται στην βιβλιογραφία: α) μέθοδος βασισμένη σε δοσμένη χαρακτηριστική καμπύλη, β) μέθοδος βασισμένη σε συνεχείς αλλαγές και συγκρίσεις και γ) μέθοδος βασισμένη στην ασαφή λογική.

Συγκεκριμένα, το σύστημα, στο οποίο υλοποιήθηκαν οι μέθοδοι ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος, αποτελείται από μια σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών που οδηγείται στο εργαστήριο άμεσα από έναν DC κινητήρα, ο οποίος προσομοιώνει τη ροπή του ανεμοκινητήρα. Η γεννήτρια ανορθώνεται από έναν ανορθωτή διόδων και ανυψώνεται με τη βοήθεια ενός DC/DC μετατροπέα ανύψωσης και ενός πυκνωτή. Το σύστημα λειτουργεί σε απομονωμένη λειτουργία με μεταβλητό φορτίο ελεγχόμενο από το μικροεπεξεργαστή, συνδεδεμένο στους πυκνωτές σταθεροποίησης της τάσης. Παράλληλα υπάρχουν δύο συστήματα ελέγχου, ένα που επιβάλλει στο σύστημα να λειτουργεί υπό μια προκαθορισμένη χαρακτηριστική ροπής στροφών και ένα δεύτερο που ρυθμίζει τη ροή ενεργού και άεργου ισχύος και εξασφαλίζει τη διατήρηση σταθερής τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα.

Η εξέταση των τριών μεθόδων ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος πραγματοποιήθηκε για τα αντίστοιχα προσομοιωμένα μοντέλα των συστημάτων που υλοποιούν τις μεθόδους αυτές.

Η λειτουργία του κάθε συστήματος αναλύθηκε σύμφωνα με την επίδραση που ασκεί ο λόγος κατάτμησης του DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης στη συμπεριφορά του εκάστοτε συστήματος. Διαπιστώθηκε ότι το σύστημα που λειτουργεί με βάση τον ελεγκτή ασαφούς λογικής όπως επίσης και το σύστημα με δοσμένη χαρακτηριστική καμπύλη δεν επηρεάζονται από τις αρχικές τιμές του λόγου κατάτμησης D . Ωστόσο, το σύστημα το οποίο βασίζεται σε συνεχείς αλλαγές και συγκρίσεις εξαρτάται εκτός από την αρχική τιμή του λόγου D και από το βήμα μεταβολής του λόγου, ΔD . Επίσης, συμπεραίνουμε πως ένα μικρό βήμα δίνει ένα πιο αργό αλλά ακριβέστερο στην παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος σύστημα συνεχών αλλαγών, ενώ ένα μεγάλο ΔD δίνει ένα γρήγορο αλλά λιγότερο ακριβές σύστημα.

Επιπρόσθετα, τα συστήματα αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν ως προς τις αποκρίσεις τους σε βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου αλλά και της μηχανικής ροπής εισόδου. Οι χρόνοι απόκρισης ελήφθησαν για τον συντελεστή ισχύος C_p αλλά και για το ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας. Η πιο γρήγορη μέθοδος φάνηκε να είναι αυτή που βασίζεται στην ασαφή λογική αφού παρουσίαζε τους μικρότερους

χρόνους απόκρισης. Ενώ πιο αργή παρουσιάστηκε η μέθοδος βασιζόμενη σε συνεχείς αλλαγές η οποία δεν κατόρθωνε να πλησιάσει τιμές βέλτιστες για τον συντελεστή C_p .

Τέλος τα συστήματα εξετάστηκαν και για εφαρμογή εξομοιωμένου πραγματικού ανέμου. Τιμές πολύ κοντά στη μέγιστη θεωρητικά προσλαμβανόμενη ισχύ έδωσαν οι μέθοδοι βασισμένες σε δοσμένη χαρακτηριστική καμπύλη και σε ασαφή λογική. Μικρότερη ισχύ παρουσίασε η μέθοδος βασισμένη σε συνεχείς αλλαγές, ενώ πολύ χαμηλή ισχύ απέδωσε η μέθοδος με υποβέλτιστη χαρακτηριστική. Παρατηρήθηκε, ακόμη, ότι οι χαρακτηριστικές καμπύλες, στις οποίες κατόρθωναν να λειτουργούν τα συστήματα με δοσμένη τη βέλτιστη χαρακτηριστική και με ασαφή λογική, πλησίαζαν την ιδανική καμπύλη λειτουργίας της γεννήτριας. Ενώ η μέθοδος συνεχών αλλαγών οδηγούσε σε ένα φάσμα τιμών γύρω από την ιδανική λειτουργία.

Ικανοποιητικά, λοιπόν, αποτελέσματα παρουσίασε η μέθοδος που βασίζεται στην ασαφή λογική αφού η οποία είναι ανεξαρτητοποιημένη από ανακρίβειες της χαρακτηριστικής καμπύλης ροπής στροφών και παρουσιάζει καλύτερη δυναμική συμπεριφορά από τη μέθοδο με τις συνεχείς αλλαγές και συγκρίσεις. Είναι σημαντικό, όμως, να τονισθεί πως σκοπός της παρούσας εργασίας δεν είναι να αναδείξει και να καθιερώσει μία μόνο μέθοδο ελέγχου καταργώντας όλες τις υπόλοιπες. Απλώς, ανάλογα με το κριτήριο σύγκρισης μπορούμε να διακρίνουμε ποια μέθοδος είναι καταλληλότερη για κάθε εφαρμογή.

7.2. Σημεία Προαγωγής της Επιστήμης

Τα τελευταία χρόνια διαμορφώνεται ολοένα και ισχυρότερη η πεποίθηση για τη διάδοση των καθαρών μορφών ενέργειας. Καθώς η συσσωρευμένη ρύπανση στις μεγαλουπόλεις δημιουργεί σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα, ενώ αυξάνονται διαρκώς οι τιμές των συμβατικών καυσίμων, αναμένεται οι εφαρμογές όπως τα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα, τα ηλιακά και τα αιολικά πάρκα να διεισδύουν στην καθημερινή ζωή, παρά την πολυπλοκότητα και το αρχικά υψηλότερο κόστος κατασκευής τους.

Ειδικότερα οι ανεμογεννήτριες παρουσιάζουν ραγδαία διάδοση τελευταία, καθώς έχουν αναπτυχθεί κατάλληλες τεχνολογίες που καθιστούν οικονομικά σκόπιμη την άμεση αξιοποίησή τους. Δεδομένου ότι η αιολική ενέργεια έχει καταστεί μία από τις ταχύτερα αυξανόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το βασικό θέμα των αιολικών συστημάτων μετατροπής ενέργειας είναι πώς να χειρίζεται αποτελεσματικά η ανεμογεννήτρια σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου, αποδίδοντας μέγιστη ισχύ εξόδου. Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι ανεύρεσης σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος με κυριαρχούσα την τεχνική που βασίζεται σε δοσμένη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής στροφών. Συγκεκριμένα η εργασία περιλαμβάνει τα παρακάτω καινοτομικά σημεία :

- Δημιουργία αλγορίθμου ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος, βασιζόμενου στην ασαφή λογική και σχεδίαση αντίστοιχου ελεγκτή. Ο ελεγκτής ασαφούς λογικής προσαρμόστηκε στο προσομοιωμένο μοντέλο του εργαστηριακού δοκιμίου της ανεμογεννήτριας του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών του Ε.Μ.Π..
- Πραγματοποιήθηκε ανάλυση και σύγκριση του ελεγκτή ασαφούς λογικής με δύο διαφορετικής λογικής ελεγκτές ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος. Ο ένας ελεγκτής βασίζεται σε δοσμένη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής στροφών, λειτουργώντας με ντετερμινιστικό τρόπο ενώ ο άλλος

ελεγκτής αναζητεί τη μέγιστη ισχύ μέσω συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων.

- Ως αποτέλεσμα των αναλύσεων και συγκρίσεων των τριών μεθόδων, εξήχθησαν συμπεράσματα και αναδείχθηκαν τα χαρακτηριστικά των τριών τεχνικών ελέγχου.

7.3. Εργασίες για Περαιτέρω Διερεύνηση

Αντικείμενο μελλοντικής προσπάθειας μπορεί να αποτελέσει η υλοποίηση του ελεγκτή ασαφούς λογικής ο οποίος σχεδιάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Τα αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί από τις προσομοιώσεις, θα πρέπει να επιβεβαιωθούν και στην πράξη, με την πειραματική υλοποίηση της διάταξης. Εξάλλου, είναι προφανές ότι στα επόμενα στάδια της κατασκευής του ελεγκτή θα προκύψουν νέοι περιορισμοί και νέες δυνατότητες που δεν ήταν δυνατό να προβλεφθούν από τη θεωρητική ανάλυση.

Επίσης, ένα θέμα που χρήζει περισσότερης μελέτης αποτελεί η βελτιστοποίηση της μεθόδου ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος που βασίζεται σε συνεχείς αλλαγές και συγκρίσεις. Καλύτερα αποτελέσματα θα μπορούσαν να προκύψουν, αν η ευριστική λειτουργία πραγματοποιούνταν μέσω περισσότερων δυναμικών μεταβολών του λόγου κατάτμησης του DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης και όχι με βάση σταθερών βημάτων.

Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει η προσπάθεια ανεύρεσης ενός ελεγκτή που να βασίζεται σε νευρωνικά δίκτυα. Η τεχνική αυτή θα αποτελούσε μια επιπλέον μέθοδο έλεγχου μέγιστης ισχύος. Ωστόσο, απαιτείται η πλήρης διερεύνηση του θέματος σε όλες τις λειτουργικές συνθήκες ώστε να αποφασιστεί ενδεχόμενη μελέτη αυτής της δυνατότητας.

Βιβλιογραφία

- [1] Σ. ΜΑΝΙΑΣ, Α. ΚΑΛΕΤΣΑΝΟΣ, “Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά ”, Εκδόσεις Συμμεών, 2003.
- [2] ΜΙΧ. Π. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ, “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”, Εκδόσεις ΕΜΠ, 1997
- [3] Ν.ΜΟΗΑΝ, Τ. Μ.ΥΝΔΕΛΑΝΔ, W.P.ΡΟΒΒΙΝΣ, “Power Electronics, Converters, Applications, and Design”, Second edition, John Willey & Sons, 1995
- [4] Ι. ΤΕΓΟΠΟΥΛΟΣ, “Ηλεκτρικές Μηχανές”, Εκδόσεις Συμμετρία, 1991
- [5] “Fuzzy Logic Toolbox, User’s Guide, version 2” The MathWorks
- [6] GLOBAL WIND 2007 REPORT από το global wind energy council
- [7] Δ. ΑΛΠΙΡΑΝΤΗΣ, “Μοντελοποίηση και έλεγχος ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια μονίμων μαγνητών”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 1999
- [8] Α. ΧΑΝΙΩΤΗΣ, “Αναπτυξη, Προσομοίωση και Κατασκευή Συστήματος Ελέγχου Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών με Γεννήτρια Μονίμων Μαγνητών για Απομονωμένη Λειτουργία και Διασυνδεδεμένη Λειτουργία”, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, 2007
- [9] Γ. ΤΣΕΚΟΥΡΑΣ, “Μελέτη κατασκευής – ανάλυση κυκλωματικής & πεδιακής συμπεριφοράς δοκιμίου 2,5 kW & ανεμογεννήτριας 25 kW”, Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, 2000.
- [10] Ξ.ΚΟΥΤΙΒΑ «Έλεγχος διασύνδεσης ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ με μετατροπείς πηγής τάσης με σκοπό τη βελτιωμένη απόκριση αιολικού πάρκου που τροφοδοτεί ασθενές σήμα», Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστημίου Πατρών, 2007
- [11] S.SEKALALA “PERFORMANCE OF A THREE-PHASE PERMANENT MAGNET MOTOR OPERATING AS A SYNCHRONOUS MOTOR AND A BRUSHLESS DC MOTOR” thesis, B.EE., Electrical Engineering, City University of New York, 2003 August, 2006
- [12] Α. ΗΑΝΙΟΤΙΣ, Α. ΚΛΑΔΑΣ, “Permanent magnet machine operation with static converter: modeling and experimental verification of space harmonics effects”, International Journal on Sensors and Actuators, A: Physical (Elsevier), vol.106 no 1/3, pp. 286-291, 2003

- [13] M. ALATALO, “Permanent Magnet Machines with Air Gap Windings and Integrated Teeth Windings”, Technical Report 288, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [14] T.NAKAMURA, S. MORIMOTO, M. SANADA, Y. TAKEDA. “Optimum Control of IPMSG for Wind Generation System”, IEEE Trans. Ind. Electron, 2002
- [15] A. M. DE BROE, S. DROUILHET, V. GEVORGIAN, “A peak power tracker for small wind turbines in battery charging applications,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 14, no. 4, pp. 1630–1635, Dec. 1999
- [16] CH. PATSIOS, A. CHANIOTIS, A. KLADAS: “A Hybrid Maximum Power Point Tracking System for Grid-Connected Variable Speed Wind-Generators”, Power Electronics Specialists Conference 2008, PESC08’, June 15-19, 2008 Rhodes, Greece, article accepted for publication.
- [17] E. KOUTROULIS, and K. KALAITZAKIS, “Design of a maximum power tracking system for Wind-Energy-Conversion applications”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 53, no. 2, pp. 486-494, April 2006.
- [18] Z.CHEN, S.ARNALTE GOMEZ, M. McCORMICK “A fuzzy logic controlled power electronic system for variable speed wind energy conversion systems”, IEEE Power electronics and variable speed drives, September 2000, Conference publication No.475
- [19] AHMED G. ABO-KHALIL, DONG-CHOON LEE, JUL-KI SEOK, “Variable speed wind generation system based on Fuzzy logic control for maximum output power tracking”, 2004 24th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference.
- [20] S.T. KARRIS, “Introduction to Simulink with Engineering Applications”, Orchard Publications