



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

**Συμβολή στον έλεγχο ανεμογεννητριών μονίμων μαγνητών με
τεχνητά νευρωνικά δίκτυα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μάριος-Χαρίλαος Δ. Σουσούνης

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2011



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

**Συμβολή στον έλεγχο ανεμογεννητριών μονίμων μαγνητών με
τεχνητά νευρωνικά δίκτυα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μάριος-Χαρίλαος Δ. Σουσούνης

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19^η Ιουλίου 2011.

.....
Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Στ. Ν. Μανιάς
Καθηγητής ΕΜΠ

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

Αθήνα, Ιούλιος 2011

.....
Μάριος-Χαρίλαος Δ. Σουσιούνης

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

Copyright © Μάριος-Χαρίλαος Δ. Σουσιούνης 2011.

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 αξιοποιούμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έχει αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η βελτιστοποίηση της διαθέσιμης ενέργειας του ανέμου από τις ανεμογεννήτριες σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αναλυτική διερεύνηση της δυνατότητας των τεχνητών νευρωνικών δικτύων να συμβάλλουν στον έλεγχο ανεμογεννήτριας και συγκεκριμένα στην παρακολούθηση του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος. Αρχικά περιγράφονται τα επιμέρους τμήματα που απαρτίζουν το σύστημα της ανεμογεννήτριας. Στη συνέχεια επιχειρείται επισκόπηση της θεωρίας των σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη προκειμένου να διαμορφωθεί κατάλληλο μοντέλο αναπαράστασης της γεννήτριας. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή και παράθεση των βασικών σχέσεων των υπολοίπων υποσυστημάτων της ανεμογεννήτριας δηλαδή του τριφασικού ανορθωτή διόδων, του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, του αντιστροφέα που χρησιμοποιεί τεχνικές SPWM και του συστήματος ελέγχου παρακολούθησης σημείου μέγιστης ισχύος.

Συγκεκριμένα, αναλύονται οι συνηθέστερες τεχνικές ελέγχου ανεμογεννήτριας που συναντώνται στην βιβλιογραφία, για την παρακολούθηση σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος, παρουσιάζονται τα μειονεκτήματά τους και εξηγούνται τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την εισαγωγή τεχνητών νευρωνικών δικτύων στον έλεγχο της ανεμογεννήτριας. Στη συνέχεια σχεδιάζονται και συγκρίνονται πέντε διαφορετικοί ελεγκτές βασισμένοι σε νευρωνικά δίκτυα με διαφορετικά χαρακτηριστικά προκειμένου να επιλεγεί ο καταλληλότερος για τον έλεγχο της ανεμογεννήτριας. Ο προτεινόμενος ελεγκτής, συγκρίνεται με τις κυριότερες ανταγωνιστικές τεχνικές ελέγχου ανεύρεσης σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος, δηλαδή τον έλεγχο που βασίζεται σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες και την τεχνική ελέγχου που βασίζεται στην ασαφή λογική.

Η ανάλυση της λειτουργίας του συστήματος σε όλες τις περιπτώσεις ελέγχου που εξετάστηκαν, αλλά και η σύγκριση των μεθόδων αξιολογούνται με βάση, τη συμπεριφορά του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου και την απόκριση του συστήματος σε πραγματικές χρονοσειρές ανέμου.

Τέλος, η παρουσίαση και σύγκριση των προαναφερομένων τεχνικών ελέγχου πραγματοποιείται σε θεωρητικό επίπεδο αλλά και σε επίπεδο προσομοίωσης με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Λέξεις Κλειδιά

Ανεμογεννήτριες, Σύγχρονη Μηχανή Μονίμων Μαγνητών, Μέθοδοι Ανεύρεσης Σημείου μέγιστης Ισχύος , Έλεγχος με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Abstract

Since wind energy has become nowadays one of the most emerging renewable energy sources, a key issue of wind energy conversion systems that is effective handling of the available wind energy in a wide range of wind speeds has acquired increased interest.

The scope of this thesis is to analyze the introduction of artificial neural networks in the control of wind turbines for achieving maximum power point tracking (MPPT). Firstly, the individual components of the system of the wind turbine are described. Reference is made to the theory of permanent magnet synchronous machine in order to derive the model enabling appropriate representation of the generator. A brief description and formulation of the basic relations of constitutive subsystems of the wind turbine has been undertaken, such as the three-phase rectifier, DC/DC boost converter, the SPWM DC/AC inverter and the control system enabling MPPT.

In addition, the most common techniques, found in bibliography, involving MPPT are analyzed, the disadvantages of these techniques are reported and the advantages of the introduction of artificial neural networks to control wind turbines are explained. Five controllers based on neural networks with different features are designed and compared and the most suitable controller for controlling the wind turbines is chosen. The proposed controller is compared to other important techniques involving MPPT, i.e. control based on given characteristic curves and control technique based on fuzzy logic.

The analysis of system operation in every control case and the comparison of the methods examined are evaluated on the basis of the behavior of the system to stepwise changes of the mean wind speed and the system response in real time series of wind velocities.

Finally, the presentation and the comparison of the above techniques implemented in the control system are based both on theory and on simulation results by using a computer.

Key Words

Wind turbine, Permanent Magnet Synchronous Machine, Maximum Power Point Tracking, Searching Algorithm and Neural Network 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. Τέλος καθοριστική ήταν η συμβολή του Δρ. Αντωνίου Χανιώτη ο οποίος έχει αναπτύξει το ηλεκτρονικό κύκλωμα και με βοήθησε να εξοικειωθώ με το αντίστοιχο μοντέλο.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	5
Ευχαριστίες.....	8
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	13
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	13
1.2 Η κατάσταση στην Ελλάδα.....	14
1.3 Αιολική ενέργεια.....	16
1.4 Συστήματα Ανεμογεννητριών.....	18
1.4.1 Διαμόρφωση του μηχανικού υποσυστήματος της ανεμογεννήτριας.....	20
1.4.2 Διαμόρφωση του ηλεκτρικού υποσυστήματος της ανεμογεννήτριας	22
1.4.3 Το υποσύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας.....	24
1.5 Περιγραφή της υπό μελέτη Ανεμογεννήτριας	25
1.6 Δομή της εργασίας	26
1.7 Συνεισφορά στην επιστήμη.....	28
Κεφάλαιο 2: Υποσυστήματα Ανεμογεννήτριας	30
2.1 Εισαγωγή	30
2.2 Αεροδυναμικό μέρος.....	32
2.3 Γεννήτρια Μονίμων Μαγνητών.....	33
2.3.1 Διαμόρφωση Γεννήτριας Μονίμων Μαγνητών και Κυριότερα Λειτουργικά Χαρακτηριστικά	34
2.3.2 Μοντέλα Αναπαράστασης της Γεννήτριας Μονίμων Μαγνητών	36
2.4 Ηλεκτρονικός Μετατροπέας Ισχύος	43
2.4.1 Ανορθωτική γέφυρα διόδων	43
2.4.2 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης	47
2.4.3 Ελεγχόμενο φορτίο	49
2.4.4 Τριφασικός Αντιστροφέας Πηγής Τάσης	50
2.4.5 Συστήματα ελέγχου μετατροπέων	52
2.4.5.1 Σύστημα βελτιστοποίησης απορροφούμενης ισχύος.....	53
2.4.5.2 Σύστημα σταθεροποίησης τάσης	54
2.5 Σύστημα ελέγχου παρακολούθησης σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος.....	54
2.6 Το μοντέλο προσομοίωσης της ανεμογεννήτριας	56

Κεφάλαιο 3: Τεχνικές Ελέγχου Ανεμογεννήτριας Μονίμων Μαγνητών για MPPT	61
.....	61
3.1 Στόχοι συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας	61
3.2 Μέθοδος Βασισμένη σε Δεδομένες Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας ...	64
3.2.1 Θεωρητική Ανάλυση	64
3.2.2 Μοντέλο Προσομοίωσης	67
3.2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου με δεδομένες καμπύλες	69
.....	69
3.3 Μέθοδος Ανίχνευσης του Σημείου Μέγιστης Ισχύος μέσω Μικρών Μεταβολών	69
.....	69
3.3.1 Θεωρητική ανάλυση	69
3.3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου ελέγχου μέσω Μικρών	73
Μεταβολών	73
3.4 Μέθοδος Προσδιορισμού του Σημείου Μέγιστης Ισχύος Βασισμένη στην Ασαφή	73
Λογική.....	73
3.4.1 Θεωρητική ανάλυση	73
3.4.2 Μοντέλο Προσομοίωσης	78
3.4.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου που βασίζεται στην	79
ασαφή λογική.....	79
3.5 Μέθοδος Ελέγχου βασισμένη στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα	80
3.5.1 Εισαγωγή	80
3.5.2 Θεωρητική ανάλυση ελέγχου ανεμογεννήτριας με τεχνητά νευρωνικά	80
δίκτυα.....	80
3.5.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου που βασίζεται στα	84
τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.....	84
Κεφάλαιο 4: Διαμόρφωση και εφαρμογές Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	86
4.1 Εισαγωγή στα Νευρωνικά δίκτυα.....	86
4.2 Ιστορική αναδρομή	86
4.3 Βιολογικά νευρωνικά δίκτυα	88
4.4 Τα πλεονεκτήματα των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	91
4.5 Το μοντέλο του τεχνητού νευρώνα.....	93
4.6 Αρχιτεκτονικές Νευρωνικών Δικτύων	97
4.7 Τεχνικές εκπαίδευσης Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	100

4.7.1 Μάθηση με εκπαιδευτή - Επιβλεπόμενη μάθηση.....	101
4.7.2 Μάθηση χωρίς εκπαιδευτή - Ενισχυτική Μάθηση.....	102
4.7.3 Μάθηση χωρίς εκπαιδευτή - Μη Επιβλεπόμενη μάθηση.....	103
4.7.4 Τρόποι προσαρμογής των βαρών των συνάψεων στα αναδρομικά ΤΝΔ	103
4.8 Η μέθοδος της οπισθοδιάδοσης του σφάλματος.....	105
4.8.1 Επεξεργασία των δεδομένων για την εκπαίδευση του ΤΝΔ.....	107
Κεφάλαιο 5: Μέθοδος Ελέγχου Ανεμογεννήτριας Μονίμων Μαγνητών βασισμένη στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα.....	111
5.1 Σχεδιασμός Τεχνητών Νευρωνικών Ελεγκτών για τον έλεγχο ανεμογεννήτριας	111
5.1.1 Αρχιτεκτονική των νευρωνικών ελεγκτών – Το μοντέλο NARX	113
5.1.2 Η εκπαίδευση των νευρωνικών ελεγκτών	116
5.1.3 Αποτελέσματα εκπαίδευσης των νευρωνικών ελεγκτών.....	119
5.2 Το μοντέλο προσομοίωσης.....	129
5.3 Απόκριση του συστήματος σε βηματικές αλλαγές του ανέμου.....	132
5.4 Απόκριση του συστήματος σε πραγματικές χρονοσειρές ανέμου.....	137
5.5 Προτεινόμενος ελεγκτής που βασίζεται σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα	141
Κεφάλαιο 6: Αξιολόγηση συστημάτων ελέγχου με Νευρωνικά Δίκτυα.....	145
6.1 Εισαγωγή	145
6.2 Διερεύνηση απόκρισης σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.....	146
6.2.1 Σύγκριση συστημάτων ελέγχου ανεμογεννήτριας σε απότομη αύξηση της ταχύτητας του ανέμου	146
6.2.2 Σύγκριση συστημάτων ελέγχου ανεμογεννήτριας σε απότομη μείωση της ταχύτητας του ανέμου	148
6.3 Διερεύνηση απόκρισης σε μεταβατική λειτουργία.....	150
6.3.1 Σύγκριση συστημάτων ελέγχου ανεμογεννήτριας σε ασθενή άνεμο μέτριας μεταβλητότητας.....	151
6.3.2 Σύγκριση συστημάτων ελέγχου ανεμογεννήτριας σε ασθενή άνεμο μεγάλης μεταβλητότητας.....	155
6.3.3 Σύγκριση συστημάτων ελέγχου ανεμογεννήτριας σε ισχυρό άνεμο μικρής μεταβλητότητας	159

6.4 Συμπεράσματα	163
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα	165
7.1 Συμπεράσματα	165
7.2 Σημεία Προαγωγής της Επιστήμης.....	167
7.3 Εργασίες για Περαιτέρω Διερεύνηση	168
Βιβλιογραφία	169

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι μορφές 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. **Οι δυο κρίσιμοι παράγοντες** που έστρεψαν τις βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες στις ΑΠΕ ήταν **πρώτον η ενεργειακή ανασφάλεια** και η απεξάρτηση τους από τα ορυκτά καύσιμα και κυρίως το πετρέλαιο, **δεύτερον, η συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων** από την απελευθέρωση του διοξειδίου του άνθρακα. Τα είδη των ΑΠΕ είναι η αιολική ενέργεια, η υδροηλεκτρική, η ηλιακή, η γεωθερμία, η βιομάζα, η ενέργεια από παλίρροιες, η ενέργεια από κύματα και ωκεανούς. Από αυτές η αιολική και η υδροηλεκτρική κατέχουν την πρώτη θέση όσον αφορά στις εφαρμογές παραγωγής ενέργειας ενώ και η ηλιακή αναπτύσσεται συνεχώς.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι τα παρακάτω :

- **Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας** και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικούς ενεργειακούς πόρους οι οποίοι εξαντλούνται.
- **Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας** και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτητοποίησης και της ενεργειακής ασφάλειας 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.

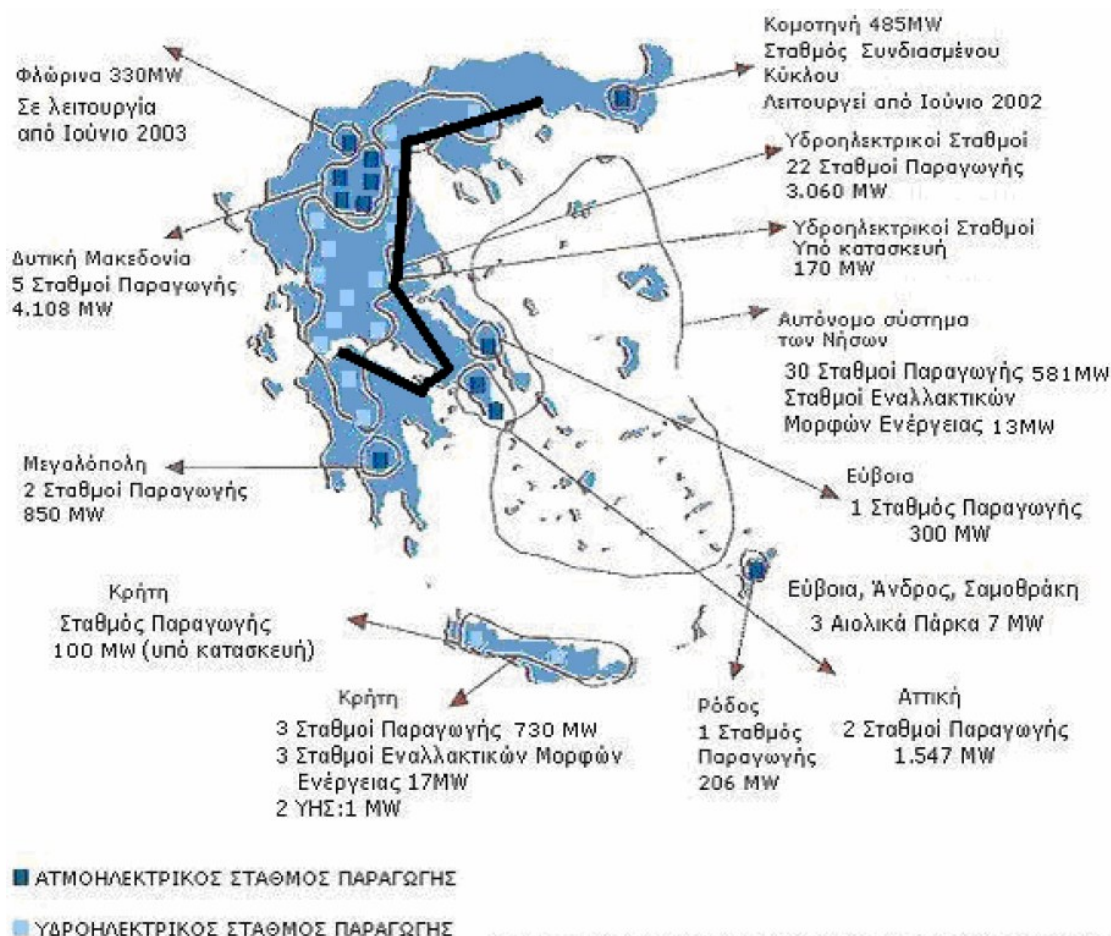
- Έχουν συνήθως **χαμηλό λειτουργικό κόστος** που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα από τις τιμές των συμβατικών καυσίμων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ **δημιουργούν σημαντικό αριθμό νέων θέσεων εργασίας**, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις **πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών** και σημαντικό παράγοντα για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. καλλιέργειες με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας).
- **Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο**, έχουν σχεδόν μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα και συμβάλλουν στην άμβλυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου καθώς συνεισφέρουν στον περιορισμό της εκπομπής των αερίων του θερμοκηπίου.
- Με την ορθολογική χρήση των ΑΠΕ μπορούν να δοθούν διαφορετικές λύσεις για διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες.

1.2 Η κατάσταση στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, στη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας η ενεργειακή κατανάλωση αυξάνεται ραγδαία ιδιαίτερα στον κτιριακό τομέα και στις μεταφορές. Οι παραγωγικές διαδικασίες εξακολουθούν να είναι ενεργειακά σπάταλες, δηλαδή δεν έχουν υιοθετηθεί επαρκείς πρακτικές εξοικονόμησης ενέργειας. Παράλληλα, η Ελλάδα εμφανίζεται σε πολύ χαμηλές θέσεις και κάτω από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο όσον αφορά τις εκπομπές ρύπων του «φαινομένου του θερμοκηπίου» και κυρίως του διοξειδίου του άνθρακα, ως αποτέλεσμα της χρήσης ορυκτών καυσίμων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα κατά το 2005 έφθασε συνολικά τις 51074 GWh. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής της χώρας κατά το 2005 ήταν 14023 MW εκ των οποίων, οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας είχαν 13763,71 MW και οι συμπαραγωγοί 259,785 MW. Ο λιγνίτης αποτελεί την κύρια πηγή της πρωτογενούς εγχώριας παραγωγής ενέργειας, αντιπροσωπεύοντας ποσοστό 82,95% επί του συνόλου. Η συνολική ακαθάριστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το 2005 στη χώρα ανήλθε στις 60020

GWh οι οποίες προήλθαν κατά 59,2% από στερεά καύσιμα, 15,3% από υγρά, 13,6% από φυσικό αέριο, 9,35% από υδροηλεκτρικά, 2,1% από αιολικά και 0,37% από βιομάζα και απόβλητα [13].



Σχήμα 1.1 Ατμοηλεκτρικοί και υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας και ο αναπτυξιακός άξονας – S

Η Ελλάδα, αν και προικισμένη με φυσικούς πόρους, παρουσιάζει χαμηλό μερίδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας** και συγκεκριμένα 9,6% για το 2003 (σε σχέση με το μέσο όρο ΕΕ25 12,7%). Η Οδηγία 2001/77/ΕΕ προέβλεπε για την Ελλάδα ενδεικτικό στόχο κάλυψης από ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές, περιλαμβανομένων των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων, σε ποσοστό της ακαθάριστης κατανάλωσης ενέργειας κατά το έτος 2010 ίσο με 20,1%, στόχος συμβατός με τις υποχρεώσεις που απορρέουν από το Πρωτόκολλο του Κιότο.

Η **συνολική δυναμικότητα των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με χρήση ΑΠΕ** (εκτός μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων) που έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν το 2010 **ανέρχεται σε 3,1 εκατομμύρια MWh** και προέρχεται κατά

65,6% από αιολικά πάρκα, 24% από μικρά υδροηλεκτρικά έργα, 4,2% από φωτοβολταϊκά και 6,1% από βιομάζα και βιοαέριο [20].

Πίνακας 1.1 Εγκατεστημένη ισχύς (MW) και παραγόμενη ενέργεια (MWh) διασυνδεδεμένων συστημάτων ΑΠΕ για το 2010

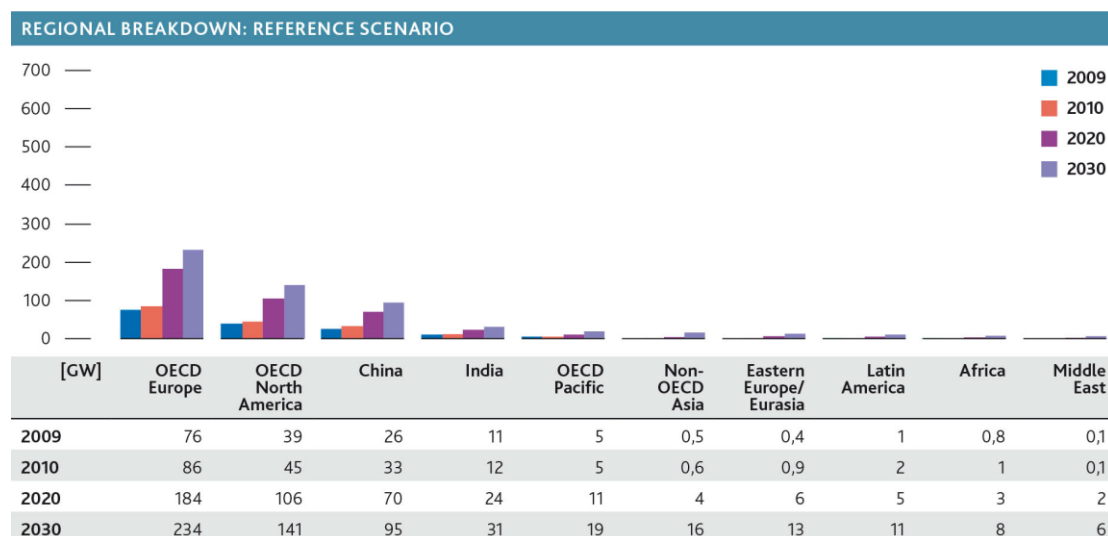
Μήνας	Αιολικά		Υδροηλεκτρικά		Βιομάζα - Βιοαέριο		Φ/Β σταθμοί σε λειτουργία		Σύνολο	
	MWh	MW	MWh	MW	MWh	MW	MWh	MW	MWh	MW
ΙΑΝ	231.075	922,61	80.996	182,61	15.700	40,80	4.251,47	53,70	332.022	1199,72
ΦΕΒ	197.363	940,61	81.403	182,61	14.184	40,80	2.713,03	55,55	295.663	1219,57
ΜΑΡ	179.761	940,61	91.192	182,61	16.086	40,80	5.640,74	58,76	292.680	1222,78
ΑΠΡ	179.989	940,61	80.844	183,97	16.033	40,80	7.165,10	63,10	284.031	1228,48
ΜΑΪ	104.659	940,61	71.231	183,97	16.823	40,80	8.252,14	71,20	200.965	1236,58
ΙΟΥΝ	105.918	940,61	51.661	183,97	16.573	40,80	18.949,59	77,76	193.102	1243,14
ΙΟΥΛ	139.247	940,61	41.604	183,97	16.271	40,80	9.729,84	84,76	206.852	1250,14
ΑΥΓ	148.824	963,39	32.565	185,12	16.524	40,80	10.672,45	99,25	208.585	1288,56
ΣΕΠ	148.964	983,19	32.458	185,12	16.017	40,80	11.523,12	113,70	208.962	1322,81
ΟΚΤ	162.048	1003,19	53.154	192,21	16.801	40,80	25.868,34	127,87	257.871	1364,07
ΝΟΕ	220.747	1005,89	63.586	194,52	16.477	40,80	14.296,16	139,84	315.106	1381,05
ΔΕΚ	243.084	1039,09	72.803	196,83	16.444	41,05	12.888,65	152,92	345.220	1429,89
Σύνολο	2.061.678		753.497		193.933		131.950,63		3.141.060	

Παρατηρείται η ραγδαία αύξηση της διείσδυσης των φωτοβολταϊκών σταθμών στο διασυνδεδεμένο σύστημα της Ελλάδας τριπλασιάζοντας την εγκατεστημένη ισχύ από τον Ιανουάριο μέχρι τον Δεκέμβριο του 2010. Η εγκατεστημένη ισχύς των μικρών υδροηλεκτρικών, της βιομάζας και βιοαερίου παραμένει σχεδόν σταθερή, ενώ αξιόλογη αύξηση παρουσιάζει η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών που αυξάνεται κατά 116,48MW μέσα στο 2010.

1.3 Αιολική Ενέργεια

Από τις παραπάνω ΑΠΕ, η βιομηχανία της αιολικής ενέργειας έχει παρουσιάσει ραγδαία άνθηση τα τελευταία χρόνια ενώ παρουσιάζονται νέες τεχνολογίες όπως η χρήση θαλάσσιων αιολικών πάρκων όπου, πνέουν εντονότεροι άνεμοι. Ενώ το παγκόσμιο εγκατεστημένο δυναμικό αιολικής ενέργειας ανερχόταν το 1998 σε λίγο περισσότερο από 10.000 MW συνολικά, το 2009 είχε ήδη φθάσει τα 158.000 MW. Η εγκατεστημένη αυτή ισχύς αναμένεται να αυξηθεί σύμφωνα με το

βασικό σενάριο στα 415.500 MW μέχρι το 2020. Η Ευρώπη παραμένει η μεγαλύτερη αγορά αιολικής ενέργειας με εγκατεστημένη ισχύ το 2010 συνολικά 86.000MW που αποτελούν το 46% του παγκόσμιου συνόλου παραγωγής αιολικής ενέργειας [6].



Σχήμα 1.2 Βασικό σενάριο αύξησης εγκατεστημένης αιολικής ισχύς ανά ήπειρο μέχρι το 2030

Στην Ελλάδα το ουσιαστικό έναυσμα για την ανάπτυξη των ΑΠΕ έγινε με τον Ν.2244/94, ο οποίος έδωσε την δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ σε ιδιώτες με σκοπό την πώλησή της στη ΔΕΗ. Παράλληλα ορίστηκαν τιμές πώλησης της ενέργειας με δεκαετής συμβάσεις. Οι μελλοντικές προοπτικές για την ελληνική αγορά αιολικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα ευοίωνες. Το κύριο αιολικό δυναμικό της Ελλάδας εντοπίζεται στα νησιά του Αιγαίου, τη Νότια Εύβοια, την Ανατολική Πελοπόννησο και την Ανατολική Θράκη. Όμως το τεράστιο αιολικό δυναμικό που διαθέτει η Ελλάδα παραμένει σε μεγάλο βαθμό ακόμα ανεκμετάλλευτο.

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) εάν γίνει **συστηματική εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού**, μπορεί αυτό να συνεισφέρει ουσιαστικά στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας **καλύπτοντας έως και το 15% των αναγκών της Ελλάδας σε ηλεκτρική ενέργεια**. Εκτός από τα πρωτεύοντα αποτελέσματα της χρήσης ΑΠΕ, που είναι η μείωση της μόλυνσης του περιβάλλοντος και η εξοικονόμηση καυσίμων, θα δημιουργηθούν νέες θέσεις εργασίας, αποκεντρωμένη ανάπτυξη, σημαντική απεξάρτηση από τα εισαγόμενα καύσιμα, αλλά και ανάπτυξη της τεχνογνωσίας σε διάφορους συναφείς τεχνολογικούς κλάδους.

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, διοξείδιο 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, **η απαραίτητη ανθρώπινη κατασκευαστική δραστηριότητα έχει επιπτώσεις στο περιβάλλον**. Η χωροθέτηση των αιολικών πάρκων και ιδιαίτερα των θαλάσσιων 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 την χλωρίδα και την πανίδα όπως π.χ. προβλήματα που μπορούν να δημιουργηθούν αν οι ανεμογεννήτριες τοποθετηθούν πάνω σε μεταναστευτικές οδούς των πτηνών.

1.4 Συστήματα Ανεμογεννητριών

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 απαιτεί γνώσεις τόσο ηλεκτρολογικές όσο και των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου. Οι επικρατέστεροι τύποι ανεμογεννητριών ταξινομούνται κυρίως σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου.

Οι πλέον διαδεδομένοι τύποι είναι οι Α/Γ οριζοντίου άξονα και οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα. Παρ' όλα αυτά έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά η **ανεμογεννήτρια 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 (μονόπτερους, δίπτερους, τρίπτερους, πολύπτερους), το είδος των πτερυγίων (*stall-controlled*, *pitch-controlled*), τη φορά των πτερυγίων σε σχέση με τη φορά του ανέμου (*down-stream*, *upstream*) κ.τ.λ.

Τα κυριότερα μέρη από τα οποία αποτελείται μια ανεμογεννήτρια είναι :

- **Το μηχανικό σύστημα**, που 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 κίνησης η οποία περιλαμβάνει έναν πολλαπλασιαστή στροφών.
- **Το ηλεκτρικό σύστημα**, που 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**, που προσαρμόζει τη λειτουργία της προς τις εκάστοτε συνθήκες ανέμου, επιτηρεί την ασφάλεια και μεγιστοποιεί την απόδοσή της.

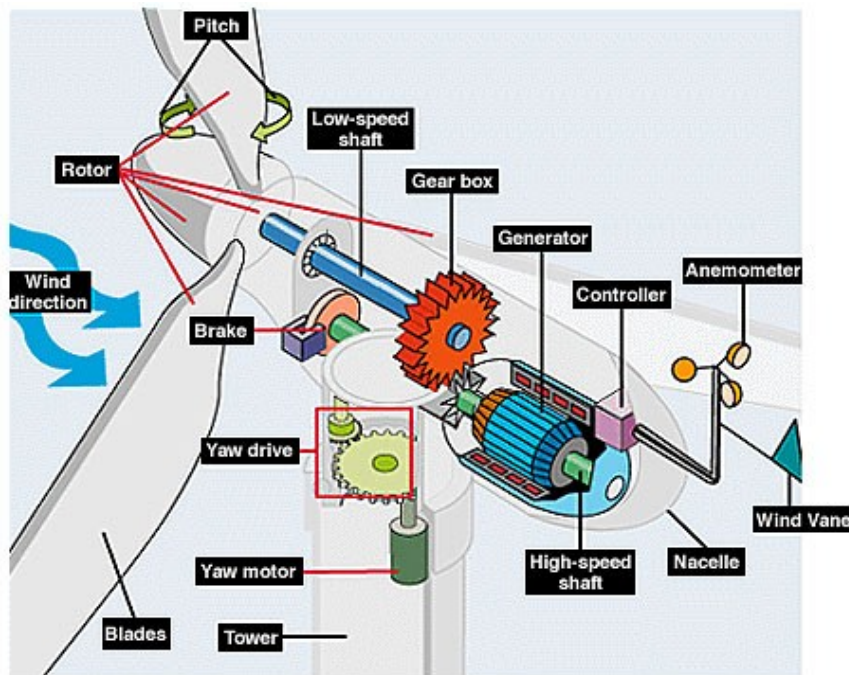
Οι Α/Γ μπορούν να διακριθούν ανάλογα με τις αρχές λειτουργίας και ελέγχου τους. Επομένως, οι Α/Γ μπορούν να είναι:

- **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 Α/Γ 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. Παρακάτω αναλύονται περαιτέρω τα υποσυστήματα των ανεμογεννητριών.

1.4.1 Διαμόρφωση του μηχανικού υποσυστήματος της ανεμογεννήτριας

Το μηχανικό σύστημα μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα περιλαμβάνει τα πτερύγια (*Blades*) και τον δρομέα με τα αντίστοιχα μέρη που είναι απαραίτητα για την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική και την προστασία της ανεμογεννήτριας όπως, τα φρένα (*brakes*) και το κιβώτιο ταχυτήτων (*Gear Box*). Το εσωτερικό μιας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα φαίνεται στην εικόνα 1. Επίσης πολλές ανεμογεννήτριες περιλαμβάνουν και σύστημα προσανατολισμού της ατράκτου (*yaw mechanism*).

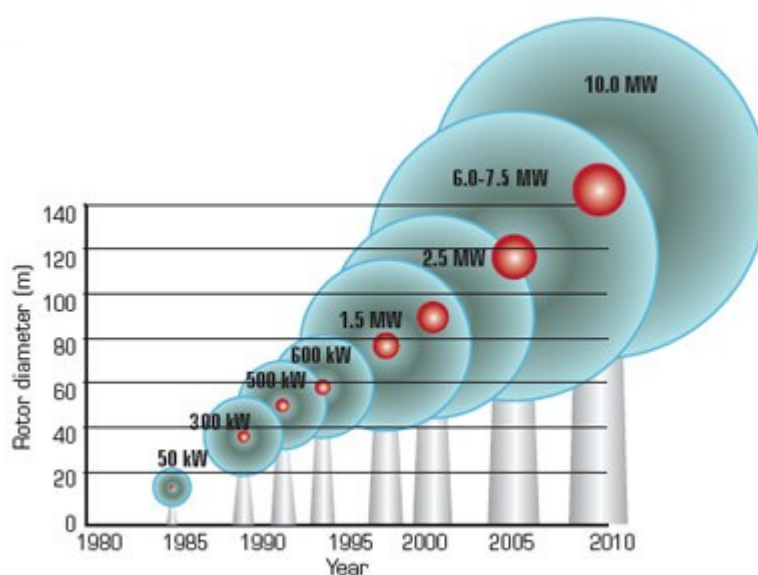


Εικόνα 1 Διαμόρφωση μιας ανεμογεννήτριας

Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι πτερυγίων για τον έλεγχο και περιορισμό της αεροδυναμικής ισχύος και ροπής.

- **Πτερύγια με έλεγχο του βήματος (pitch controlled)** που μπορούν να περιστραφούν κατά τον διαμήκη άξονα τους. Με αυτό τον τρόπο ελέγχεται η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου και κατά συνέπεια η προσπίπτουσα, στα πτερύγια, αεροδυναμική ισχύς. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της διάταξης είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω του συστήματος ελέγχου της γωνίας των πτερυγίων αλλά και της χρήσης υδραυλικών και ηλεκτρομηχανολογικών μέσων για την περιστροφή των πτερυγίων.
- **Ενεργός έλεγχος (Active stall) του βήματος των πτερυγίων** στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες. Στη διάταξη αυτή όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή η γωνία pitch μεταβάλλεται αντίθετα, μεγαλώνει δηλαδή η γωνία με τον άνεμο αποκόπτοντας με αυτό τον τρόπο την περίσσεια της αεροδυναμική ισχύος. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι ελέγχεται γρηγορότερα η ισχύς εξόδου με αποτέλεσμα να μην καταπονούνται τα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας σε ριπές ανέμου. Αυτός ο έλεγχος χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες μεγαλύτερες του 1MW.

Τα πτερύγια ενώνονται με τον άξονα χαμηλών στροφών ο οποίος περιστρέφεται με 30-60 ΣΑΛ. Τα πτερύγια και ο άξονας ονομάζονται ρότορας (rotor). Ο άξονας χαμηλών στροφών συνδέεται με τον άξονα υψηλών στροφών μέσω ενός πολλαπλασιαστή στροφών που αυξάνει τον αριθμό των στροφών σε 1000 - 18000 ΣΑΛ που είναι απαραίτητες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την γεννήτρια. **Η αύξηση του μεγέθους του ρότορα είναι καθοριστικής σημασίας για την μείωση του κόστους παραγωγής και της αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος.** Η εξέλιξη της τάξης μεγέθους των ανεμογεννητριών φαίνεται στο σχήμα 1.3.



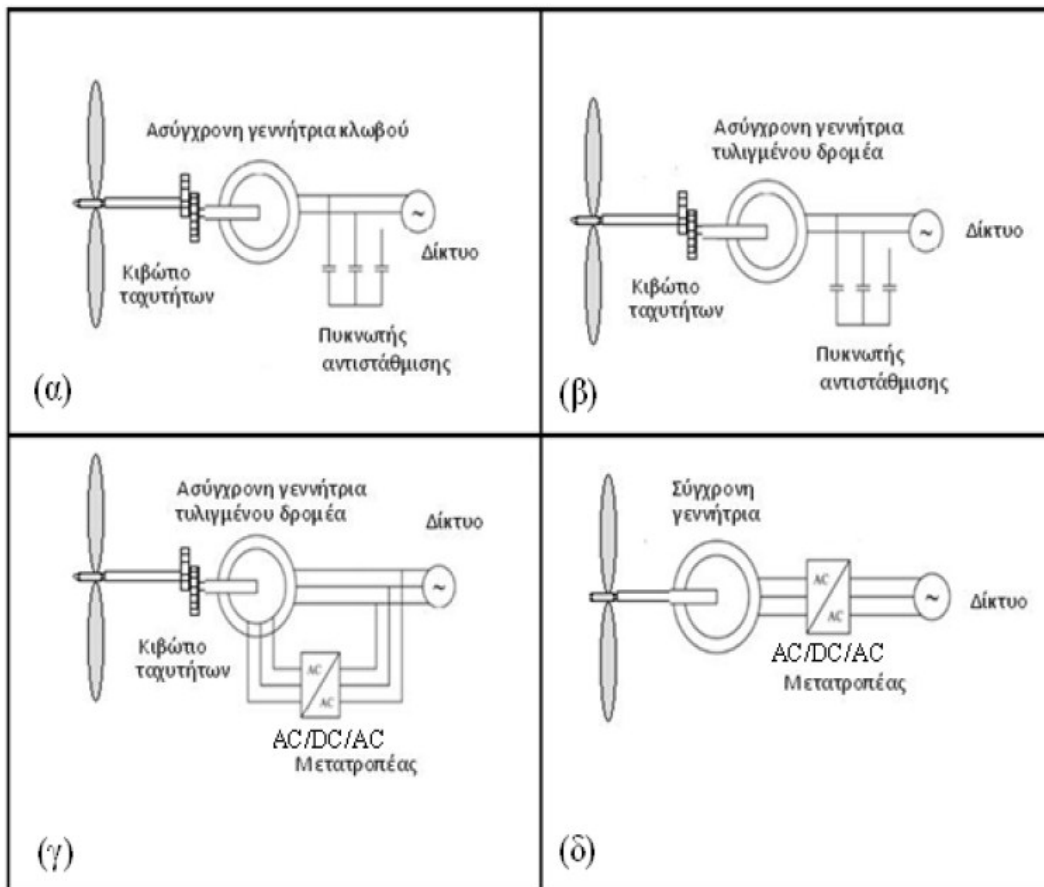
Σχήμα 1.3 Μέγεθος και ισχύς των ανεμογεννητριών

1.4.2 Διαμόρφωση του ηλεκτρικού υποσυστήματος της ανεμογεννήτριας

Οι ανεμογεννήτριες έχουν κατηγοριοποιηθεί μέχρι τώρα με βάση τον έλεγχο του βήματος των πτερυγίων (*pitch controlled* και *active stall*) και την ταχύτητα περιστροφής (*fixed speed* και *variable speed*). Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να διακριθούν και από τον τύπο της γεννήτριας που είναι εφοδιασμένες αλλά και από τον τρόπο σύνδεσής τους στο δίκτυο. Έτσι έχουμε τις παρακάτω επικρατέστερες διαμορφώσεις.

- **Ασύγχρονη γεννήτρια κλωβού**, σταθερών στροφών απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο (σχήμα 1.4α).
- **Ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα**, μεταβλητών στροφών, μεταβλητής αντίστασης απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο (σχήμα 1.4β).

- Ασύγχρονη γεννήτρια μεταβλητών στροφών διπλής τροφοδότησης (σχήμα 1.4γ).
- Σύγχρονη γεννήτρια μεταβλητών στροφών με τύλιγμα διεγέρσεως ή μόνιμο μαγνήτη και μετατροπέας EP/ΣΡ/ΕΡ στο στάτη για σύνδεση στο δίκτυο (σχήμα 1.4δ).



Σχήμα 1.4 Διαμόρφωση ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννητριών (α) A/G σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού (β) A/G σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα (γ) A/G μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (δ) A/G μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια.

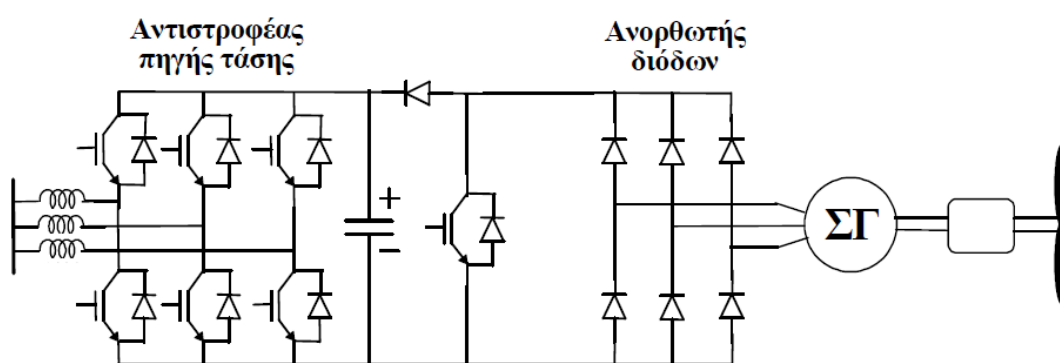
Η παρούσα εργασία θα ασχοληθεί με σύστημα σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών, μεταβλητών στροφών του οποίου η διάταξη θα παρουσιαστεί σε επόμενη παράγραφο.

Ο έλεγχος για την παρακολούθηση της μέγιστης ισχύος πραγματοποιείται από ελεγκτές που ονομάζονται ελεγκτές MPPT και χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές για την ανεύρεση της μέγιστης ισχύος. Αρχή λειτουργίας για όλες τις τεχνικές είναι ο έλεγχος των στροφών της Α/Γ ώστε σε κάθε χρονική στιγμή, για κάθε ταχύτητα ανέμου, το σύστημα της ανεμογεννήτριας να λειτουργεί με μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος $C_{p(max)}$ κοντά στο 0.5.

Η παρούσα διπλωματική αναλύει τις επικρατέστερες μεθόδους ελέγχου για την ανεύρεση σημείου λειτουργίας που μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ και προτείνει μια νέα μέθοδο ελέγχου με την χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.

1.5 Περιγραφή της υπό μελέτη Ανεμογεννήτριας

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 :



Σχήμα 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 εναλλασσομένου ρεύματος (AC) μέσω της γεννήτριας.

- Από AC μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια σταθερού ρεύματος (DC) μέσω του ανορθωτή και κατόπιν ανυψώνεται η τάση (boost-up converter).
- Από DC μετατρέπεται σε AC σταθερής συχνότητας μέσω του αντιστροφέα και αποδίδεται στο δίκτυο.

Ο ανυψωτής τάσης φαίνεται να χρειάζεται πηνίο όμως η αυτεπαγωγή των τυλιγμάτων της γεννήτριας επαρκεί για τη λειτουργία του καθώς λειτουργεί όπως θα λειτουργούσε ένα πηνίο στον ανυψωτή. Συγκεκριμένα, η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας είναι 100 ΣΑΛ. **Η έξοδος της γεννήτριας ανορθώνεται από έναν απλό ανορθωτή διόδων και ανυψώνεται με τη βοήθεια ενός DC/DC μετατροπέα ανύψωσης (boost-up converter) και ενός πυκνωτή.** Ο μετατροπέας αυτός χρησιμοποιείται για να φέρει την τάση εισόδου τού αντιστροφέα σε επίπεδα που να καθιστούν δυνατή τη μεταφορά ισχύος.

Η μετατροπή της ανυψωμένης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση σταθερής συχνότητας γίνεται μέσω ενός αντιστροφέα πηγής τάσης, ο οποίος χρησιμοποιεί τεχνική SPWM για την παραγωγή ημιτονοειδούς τάσης. Η διάταξη πρέπει να παρέχει όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια, και για να επιτευχθεί αυτό, **ο αντιστροφέας πρέπει να λειτουργεί με όσο γίνεται μεγαλύτερη απόδοση** και να εξασφαλίζει ότι η τάση στον πυκνωτή παραμένει περίπου σταθερή. Μέσω του ανυψωτή είναι εφικτό η τάση στον 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, οι δύο μετατροπείς ελέγχονται από δύο μικροεπεξεργαστές οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους.

1.6 Δομή της εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η **εισαγωγή μιας νέας μεθόδου ελέγχου ανεμογεννήτριας μονίμων μαγνητών με την χρήση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ)** και η σύγκριση της μεθόδου αυτής με τεχνικές ελέγχου οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα για την παρακολούθηση σημείων λειτουργίας μέγιστης ισχύος. Η διπλωματική εργασία αποτελείται από 7 κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρατίθενται 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 στα κυριότερα υποσυστήματα τους. Επίσης περιγράφεται σύντομα η υπό μελέτη ανεμογεννήτρια και η εργαστηριακή διάταξη.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται τα επιμέρους τμήματα που απαρτίζουν το σύστημα της ανεμογεννήτριας. Αρχικά, παρουσιάζεται το αεροδυναμικό μέρος. Στη συνέχεια παρατίθεται η θεωρία σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη, για να καταλήξουμε στο μοντέλο αναπαράστασης της γεννήτριας. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή και παράθεση των βασικών σχέσεων που ισχύουν για τον τριφασικό ανορθωτή διόδων, τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης (*boost-up converter*) και τον SPWM αντιστροφέα. Τέλος, ορίζεται ο στόχος του συστήματος ελέγχου σε μια ανεμογεννήτρια.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τέσσερις μέθοδοι παρακολούθησης του σημείου μέγιστης παραγόμενης ισχύος. Πρώτη, εξετάζεται η μέθοδος που βασίζεται σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής στροφών, δεύτερη η μέθοδος ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος μέσω μικρών μεταβολών και τρίτη η μέθοδος που είναι βασισμένη σε ασαφή λογική. Τέλος, εισάγεται ο τρόπος ελέγχου ανεμογεννήτριας με την χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Η ανάλυση και των τεσσάρων μεθόδων πραγματοποιείται με παράθεση θεωρητικών στοιχείων και μοντέλων προσομοίωσης ενώ διακρίνονται και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται επισκόπηση της θεωρίας των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, επεξηγείται ο τρόπος λειτουργίας τους και αναλύεται η τοπολογία τους και ο τρόπος εκπαίδευσής τους. Επίσης, παρουσιάζεται αναλυτικότερα ο αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης του σφάλματος και παρατίθενται τρόποι βελτίωσης της μάθησης ενός ΤΝΔ.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μη γραμμικό αυτοπαλινδρομικό μοντέλο με εξωγενείς εισόδους (Nonlinear autoregressive model with exogenous inputs, NARX) και σταδιακά ο σχεδιασμός πέντε νευρωνικών ελεγκτών, αλλά και το μοντέλο προσομοίωσης στο SIMULINKTM. Συγκρίνονται οι νευρωνικοί ελεγκτές σε βηματικές και πραγματικές χρονοσειρές ανέμου και επιλέγεται ο

αποτελεσματικότερος ελεγκτής. Ακόμα, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των νευρωνικών ελεγκτών στο σύστημα της ανεμογεννήτριας.

Στο έκτο κεφάλαιο συγκρίνονται οι επικρατέστερες μέθοδοι ελέγχου παρακολούθησης σημείου μέγιστης ισχύος με την νέα μέθοδο που χρησιμοποιεί τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Αναλύεται η λειτουργία του συστήματος σε κάθε περίπτωση ελέγχου, αλλά και συγκρίνονται οι μέθοδοι, οι οποίες αξιολογούνται με βάση τα εξής κριτήρια: την απόκριση του συστήματος σε βηματικές μεταβολές της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου και 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 τα οποία αναδείχθηκαν από την παρούσα διπλωματική εργασία ότι είναι σκόπιμο να αποτελέσουν αντικείμενα μελλοντικής ερευνητικής μελέτης.

Τέλος, παρατίθεται η βιβλιογραφία της εργασίας.

1.7 Συνεισφορά στην επιστήμη

Η παρούσα διπλωματική εργασία συμβάλει στη **σχεδίαση ενός δυναμικού μοντέλου** πραγματικού χρόνου στο περιβάλλον MATLAB/SIMULINK που προσομοιώνει τη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών.

Το μοντέλο προσομοιώνει με ακρίβεια όλα τα επιμέρους υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας μαζί με τους αντίστοιχους ελεγκτές. Ένα καινοτομικό χαρακτηριστικό της παρούσας εργασίας είναι η αξιοποίηση της **τεχνολογίας των τεχνητών νευρωνικών δικτύων** για τη διαμόρφωση κατάλληλων ελεγκτών παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT). Αναπτύσσονται εναλλακτικοί τύποι ελεγκτών με διαφορετικά χαρακτηριστικά και επιλέγεται ο καταλληλότερος για τον έλεγχο της ανεμογεννήτριας. Επίσης, αξιολογείται σε σύγκριση με τους κυριότερους αντίστοιχους ελεγκτές που συναντώνται στην βιβλιογραφία και παρουσιάζονται τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα χρήσης του.

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από την εργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός ελεγκτή που θα

εκμεταλλεύεται αποτελεσματικότερα την κινητική ενέργεια του ανέμου, επιτρέποντας στην ανεμογεννήτρια να παράγει μέγιστη ισχύ.

Κεφάλαιο 2

Υποσυστήματα ανεμογεννήτριας

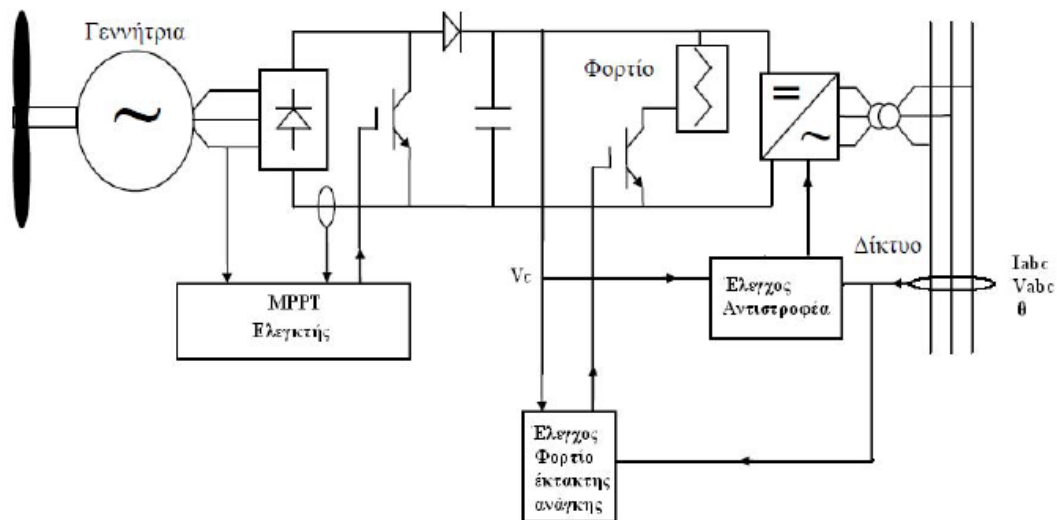
2.1 Εισαγωγή

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 με 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 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 μετατρέπει τη κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης αναλύεται η ηλεκτρονική διάταξη που χρησιμοποιείται αφενός 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 μόνιμων μαγνητών. Κατόπιν χρησιμοποιούμε προσομοιώσεις για την εξαγωγή ενός πολύ απλού μοντέλου που όμως περιγράφει πολύ ικανοποιητικά στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της γεννήτριας μαζί με τον ανορθωτή διόδων. Γίνεται συνοπτική παρουσίαση των μετατροπέων ισχύος, δηλαδή της ανορθωτικής γέφυρας διόδων, του DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης και του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης, καθώς και του συστήματος ελέγχου τους. Τέλος, περιγράφεται ο ρόλος του συστήματος ελέγχου ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος.



Σχήμα 2.1 Σύστημα ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών. Διακρίνονται τα υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας.

2.2 Αεροδυναμικό μέρος

Ο αέρας έχει μάζα χαμηλής πυκνότητας που όταν έχει ταχύτητα ο προκύπτων άνεμος που δημιουργείται έχει εκμεταλλεύσιμη κινητική ενέργεια. Στην πράξη ένας ανεμοκινητήρας δεν δεσμεύει όλη την κινητική ενέργεια αλλά μόνο ένα κλάσμα αυτής. **Η ισχύς που προσλαμβάνεται από τον ανεμοκινητήρα** δίνεται από την εξίσωση:

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

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

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

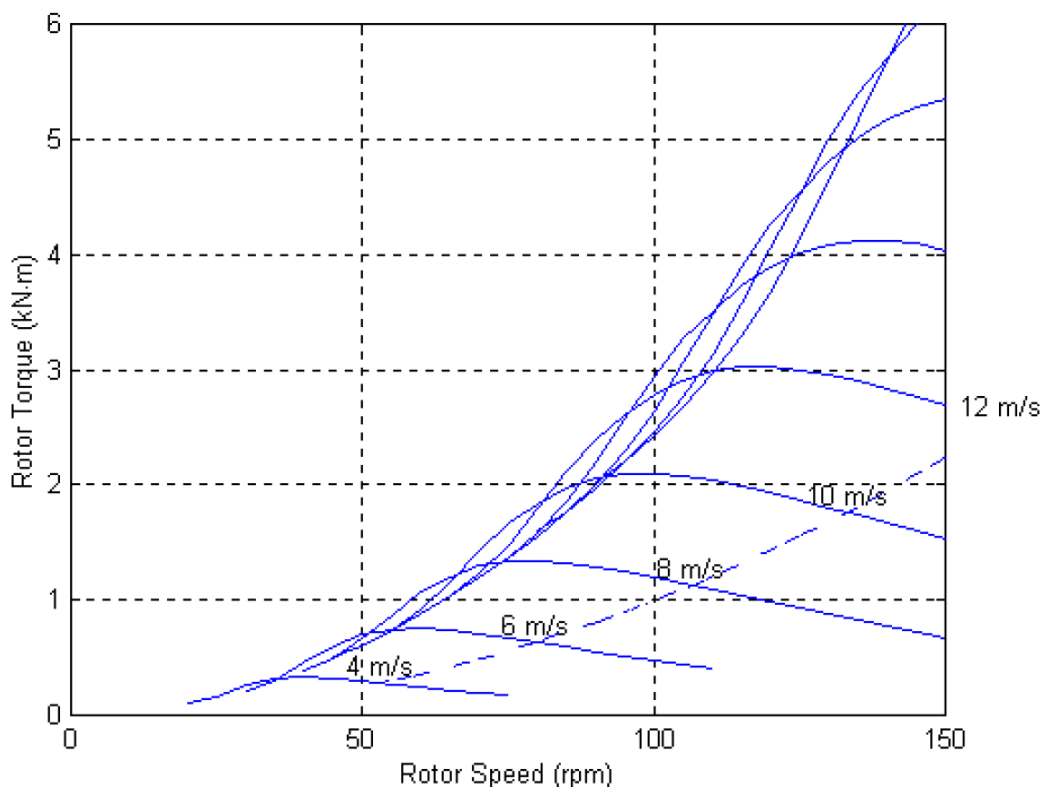
όπου:

- R , η ακτίνα και ωR 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 A. 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 – 0,5). Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του για κάθε ταχύτητα ανέμου για μια συγκεκριμένη τιμή του λόγου λ (λοπτιμυμ). 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 διάφορες 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 σχήμα 2.2. Στο σχήμα 2.2 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.



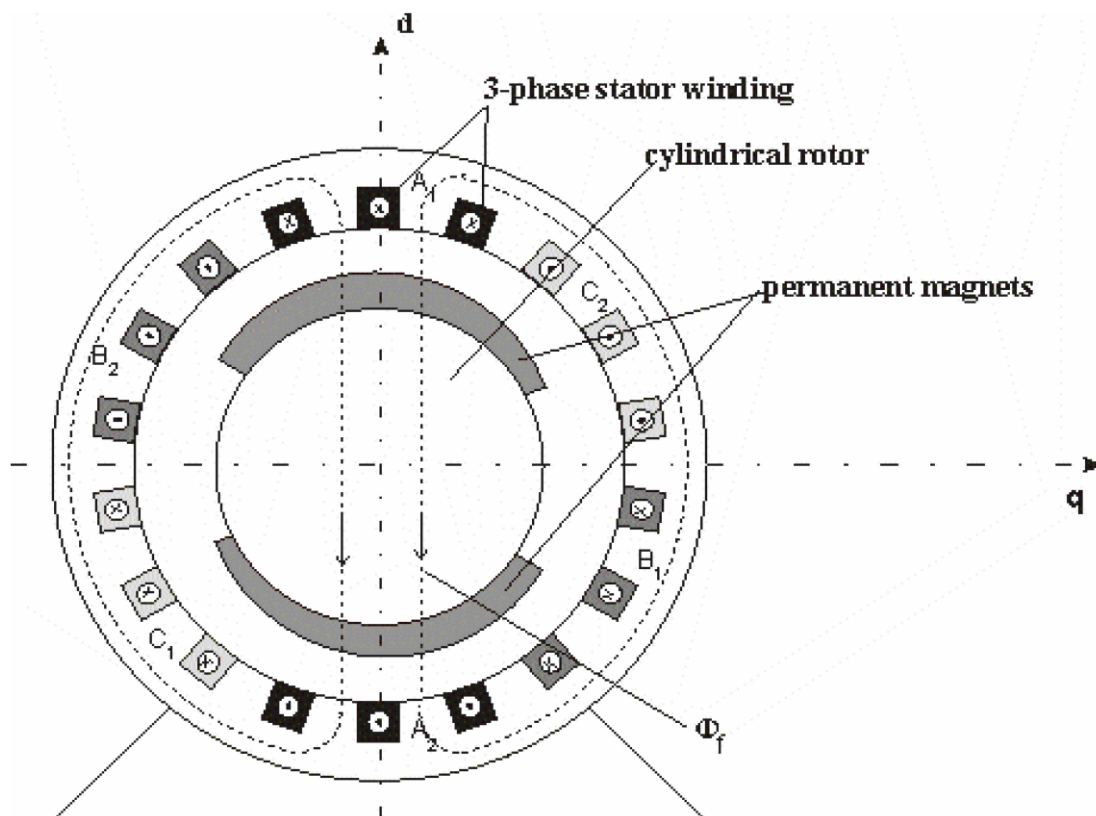
Σχήμα 2.2 Ιδανική Χαρακτηριστική ροπής –στροφών ανεμοκινητήρα για διάφορες ταχύτητες ανέμου. Στη διακεκομμένη γραμμή βρίσκονται τα σημεία που αντιστοιχούν σε μέγιστη ισχύ.

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 μόνιμων μαγνητών είναι οι σύγχρονες (με ομοιόμορφα στρεφόμενο, ημιτονοειδές κατανομημένο πεδίο στο στάτη) και οι διακοπτικοί, τραπεζοειδής (με πεδίο στο στάτη το οποίο εναλλάσσεται διακοπτικά σε διακριτά βήματα). Η γεννήτρια μόνιμων μαγνητών που χρησιμοποιείται στη παρούσα εργασία ανήκει στην πρώτη περίπτωση και παρουσιάζεται η κάθετη τομή της στο σχήμα 2.3.



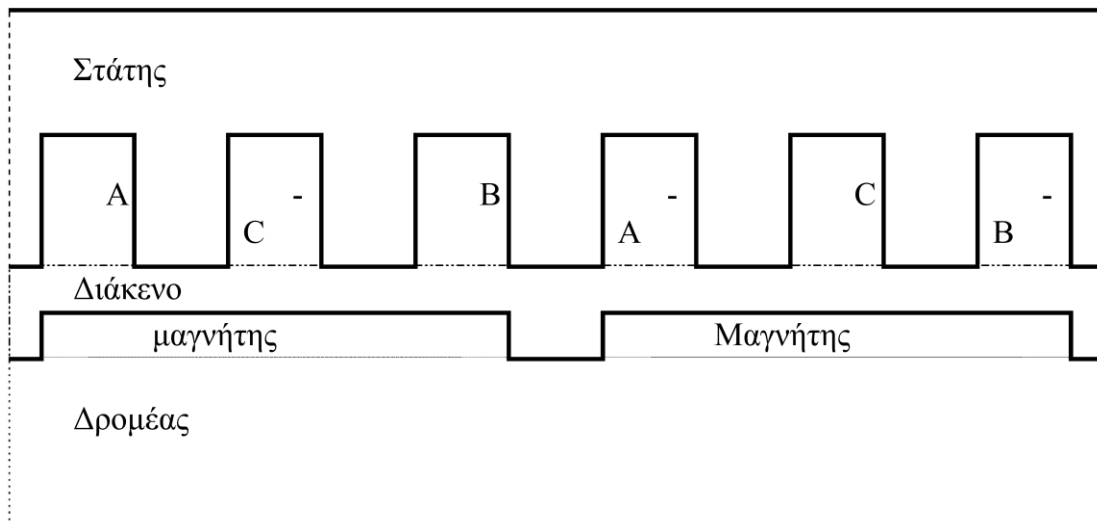
Σχήμα 2.3 Διατομή γεννήτριας μόνιμων μαγνητών με επιφανειακούς μαγνήτες [11]

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 μόνιμων μαγνητών 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 πρέπει ο δρομέας να περιστραφεί με την ίδια ταχύτητα με αυτής της περιστρεφόμενης ροής που παράγεται από το στάτη. Ο δρομέας ακολουθεί το 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 τροφέα 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. 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 σχήμα 2.4. Έτσι, κάθε φάση είναι κατά το $-1/3$ εξαρτημένη από την άλλη.



Σχήμα 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 είσοδοι λαμβάνονται:

- V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : οι τάσεις των ακροδεκτών
- T_m : η μηχανική ροπή στον άξονα.

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.

Ως 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:

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

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

Όπου:

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

$$\psi_{md} = \frac{1}{\frac{1}{X_{md}} + \frac{1}{X_{ls}}} \cdot \left(\frac{\psi_{qs}}{X_{ls}} + i_m \right) = \frac{X_{md}}{X_{md} + X_{ls}} \cdot \psi_{ds} + \frac{X_{md} \cdot X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} \cdot i_m \quad (2-6)$$

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:

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

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

$$\theta_r = \frac{1}{J} \int \omega_r dt \quad (2-11)$$

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: $V_{b(qd0)} = \sqrt{2} \cdot V_{b(abc)} =$ πλάτος της φασικής τάσης.
- Βασική τιμή ρεύματος γραμμής abc: $I_{b(abc)} = \frac{S_b}{3 \cdot V_{b(abc)}}$
- Βασική τιμή ρεύματος για τις μεταβλητές qd0: $I_{b(qd0)} = \frac{S_b}{\frac{3}{2} \cdot V_{b(qd0)}}$
- Βασική τιμή αντίστασης: $Z_b = \frac{V_{b(abc)}}{I_{b(abc)}} = \frac{3 \cdot V_{b(abc)}^2}{S_b}$ ή ισοδύναμα:

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

- Βασική τιμή ροπής: $T_b = \frac{S_b}{\left(\frac{2}{P}\right) \cdot \omega_b}$ όπου η βασική γωνιακή ταχύτητα ω_b

αντιστοιχεί στην ονομαστική ή βασική τιμή (ηλεκτρικής) συχνότητας της μηχανής.

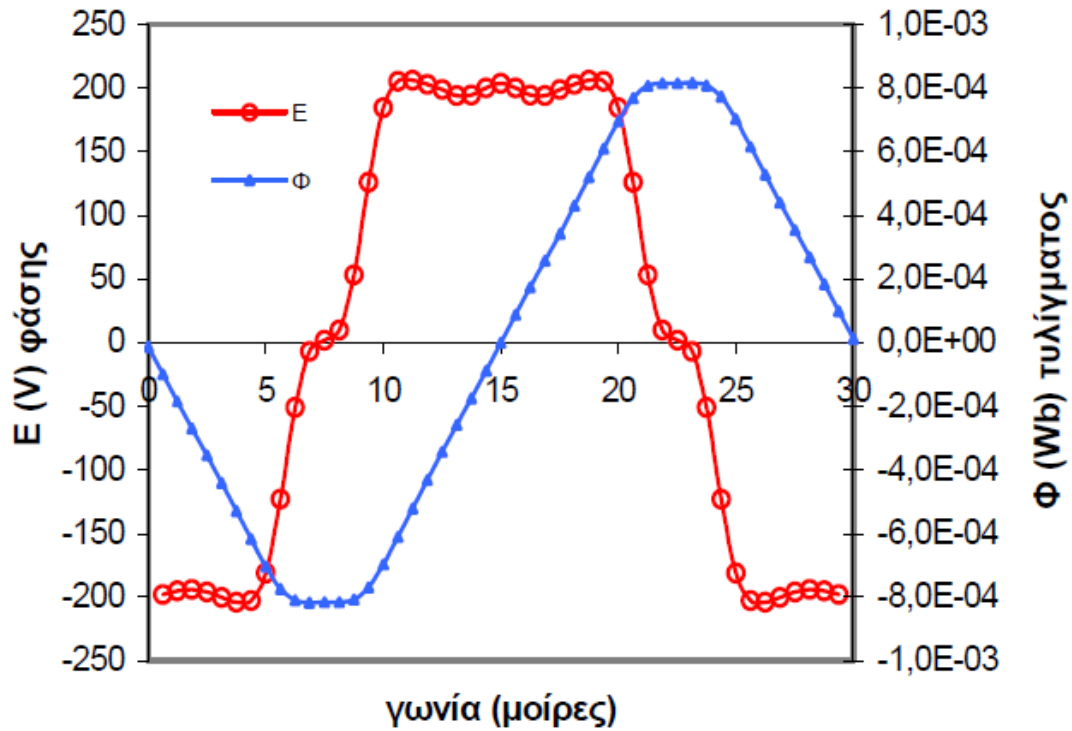
- Ανηγμένη σταθερά αδράνειας: $H = \frac{\frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_{mb}^2}{S_b} = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{2}{P}\right)^2 \cdot J \cdot \omega_b^2}{S_b}$ όπου ω_{mb}

είναι η βασική τιμή μηχανικής ταχύτητας.

Μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος με ηλεκτρεγερτική δύναμη που περιέχει ανώτερες αρμονικές συνιστώσες

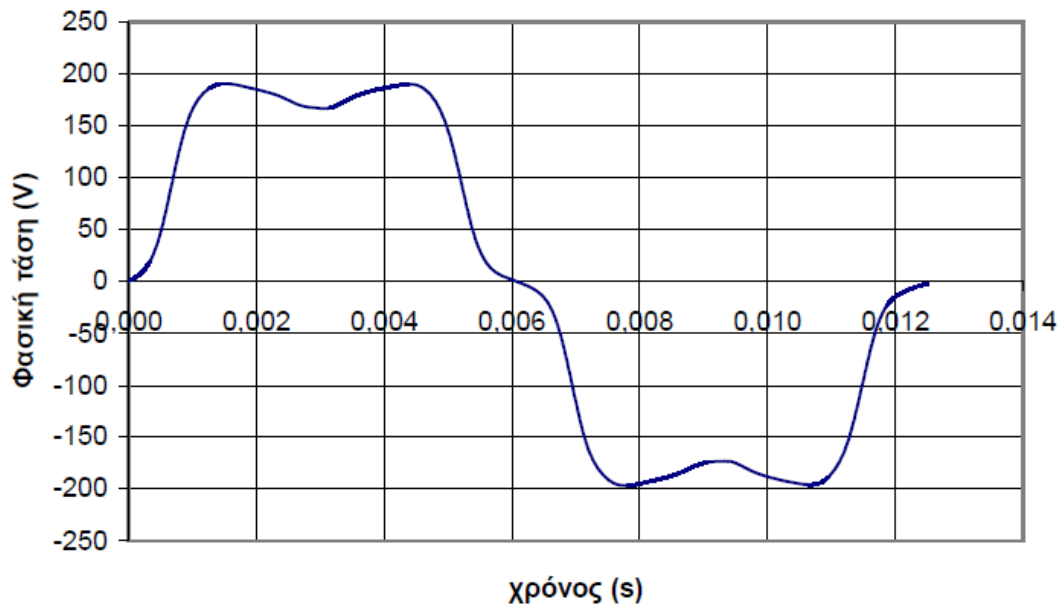
Πρόκειται για κυκλωματικό μοντέλο που περιλαμβάνει ηλεκτρεγερτική δύναμη, αντίσταση και αυτεπαγωγή για κάθε φάση [12]. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη περιέχει αρμονικές συνιστώσες ανώτερης τάξης. Μπορεί να προέρχεται από

προσομοίωση σε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα 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 σχήμα 2.6, ενώ περιέχει μέχρι 100 ανώτερες αρμονικές συνιστώσες.



Σχήμα 2.5 Προσομοίωση ροής τυλίγματος και τάσης φάσης της γεννήτριας μονίμων μαγνητών σε ονομαστικές στροφές

Κενό φορτίο, 400rpm



Σχήμα 2.6 Φασική τάση κενού φορτίου δοκιμίου σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων 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 Llq και Lld , καθέτου και ευθύ άξονα αντίστοιχα, όπως ορίζονται στον τροποποιημένο μετασχηματισμό του Park, σύμφωνα με τους τύπους:

$$Llq \approx Llq_{\tau\lambda} + Leo_{\lambda} \quad (2-12)$$

$$Lld \approx Lld_{\tau\lambda} + Leo_{\lambda} \quad (2-13)$$

όπου οι αυτεπαγωγές $Llq_{\tau\lambda}$ και $Lld_{\tau\lambda}$ για τον κάθετο και ευθύ άξονα αντίστοιχα προκύπτουν από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, ενώ η Leo_{λ} , 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:

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

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

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:

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

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

$$Llq \approx 13.928 \text{ mH} \quad \& \quad Lld \approx 13.911 \text{ mH}$$

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 L_{Cu} και την αντίστοιχη διατομή του $S = 0,785 \text{ mm}^2$.

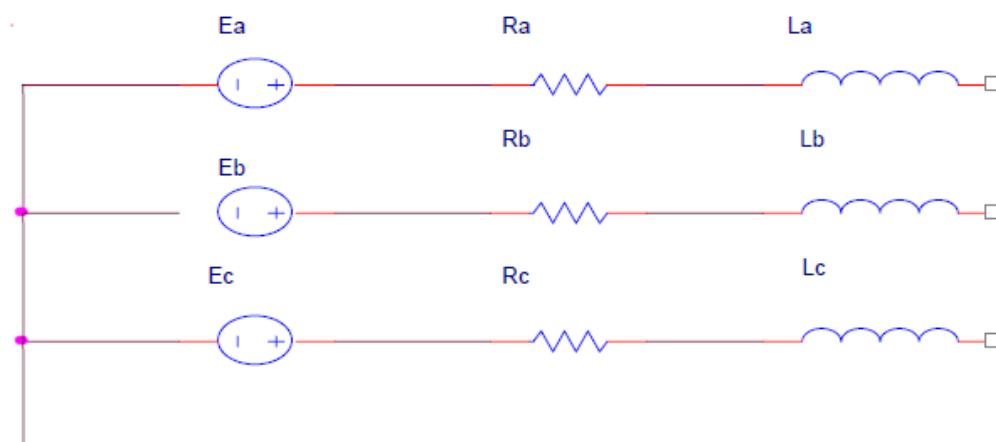
$$R_{ph} = \rho_{Cu} S$$

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

Το μήκος κάθε σπείρας είναι σύμφωνα με τις παραδοχές που έχουν γίνει ως προς τα μήκη ίσο με: $L_{\text{σπείρας}} = 0.21486 \text{ m}$. 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: $L_{\text{Cu}} = 128.9 \text{ m}$ Οπότε η αντίσταση κάθε φάσης είναι: $R_{\text{ph}} = 2.872 \Omega$ 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 μονίμων 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 σχήμα 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.



Σχήμα 2.7 Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας

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

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

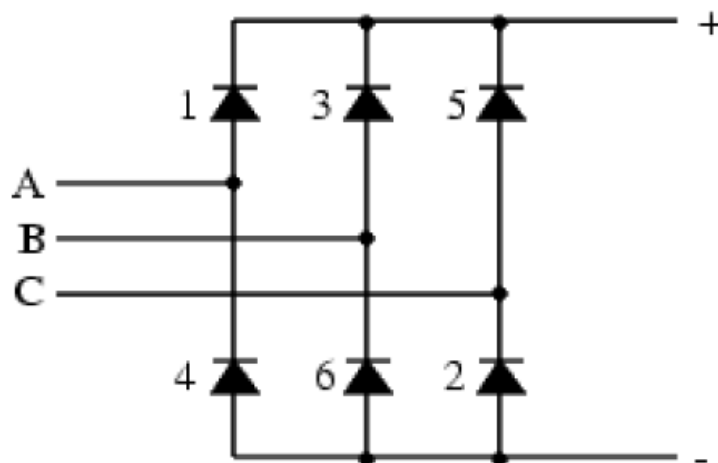
$$V_a = \tilde{E}_a - R_a i_a - (L_a + M) \frac{di_a}{dt} \quad (2-21)$$

Οι εξισώσεις (2-12) – (2-14) εξηγούν την αρνητική τιμή του συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής Μ. 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 Μ δείχνει την αναλογία των ρευμάτων των εμπλεκόμενων τυλιγμάτων, θα είναι $M < 0$.

2.4 Ηλεκτρονικός Μετατροπέας Ισχύος

2.4.1 Ανορθωτική γέφυρα διόδων

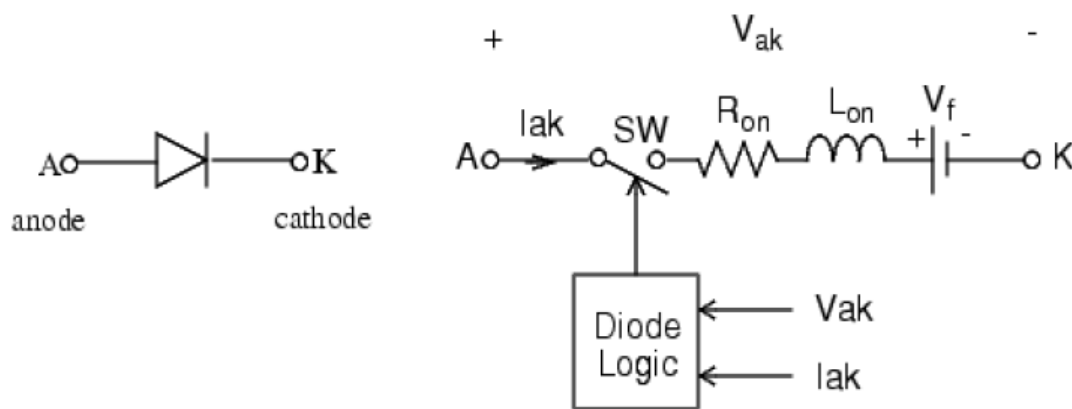
Η μη ελεγχόμενη τριφασική ανόρθωση σε συνδεσμολογία γέφυρας παρουσιάζεται στο σχήμα 2.8. Η αρίθμηση των διόδων έχει γίνει σύμφωνα με την ακολουθία αγωγής των διόδων. Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα της διόδου.



Σχήμα 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:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_s, \text{ όπου η } V_s : \text{ η πολική τάση στα άκρα της γεννήτριας}$$

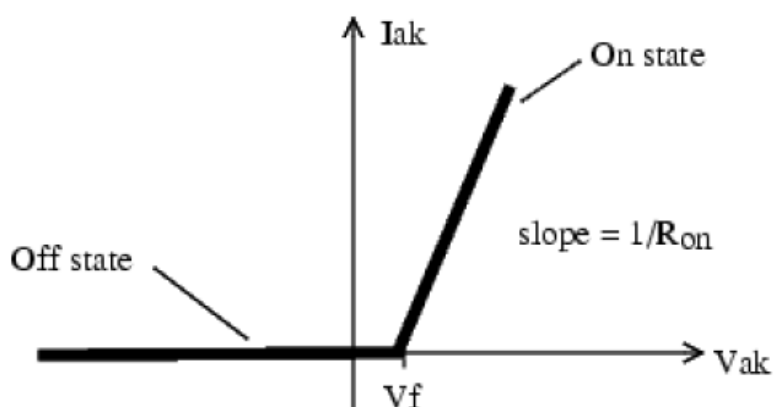


Σχήμα 2.9 Ισοδύναμο κύκλωμα διόδου

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 διόδος άγει. Όταν το ρεύμα μηδενιστεί, η διόδος σταματά να άγει και ο διακόπτης ανοίγει. Όσο η τάση V_{AK} είναι αρνητική, η διόδος 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 διόδο σύμφωνα με την καμπύλη του σχήμα 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.

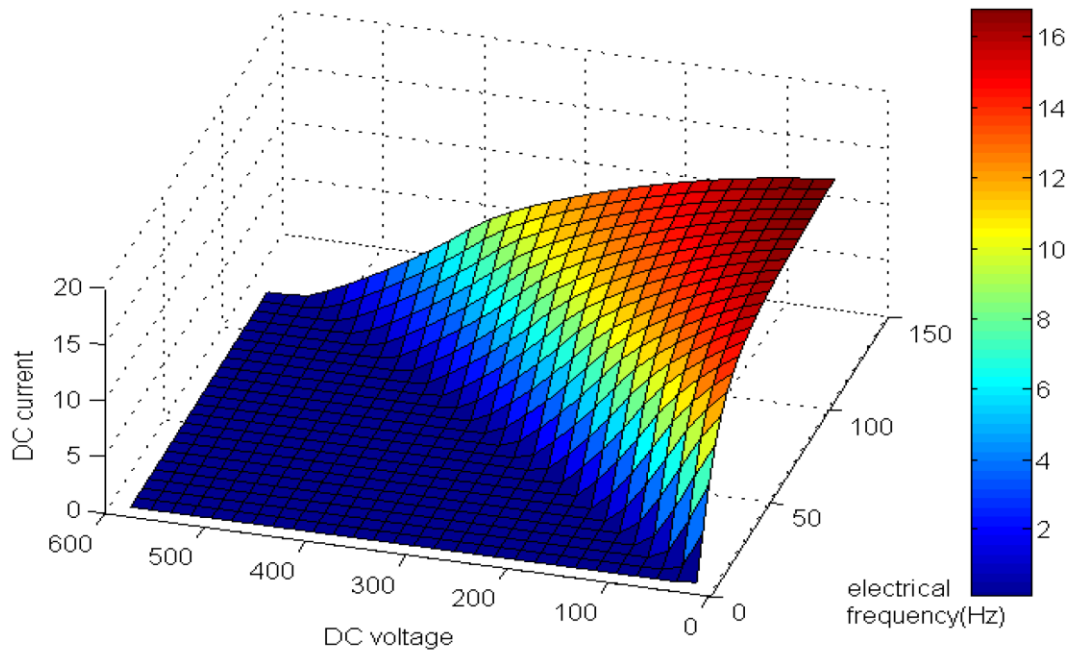


Σχήμα 2.10 Γραμμικοποιημένη Καμπύλη V_f - I διόδου

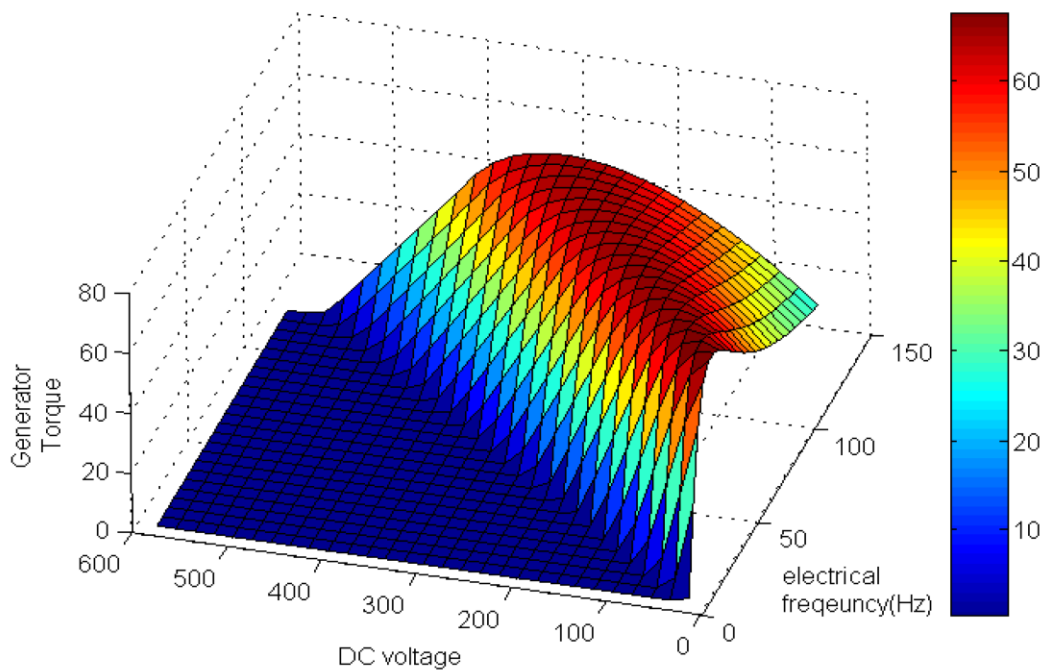
Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις που γίνονται με το πακέτο Simulink™ του περιβάλλοντος MATLAB™.

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.



Σχήμα 2.11 Μέσο ανορθωμένο ρεύμα γεννήτριας μονίμων μαγνητών ως συνάρτηση της ηλεκτρικής συχνότητας και της τάσης εξόδου



Σχήμα 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 (Σχήμα 2.11), αφετέρου η μέση ροπή στον άξονα (Σχήμα 2.12) [8].

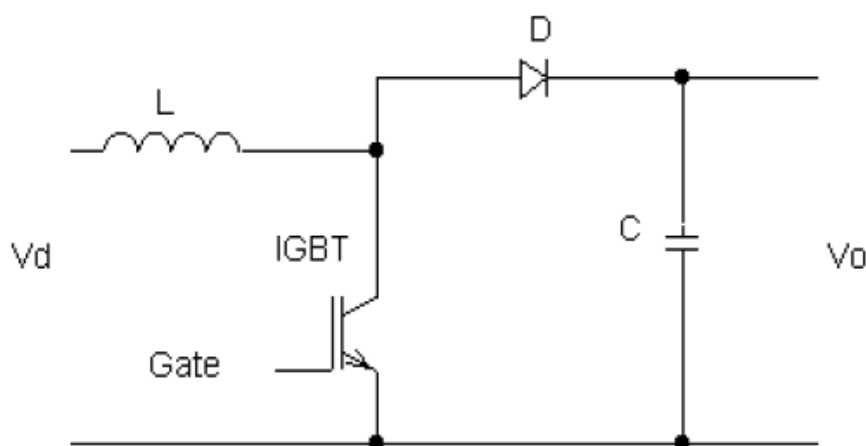
Με βάση τα παραπάνω, το ηλεκτρικό μοντέλο της μηχανής δέχεται ως είσοδο την ηλεκτρική συχνότητα της μηχανής, που επιβάλλεται από την κινητική της κατάσταση, και τη μέση τάση εξόδου μετά την ανόρθωση και υπολογίζει το ανορθωμένο ρεύμα στην έξοδο, καθώς και τη ροπή που ασκεί η γεννήτρια στον άξονα. Από 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.

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

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 σχήμα 2.13.



Σχήμα 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 μόνιμων μαγνητών είναι αρκετά μεγάλη, έτσι 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 ημιαγωγίμο 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:

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

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:

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

$$\bar{V}_o = V_d \cdot \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} = \frac{V_d}{1-D} \quad (2-28)$$

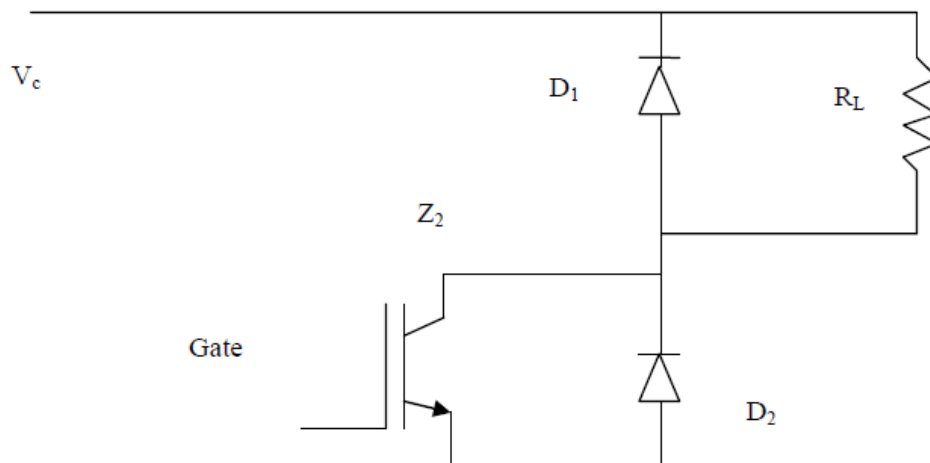
όπου D ο βαθμός χρησιμοποίησης του διακόπτη (Duty Cycle) = t_{on}/T_s

Επιπλέον για το ρεύμα εξόδου ισχύει:

$$\bar{I}_o = \bar{I}_s \cdot (1-D) \quad (2-29)$$

2.4.3 Ελεγχόμενο φορτίο

Για την περίπτωση της απομονωμένης λειτουργίας υπάρχει μεταβλητό φορτίο ελεγχόμενο από το μικροεπεξεργαστή, συνδεδεμένο στους πυκνωτές σταθεροποίησης της τάσης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.14.



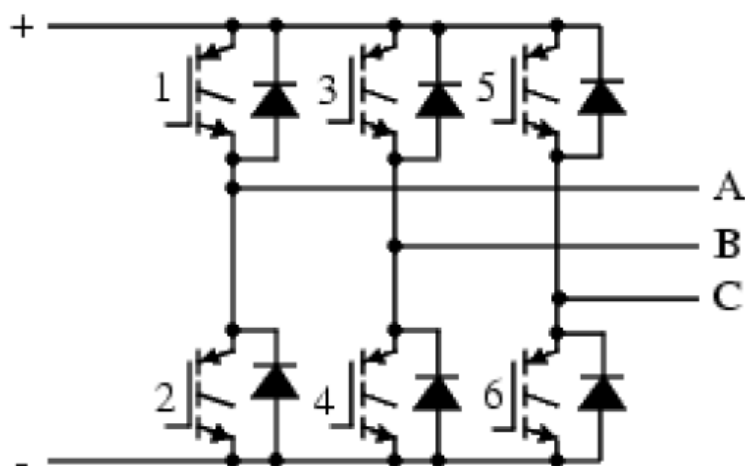
Σχήμα 2.14 Ελεγχόμενο φορτίο για απομονωμένη λειτουργία.

Όταν το IGBT Z_2 άγει, ρεύμα περνά από το φορτίο R_L . Όταν δεν άγει, η κυκλοφορία ρεύματος μέσα από το φορτίο συνεχίζεται για λίγο μέσα από τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης D_1 . Η δίοδος D_2 , που βρίσκεται ενσωματωμένη στο Z_2 , χρησιμεύει ελάχιστα, κυρίως για προστασία του από ανάστροφες τάσεις λόγω αυτεπαγωγών σύνδεσης. Αν D είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης του Z_2 , I_L το ρεύμα προς την αντίσταση και V_C η τάση εισόδου, από τους πυκνωτές, τότε ισχύει:

$$\bar{I}_L = \frac{V_C \cdot D}{R_L} \quad (2-30)$$

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 Σχήμα 2.15.



Σχήμα 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 ημιέφυρα) 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:

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

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

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

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

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

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:

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

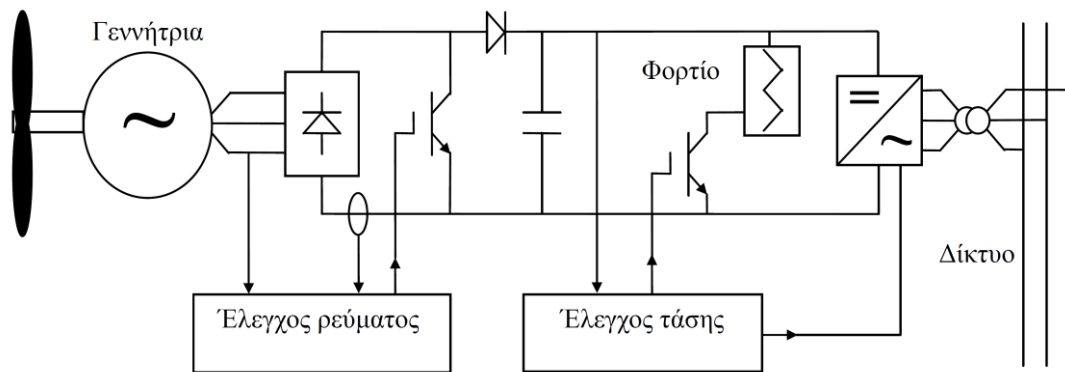
Το πλάτος κυματομορφής φορέα A_c παραμένει σταθερό με αποτέλεσμα αυξομειώνοντας το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς A_r να αυξομειώνονται τα εύρη των παλμών έναυσης και κατά συνέπεια να αυξομειώνεται η ενεργός τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας. Το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας της πολικής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

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

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

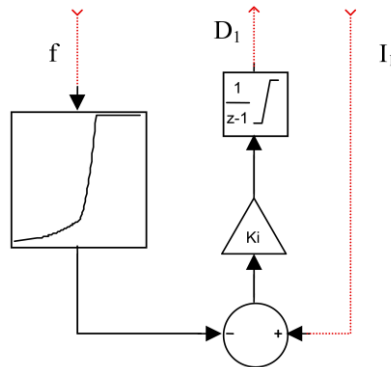
Υπάρχουν δύο συστήματα ελέγχου, ένα που επιβάλλει στο σύστημα να λειτουργεί υπό μια προκαθορισμένη χαρακτηριστική ροπής στροφών και ένα δεύτερο που ρυθμίζει τη ροή ενεργού και άεργου ισχύος και εξασφαλίζει τη διατήρηση σταθερής τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα. Στο σχήμα 2.16 φαίνεται μια απλοποιημένη παράσταση του συστήματος ελέγχου, όπως έχει υλοποιηθεί στο μικροεπεξεργαστή.



Σχήμα 2.16 Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου

2.4.5.1 Σύστημα βελτιστοποίησης απορροφούμενης ισχύος

Το σύστημα αυτό λειτουργεί σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήμα 2.17.



Σχήμα 2.17 Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου ρεύματος γεννήτριας

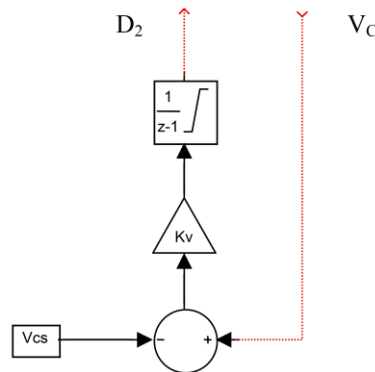
Όπου:

- f η ηλεκτρική συχνότητα της γεννήτριας σε Hz
- D_1 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
- I_1 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 σχήμα 2.18.



Σχήμα 2.18 Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου τάσης πυκνωτών

Όπου:

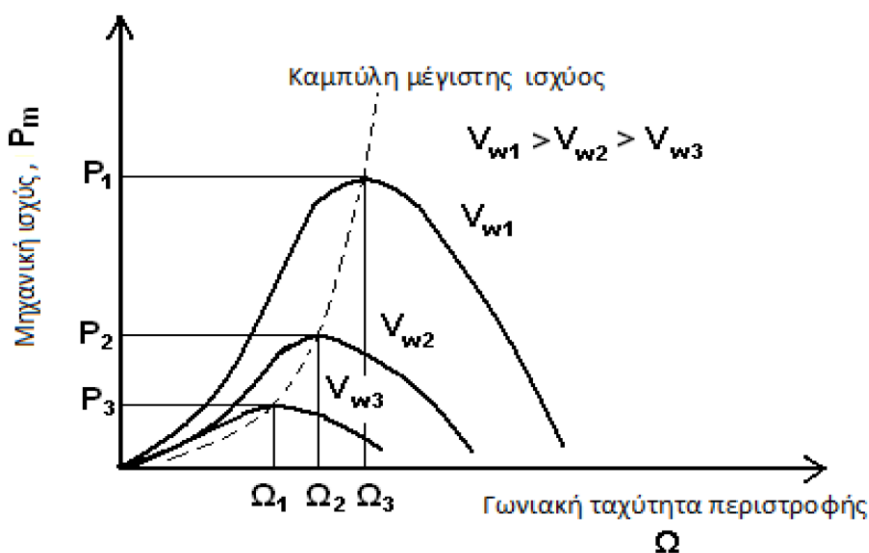
- V_C η τάση της συστοιχίας των πυκνωτών σε V
- D_2 η τιμή του βαθμού χρησιμοποίησης (duty cycle) του διακοπτικού στοιχείου 2 που κυμαίνεται από 0 ως 1
- V_{CS} η τάση αναφοράς που είναι σταθερά, σε Volt
- K_V το κέρδος του βρόχου ανάδρασης, περίπου $0.0642V^{-1}s^{-1}$

Το παραπάνω σύστημα ελέγχου μεταβάλλει με διαμόρφωση εύρους παλμών τη σταθερή αντίσταση R_L 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.

2.5 Σύστημα ελέγχου παρακολούθησης σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος

Η Α/Γ απορροφά τη μέγιστη δυνατή αιολική ισχύ για δεδομένη ταχύτητα ανέμου όταν το γινόμενο ροπής επί στροφών μεγιστοποιείται. Τα σημεία αυτά

διαμορφώνουν μια καμπύλη πάνω στην οποία επιδιώκεται η λειτουργία της Α/Γ για κάθε ταχύτητα ανέμου. Η διαδικασία ελέγχου ονομάζεται Maximum Power Point Tracking, MPPT και στο σχήμα 2.19 φαίνεται η καμπύλη μέγιστης ισχύος πάνω στην οποία οφείλει να λειτουργεί η Α/Γ. Ο έλεγχος πραγματοποιείται από ελεγκτές που ρυθμίζουν τις στροφές της Α/Γ ακολουθώντας συγκεκριμένες τεχνικές.

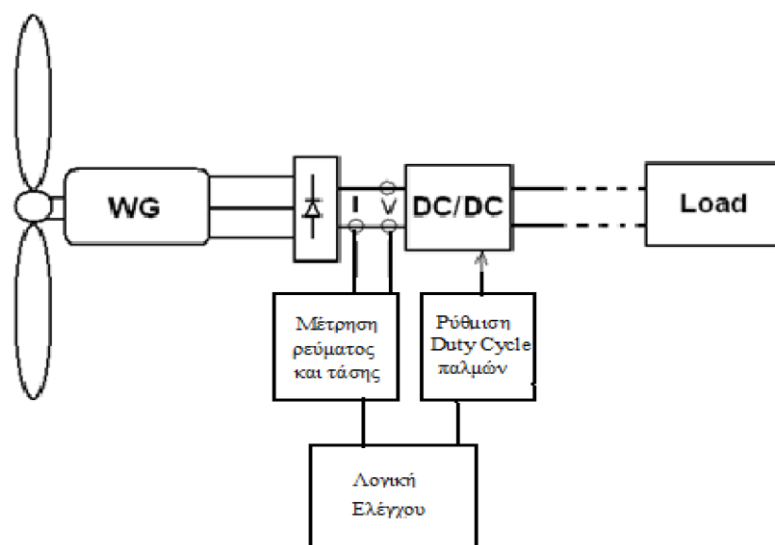


Σχήμα 2.19 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος στροφών

Οι ελεγκτές αυτοί ονομάζονται MPPT ελεγκτές και χρησιμοποιούν διάφορους αλγόριθμους ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος λειτουργίας. **Αρχή λειτουργίας** των αλγορίθμων αυτών είναι ο έλεγχος των στροφών της Α/Γ με τέτοιο τρόπο ώστε για κάθε ταχύτητα ανέμου το σύστημα να λειτουργεί με μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή $C_{p(max)}$ κοντά στην τιμή 0.5. Για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, ανάλογα με την λειτουργική κατάσταση που θα βρεθεί το σύστημα, δηλαδή ανάλογα με το αν βρίσκεται σε σημεία αριστερά ή δεξιά της καμπύλης μέγιστης ισχύος του σχήματος 2.19 ο ελεγκτής οφείλει εν τέλει να το οδηγήσει σε σημεία λειτουργίας που βρίσκονται πάνω στην βέλτιστη καμπύλη.

Ο έλεγχος πραγματοποιείται μεταβάλλοντας το ρεύμα της γεννήτριας και εν τέλη την ηλεκτρική της ροπή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης όπως αυτός που περιγράφηκε στη παράγραφο 2.4.2 του οποίου την λειτουργία ελέγχει ο ελεγκτής ανεύρεσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Ανάλογα με τον βαθμό χρησιμοποίησης (Duty Cycle) του ημιαγωγικού στοιχείου, λαμβάνεται διαφορετικό ρεύμα στην έξοδο και κατά συνέπεια και στην είσοδο του αντιστροφέα. Η ρύθμιση αυτή στο ρεύμα σημαίνει και ρύθμιση αντίστοιχα της ηλεκτρικής ροπής

της γεννήτριας. Έτσι τελικά επιτυγχάνεται ρύθμιση των στροφών του άξονα της Α/Γ. Στο σχήμα 2.20 φαίνεται το σύστημα ελέγχου των στοφών της Α/Γ.



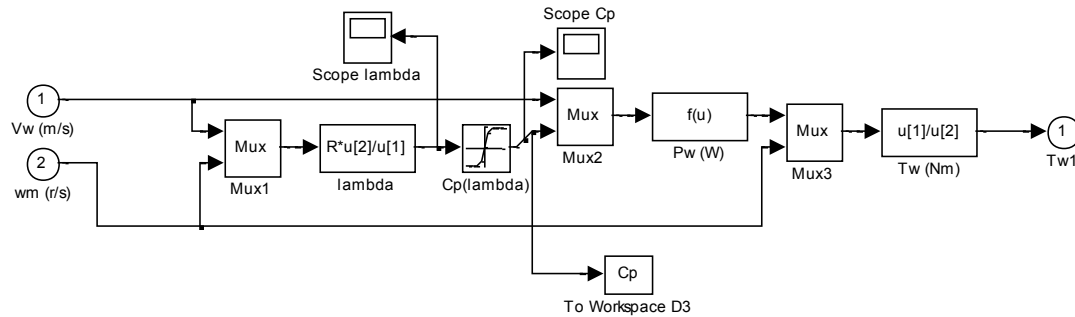
Σχήμα 2.20 Σύστημα ελέγχου Α/Γ μεταβλητών στροφών για την ανεύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας.

Οι MPPT ελεγκτές εφαρμόζουν διάφορους αλγορίθμους ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος. Οι τεχνικές που απαντώνται σήμερα στη βιβλιογραφία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε **δύο μεγάλες κατηγορίες**. Στην πρώτη βρίσκονται τεχνικές που βασίζονται σε **δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας** ενώ στη δεύτερη κατηγορία, τεχνικές που η αναζήτηση του σημείου βέλτιστης λειτουργίας γίνεται **χωρίς προγενέστερη γνώση των χαρακτηριστικών καμπυλών**. Τέτοιες μέθοδοι είναι ο έλεγχος μέσω συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων (Perturbation and Observation, P&O) και έλεγχοι μέσω ασαφής λογικής. **Ο έλεγχος με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα**, ανάλογα με την τοπολογία του, **μπορεί να καταταχθεί και στις δυο κατηγορίες**.

2.6 Το μοντέλο προσομοίωσης της ανεμογεννήτριας

Για την προσομοίωση του συστήματος έχει δημιουργηθεί ένα απλοποιημένο μοντέλο σε υπολογιστή με την βοήθεια του προγράμματος SIMULINK με σκοπό την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος [8]. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικότερα δομικά ηλεκτρικά και μηχανικά μέρη του μοντέλου της ανεμογεννήτριας που είναι: “Blades”, “Machine”, “I-Loop” και “V-Loop”.

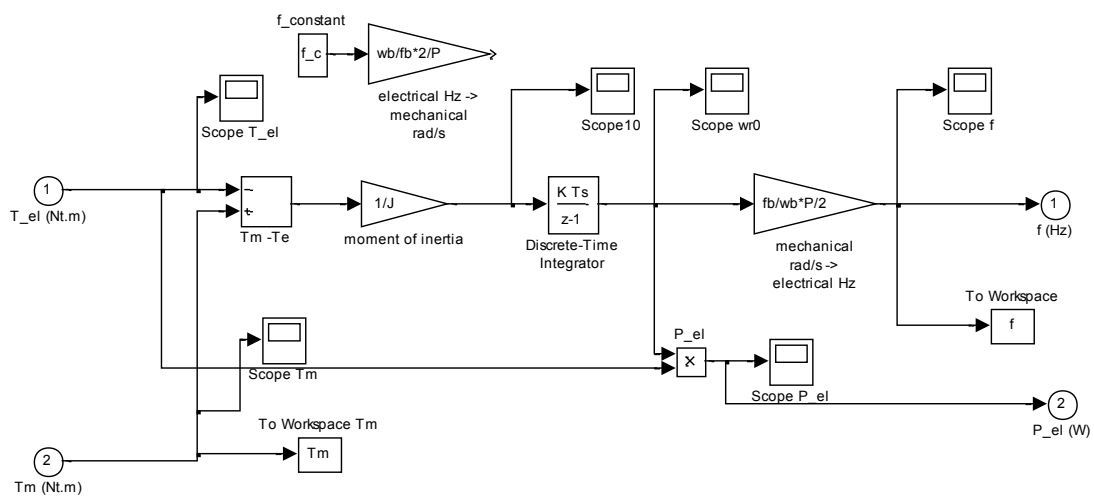
Βάσει των εξισώσεων που περιγράφουν το αεροδυναμικό μέρος της Α/Γ κατασκευάστηκε το υποσύστημα “Blades” στο περιβάλλον του SIMULINK/MATLAB.



Σχήμα 2.21 Το υποσύστημα “Blades”

Το υποσύστημα “Blades” όπως φαίνεται στο σχήμα 2.21 δέχεται ως εισόδους την ταχύτητα του ανέμου V_w (m/s) και τη γωνιακή ταχύτητα του ανεμοκινητήρα w_m (rad/s). Από την σχέση (2–2) υπολογίζεται ο λόγος ταχύτητας των ακροπερυγίων λ με ακτίνα έλικας $R=1.25m$. Γνωρίζοντας τον συντελεστή λ και με την βοήθεια ενός πίνακα που εκφράζει την χαρακτηριστική της ανεμογεννήτριας υπολογίζεται ο συντελεστής ισχύος του ανεμοκινητήρα C_p . Τέλος, με βάση τα παραπάνω το σύστημα εξάγει τη μηχανική ροπή T_m .

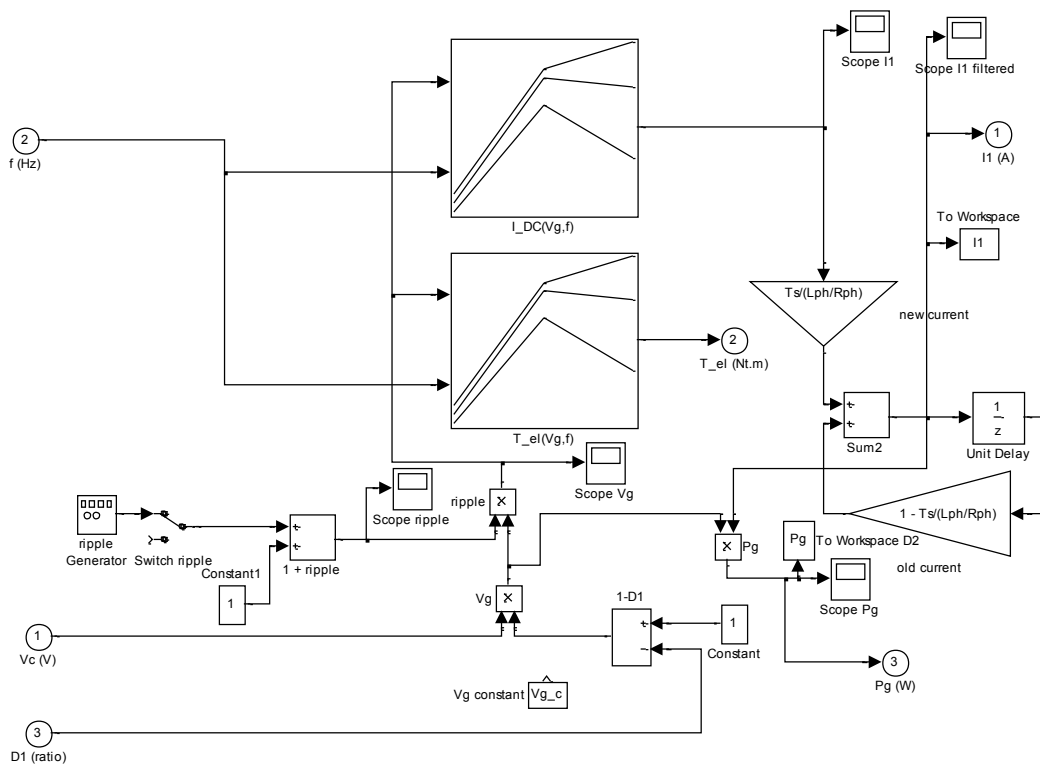
Βάσει των εξισώσεων που περιγράφουν τη γεννήτρια της Α/Γ κατασκευάστηκε το υποσύστημα “Machine” στο περιβάλλον του SIMULINK/MATLAB.



Σχήμα 2.22 Το υποσύστημα “Machine”

Στο υποσύστημα “Machine” που φαίνεται στο Σχήμα 2.22 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 (2-1) που εκφράζει την εξίσωση κίνησης του δρομέα της γεννήτριας καθώς και την ηλεκτρομαγνητική ισχύ P_{el} . 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.

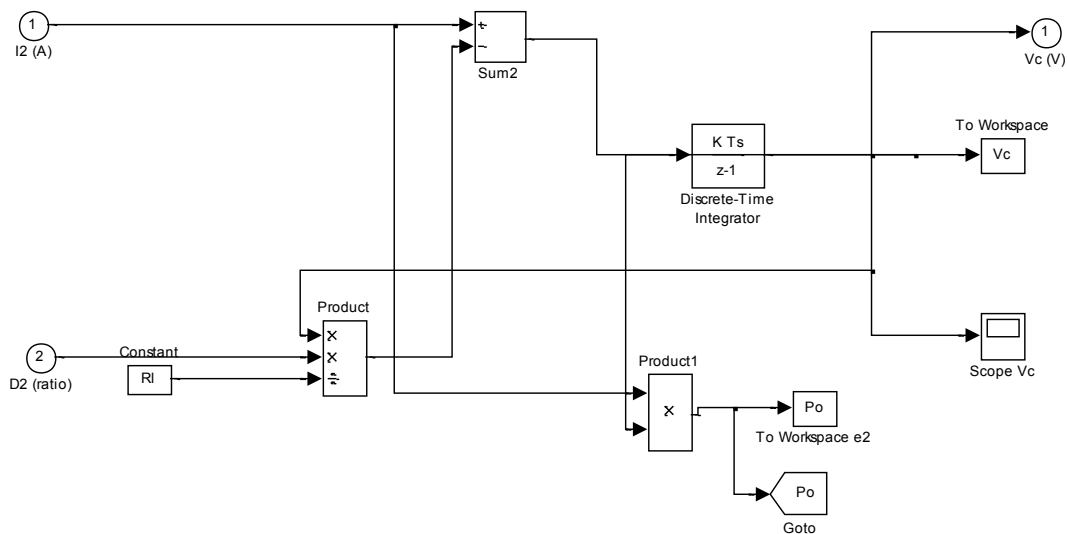
$$f = \frac{1}{2\pi J} \cdot \int (T_m - T_e) dt \quad (2-1)$$



Σχήμα 2.23 Το υποσύστημα “I-loop”

Στο “I-Loop” που φαίνεται στο σχήμα 2.23 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 D1 ο οποίος καθορίζει τη βέλτιστη ισχύ και την τάση της συστοιχίας των πυκνωτών VC. Στη συνέχεια η συχνότητα f εισάγεται σε δύο γραφικές παραστάσεις: την $IDC(Vg,f)$ που παρέχει το μέσο ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας μονίμων μαγνητών ως συνάρτηση της συχνότητας f την τάση εξόδου Vg και την $Tel(Vg,f)$ η οποία παρέχει τη μέση ροπή του άξονα γεννήτριας μονίμων μαγνητών της ηλεκτρικής συχνότητας f και της τάσης εξόδου Vg . Το στοιχείο αυτό συνεργάζεται άμεσα με το προηγούμενο.



Σχήμα 2.24 Το υποσύστημα “V-loop”

Στο υποσύστημα “V-Loop” που φαίνεται στο σχήμα 2.24 πραγματοποιούνται υπολογισμοί για την εκφόρτιση των πυκνωτών μέσω της εξωτερικής αντίστασης φορτίου RL. Το υποσύστημα δέχεται ως εισόδους το ρεύμα στην έξοδο του dc/dc μετατροπέα-ανυψωτή και το λόγο κατάτμησης D2 του διακοπτικού στοιχείου μέσω του οποίου σταθεροποιείται η τάση της συστοιχίας των πυκνωτών VC. 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.

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.

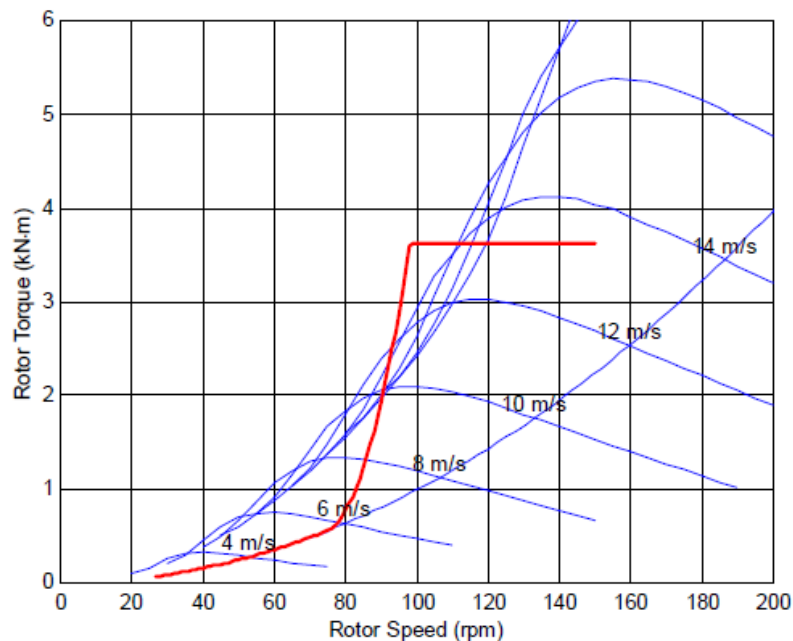
Στο Κεφάλαιο 3 εξετάζονται αναλυτικότερα τα συστήματα ελέγχου ανεύρεσης σημείου μέγιστης λειτουργίας και τα αντίστοιχα μοντέλα προσομοίωσης στο περιβάλλον SIMULINK™.

Κεφάλαιο 3

Τεχνικές Ελέγχου Ανεμογεννήτριας Μονίμων Μαγνητών για MPPT

3.1 Στόχοι συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας

Ο ανεμοκινητήρας χαρακτηρίζεται από χαρακτηριστικές ροπής – στροφών για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Η μέγιστη ισχύς για κάθε καμπύλη εμφανίζεται σε εκείνα τα λειτουργικά σημεία όπου το γινόμενο ροπή x στροφές μεγιστοποιείται. Στην πράξη επειδή σε μεγάλες ισχύς το σύστημα πρέπει να αυτοπροστατευθεί, περιορίζοντας τις στροφές της μηχανής κάτω από τις μέγιστες επιτρεπτές, τα σημεία λειτουργίας που ακολουθεί βρίσκονται πάνω στην κόκκινη γραμμή όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.



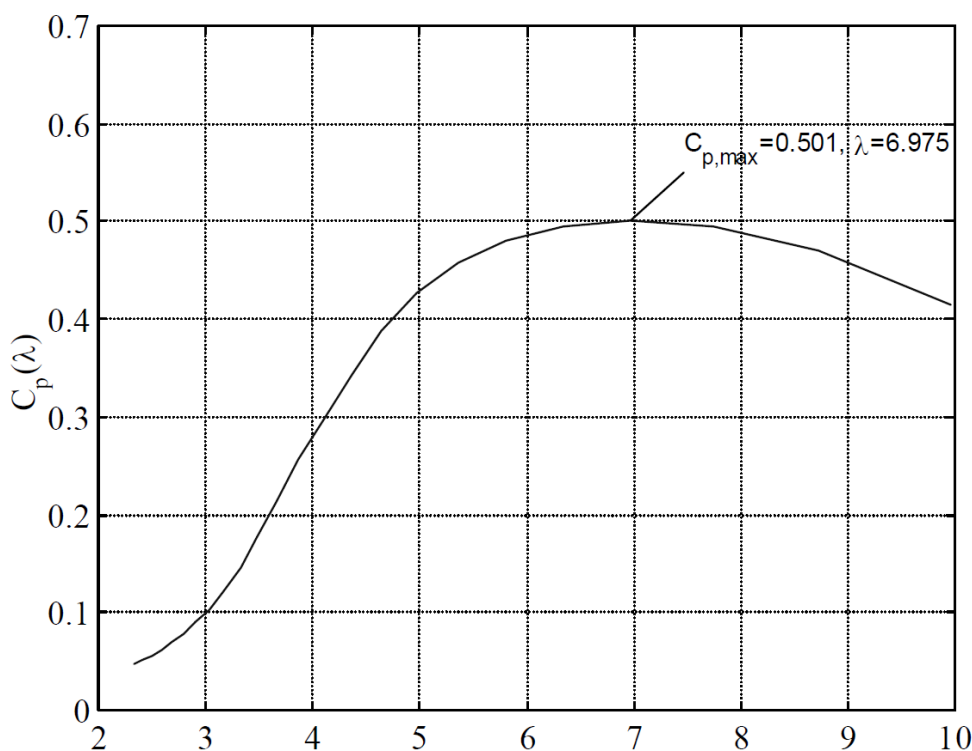
Σχήμα 3.1 Προτεινόμενη χαρακτηριστική ροπής - στροφών για το σύστημα αυτομάτου ελέγχου

Σε αυτή τη χαρακτηριστική διακρίνονται δύο τμήματα: το πρώτο έχει χαμηλή κλίση και ακολουθεί τη βέλτιστη παραγωγή ισχύος, ενώ το δεύτερο είναι απότομο και περιορίζει την ταχύτητα κάτω από τις 100 ΣΑΛ. Το οριζόντιο τμήμα δεν λαμβάνεται υπόψη αφού εκεί αναλαμβάνει την πέδηση της διάταξης ξεχωριστό

σύστημα. 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 αεροδυναμικής ισχύος C_{pmax} , ο οποίος όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2 είναι περίπου 0.5.

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 (Σχήμα 3.2) (στην αριστερή πλευρά του C_{pmax}), στη μηδενική κλίση (ουσιαστικά στο C_{pmax}) και στην αρνητική κλίση της καμπύλης (στην δεξιά πλευρά του C_{pmax}).

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 *loptimum*. 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_{pmax} και κατ' επέκταση ο ανεμοκινητήρας να αποδίδει μέγιστη ισχύ για κάθε ταχύτητα ανέμου.



Σχήμα 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.

Κύριο αντικείμενο μελέτης της εργασίας αποτελεί η **εισαγωγή μιας νέας μεθόδου ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος** η οποία **βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα**. Σχεδιάζονται και διαμορφώνονται ελεγκτές οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να **παρακολουθούν την καμπύλη μέγιστης ισχύος** υποβοηθούμενοι από τις δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής – στροφών αλλά παράλληλα, αξιοποιώντας την ικανότητα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων να γενικεύουν τα δεδομένα τους, να **προσαρμόζονται εύκολα στις αλλαγές** του περιβάλλοντος τους.

Οι ελεγκτές ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος εφαρμόζουν διάφορες τεχνικές ελέγχου. Οι τεχνικές ελέγχου που συναντώνται συχνά στην βιβλιογραφία μπορούν να χωριστούν σε **δύο μεγάλες οικογένειες** ανάλογα με το αν χρησιμοποιούν ή όχι προγενέστερη γνώση χαρακτηριστικών καμπυλών, με αποτέλεσμα να διακρίνεται η παρακάτω κατηγοριοποίηση για τις μεθόδους που θα εξεταστούν.

1. **Έλεγχος βασισμένος σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες**
 - Optimal Characteristic Tracking Controller (OCT)
2. **Αναζήτηση του σημείου μέγιστης ισχύος χωρίς προγενέστερη γνώση χαρακτηριστικών καμπυλών**
 - Έλεγχος μέσω συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων (Perturbation and Observation – P&O)
 - Έλεγχος βασισμένος στην ασαφή λογική (Fuzzy Logic Controller – FLC)

Η μέθοδος ελέγχου που βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks - ANN) μπορεί να **καταταχθεί και στις δυο κατηγορίες ελέγχων** ανάλογα με τον **τρόπο μάθησης** (επιβλεπόμενη ή μη επιβλεπόμενη μάθηση), τον **αλγόριθμο εκπαίδευσης** του τεχνητού νευρωνικού δικτύου και **την αρχιτεκτονική** του. Οι ελεγκτές που βασίζονται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν τη δυνατότητα να εκπαιδεύονται αξιοποιώντας τις δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες. Στην περίπτωση αυτή, ο έλεγχος με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα κατατάσσεται στον έλεγχο που βασίζεται σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες. Όμως οι ελεγκτές που βασίζονται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν την ικανότητα να εκπαιδεύονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, χρησιμοποιώντας έναν όρο σφάλματος με τον

οποίο αλλάζουν τα βάρη των νευρώνων, με αποτέλεσμα να αποδεσμεύονται από τους περιορισμούς της προγενέστερης γνώσης των χαρακτηριστικών καμπυλών. Αυτή η ικανότητα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, να αξιοποιούν τα **πλεονεκτήματα και των δυο κατηγοριών ελέγχων**, τα καθιστά ένα χρήσιμο εργαλείο για την διαμόρφωση ελεγκτών οι οποίοι ξεπερνούν τα μειονεκτήματα των προηγούμενων μεθόδων ελέγχου με αποτέλεσμα να αξιοποιείται στο μέγιστο η αιολική ενέργεια.

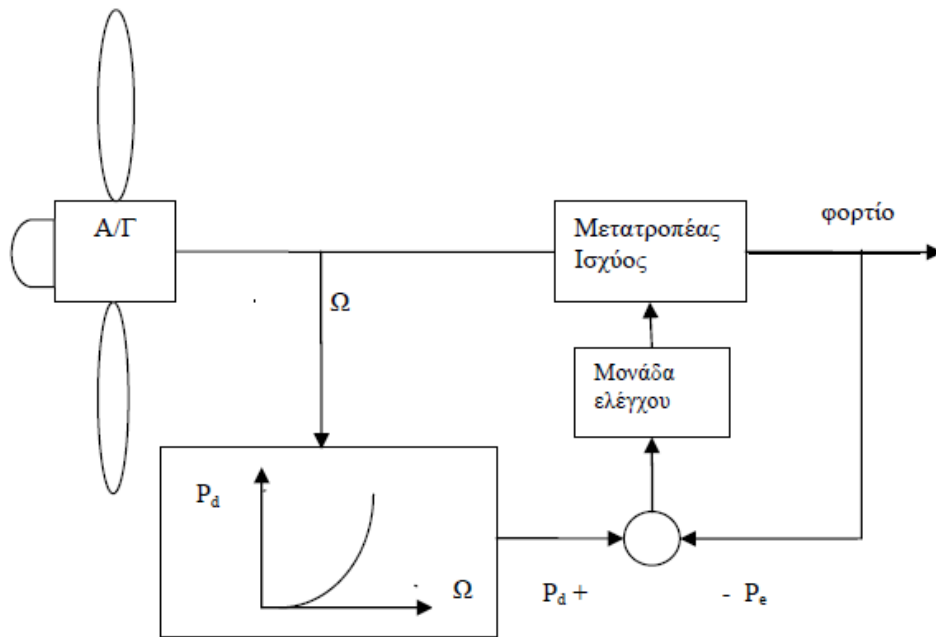
Προκειμένου να ελεγχθεί η εύρυθμη λειτουργία του κάθε συστήματος αλλά και να συγκριθούν οι μέθοδοι ως προς την αποτελεσματικότητά τους σε διαφορετικές διαταραχές, **η αξιολόγηση** του κάθε συστήματος **περιλαμβάνει δυο μέρη**. Αρχικά εξετάζεται η απόκριση του κάθε συστήματος στην **μόνιμη κατάσταση** και σε βηματική μεταβολή της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου. Στο δεύτερο μέρος γίνεται αξιολόγηση της απόκρισης του συστήματος σε **πραγματικές χρονοσειρές ανέμου** οι οποίες ελήφθησαν από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ).

Παρακάτω, αναλύεται για κάθε μια από τις τεχνικές ελέγχου που αναφέρθηκαν τα βασικά θεωρητικά στοιχεία για τον έλεγχο ανεμογεννήτριας αλλά και ο τρόπος υλοποίησης των μοντέλων προσομοίωσης.

3.2 Μέθοδος Βασισμένη σε Δεδομένες Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας

3.2.1 Θεωρητική Ανάλυση

Η μέθοδος αυτή, η οποία απαντάται και συχνότερα στη πράξη βασίζεται στη γνώση της χαρακτηριστικής μέγιστης ισχύος. Ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου με δεδομένες καμπύλες φαίνεται στο σχήμα 3.3.



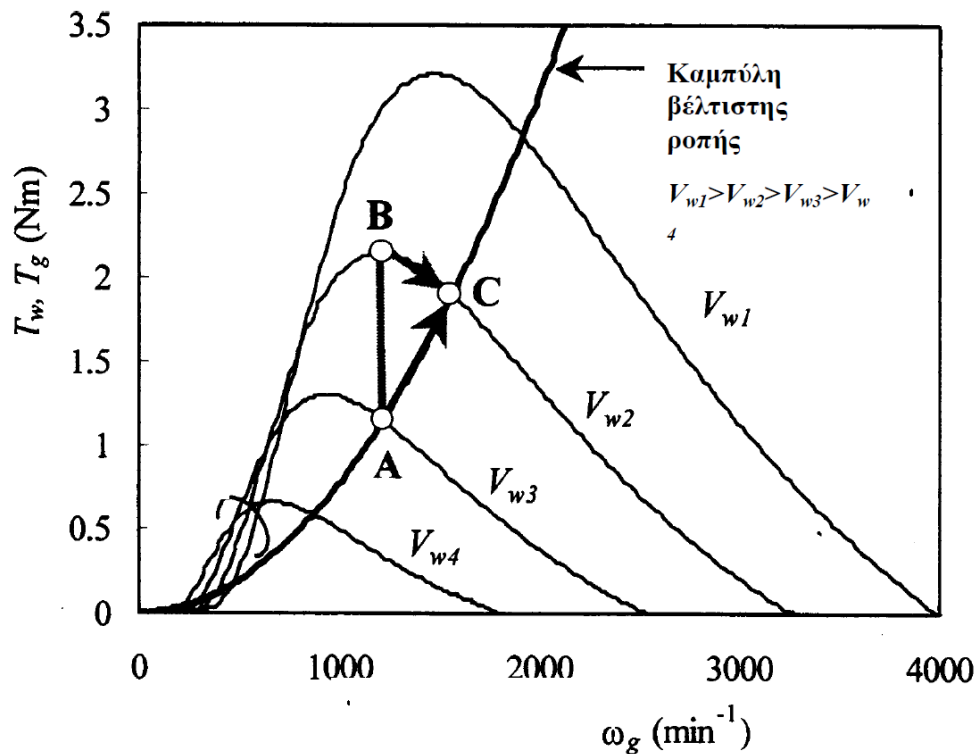
Σχήμα 3.3 Σύστημα με έλεγχο μέγιστης ισχύος βασισμένο σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες.

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 (λόγος κατάτμησης) 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.

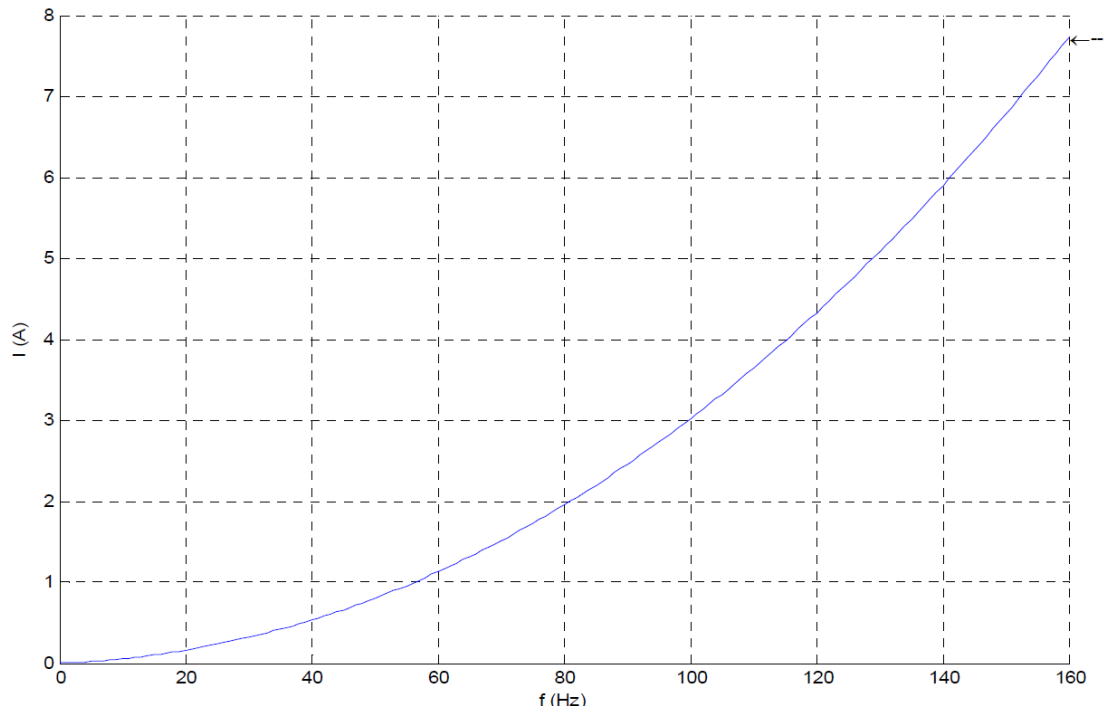
Στο σχήμα 3.4 δίνεται ένα παράδειγμα μιας τέτοιας διαδικασίας. Έστω πως ο άνεμος πνέει με ταχύτητα V_{w3} και η ροπή της γεννήτριας (φορτίου) T_g ισορροπεί με αυτή του κινητήρα T_m στο σημείο A. Σε κάποια χρονική στιγμή ο άνεμος αλλάζει την

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.



Σχήμα 3.4 Διαδικασία αναζήτησης του σημείου μέγιστης ισχύος στην περίπτωση του ελέγχου με χαρακτηριστική [14]

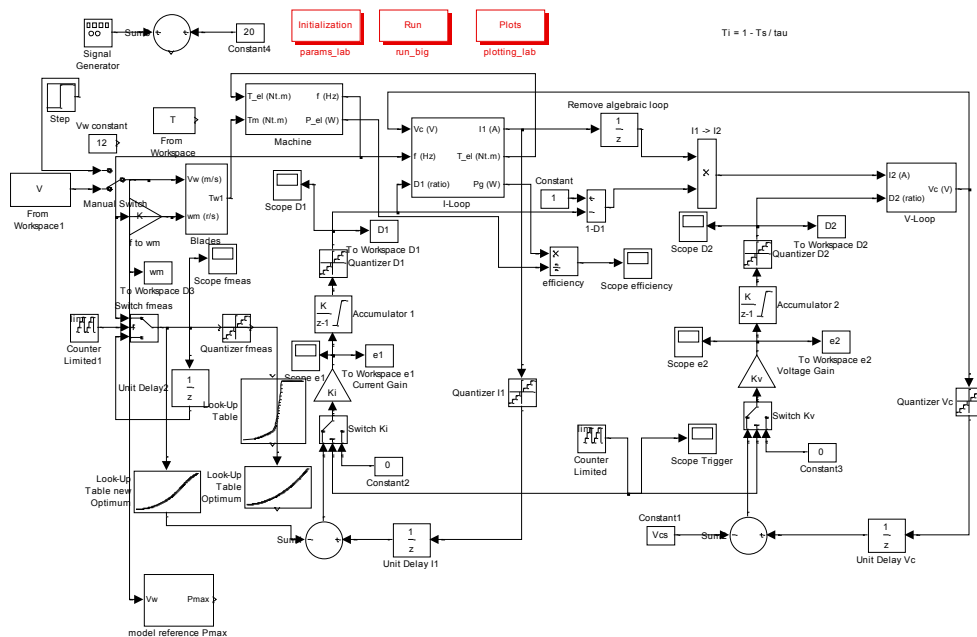
Στην παρούσα εργασία, η καμπύλη ροπής - στροφών μετατράπηκε σε σχέση ρεύματος - συχνότητας αφού, όπως εξηγείται στην αναφορά [8], η ροπή και το ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας μονίμων μαγνητών έχουν περίπου γραμμική εξάρτηση. Η αντιστοίχιση στροφών σε ηλεκτρική συχνότητα γίνεται μέσω του αριθμού πόλων της μηχανής. Η μορφή της καμπύλης που χρησιμοποιήθηκε στα προσομοιωμένα και πειραματικά μοντέλα φαίνεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 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 SimulinkTM με σκοπό την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Το διάγραμμα της μεθόδου που βασίζεται σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες μέγιστης ροπής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 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”.

Όπως έχουμε περιγράψει στο κεφάλαιο 2 στο υποσύστημα “Blades”, προσομοιώνεται η διαδικασία υπολογισμού του αεροδυναμικού τμήματος του συστήματος μέσα στο οποίο υπολογίζεται η προσλαμβανόμενη ισχύ από τον άνεμο, στο υποσύστημα “Machine” γίνονται οι υπολογισμοί για το μηχανικό μέρος της γεννήτριας, όπου η στρεφόμενη μάζα επιταχύνεται ή επιβραδύνεται, στο “I-Loop” υπολογίζεται το ανορθωμένο ρεύμα του ηλεκτρικού μέρους της γεννήτριας, το οποίο συνδέεται με τη ροπή με γραμμική σχέση κοντά στα σημεία λειτουργίας και τέλος στο υποσύστημα “V-Loop” πραγματοποιούνται υπολογισμοί για την εκφόρτιση των πυκνωτών μέσω της εξωτερικής αντίστασης φορτίου R_L .

3.2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου με δεδομένες καμπύλες

Το σύστημα ελέγχου που χρησιμοποιεί τις δεδομένες καμπύλες δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη πολυπλοκότητα πράγμα το οποίο το καθιστά ελκυστικό [24]. Η απλότητα του συστήματος οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι χρησιμοποιεί δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργώντας με ντετερμινιστικό τρόπο. Επίσης, το παραπάνω μοντέλο δεν επηρεάζεται από τις αρχικές συνθήκες του λόγου κατάτμησης D.

Μια μέθοδος ελέγχου που βασίζεται αποκλειστικά σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες ελέγχου είναι ευάλωτη σε ανακρίβειες εξαιτίας της γήρανσης αλλά και σφαλμάτων στους αρχικούς υπολογισμούς. Προκειμένου να αποφευχθούν τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι ελεγκτές που χρησιμοποιούν χαρακτηριστικές καμπύλες αναπτύχθηκαν μέθοδοι ελέγχου που δεν χρησιμοποιούν προγενέστερη γνώση.

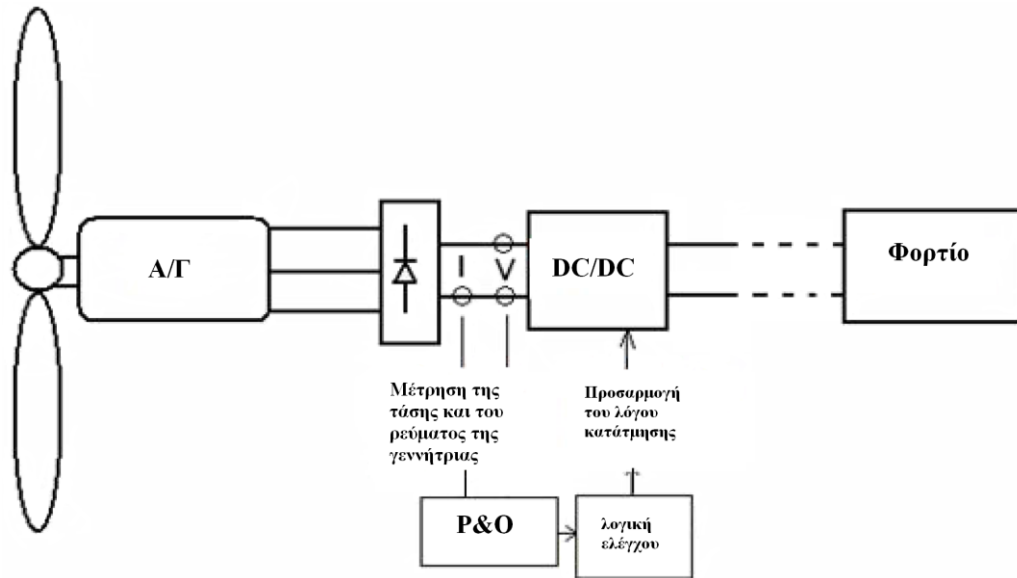
Παρακάτω παρουσιάζονται οι δυο συνηθέστερες μέθοδοι ελέγχου ανεμογεννήτριας που απαντώνται στην βιβλιογραφία που δεν χρησιμοποιούν δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες.

3.3 Μέθοδος Ανίχνευσης του Σημείου Μέγιστης Ισχύος μέσω Μικρών Μεταβολών

3.3.1 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 σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7 Σύστημα ανεμογεννήτριας με αναζήτηση σημείου μέγιστης ισχύος μέσω συνεχών μεταβολών 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 [24]:

$$D_k = D_{k-1} + C_1 \cdot \frac{\Delta P_{k-1}}{\Delta D_{k-1}} \quad (3-1)$$

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 $\frac{\Delta P_{k-1}}{\Delta D_{k-1}}$ 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 :

$$\frac{dP}{d\Omega} = 0 \quad (3-2)$$

όπου Ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της ανεμογεννήτριας. Η σχέση (3-2) μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

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

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:

$$V_g = (1-D) \cdot V_o \quad (3-4)$$

$$\frac{dV_g}{dD} = -V_o \neq 0 \quad (3-5)$$

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:

$$\Omega_e = p \cdot \Omega \quad (3-6)$$

$$\frac{d\Omega_e}{d\Omega} = p > 0 \quad (3-7)$$

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.

$$\frac{dV_g}{d\Omega_e} > 0 \quad (3-8)$$

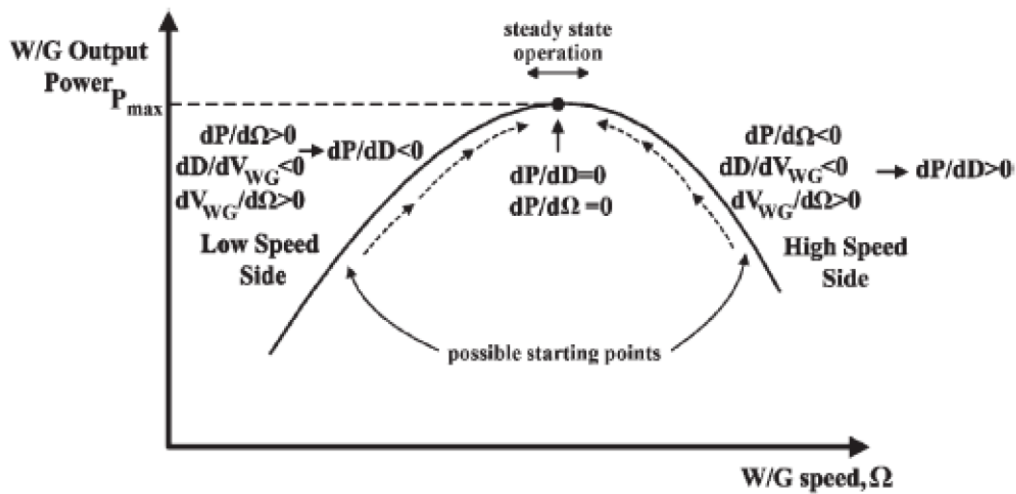
$$\frac{dD}{dV_g} > 0 \quad (3-9)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (3-2) έως (3-9) προκύπτει ότι:

$$\frac{dP}{d\Omega} = 0 \Leftrightarrow \frac{dP}{dD} = 0 \quad (3-10)$$

Κατά συνέπεια, η σχέση P(D) έχει ένα ακραίο σημείο, που συμπίπτει με το σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου, και άρα η ρύθμιση του λόγου κατάτμησης D

εξασφαλίζει σύγκλιση στο επιθυμητό σημείο υπό οποιαδήποτε ταχύτητα ανέμου. Δεδομένου τώρα ότι η ρύθμιση του λόγου κατάτμησης 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 Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται διαγραμματικά η λειτουργία του αλγορίθμου ανίχνευσης σημείων μέγιστης ισχύος με μικρές αλλαγές.



Σχήμα 3.8 Διαδικασία ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος μέσω μικρών μεταβολών του λόγου κατάτμησης του DC/DC μετατροπέα

Η σχέση (3-1) μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$D_k = D_{k-1} + \Delta D \quad (3-11)$$

Όπου:

$$\Delta D = C_1 \cdot \frac{\Delta P_{k-1}}{\Delta D_{k-1}} \quad (3-12)$$

Στη σχέση (3-12) 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.

3.3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου ελέγχου μέσω Μικρών Μεταβολών

Η μέθοδος ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος μέσω συνεχών μεταβολών και συγκρίσεων **δεν επηρεάζεται από ανακρίβειες** της χαρακτηριστικής καμπύλης **ούτε από σφάλματα** που δημιουργούνται **από την πάροδο του χρόνου** [24]. Επίσης το συνολικό σύστημα για την υλοποίηση της μεθόδου **δεν είναι πολύπλοκο** στην υλοποίηση του. Όμως, αυτή η μέθοδος **επηρεάζεται έντονα από την επιλογή του βήματος κατάτμησης** ΔD καθώς και από την αρχική τιμή του λόγου κατάτμησης D .

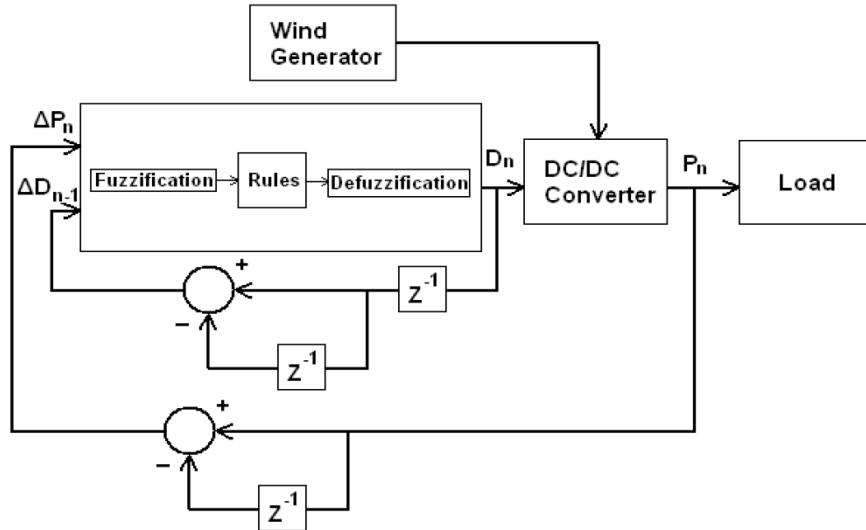
Μειονέκτημα του συστήματος είναι επίσης οι **σημαντικές κυματώσεις**, οι οποίες παρατηρούνται τόσο στις κυματομορφές του ανορθωμένου ρεύματος όσο και της ισχύος εξόδου. Τέλος, όταν εφαρμοσθεί στην είσοδο του συστήματος εξομοιωμένος **πραγματικός άνεμος**, το σύστημα φαίνεται να ακολουθεί το σημείο μέγιστης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

Μια βελτιωμένη μέθοδος ελέγχου που βασίζεται στην P&O είναι αυτή που είναι βασισμένη στην ασαφή λογική που παρουσιάζεται παρακάτω.

3.4 Μέθοδος Προσδιορισμού του Σημείου Μέγιστης Ισχύος Βασισμένη στην Ασαφή Λογική

3.4.1 Θεωρητική ανάλυση

Η φιλοσοφία λειτουργίας του ελεγκτή που βασίζεται στην ασαφή λογική (Fuzzy logic) είναι παρόμοια με αυτή της μεθόδου των συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων και φαίνεται στο σχήμα 3.9. Η λογική του ελέγχου βασίζεται στην **πραγματοποίηση συνεχών μεταβολών** του λόγου κατάτμησης (Duty Cycle) του ημιαγώγιμου στοιχείου προκειμένου να εντοπιστεί το σημείο βέλτιστης λειτουργίας. Ο ελεγκτής που βασίζεται στην ασαφή λογική (Fuzzy Logic Controller - FLC) χρησιμοποιώντας κατάλληλη λογική ελέγχου επιδρά στη μεταβολή του λόγου κατάτμησης D .

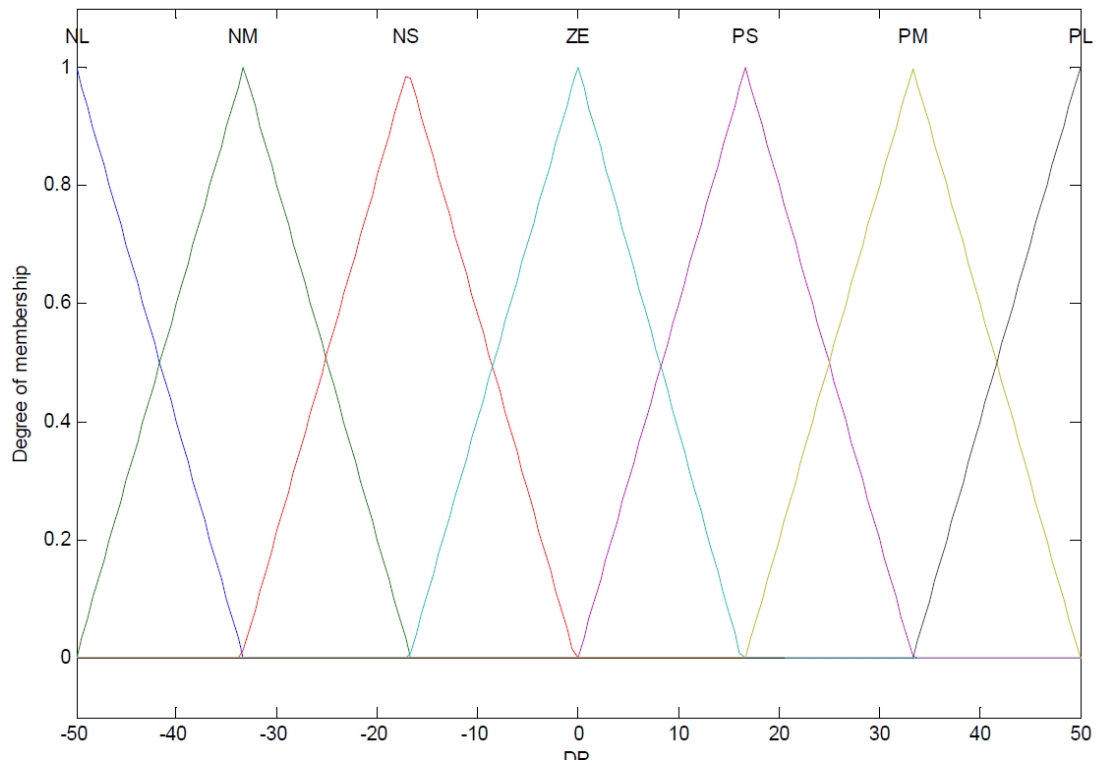


Σχήμα 3.9 Δομικό διάγραμμα Fuzzy Logic Controller

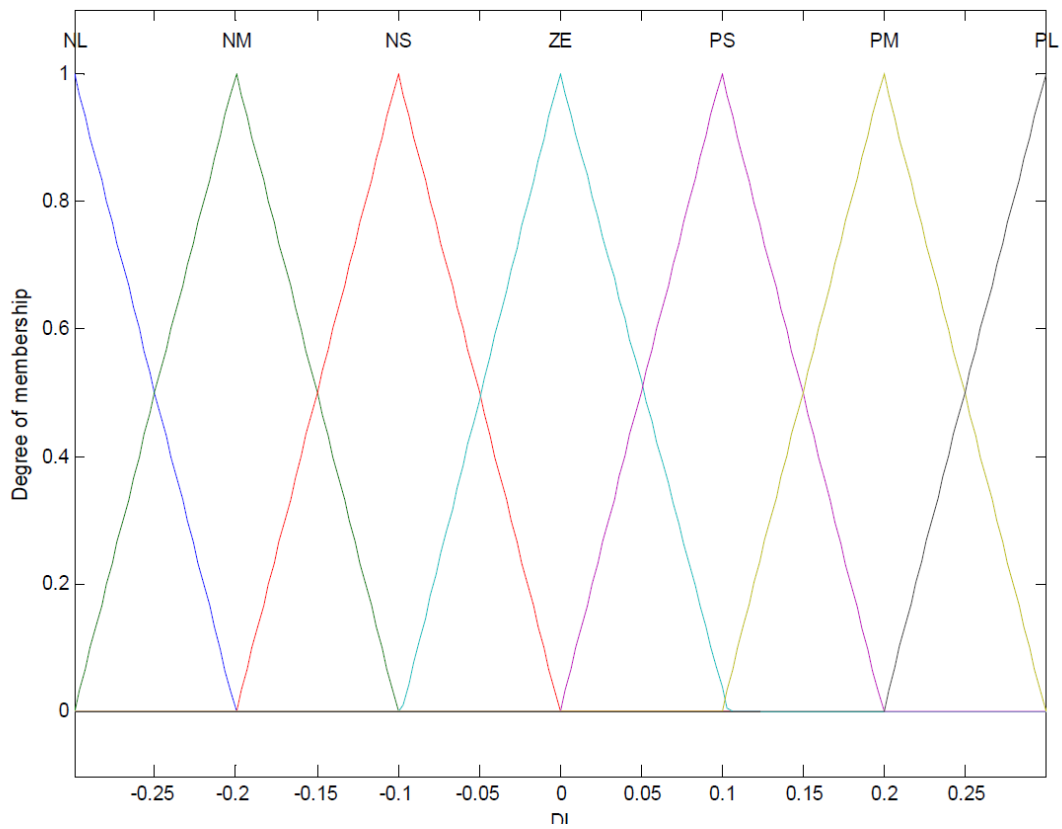
Ο αλγόριθμος ανίχνευσης μέγιστου σημείου λειτουργίας περιλαμβάνει **τρεις χωριστές διαδικασίες**. Αρχικά πραγματοποιείται η **διαδικασία της ασαφοποίησης** (Fuzzification), δηλαδή του καθορισμού των εισόδων και των εξόδων της συνάρτησης συμμετοχής, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.9. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η **εξαγωγή των αποτελεσμάτων** και τέλος η **διαδικασία της αποσαφοποίησης** (Defuzzification) όπου χρησιμοποιώντας συγκεκριμένη μέθοδο λαμβάνεται η τιμή του λόγου κατάτμησης D από το σύνολο των αποτελεσμάτων.

Κατά τη διαδικασία της ασαφοποίησης, οι συναρτήσεις συμμετοχής μετατρέπουν τις μεταβλητές εισόδου του ελεγκτή σε τιμές συμμετοχής από 0 ως 1. Για τον συγκεκριμένο ελεγκτή, οι συναρτήσεις συμμετοχής επιλέχθηκαν τριγωνικές, σχήματα 3.8-3.10, για λόγους απλότητας και λιγότερου υπολογιστικού κόστους. Οι είσοδοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου, ΔP_n , μεταξύ των συμβάντων n και $n-1$ αλλά και οι μεταβολές του λόγου κατάτμησης, ΔD_{n-1} μεταξύ των συμβάντων $n-1$ και $n-2$ όπως φαίνεται στις σχέσεις (3-13) [18] [19].

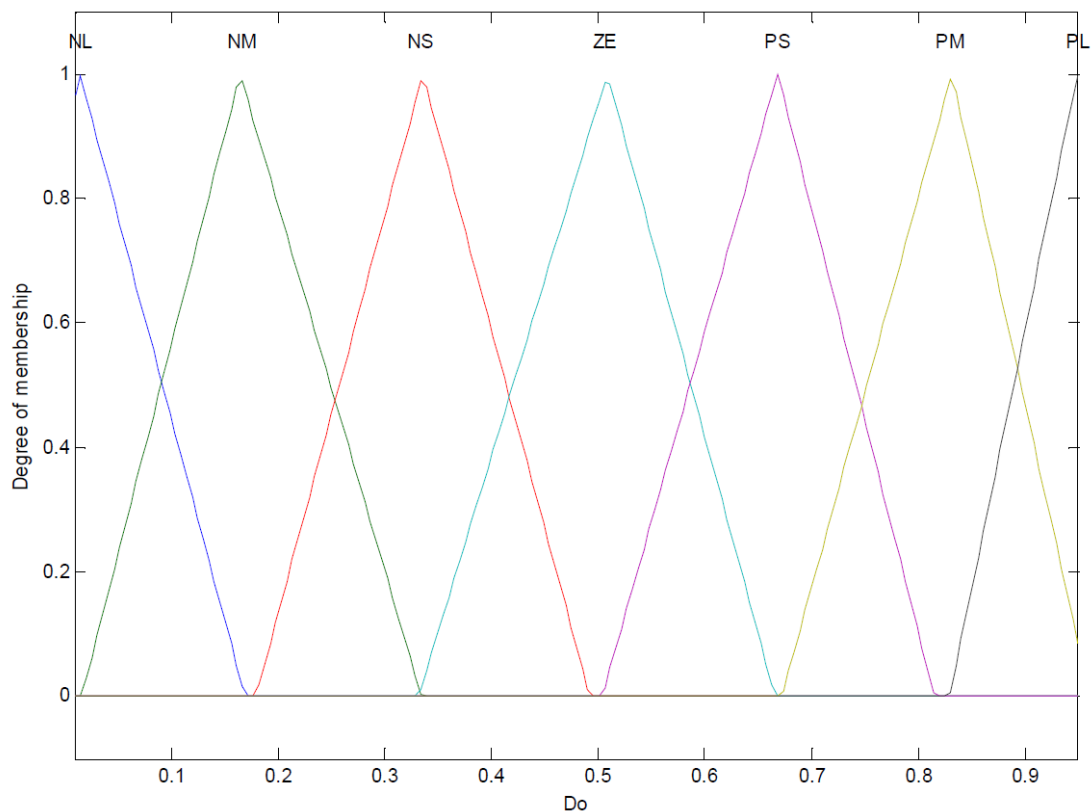
$$\begin{aligned} \Delta P_n &= P_n - P_{n-1} \\ \Delta D_n^i &= D_{n-1}^0 = D_{n-2}^0 \end{aligned} \quad (3-13)$$



Σχήμα 3.10 Συναρτήσεις συμμετοχής της ασαφούς μεταβλητής εισόδου ΔP_g



Σχήμα 3.11 Συναρτήσεις συμμετοχής της ασαφούς μεταβλητής εισόδου ΔI

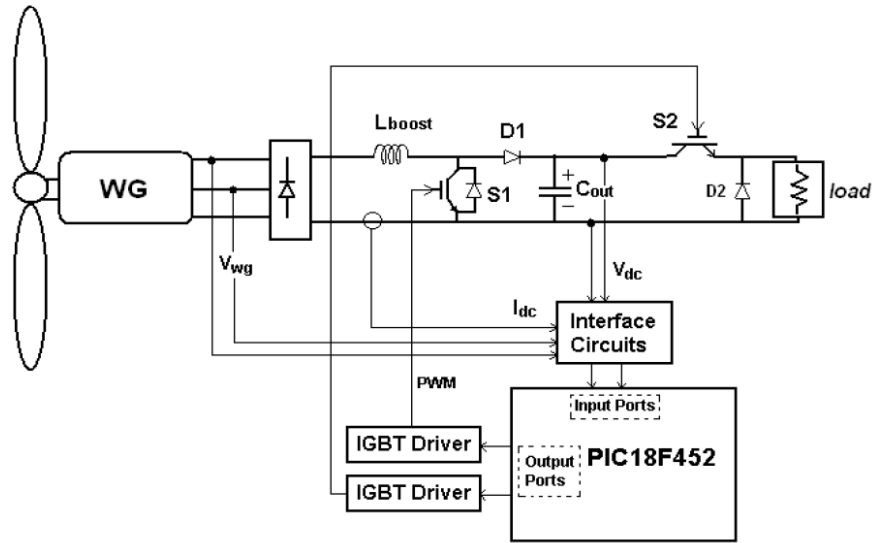


Σχήμα 3.12 Συναρτήσεις συμμετοχής της ασαφούς μεταβλητής εξόδου D

Κατά την διαδικασία εξαγωγής των αποτελεσμάτων, ο Fuzzy ελεγκτής 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 (πίνακας 3.1). 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 συνεπαγωγής που θα επιλεγθεί. Στον ελεγκτή που υλοποιούμε χρησιμοποιούμε την συνεπαγωγή Mamdani (τύπος 3-14) καθώς αναμένει οι συναρτήσεις συμμετοχής εξόδου να είναι ασαφή σύνολα.

$$\mu_R(x, y) = \mu_{A \cap B} = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (3-14)$$

Στο πίνακα 3.1 συνοψίζονται οι κανόνες στους οποίους υπακούει η ασαφή λογική ελέγχου.



Σχήμα 3.13 Fuzzy logic Controller

Πίνακας 3.1 Κανόνες του ελεγκτή που βασίζεται στην ασαφή λογική

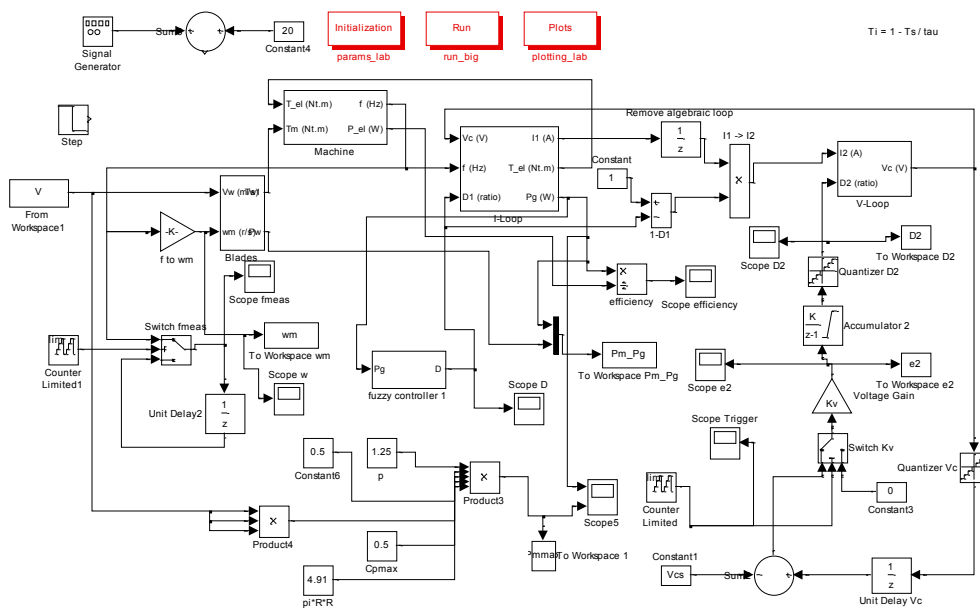
Σύνολο ασαφών κανόνων							
ΔΙ/ΔΡ	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NM	PS	PM	PL	PL
NM	NL	NM	NS	PS	PS	PM	PL
NS	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PL
ZE	PL	PM	PS	ZE	NS	NM	NL
PS	PM	PS	PS	ZE	NS	NS	NM
PM	PL	PM	PS	NS	NS	NM	NL
PL	PL	PL	PM	NS	NM	NL	NL

Κατά την διαδικασία της αποασαφοποίησης χρησιμοποιείται κατάλληλη μέθοδος για από-ασαφοποίηση της ασαφούς εισόδου σε σαφή τιμή με την από-ασαφοποίηση του κέντρου βάρους (Center 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:

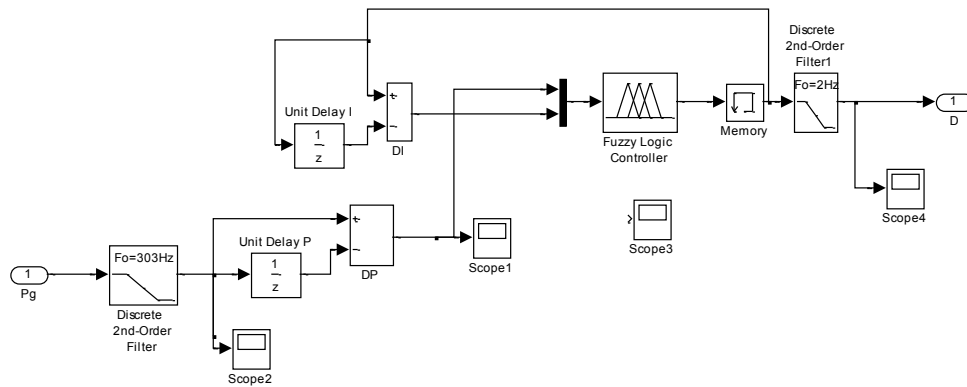
$$y_{COG} = \frac{\sum_{i=1}^I \sigma_i \cdot \mu_i(y)}{\sum_{i=1}^I \mu_i(y)} \quad (3-15)$$

3.4.2 Μοντέλο Προσομοίωσης

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 φαίνεται στο σχήμα 3.14 ενώ στο σχήμα 3.15 παρουσιάζεται το αντίστοιχο block όπως παρουσιάζεται στο πρόγραμμα Simulink™.



Σχήμα 3.14 Πλήρες μοντέλο ανεμογεννήτριας με σύστημα ελέγχου MPPT βασισμένου στην ασαφή λογική



Σχήμα 3.15 Το υποσύστημα ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος με βάση την ασαφή λογική

3.4.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου που βασίζεται στην ασαφή λογική

Πλεονέκτημα της μεθόδου που βασίζεται στην ασαφή λογική είναι η **απεξαρτητοποίηση από δεδομένη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – στροφών** και άρα από πιθανές ανακρίβειες αυτής. Επίσης, το σύστημα **παρουσιάζει γενικά γρήγορη απόκριση σε βηματικές μεταβολές** [24]. Αξιοσημείωτο είναι ότι το σύστημα δεν εξαρτάται από την αρχική τιμή του λόγου κατάτμησης D και συνεπώς δεν καθίσταται επιρρεπές σε ακατάλληλες αρχικοποιήσεις.

Ωστόσο, μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός πως παρατηρείται **σφάλμα μόνιμης κατάστασης** στο συντελεστή ισχύος C_p **για χαμηλές ταχύτητες ανέμου**. Μάλιστα παρατηρήθηκε πως όσο πιο χαμηλός ο άνεμος τόσο πιο πολύ αποκλίνει η τιμή του C_p από την βέλτιστη. Επίσης, ο ελεγκτής που χρησιμοποιεί την ασαφή λογική χρησιμοποιεί **κανόνες που βασίζονται στην εμπειρία** και λειτουργούν με επιτυχία σε συγκεκριμένες ανεμολογικές συνθήκες και **περιορισμένο εύρος ταχυτήτων ανέμου**. Αν οι ανεμολογικές συνθήκες αλλάξουν το σύστημα παρουσιάζει έντονα σφάλματα.

Μια νέα μέθοδος ελέγχου που έχει εμφανιστεί στη βιβλιογραφία αφορά τον έλεγχο ανεμογεννήτριας, για την ανεύρεση σημείου μέγιστης ισχύος, με την αξιοποίηση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Η μέθοδος ελέγχου που βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιεί τις δεδομένες καμπύλες αλλά ταυτόχρονα δεν εξαρτάται αποκλειστικά από αυτές για την λειτουργία της.

3.5 Μέθοδος Ελέγχου βασισμένη στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

3.5.1 Εισαγωγή

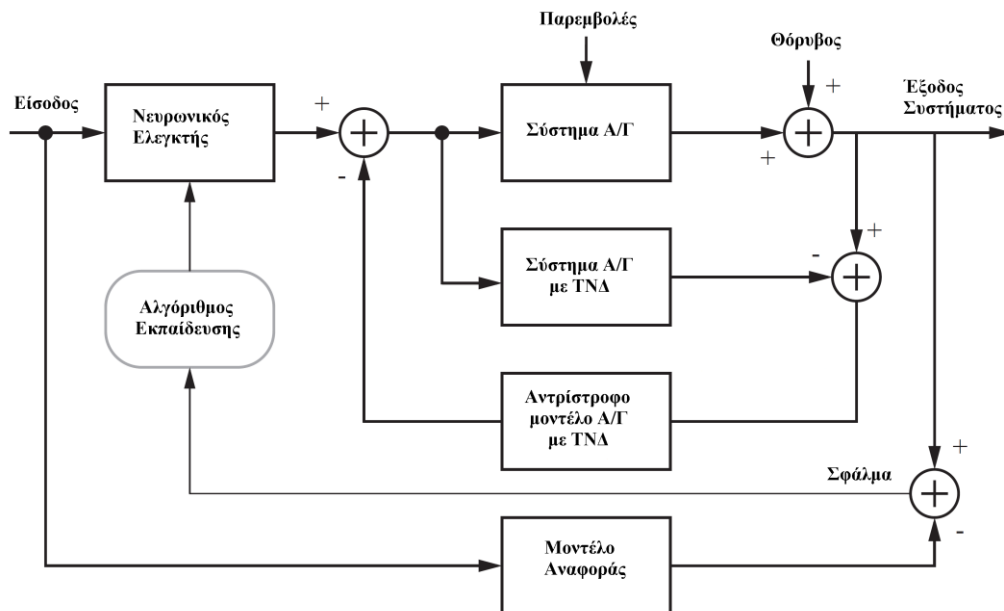
Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία στην αναγνώριση και στον έλεγχο δυναμικών συστημάτων. **Οι ιδιότητες της παράλληλης επεξεργασίας δεδομένων, πρόβλεψης και γενίκευσης των δεδομένων** έχουν καταστήσει τα νευρωνικά δίκτυα πολύ δημοφιλή για τον έλεγχο μη-γραμμικών συστημάτων. Στη βιβλιογραφία [23] αναλύονται διάφορες τοπολογίες σχετικά με την εισαγωγή τεχνητών νευρωνικών δικτύων στον έλεγχο συστημάτων και η κάθε μια παρουσιάζει τα δικά της ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τα οποία αναλύονται παρακάτω.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ο έλεγχος που βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα δεν μπορεί να καταταχθεί αποκλειστικά σε κάποια από τις υπάρχουσες κατηγορίες ελέγχου ανεμογεννήτριας, για την ανεύρεση σημείου μέγιστης ισχύος, καθώς, οι αντίστοιχοι ελεγκτές εκπαιδεύονται ώστε να ακολουθούν μια δεδομένη χαρακτηριστική καμπύλη αλλά ταυτόχρονα, με την αξιοποίηση της εκπαίδευσης κατά την διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος (online training), έχουν την δυνατότητα να μεταβάλουν την πληροφορία των δεδομένων καμπυλών με βάση έναν όρο σφάλματος ώστε να ανταποκρίνονται αποτελεσματικότερα στις στοχαστικές μεταβολές του ανέμου.

3.5.2 Θεωρητική ανάλυση ελέγχου ανεμογεννήτριας με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα – τοπολογίες ελέγχου

Προκειμένου να εξεταστεί ο έλεγχος ανεμογεννήτριας με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι απαραίτητο να επιλεγθεί κατάλληλη **τοπολογία ελέγχου** [23]. Το σύστημα ελέγχου ανεμογεννήτριας εμφανίζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και η επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας ελέγχου είναι καθοριστικής σημασίας για την απόδοση του ελεγκτή. Ο άνεμος είναι στοχαστικός και γρήγορα μεταβαλλόμενος με αποτέλεσμα, τα δεδομένα εισόδου – εξόδου, ο τρόπος εκπαίδευσης αλλά και η θέση του νευρωνικού δικτύου μέσα στο σύστημα της ανεμογεννήτριας να επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα.

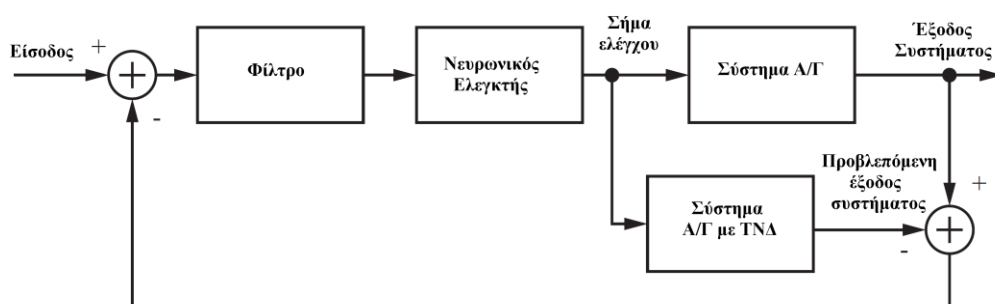
Μια διαδεδομένη τοπολογία ελέγχου είναι του **αντίστροφου ελέγχου** (Inverse Control) που φαίνεται στο σχήμα 3.16. Ο αντίστροφος έλεγχος βασίζεται στην παράθεση με το υπό έλεγχο σύστημα A/Γ ενός αντίστροφου μοντέλου, υλοποιούμενου με ΤΝΔ (NN Inverse plant model), του **ελεγχόμενου συστήματος** ώστε να έχει μια εξακριβωμένη απεικόνιση ανάμεσα στην αναμενόμενη έξοδο (NN plant model output) και τις εξόδους του ελεγχόμενου συστήματος. Με την διαδικασία του αντίστροφου ελέγχου φιλτράρεται το σήμα ελέγχου και δεν επηρεάζεται το σύστημα από παρεμβολές. Ο αλγόριθμος δέχεται το σφάλμα μεταξύ επιθυμητής εξόδου και πραγματικής και μεταβάλλει τη δομή του νευρωνικού δικτύου κατάλληλα με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιεί κάθε φορά το σφάλμα. **Μειονέκτημα** της τοπολογίας του αντίστροφου ελέγχου είναι η **απουσία απευθείας ανάδρασης** στο νευρωνικό ελεγκτή από την έξοδο του ελεγχόμενου συστήματος. Η απουσία απευθείας ανάδρασης δημιουργεί **προβλήματα ευστάθειας και σθεναρότητας** τα οποία αντιμετωπίζονται μόνο με την εκπαίδευση κατά την διάρκεια λειτουργίας του συστήματος. Επίσης, η τοπολογία του αντίστροφου ελέγχου είναι **πολύπλοκη** πράγμα το οποίο την καθιστά **δύσκολη στην υλοποίηση της** στο σύστημα ελέγχου ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 3.16 Τοπολογία αντίστροφου ελέγχου

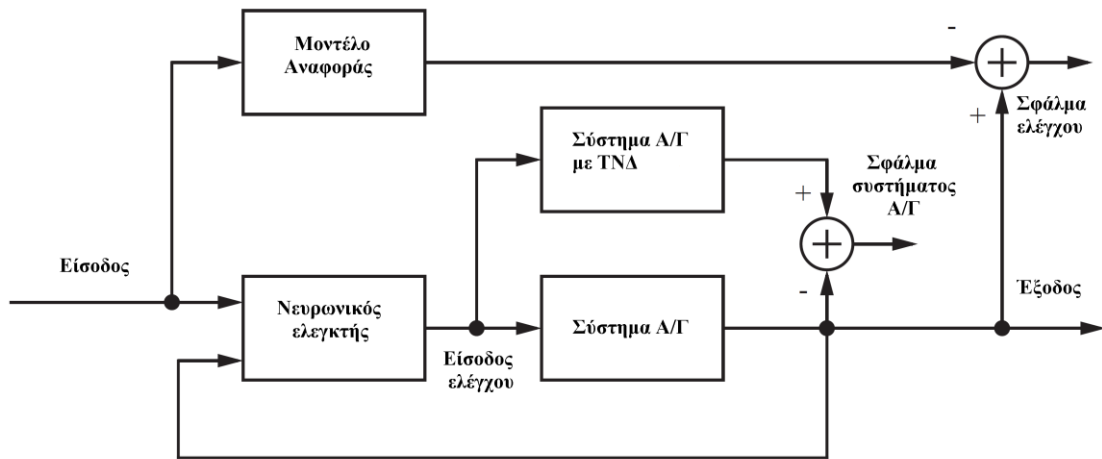
Η δεύτερη τοπολογία ελέγχου με νευρωνικά δίκτυα που συναντάται συχνά στην βιβλιογραφία ονομάζεται **μοντέλο εσωτερικού ελέγχου** (Internal Model Control) και παρουσιάζεται στο σχήμα 3.17. Το μοντέλο εσωτερικού ελέγχου

αποτελείται από ένα φίλτρο πρώτης τάξης (Filter) που τροφοδοτεί το νευρωνικό ελεγκτή (NN Controller). Ο νευρωνικός ελεγκτής εκπαιδεύεται στο εργαστήριο (offline) όπως και το νευρωνικό δίκτυο που προσομοιώνει την λειτουργία του ελεγχόμενου συστήματος (NN plant model). Το φίλτρο βεβαιώνει ότι **το σύστημα κλειστού βρόχου θα παραμείνει ευσταθές**. Η λογική αυτή ελέγχου είναι παρόμοια με αυτήν που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ανεμογεννήτριας με δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες.



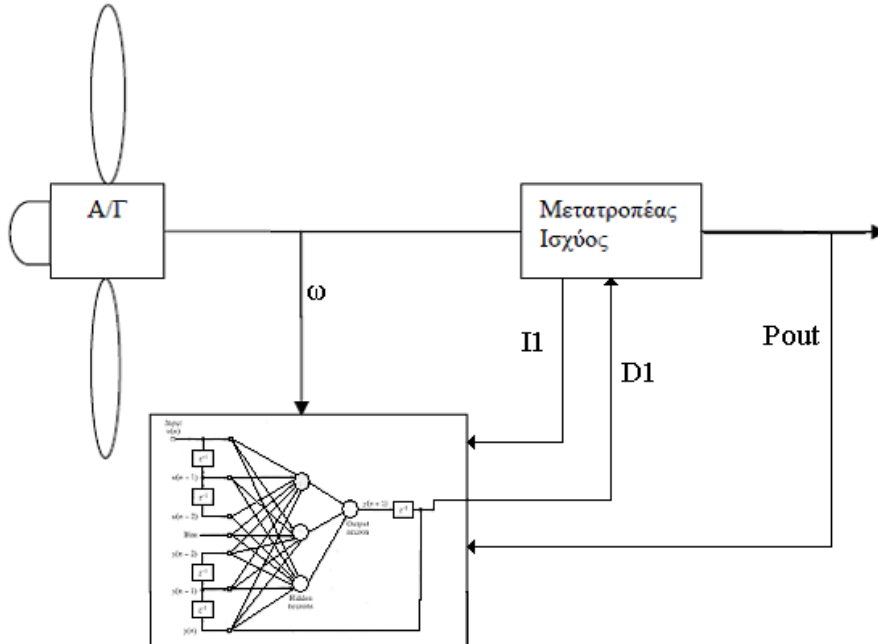
Σχήμα 3.17 Τοπολογία μοντέλου εσωτερικού ελέγχου

Η τρίτη τοπολογία ελέγχου ονομάζεται **έλεγχος μοντέλου αναφοράς** (Reference Model Control) και παρουσιάζεται στο σχήμα 3.18. Στην περίπτωση αυτή ο νευρωνικός ελεγκτής τροφοδοτείται από το σήμα ελέγχου αλλά και **απευθείας με ανάδραση από την έξοδο του υπό ελέγχου συστήματος**. Για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου ένας αλγόριθμος δέχεται το σφάλμα μεταξύ της εξόδου του μοντέλου αναφοράς και της πραγματικής εξόδου (σφάλμα ελέγχου) με αποτέλεσμα να μεταβάλλει την εσωτερική δομή του νευρωνικού δικτύου κατάλληλα ώστε να ελαχιστοποιεί το σφάλμα ελέγχου. Το μοντέλο αναφοράς και το σφάλμα ελέγχου καθιστά την συγκεκριμένη τοπολογία **κατάλληλη για υλοποίηση σε σύστημα ανεμογεννήτριας** καθώς εξασφαλίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα για όλο το εύρος των ταχυτήτων ανέμου. Επίσης, η ύπαρξη **απευθείας ανάδραση** στον ελεγκτή **βελτιώνει την ευστάθεια** του συστήματος κλειστού βρόχου και επιτρέπει στον ελεγκτή να **παρακολουθεί τις γρήγορες μεταβολές**.



Σχήμα 3.18 Τοπολογία ελέγχου μοντέλου αναφοράς

Επομένως, με βάση την τοπολογία του ελέγχου μοντέλου αναφοράς σχεδιάστηκε και η διάταξη ελέγχου της ανεμογεννήτριας, στην παρούσα εργασία, για την παρακολούθηση του σημείου μέγιστη ισχύος. Στο σχήμα 3.19 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα με το οποίο πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος του συστήματος ανεμογεννήτριας για την ανεύρεση σημείου μέγιστης ισχύος με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.



Σχήμα 3.19 Σύστημα ελέγχου για την εύρεση σημείου μέγιστης ισχύος με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Ως είσοδοι στον ελεγκτή που βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα επιλέγονται εύκολα και με ακρίβεια μετρήσιμα και κυρίως ηλεκτρικά μεγέθη τα

οποία κατά την διάρκεια πραγματικής λειτουργίας **αναπαριστούν τις τάσεις μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου**. Αποφεύγεται να χρησιμοποιηθεί η ταχύτητα του ανέμου ως είσοδος στον ελεγκτή έτσι ώστε να αποφευχθεί η ύπαρξη ανεμομέτρου το οποίο εισάγει επιπλέον κόστος για την τοποθέτηση και συντήρηση του και ταυτόχρονα δεν παρέχει αξιόπιστες πληροφορίες για τις ανεμολογικές συνθήκες.

Επιλέγονται ως είσοδοι στο νευρωνικό ελεγκτή η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα w_m , το ρεύμα εξόδου I του υπό έλεγχο ημιαγωγίου στοιχείου και η ισχύς εξόδου P_{out} της ανεμογεννήτριας. Ως έξοδος του νευρωνικού ελεγκτή επιλέγεται ο λόγος κατάτμησης (Duty Cycle) του ημιαγωγίου στοιχείου $D1$ η οποία ανατροφοδοτείται ως είσοδος (feedback) στο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Ελέγχοντας το λόγο κατάτμησης του μετατροπέα μπορούμε να ελέγξουμε το ρεύμα εξόδου της γεννήτριας και άρα και την ροπή της. Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο ελέγχοντας τον λόγο κατάτμησης μεταβάλλει ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου το ρεύμα της γεννήτριας ώστε σε κάθε χρονική στιγμή να μπορεί να βρίσκεται στις κατάλληλες στροφές ώστε να αποδίδει την μέγιστη ισχύ.

3.5.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου που βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Η αξιοποίηση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων για την παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος σε σύστημα ανεμογεννήτριας εμφανίζει **τα πλεονεκτήματα όλων των παραπάνω μεθόδων**. Σε πρώτο επίπεδο η ικανότητα τους να εκπαιδεύονται και να ακολουθούν με ακρίβεια μια δεδομένη καμπύλη τα καθιστά ικανά να εμφανίζουν **ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων του ανέμου**. Ακόμα και αν το σύστημα προορίζεται να λειτουργεί με μεγάλη ακρίβεια σε ένα συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων ανέμου, πιθανή αλλαγή των συνθηκών θα επηρεάσει ελάχιστα τον ελεγκτή που βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα ο οποίος θα ανταποκριθεί ικανοποιητικά σε οποιεσδήποτε μεταβολές. Επίσης, η δυνατότητα της παράλληλης επεξεργασίας δεδομένων και πρόβλεψης που διαθέτουν τα νευρωνικά δίκτυα τα καθιστά κατάλληλα για τον έλεγχο συστημάτων που έχουν γρήγορα μεταβαλλόμενα μεγέθη όπως ο άνεμος.

Σε δεύτερο επίπεδο, οι ελεγκτές που χρησιμοποιούν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν την ικανότητα να αναπρογραμματίζονται εν λειτουργία και να

ακολουθούν μια άλλη δεδομένη χαρακτηριστική καμπύλη καθώς η αρχική μπορεί να εμφανίζει σφάλματα αρχικών υπολογισμών και γήρανσης. Η δυνατότητα **εκπαίδευσης κατά την διάρκεια λειτουργίας του συστήματος** της ανεμογεννήτριας (online training) μπορεί να μεταβάλλει τα εσωτερικά βάρη των νευρώνων, σε έναν ελεγκτή που βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, με βάση έναν όρο σφάλματος. Το αποτέλεσμα τις παραπάνω λειτουργίας καθιστά το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα **ανεξάρτητο** από τη γήρανση και τα σφάλματα αρχικών υπολογισμών, που εμφανίζει η μέθοδος με δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες, καθώς μπορεί να προσαρμόζεται στις αλλαγές του περιβάλλοντος του, εκμεταλλευόμενο στο μέγιστο την αιολική ενέργεια.

Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία του νευρωνικού ελεγκτή χρειάζεται να αναλυθεί η εσωτερική δομή του, ο τρόπος λειτουργίας του και ο τρόπος εκπαίδευσης του. Επομένως, κρίνεται σκόπιμο να αναλυθεί εκτενέστερα η διαμόρφωση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων πριν αναλυθεί ο σχεδιασμός των νευρωνικών ελεγκτών και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Κεφάλαιο 4

Διαμόρφωση και εφαρμογές Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

4.1 Εισαγωγή στα Νευρωνικά Δίκτυα

Για τη σχεδίαση και υλοποίηση των νευρωνικών ελεγκτών, για την παρακολούθηση σημείου που θα μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ της ανεμογεννήτριας, πρέπει πρωτίστως να εξεταστεί η εσωτερική δομή και λειτουργία των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ). Η ιδέα των ΤΝΔ βασίζεται στο ανθρώπινο νευρικό σύστημα και σκοπός τους είναι η δημιουργία τεχνητών μέσων που προσπαθούν να αναπαραγάγουν όσο το δυνατόν καλύτερα τις λειτουργίες του ανθρώπινου Νευρικού Συστήματος.

Στο κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνεται μία **σύντομη ιστορική ανασκόπηση** των νευρωνικών δικτύων και παρουσιάζονται επιγραμματικά οι φάσεις από τις οποίες πέρασε η εξέλιξη τους. Εξηγούνται τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και οι νευρώνες από τους οποίους αποτελούνται. Αναλύεται η σχέση με τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα των ζώντων οργανισμών. Αναπτύσσονται παραστατικά οι αναλογίες με τους υπολογιστές, οι ομοιότητες και οι διαφορές.

Παρουσιάζεται η δομή ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου, ο τρόπος λειτουργίας του και ο τρόπος εκπαίδευσής του. Παράλληλα αποτυπώνονται τα μοντέλα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων που προτάθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος, αναλύεται η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου, η μέθοδος της οπισθοδιάδοσης του σφάλματος.

4.2 Ιστορική αναδρομή

Το πρώτο μοντέλο νευρωνικού δικτύου το οποίο προτείνει ότι οι νευρώνες είναι η βασική μονάδα του δικτύου **παρουσιάστηκε το 1943** από τους McCulloch και Pitts. Στην εργασία τους παρουσίασαν για πρώτη φορά την ιδέα ότι ένα

νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από ένα σύνολο ενός μεγάλου αριθμού **νευρώνων** και έδειξαν πώς θα μπορούσαν να λειτουργούν οι νευρώνες με τις διασυνδέσεις τους.

Το 1947, οι ίδιοι συγγραφείς, προχώρησαν σε ένα πιο εξελιγμένο πρότυπο για την αναγνώριση σχημάτων. Ο νευρώνας θεωρείται ότι μπορεί να έχει δύο μόνον καταστάσεις είτε είναι ενεργός είτε ηρεμεί. Μπορεί να έχει πολλές εισόδους αλλά δίνει μόνο μια έξοδο. Οι έξοδοι από διαφορετικούς νευρώνες δεν επιτρέπεται να ενώνονται, αλλά πρέπει υποχρεωτικά να οδηγούν σε είσοδο άλλου νευρώνα. Οι λειτουργίες αυτές πάντα γίνονται σε διακριτό χρόνο και υποτίθεται ότι όλοι οι νευρώνες αποκρίνονται ταυτόχρονα, δηλαδή το σύστημα δρα συγχρονισμένα. Τα δίκτυα McCulloch–Pitts προσπαθούν να εξηγήσουν για πρώτη φορά πως δουλεύει η μνήμη. Θεωρούν ότι ένας πιθανός μηχανισμός μνήμης μπορεί να είναι η ύπαρξη κλειστών διαδρομών του σήματος μέσα στο δίκτυο. Έτσι, μια ίνα ενώνει την έξοδο ενός νευρώνα με το νευρώνα εισόδου στο ίδιο δίκτυο, δημιουργώντας έναν μηχανισμό ανάδρασης (feedback).

Τις έρευνες των McCulloch–Pitts χρησιμοποίησε λίγα χρόνια αργότερα ο J. von Neumann ως παράδειγμα για υπολογιστικές μηχανές και τότε έγιναν και οι πρώτες προσπάθειες να αντλήσουμε πληροφορίες από τα βιολογικά δίκτυα και να δημιουργηθούν τα πρώτα τεχνητά δίκτυα.

Το 1949 ο D. Hebb με το βιβλίο του «The organisation of behaviour», εισάγει τον κανόνα μάθησης του Hebb. Το μοντέλο του Hebb έχει ως κεντρική ιδέα τις συνδέσεις μεταξύ μονάδων του συστήματος, δηλαδή τους νευρώνες. Ο κανόνας αυτός λέει ότι κάθε φορά που το δίκτυο χρησιμοποιεί τις νευρωνικές του συνδέσεις, οι συνδέσεις αυτές ενισχύονται και το δίκτυο πλησιάζει περισσότερο στο να μάθει το πρότυπο το οποίο παρουσιάζεται.

Το μοντέλο του αισθητήρα (perceptron) παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1957 από τον F. Rosenblatt, ο οποίος αρχικά έφτιαξε το πρώτο δίκτυο με hardware που μπορούσε να κάνει πολλές και διάφορες διεργασίες. Είναι ένα πολύ απλό μοντέλο που έχει μόνο δύο επίπεδα, αυτά της εισόδου και της εξόδου όπου το σήμα προχωρά μονοδρομικά από την είσοδο στην έξοδο. Στο βιβλίο «Perceptrons» των Minsky και Papert το 1969 γίνεται μία συνολική εκτίμηση της χρησιμότητας του προτύπου του αισθητήρα και όλων των διεργασιών για τα οποία είναι χρήσιμο παρουσιάζονται όμως και τα μειονεκτήματά του. Την ίδια περίπου εποχή με την ανάπτυξη του μοντέλου του αισθητήρα οι Widrow και Hoff ανέπτυξαν το 1959 δύο νέα μοντέλα, το Adaline και το Madaline, που ήταν από τα πρώτα μοντέλα που

χρησιμοποιήθηκαν επιτυχώς για πρακτικά προβλήματα: Χρησιμοποιήθηκαν ως φίλτρα για να εξαλείψουν την ηχώ σε τηλεφωνικές γραμμές.

Το 1982 ο J.Hopfield, έδωσε μεγάλη ώθηση στην ανάπτυξη των νευρωνικών δικτύων με μία εργασία μόλις 5 σελίδων όπου έδειξε με αυστηρά μαθηματική απόδειξη πώς ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποθηκευτικός χώρος. Επίσης απέδειξε πως ένα δίκτυο μπορεί να επανακτήσει όλη την πληροφορία ενός συστήματος έστω και αν του δοθούν μερικά τμήματα μόνο και όχι ολόκληρο το σύστημα.

Ένα επόμενο σημαντικό βήμα ήταν η πρόοδος που επιτελέστηκε στην διαδικασία εκπαίδευσης των δικτύων όταν επινοήθηκε ο κανόνας της διόρθωσης του σφάλματος (error correction learning). Σε όποια κατάσταση και αν βρίσκεται αυτό σε μια δεδομένη στιγμή, σημασία έχει η απόκλιση που δίνει στην έξοδο του το δίκτυο από τον στόχο που έχουμε θέσει. Η διαφορά αυτή δίνει το σφάλμα που παράγει το δίκτυο την δεδομένη στιγμή. Το σφάλμα διορθώνεται με ένα μηχανισμό ελέγχου που επιφέρει μια σειρά από διορθωτικές αλλαγές στα βάρη των νευρώνων.

Το 1986 δημοσιεύεται ένα άλλο σημαντικό έργο από τους McClelland και Rumelhart, το «Parallel Distributed Processing», στο οποίο παρουσιάζεται η ιδέα πώς ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παράλληλος επεξεργαστής. Το έργο αυτό εισάγει την ύπαρξη και άλλων επιπέδων νευρώνων, εκτός από την είσοδο και την έξοδο που αποτελούν την εσωτερική δομή του δικτύου. Προτείνουν μία νέα διαδικασία εκπαίδευσης, την μέθοδο της οπισθοδιάδοσης (back-propagation) η οποία κατέληξε να είναι η πιο χρήσιμη σήμερα τεχνική εκπαίδευσης δικτύων.

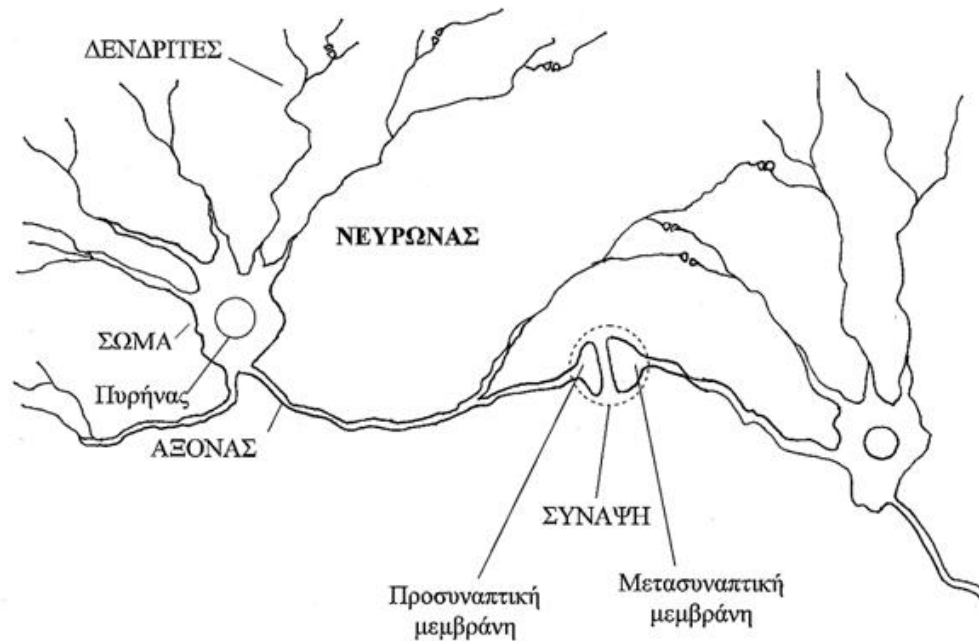
Από το 1985 και μετά αρχίζουν τα πρώτα συνέδρια που είναι αφιερωμένα αποκλειστικά στα νευρωνικά δίκτυα, από την American Physical Society και από την IEEE. Ταυτόχρονα δημιουργούνται ειδικές επαγγελματικές εταιρίες νευρωνικών δικτύων.

4.3 Βιολογικά νευρωνικά δίκτυα

Το έργο στο επιστημονικό πεδίο των τεχνητών νευρωνικών δικτύων βασίστηκε στο γεγονός ότι ο ανθρώπινος εγκέφαλος εκτελεί τους υπολογισμούς με εντελώς διαφορετικό τρόπο από το συμβατικό υπολογιστή. Η αναλογία μεταξύ

νευροφυσιολογίας του ανθρώπινου εγκεφάλου και τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι καθοριστικής σημασίας για την κατανόηση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

Ο νευρώνας είναι ένας εξειδικευμένος τύπος κυττάρου που αποτελεί τη βασική μονάδα των συστημάτων επεξεργασίας πληροφοριών που απαρτίζουν το νευρικό σύστημα του ανθρώπου. Σε αναλογία με του ηλεκτρονικούς υπολογιστές, οι νευρώνες αποτελούν το σύνολο των στοιχείων μνήμης και των λογικών κυκλωμάτων.



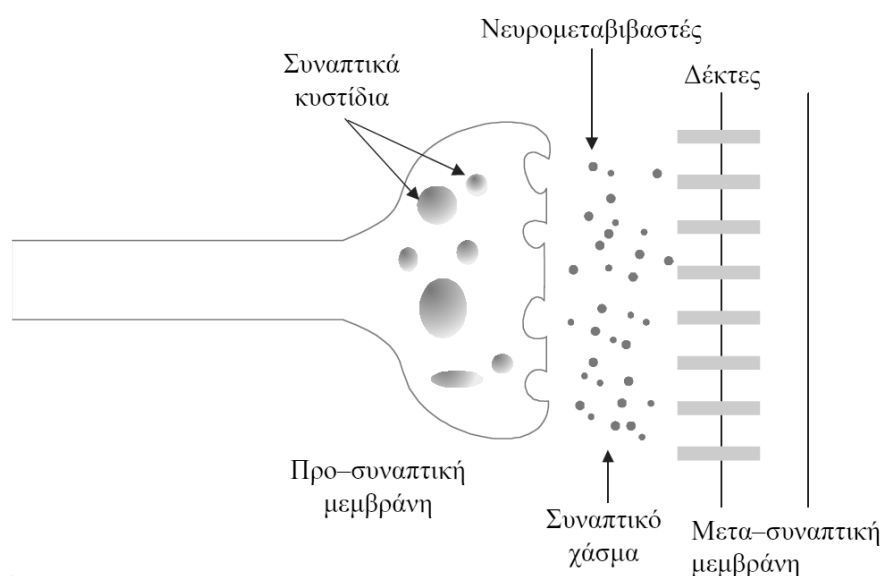
Σχήμα 4.1 Ένας φυσιολογικός νευρώνας

Το βασικότερο χαρακτηριστικό του νευρώνα είναι η ευαισθησία του, δηλαδή η ικανότητα του να αντιδρά σε διάφορα εξωτερικά ερεθίσματα (ηλεκτρομαγνητικά, χημικά, θερμικά, μηχανικά κ.α.). Η αντίδραση αυτή έχει ως αποτέλεσμα μια σειρά παλμών τάσης σύντομης διάρκειας. Αυτοί οι παλμοί είναι γνωστοί ως δυναμικά δράσης και ξεκινούν από το κυτταρικό σώμα των νευρώνων και διαδίδονται μέσω των νευρώνων με σταθερή ταχύτητα και πλάτος σήματος. Το δυναμικό δράσης χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μεταξύ των νευρικών κυττάρων εξαιτίας της φυσικής των αξόνων των νευρικών κυττάρων οι οποίοι είναι πολύ μακρύς, με μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση και πολύ μεγάλη χωρητικότητα. Τα δυναμικά δράσεις παρακάμπτουν τους παραπάνω περιορισμούς.

Ο κυρίως κορμός του νευρώνα είναι το σώμα, μέσα στο οποίο βρίσκεται ο πυρήνας του κυττάρου στον οποίο βρίσκεται όλο το γενετικό υλικό του οργανισμού. Ο άξονας είναι μια μεγάλη επέκταση από το σώμα και εφάπτεται με άλλους νευρώνες. Οι άξονες σε μερικούς νευρώνες είναι καλυμμένοι με μια ουσία, που

λέγεται μυελίνη, ενώ άλλοι άξονες είναι τελείως ακάλυπτοι. Κάθε νευρώνας έχει έναν μόνο άξονα, ο οποίος μεταδίδει σήματα σε άλλους νευρώνες. Τέλος, υπάρχουν οι λεπτές επεκτάσεις που μοιάζουν με διακλαδώσεις δένδρου και ονομάζονται δενδρίτες. Οι δενδρίτες κάνουν και αυτοί επαφή με άλλους νευρώνες και δέχονται τα εισερχόμενα σήματα. Η ταχύτητα των ηλεκτρικών παλμών στους απλούς νευρώνες κυμαίνεται από 10 – 20 m/sec, ενώ σε αυτούς που οι άξονες είναι καλυμμένοι με μυελίνη η ταχύτητα φθάνει τα 100 m/sec. Το μήκος των νευρώνων διαφέρει και μπορεί να έχουν μήκος από μερικά μικρόμετρα (μm) μέχρι και 1m, ιδίως αυτοί που εκτείνονται στα άκρα.

Οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων, με τους άξονες και τους δενδρίτες, γίνονται στις επαφές που ονομάζονται συνάψεις. Οι συνάψεις είναι οι στοιχειώδεις δομικές και λειτουργικές μονάδες που παίζουν διαμεσολαβητικό ρόλο κατά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των νευρώνων. Ο άξονας όπως είδαμε συνήθως έχει πάρα πολλές διακλαδώσεις και έτσι στέλνει πολλά σήματα σε διαφορετικά σημεία. Στα σημεία που εφάπτονται οι δενδρίτες δημιουργείται μία σύναψη. Η επαφή που δημιουργείται περιέχει ένα κενό, το συναπτικό χάσμα, το οποίο είναι της τάξης του 0,01μ. Η μεμβράνη του πρώτου νευρώνα που στέλνει το σήμα ονομάζεται προ-συναπτική μεμβράνη, ενώ αυτή του δεύτερου νευρώνα (δέκτη) ονομάζεται μετα-συναπτική μεμβράνη. Στην άκρη κάθε διακλάδωσης εκκρίνονται χημικοί μεταβιβαστές οι οποίοι διαπερνούν το συναπτικό χάσμα και έτσι φθάνουν στον άλλο νευρώνα.



Σχήμα 4.2 Η σύναψη

Κάθε νευρώνας έχει δύο δυνατές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρίσκεται και τις ονομάζουμε ενεργό και μη-ενεργό κατάσταση. Ενδιάμεσες καταστάσεις δεν υπάρχουν. Κατά κάποιο τρόπο βλέπουμε ότι ο νευρώνας είναι δυαδικό (binary) στοιχείο και μοιάζει στο σημείο αυτό με τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Όταν ο νευρώνας πυροδοτεί, παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα (παλμό), το οποίο κάθε φορά έχει τα ίδια χαρακτηριστικά.

Οι αριθμοί των μονάδων των νευρώνων και οι συνδέσεις τους στον άνθρωπο ως τάξη μεγέθους είναι πολύ μεγαλύτεροι από τους αριθμούς μονάδων που μπορεί να χειριστεί εύκολα σήμερα ένας υπολογιστής. Είναι μάλλον λογικό να είναι έτσι τα πράγματα, αν πάρουμε υπ' όψη μας την πολυπλοκότητα του ανθρώπινου νου και όλες τις διεργασίες που επιτελεί. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα οπωσδήποτε υπολείπονται κατά πολύ στο σημείο αυτό και δεν μπορούν να κάνουν πράγματα που ο εγκέφαλος ακόμα και ενός παιδιού επιτελεί με μεγάλη ευκολία. Ένα ΤΝΔ μπορεί να έχει μερικές εκατοντάδες ή χιλιάδες νευρώνες, αλλά όχι την τάξη μεγέθους που έχει ο ανθρώπινος εγκέφαλος. Από την άλλη μεριά τα ΤΝΔ μπορούν να λύσουν δύσκολα μαθηματικά προβλήματα, όπως είναι η αναγνώριση συστήματος, η πρόβλεψη κ.α., στα οποία ο ανθρώπινος εγκέφαλος δεν τα καταφέρνει καλά. Επιπλέον, υπάρχουν πολλές άλλες διαφορές, όπως ότι οι συνάψεις και η συνδεσμολογία τους είναι πολύ περίπλοκες στα βιολογικά, ενώ πολύ απλές στα ΤΝΔ. Η ταχύτητα όμως στους υπολογιστές είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης του σήματος στα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα παρόλα αυτά, η διαφορά στην ταχύτητα δεν επαρκεί για να καλύψει την διαφορά στην πολυπλοκότητα.

4.4 Τα πλεονεκτήματα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Ένα νευρωνικό δίκτυο οφείλει την υπολογιστική του ισχύ πρώτων στην παράλληλη, κατανεμημένη δομή του και κατά δεύτερον στην ικανότητα του να μαθαίνει και ως εκ τούτου να γενικεύει. Ο όρος **γενίκευση** αναφέρεται στην παραγωγή, από το νευρωνικό δίκτυο, εξόδων για εισόδους τις οποίες δεν έχει συναντήσει κατά την εκπαίδευση του. Αυτές οι δυνατότητες δίνουν στα νευρωνικά δίκτυα την ικανότητα να βρίσκουν καλές προσεγγιστικές λύσεις σε πολύπλοκα προβλήματα.

Γενικότερα τα νευρωνικά δίκτυα προσφέρουν τις ακόλουθες χρήσιμες ιδιότητες [21]:

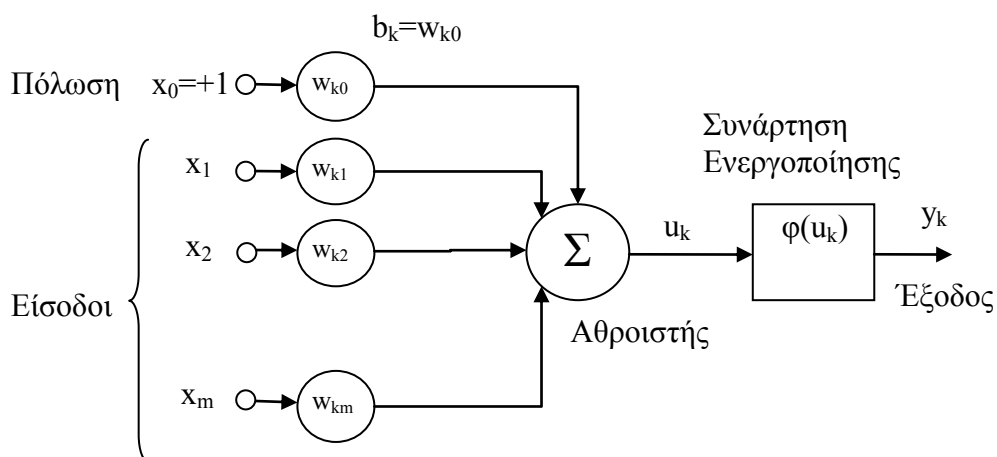
1. **Μη γραμμικότητα:** Ένας τεχνητός νευρώνας μπορεί να είναι μη-γραμμικός. Ένα ΤΝΔ αποτελούμενο από διασυνδεδεμένους μη-γραμμικούς νευρώνες είναι μη-γραμμικό. Αυτή η ιδιότητα είναι πολύ σημαντική καθώς οι σύγχρονες εφαρμογές απαιτούν **έλεγχο και προσομοίωση μη-γραμμικών συστημάτων**.
2. **Αντιστοίχιση Εισόδου-Εξόδου:** Κατά την διάρκεια εκπαίδευσης του ΤΝΔ με εκπαιδευτή έχουμε την τροποποίηση των συναπτικών βαρών του δικτύου με βάση ένα εφαρμοζόμενο σύνολο εκπαίδευσης. Κάθε σύνολο αποτελείται από ένα διάνυσμα εισόδου και την αντίστοιχη επιθυμητή έξοδο. Η εκπαίδευση επαναλαμβάνεται για όλο το σύνολο εκπαίδευσης έως ότου το δίκτυο φτάσει σε μια μόνιμη κατάσταση κατά την οποία δεν υπάρχουν σημαντικές μεταβολές στα συναπτικά βάρη.
3. **Προσαρμοστικότητα:** Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν την δυνατότητα να προσαρμόζουν τα συναπτικά βάρη τους ανάλογα με τις μεταβολές που γίνονται στο περιβάλλον τους. Ένα ΤΝΔ εκπαιδευμένο να λειτουργεί σε συγκεκριμένο περιβάλλον **μπορεί εύκολα να επαν-εκπαιδευτεί** ώστε να **χειρίζεται τις μεταβολές στο νέο περιβάλλον λειτουργίας του**. Επίσης, όταν λειτουργεί σε μη στατικό περιβάλλον μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να μεταβάλλει τα συναπτικά βάρη του σε πραγματικά χρόνο.
4. **Ενδεικτική απόκριση:** Στο πλαίσιο ταξινόμησης προτύπων, ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να παρέχει πληροφορία όχι μόνο για το ποιο συγκεκριμένο πρότυπο θα επιλεγεί αλλά και για τον βαθμό εμπιστοσύνης στην ληφθείσα απόφαση.
5. **Πληροφορία σχετική με το Περιεχόμενο:** Η γνώση του ΤΝΔ αντιπροσωπεύεται από την ίδια την δομή και την κατάσταση ενεργοποίησης ενός νευρωνικού δικτύου. Κάθε νευρώνας επηρεάζεται από τη συνολική δραστηριότητα όλων των άλλων νευρώνων του δικτύου.
6. **Ανοχή σε βλάβες:** Ένα νευρωνικό δίκτυο υλοποιημένο σε μορφή hardware έχει την δυνατότητα να είναι ανεκτικό σε βλάβες. Αν ένας νευρώνας ή οι συνδέσεις του καταστραφούν η ποιότητα της εξόδου μειώνεται, ωστόσο λόγω της κατανεμημένης δομής του δικτύου, **που η πληροφορία αποθηκεύεται σε**

όλη την δομή του, η βλάβη πρέπει να λάβει μεγάλη έκταση για να αρχίσει να μειώνεται σοβαρά η συνολική απόκριση του.

7. **Δυνατότητα υλοποίησης σε VLSI:** Η παράλληλη δομή του ΤΝΔ το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για την υλοποίηση για υλοποίηση με χρήση τεχνολογίας πολύ μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης (VLSI).
8. **Ομοιομορφία Ανάλυσης και σχεδίασης:** Όλα τα νευρωνικά δίκτυα απολαμβάνουν καθολικής αποδοχής ως επεξεργαστές πληροφοριών καθώς χρησιμοποιείται η ίδια σημειογραφία σε όλα τα πεδία εφαρμογής τους.
9. **Αναλογία με την νευροφυσιολογία του εγκεφάλου:** Η σχεδίαση ενός νευρωνικού δικτύου δανείζεται στοιχεία από την λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου, ο οποίος είναι η ζωντανή απόδειξη ότι η εύρωστη, παράλληλη επεξεργασία δεν είναι μόνο εφικτή, αλλά επίσης γρήγορη και ισχυρή.

4.5 Το μοντέλο του τεχνητού νευρώνα

Σε ένα απλουστευμένο μαθηματικό πρότυπο του φυσικού νευρώνα οι επιδράσεις των συνάψεων αντιπροσωπεύονται από “βάρη” που διαμορφώνουν την επίδραση των αντίστοιχων σημάτων εισόδου, ενώ τα μη-γραμμικά χαρακτηριστικά των νευρώνων μπορούν να αναπαρασταθούν από μια μη-γραμμική συνάρτηση μεταφοράς.



Σχήμα 4.3 Απλός τεχνητός νευρώνας με πολλαπλές εισόδους

Σε ένα μοντέλο νευρώνα μπορούν να αναγνωριστούν τα εξής βασικά στοιχεία:

- Ένα σύνολο από συνάψεις (διασυνδέσεις), η κάθε μια από τις οποίες χαρακτηρίζεται από κάποιο βάρος w_{km} . Συγκεκριμένα ένα σήμα x_m στην είσοδο μιας σύναψης m που είναι συνδεδεμένη με το νευρώνα k πολλαπλασιάζεται με το βάρος της σύναψης w_{km} . Όταν το βάρος είναι θετικό τότε η αντίστοιχη σύναψη διεγείρει το νευρώνα, όταν το βάρος είναι αρνητικό τότε η σύναψη θεωρείται ανασταλτική.
- Έναν **αθροιστή**, που αθροίζει τα εισερχόμενα σήματα στο νευρώνα που έχουν πολλαπλασιαστεί με το βάρος της αντίστοιχης σύναψης από την οποία εισήλθαν. **Η διαδικασία της άθροισης είναι γραμμική.**
- **Μια συνάρτηση ενεργοποίησης**, για τον περιορισμό του μεγέθους εξόδου του νευρώνα a . Συνήθως το κανονικοποιημένο εύρος εξόδου του νευρώνα είναι ένα κλειστό σύνολο $[0, 1]$ ή $[-1, 1]$.
- Σε πολλά μοντέλα νευρώνα έχουμε επίσης μια **πόλωση b** (bias). Η πόλωση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση ή την μείωση της τιμής v_k που δίνει ως είσοδο το δίκτυο στην συνάρτηση ενεργοποίησης ανάλογα με το αν είναι αρνητική ή θετική. Συγκεκριμένα αν το bias είναι αρνητικό ή θετικό η σχέση μεταξύ της δυνατότητας ενεργοποίησης u_k του νευρώνα k και της εξόδου του γραμμικού αθροιστή v_k αλλάζει.

Με μαθηματικούς όρους [21] ο νευρώνας του σχήματος 4.3 περιγράφεται ως εξής:

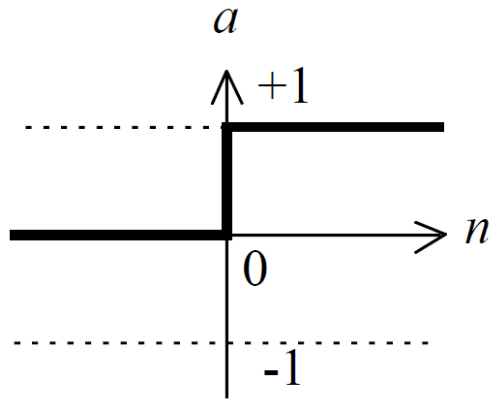
$$u_k = \sum_{j=0}^m w_{kj} \cdot x_j \text{ και } y_k = \phi(u_k)$$

Ενώ για την πόλωση έχουμε: $x_0 = +1$ και το βάρος της $w_{k0} = b_k$.

Υπάρχουν πολλά είδη συναρτήσεων ενεργοποίησης. Τα κυριότερα παρουσιάζονται παρακάτω:

1. **Η συνάρτηση κατώφλι** (Threshold function): Η συνάρτηση αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4α περιγράφεται ως εξής:

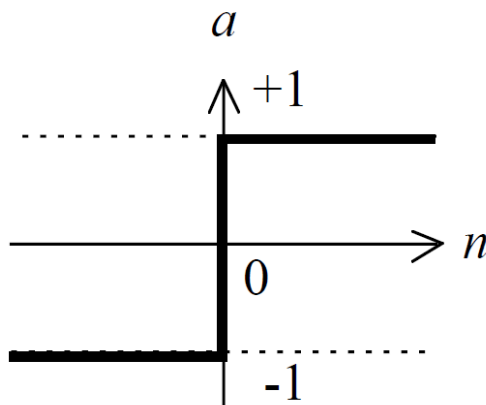
$$a(n) = \begin{cases} 1, & \text{εάν } n \geq 0 \\ 0, & \text{εάν } n < 0 \end{cases}$$



Σχήμα 4.4α Συνάρτηση κατωφλίου

2. **Συμμετρική συνάρτηση κατωφλίου** (Symmetric Threshold Function): Η συνάρτηση αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4β και περιγράφεται ως εξής:

$$a(n) = \begin{cases} 1, & \text{εάν } n \geq 0 \\ -1, & \text{εάν } n < 0 \end{cases}$$

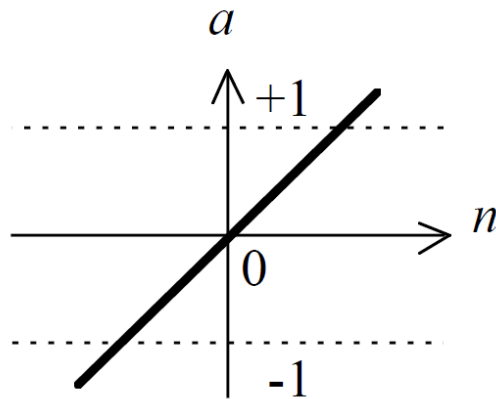


Σχήμα 4.4β Συμμετρική συνάρτηση κατωφλίου

3. **Γραμμική συνάρτηση** (linear function): Η συνάρτηση αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4γ και περιγράφεται ως εξής:

$$a(n) = b \cdot n \text{ για κάθε } n$$

Όπου b είναι η παράμετρος κλίσης της γραμμικής συνάρτησης.

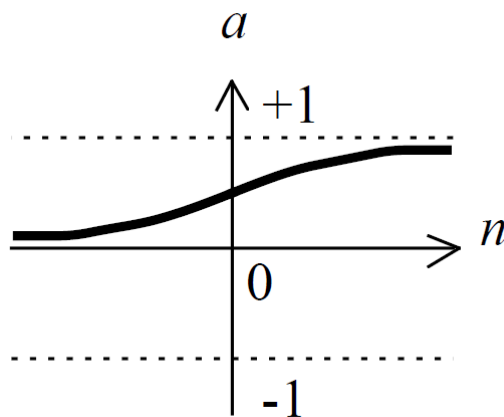


Σχήμα 4.4γ Γραμμική συνάρτηση

4. **Σιγμοειδής συνάρτηση** (sigmoid Function): Η σιγμοειδής συνάρτηση είναι η πλέον κοινή μορφή συνάρτησης ενεργοποίησης που χρησιμοποιείται στα ΤΝΔ. Ορίζεται αυστηρά ως αύξουσα συνάρτηση και έχει ισορροπία μεταξύ γραμμικής και μη-γραμμικής συμπεριφοράς. **Η λογιστική σιγμοειδής συνάρτηση** φαίνεται στο σχήμα 4.4δ και περιγράφεται ως εξής:

$$a(n) = \frac{1}{1 + \exp(-b \cdot n)}$$

Όπου b είναι η παράμετρος κλίσης της λογιστικής σιγμοειδής συνάρτησης.

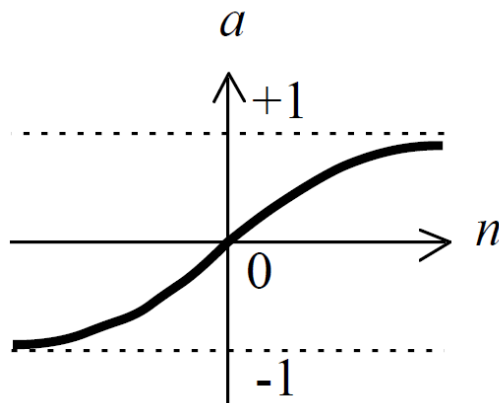


Σχήμα 4.4δ Λογιστική σιγμοειδής συνάρτηση

Μια άλλη συχνά χρησιμοποιούμενη σιγμοειδής συνάρτηση είναι η συνάρτηση υπερβολικής εφαπτομένης (Hyperbolic tangent sigmoid) η οποία φαίνεται στο σχήμα 4.4ε και περιγράφεται ως εξής:

$$a(n) = \tanh(n) = \frac{2}{1 + \exp(-b \cdot 2 \cdot n)} - 1$$

Αυτή η συνάρτηση παίρνει και αρνητικές τιμές σε αντίθεση με την λογιστική συνάρτηση ενεργοποίησης και παρέχει πρακτικά οφέλη έναντι αυτής.



Σχήμα 4.4ε Σιγμοειδής συνάρτηση υπερβολικής εφαστομένης

4.6 Αρχιτεκτονικές Νευρωνικών Δικτύων

Τα νευρωνικά δίκτυα **χαρακτηρίζονται από την αρχιτεκτονική τους**, την **λειτουργία που επιτελούν** και την **μέθοδο εκπαίδευσής τους**. Η αρχιτεκτονική του δικτύου καθορίζει την διάταξη των νευρωνικών συνδέσεων καθώς και **τον αριθμό και τον τύπο των νευρώνων** ο οποίος προσδιορίζεται από την συνάρτηση ενεργοποίησης. Το νευρωνικό δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε **δυο διαφορετικές καταστάσεις, την κατάσταση εκπαίδευσης και την κατάσταση λειτουργίας**. Ο αλγόριθμος της εκπαίδευσης του δικτύου καθορίζει τον τρόπο αλλαγής των διασυνδετικών βαρών του δικτύου για τα εφαρμοζόμενα διανύσματα εισόδου / εξόδου κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα εξόδου του ΤΝΔ σε σχέση με τον στόχο που του έχει ανατεθεί.

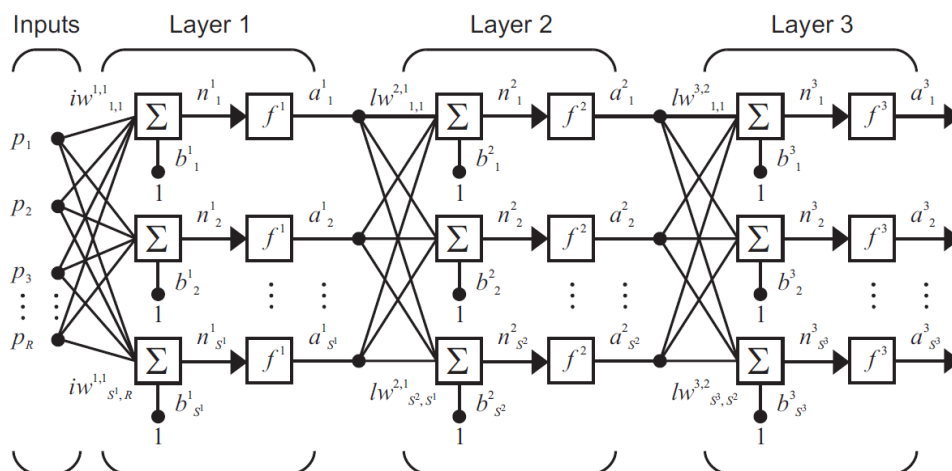
Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο περιλαμβάνει τρία μέρη:

- **Το επίπεδο εισόδου** (input layer) όπου εφαρμόζονται τα δεδομένα εισόδου. Το επίπεδο εισόδου έχει τόσους νευρώνες όσες είναι οι διαφορετικές μεταβλητές εισόδου στο ΤΝΔ. Στην περίπτωση που υπάρχει ανατροφοδότηση από το επίπεδο εξόδου ή κρυμμένο επίπεδο στο επίπεδο εισόδου ένας νέος νευρώνας προστίθεται στο επίπεδο αυτό για κάθε ανατροφοδοτούμενο σήμα. Οι νευρώνες του επιπέδου αυτού συνδέονται με τους νευρώνες των κρυμμένων επιπέδων ή απευθείας στους νευρώνες στο επίπεδο εξόδου.

- **Τα κρυμμένα επίπεδα** (hidden layers) του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Κάθε κρυμμένο επίπεδο μπορεί να έχει N νευρώνες διασυνδεδεμένους με διαφόρους τρόπους με τα υπόλοιπα κρυμμένα επίπεδα ή με το επίπεδο εξόδου. Οι νευρώνες των κρυμμένων επιπέδων μπορούν να έχουν ως είσοδο από το επίπεδο εισόδου ή άλλο κρυμμένο επίπεδο ή ακόμα και από το επίπεδο εξόδου στην περίπτωση της εσωτερικής ανατροφοδότησης. Στην έξοδο συνδέονται με το επίπεδο εξόδου ή άλλο κρυμμένο επίπεδο ενώ συνδέονται με το επίπεδο εισόδου μόνο με εσωτερική ανατροφοδότηση.
- **Το επίπεδο εξόδου** (output layer) από όπου εξέρχεται το διάνυσμα εξόδου. Ο αριθμός των νευρώνων στο επίπεδο εξόδου είναι τόσος όσες και οι μεταβλητές εξόδου του ΤΝΔ. Οι νευρώνες στο επίπεδο εξόδου μπορούν να δέχονται ως είσοδο από το επίπεδο εισόδου ή τα κρυμμένα επίπεδα.

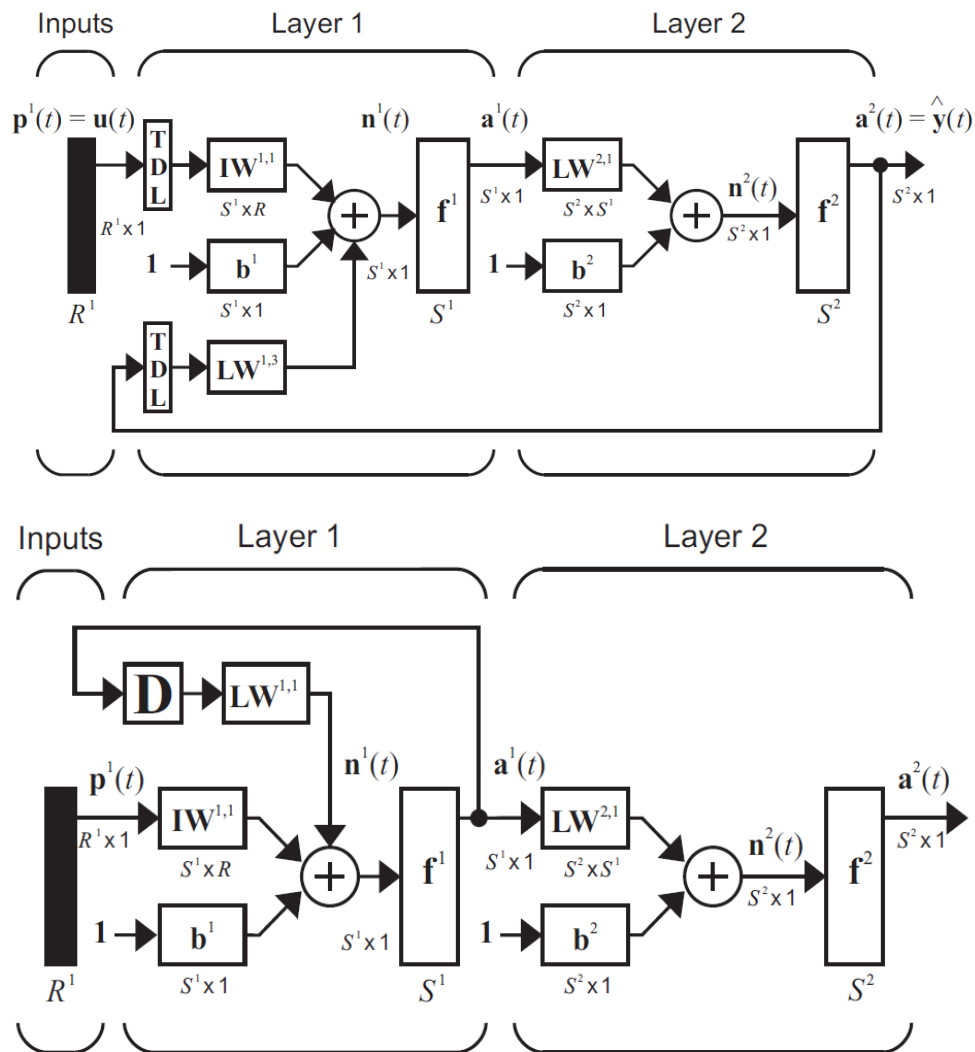
Με κριτήριο την αρχιτεκτονική προκύπτουν οι ακόλουθες κατηγορίες τεχνητών νευρωνικών δικτύων:

1) **Πλήρως προσωτροφοδοτούμενα νευρωνικά δίκτυα**, όπως αυτό του σχήματος 4.5, όπου κάθε επίπεδο νευρώνων λαμβάνει εισόδους μόνο από νευρώνες προηγούμενων επιπέδων και η ροή της πληροφορίας σε αυτά τα δίκτυα είναι μόνο προς μια κατεύθυνση. Η έξοδος κάθε νευρώνα συνδέεται στην είσοδο κάθε νευρώνα του επόμενου επιπέδου. Η είσοδος διαδίδεται προς τα κρυμμένα επίπεδα όπου οι νευρώνες του κρυμμένου επιπέδου και του επιπέδου εξόδου επεξεργάζονται την πληροφορία μέσω των συναρτήσεων ενεργοποίησής τους.



Σχήμα 4.5 Αναπαράσταση ΤΝΔ τριών επιπέδων

2) **Αναδρομικά (Recurrent) νευρωνικά δίκτυα**, όπως αυτά του σχήματος 4.6, όπου οι εισόδοι ενός νευρώνα μπορεί να είναι και από νευρώνες επομένων στρωμάτων. Η ανάδραση μπορεί να προέρχεται είτε την έξοδο κρυφού επιπέδου είτε από την έξοδο του ΤΝΔ. Αυτού του τύπου τα δίκτυα χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση δυναμικών συστημάτων όπως π.χ. μιας ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 4.6 Ανατροφοδοτούμενα (Recurrent) νευρωνικά δίκτυα α) Με ανάδραση από την έξοδο του ΤΝΔ β) Με ανάδραση από την έξοδο κρυφού επιπέδου

3) **Γειτονικά διασυνδεδεμένα (Laterally connected) νευρωνικά δίκτυα**, τα οποία αποτελούνται από τα προσωτροφοδοτούμενα στοιχεία εισόδου και από ένα επίπεδο του οποίου οι νευρώνες είναι συνδεδεμένοι με όλους τους γειτονικούς τους. Το δίκτυο Kohonen αποτελεί παράδειγμα ενός τέτοιου δικτύου.

4) **Υβριδικά δίκτυα**, τα οποία συνδυάζουν κάποια από τα προηγούμενα χαρακτηριστικά.

5) **Διαγώνια ανατροφοδοτούμενα** (Diagonal Recurrent) νευρωνικά δίκτυα. Αυτού του τύπου τα δίκτυα έχουν μόνο ένα κρυμμένο επίπεδο ανατροφοδοτούμενων νευρώνων με σιγμοειδή συνάρτηση μεταφοράς. Λόγω της ύπαρξης της ανατροφοδότησης ο κάθε κόμβος παράγει ένα σήμα το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως μια μεταβλητή κατάσταση του συστήματος σε κανονική μορφή.

4.7 Τεχνικές εκπαίδευσης Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Η πιο σημαντική ιδιότητα των ΤΝΔ είναι η ικανότητα τους να μαθαίνουν από το περιβάλλον τους και να βελτιώνουν την απόδοση τους μέσω της διαδικασίας της μάθησης. Η βελτίωση γίνεται στην διάρκεια του χρόνου με κάποιο προκαθορισμένο αλγόριθμο. Ένα ΤΝΔ μαθαίνει από το περιβάλλον του μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας προσαρμογής των βαρών στις συνάψεις του δικτύου. Μετά από κάθε επανάληψη της διαδικασίας της μάθησης το ΤΝΔ αποκτά περισσότερη γνώση για το περιβάλλον του μειώνοντας το σφάλμα μεταξύ επιθυμητής και πραγματικής εξόδου. Ακριβώς όπως υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους μαθαίνουν οι άνθρωποι από το περιβάλλον τους, το ίδιο ισχύει και για τα νευρωνικά δίκτυα.

Η μάθηση περιλαμβάνει την εξής επαναληπτική διαδικασία:

1. Το ΤΝΔ διεγείρεται από το περιβάλλον.
2. Το ΤΝΔ μεταβάλλει τις τιμές των ελεύθερων παραμέτρων του ως αποτέλεσμα των ερεθισμάτων που δέχεται από το περιβάλλον.
3. Το ΤΝΔ αντιδράει με διαφορετικό τρόπο στο περιβάλλον, λόγω των αλλαγών που επήλθαν στον εσωτερικό του.

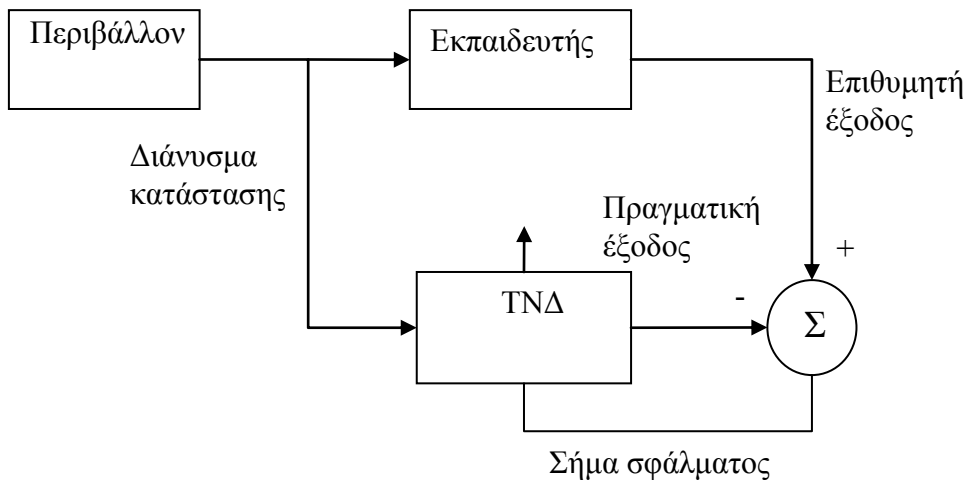
Κατά την εκπαίδευση ενός ΤΝΔ ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται οι ελεύθεροι παράμετροι του, έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η έξοδος, προσδιορίζεται από τον αλγόριθμο εκπαίδευσης. Αλγόριθμος εκπαίδευσης καλείται ένα προκαθορισμένο σύνολο από κανόνες που χρησιμοποιούνται για την επίλυση ενός προβλήματος εκμάθησης. Δεν υπάρχει μοναδικός αλγόριθμος εκπαίδευσης

κατάλληλος για όλες τις περιπτώσεις. Αντίθετα υπάρχει ένα σύνολο αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους και το είδος του προβλήματος που καλείται να επιλύσει το ΤΝΔ. Το βασικό σημείο στο οποίο διαφέρουν οι αλγόριθμοι είναι ο τρόπος που αλλάζουν τα βάρη των συνάψεων του δικτύου.

4.7.1 Μάθηση με εκπαιδευτή - Επιβλεπόμενη μάθηση

Στην μάθηση με εκπαιδευτή, **ο εκπαιδευτής έχει γνώση του περιβάλλοντος** και αυτή η γνώση αντιπροσωπεύεται από ένα σύνολο διανυσμάτων εισόδου-εξόδου. Το περιβάλλον είναι άγνωστο για το νευρωνικό δίκτυο και έτσι κατά την διαδικασία της εκπαίδευσης ο εκπαιδευτής παρέχει στο νευρωνικό δίκτυο μια επιθυμητή απόκριση για το συγκεκριμένο διάνυσμα εκπαίδευσης. Για να φτάσει στην βέλτιστη απόκριση το νευρωνικό δίκτυο προσαρμόζονται οι παράμετροι του υπό την συνδυασμένη επιρροή του διανύσματος εκπαίδευσης και του σήματος σφάλματος. Το σήμα σφάλματος είναι η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής απόκρισης και της πραγματικής απόκρισης του δικτύου. Οι αλλαγές που επιτελούνται στις παραμέτρους του νευρωνικού δικτύου γίνονται επαναληπτικά έως ότου το δίκτυο να προσομοιώνει τη συμπεριφορά του εκπαιδευτή. **Η γνώση αυτή του εκπαιδευτή αποθηκεύεται** στο νευρωνικό δίκτυο με την **μορφή σταθερών συναπτικών βαρών** και αποτελούν την μακροπρόθεσμη μνήμη του δικτύου. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.7 η επιβλεπόμενη μάθηση αποτελείται από ένα σύστημα ανάδρασης κλειστού βρόχου ενώ το περιβάλλον είναι εκτός του συστήματος αυτού.

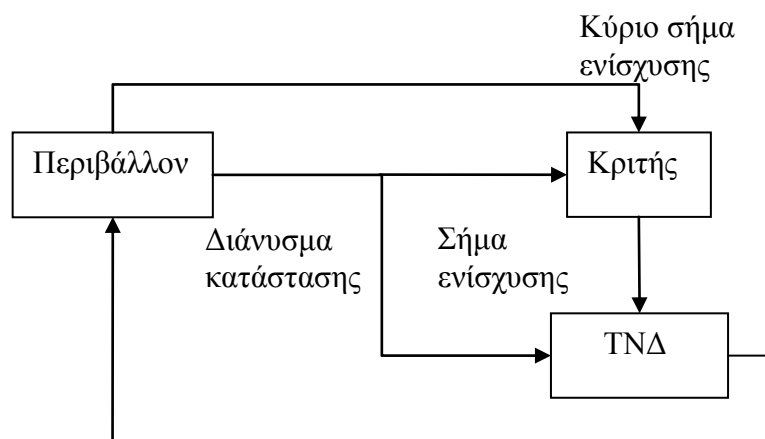
Ως μέτρο απόδοσης χρησιμοποιούμε συχνά το **μέσο τετραγωνικό σφάλμα** ή το **άθροισμα των μέσων τετραγωνικών σφαλμάτων**. **Η καμπύλη μάθησης** είναι το μέτρο απόδοσης σε συνάρτηση με τον αριθμό των επαναλήψεων των διανυσμάτων εισόδου-εξόδου και μας δίνει μια καλή εικόνα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της εκπαίδευσης. Η καμπύλη αυτή πρέπει να είναι φθίνουσα και κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης την πληροφορία αυτή μας την δίνει η κλίση (gradient) της καμπύλης. Η επιβλεπόμενη μάθηση με την χρησιμοποίηση κατάλληλου αλγορίθμου που μειώνει την συνάρτηση κόστους είναι σε θέση να προσεγγίζει μια άγνωστη αντιστοίχιση εισόδου - εξόδου εύλογα καλά.



Σχήμα 4.7 Σχηματικό διάγραμμα μάθησης με εκπαιδευτή

4.7.2 Μάθηση χωρίς εκπαιδευτή - Ενισχυτική Μάθηση

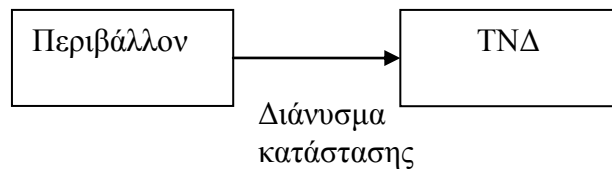
Στην ενισχυτική μάθηση η εκμάθηση του διανύσματος εισόδου-εξόδου εκτελείται μέσω της συνεχούς αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον και όχι με εκπαιδευτή. Στόχος αυτής της μάθησης είναι η ελαχιστοποίηση ενός δείκτη απόδοσης με την βοήθεια του κριτή ο οποίος μετατρέπει το κύριο σήμα ενίσχυσης που λαμβάνει από το περιβάλλον σε ένα υψηλότερης ποιότητας σήμα ενίσχυσης. Το σύστημα μαθαίνει βάσει της καθυστερούμενης ενίσχυσης που σημαίνει ότι το σύστημα παρακολουθεί μια αλληλουχία ερεθισμάτων τα οποία οδηγούν στην παραγωγή του ευρετικού σήματος ενίσχυσης όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8 Σχηματικό διάγραμμα μάθησης χωρίς εκπαιδευτή-ενισχυτική μάθηση

4.7.3 Μάθηση χωρίς εκπαιδευτή - Μη Επιβλεπόμενη μάθηση

Στη μη επιβλεπόμενη μάθηση ή αυτό-οργανούμενη μάθηση δεν υπάρχει εξωτερικός εκπαιδευτής ή κριτής που να επιβάλλει την διαδικασία της μάθησης όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.9. Το δίκτυο μαθαίνει από ένα ανεξάρτητο από την εργασία μέτρο της ποιότητας της αναπαράστασης που καλείται να μάθει το δίκτυο και οι ελεύθερες παράμετροι του δικτύου βελτιστοποιούνται με βάση το μέτρο αυτό.



Σχήμα 4.9 Σχηματικό διάγραμμα μάθησης χωρίς εκπαιδευτή-μη επιβλεπόμενη μάθηση

4.7.4 Τρόποι προσαρμογής των βαρών των συνάψεων στα αναδρομικά Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Πριν αναλυθεί η τεχνική της οπισθοδιάδοσης του σφάλματος είναι σημαντικό να διαχωριστούν οι τρόποι με τους οποίους μπορούν και μαθαίνουν τα αναδρομικά ΤΝΔ. Αναλύεται η εκπαίδευση κατά εποχές (batch training) και η συνεχής εκπαίδευση (incremental training) οι οποίες διαχωρίζονται από την εκπαίδευση κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος (online training) και από την εκπαίδευση στο εργαστήριο (offline training) καθώς πολύ συχνά συγχέονται.

- **Εκπαίδευση κατά εποχές:** Είναι η μέθοδος εκπαίδευσης κατά την οποία τα βάρη των συνάψεων και της πόλωσης (bias) αλλάζουν μόνο αφού έχουν εφαρμοστεί όλα τα διανύσματα εισόδου – εξόδου, έχει περάσει δηλαδή μια εποχή (epoch). Για να πραγματοποιηθεί η εκπαίδευση χρειάζεται να επαναληφθεί η διαδικασία εφαρμογής όλων των δεδομένων εισόδου - εξόδου πολλές φορές. Οι αλγόριθμοι που αλλάζουν τα βάρη σε ένα ΤΝΔ με βάση τη λογική της εκπαίδευσης κατά εποχές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δυναμικά και σε στατικά νευρωνικά δίκτυα.
- **Συνεχής εκπαίδευση:** Είναι η μέθοδος εκπαίδευσης κατά την οποία τα βάρη των συνάψεων και της πόλωσης (bias) αλλάζουν κάθε φορά που εφαρμόζεται

μια νέα τιμή εισόδου. Οι αλγόριθμοι που αλλάζουν τα βάρη σε ένα ΤΝΔ με βάση τη λογική της συνεχούς εκπαίδευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δυναμικά και σε στατικά νευρωνικά δίκτυα.

- **Εκπαίδευση στο εργαστήριο:** Όταν ένα ΤΝΔ εκπαιδεύεται offline τότε τα βάρη των συνάψεων και της πόλωσης αλλάζουν μόνο κατά την διαδικασία της εκπαίδευσης. Κατά την offline εκπαίδευση μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι με λογική προσαρμογής των βαρών κατά εποχές ή συνεχούς προσαρμογή των βαρών.
- **Εκπαίδευση κατά την διάρκεια λειτουργίας του συστήματος:** Όταν ένα ΤΝΔ εκπαιδεύεται online τότε τα βάρη των συνάψεων και το βάρος της πόλωσης αλλάζουν και κατά την διαδικασία της εκπαίδευσης (αν έχει προηγηθεί) αλλά και κατά την διάρκεια πραγματικής λειτουργίας του ΤΝΔ. Κατά την online εκπαίδευση μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο αλγόριθμοι με λογική συνεχούς προσαρμογής των βαρών.

Το πρόβλημα επιλύεται όταν ένα κριτήριο σύγκλισης γίνει μικρότερο μιας προκαθορισμένης τιμής μετά από την εκτέλεση του απαιτούμενου αριθμού κύκλων μάθησης (epochs). Από την γραφική παράσταση του σφάλματος με τον αριθμό των κύκλων μάθησης προκύπτει η καμπύλη μάθησης του δικτύου. Εάν το σύστημα το οποίο εξετάζεται συγκλίνει σε κάποια αποδεκτή λύση η καμπύλη αυτή θα είναι φθίνουσα και η κλίση της δίνει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την αποδοτικότητα του αλγορίθμου εκπαίδευσης και τον τρόπο της μάθησης. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας μάθησης είναι χρήσιμο να παρακολουθείται η καμπύλη μάθησης ώστε όταν αυτή δεν φθίνει, να σταματά η διαδικασία, να γίνονται οι απαραίτητες τροποποιήσεις στις παραμέτρους της εκπαίδευσης και να επαναλαμβάνεται η διαδικασία της μάθησης.

Το φαινόμενο της υπερπροσαρμογής των διανυσμάτων εισόδου-εξόδου είναι ένας ανασταλτικός παράγοντας στην γενίκευση της συμπεριφοράς του δικτύου. Η υπερπροσαρμογή εμφανίζεται όταν ένα ΤΝΔ εκπαιδεύεται σε ένα σύνολο δεδομένων μαθαίνοντάς τα πάρα πολύ καλά χάνοντας όμως, την ικανότητα της γενίκευσης, την ικανότητα δηλαδή να εξάγει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε διανύσματα εισόδου με τα οποία δεν έχει εκπαιδευτεί.

4.8 Η μέθοδος της οπισθοδιάδοσης του σφάλματος

Με τη μέθοδο της οπισθοδιάδοσης του σφάλματος αναζητείται ένα ολικό ελάχιστο του σφάλματος της εξόδου ενός ΤΝΔ χρησιμοποιώντας την τεχνική της πιο απότομης κλίσης (*steepest descent method*). Ο αλγόριθμος της διάδοσης του λάθους προς τα πίσω είναι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος αναζήτησης της κλίσης, ο οποίος ρυθμίζει κάθε διασυνδεδετικό βάρος ενός δικτύου πολλών επιπέδων ώστε να μειωθεί το σφάλμα της εξόδου του και λειτουργεί με την διάδοση των κατάλληλα διαμορφωμένων σφαλμάτων του επιπέδου εξόδου προς τα προηγούμενα επίπεδα. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η απλότητα της, παρουσιάζει όμως δύο βασικά μειονεκτήματα:

1. Ο ρυθμός σύγκλισης του αλγορίθμου είναι γενικά αργός. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με την χρήση άλλων τεχνικών ελαχιστοποίησης με καλύτερες ιδιότητες σύγκλισης (π.χ. μέθοδος Levenberg-Marquardt). Γενικώς απαιτούνται αρκετές επαναλήψεις πριν επιτευχθεί η σύγκλιση. Βέβαια αρκετές φορές ο τρόπος σύγκλισης δεν είναι τόσο δυσμενής και συνήθως απαιτούνται λίγες επαναλήψεις οι οποίες πραγματοποιούνται μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα ή λεπτά, ακόμη και για μεγάλο όγκο δεδομένων.
2. Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να συγκλίνει σε κάποιο τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης ελαχιστοποίησης αντί στο ολικό. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος η διαδικασία μάθησης μπορεί να σταματήσει πρόωρα εάν έχει ξεκινήσει με τιμές βαρών οι οποίες οδηγούν σε τοπικό ελάχιστο και το δίκτυο δεν θα μπορέσει να αποδώσει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Για να επιτευχθεί επιτυχής σύγκλιση της εκπαίδευσης η διαδικασία θα πρέπει να ξεκινά με βάρη που οδηγούν στο ολικό ελάχιστο και συνήθως η τυχαία επιλογή των βαρών δεν παρουσιάζει πρόβλημα.

Ο αλγόριθμος της οπισθοδιάδοσης του σφάλματος αποτελείται από πέντε επαναληπτικά βήματα [21]:

1. **Αρχικοποίηση:** Έστω ότι υπάρχει το δείγμα εκπαίδευσης $\{(x(n), d(n))\}_{n=1}^N$ όπου $x(n)$ το διάνυσμα εισόδου και $d(n)$ το διάνυσμα των επιθυμητών αποκρίσεων. Υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει διαθέσιμη πρότερη πληροφορία επιλέγονται τα αρχικά βάρη και οι πολώσεις σε μικρές τυχαίες τιμές με βάση

μια ομοιόμορφη κατανομή με μέσο μηδέν και τυπική απόκλιση που ορίζεται από την συνάρτηση ενεργοποίησης.

2. **Παρουσιάσεις των διανυσμάτων εκπαίδευσης:** Εφαρμογή των διανυσμάτων εισόδου στο επίπεδο εισόδου και καθορισμός του διανύσματος της επιθυμητής εξόδου. Κάθε ζεύγος εισόδου- εξόδου του συστήματος μπορεί να εφαρμόζεται σε μία ή περισσότερες ανακυκλώσεις. Στα δυναμικά συστήματα η σειρά επιλογής των διανυσμάτων εισόδου – εξόδου επηρεάζει την διαδικασία της μάθησης του ΤΝΔ.

3. **Υπολογισμός Προς τα Εμπρός:** Υπολογίζονται τα τοπικά πεδία και τα λειτουργικά σήματα του δικτύου προχωρώντας προς τα εμπρός σε όλη την έκταση του δικτύου, επίπεδο προς επίπεδο.

- Το τοπικό πεδίο $v_j^{(l)}(n)$ για το νευρώνα j στο επίπεδο l είναι:

$$v_j^{(l)}(n) = \sum_i w_{ji}^{(l)}(n) \cdot y_i^{(l-1)}(n)$$
, όπου $y_i^{(l-1)}(n)$ είναι το σήμα εξόδου του νευρώνα i του προηγούμενου επιπέδου $(l-1)$ στην επανάληψη n και $w_{ji}^{(l)}(n)$ είναι το συναπτικό βάρος του νευρώνα j του επιπέδου l που τροφοδοτείται από το νευρώνα i στο επίπεδο $(l-1)$.
- Για $i=0$, έχουμε $y_0^{(l-1)}(n) = +1$ και $w_{j0}^{(l)}(n) = b_j^{(l)}(n)$ είναι η πόλωση που εφαρμόζεται στο νευρώνα j στο επίπεδο l .
- Το σήμα εξόδου του νευρώνα j στο επίπεδο l είναι: $y_j^{(l)} = \phi_j(v_j^{(l)}(n))$. Εάν ο νευρώνας j είναι στο πρώτο κρυφό επίπεδο τότε: $y_j^{(0)} = x_j(n)$. Εάν ο νευρώνας είναι στο επίπεδο εξόδου με L το βάθος του δικτύου τότε: $y_j^{(L)} = o_j(n)$.
- Υπολογισμός σφάλματος: $e_j(n) = d_j(n) - o_j(n)$

4. **Υπολογισμός προς τα πίσω:**

- Υπολογίζονται οι τοπικές κλίσεις δ του δικτύου:

$$\delta_j^{(l)}(n) = \left\{ \begin{array}{l} e_j^{(L)}(n) \cdot \phi_j'(v_j^{(L)}(n)), \text{ για το νευρώνα } j \text{ στο επίπεδο } L \\ \phi_j'(v_j^{(l)}(n)) \cdot \sum_k \delta_k^{(l+1)}(n) \cdot w_{kj}^{(l+1)}(n), \text{ για το νευρώνα } j \text{ στο επίπεδο } l \end{array} \right\}$$

- Προσαρμόζονται τα συναπτικά βάρη του δικτύου στο επίπεδο l σύμφωνα με το γενικευμένο κανόνα Δέλτα:

$w_{ji}^{(l)}(n+1) = w_{ji}^{(l)}(n) + a[w_{ji}^{(l)}(n-1)] + \eta \cdot \delta_j^{(l)}(n) \cdot y_j^{(l-1)}(n)$ όπου η είναι η παράμετρος ρυθμού μάθησης και a η σταθερά ορμής.

5. **Επανάληψη:** Επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί της προς τα εμπρός και της προς τα πίσω διάδοσης με νέες εποχές διανυσμάτων εκπαίδευσης μέχρι να ικανοποιηθεί ένα καθορισμένο κριτήριο τερματισμού.

4.8.1 Επεξεργασία των δεδομένων για την εκπαίδευση του ΤΝΔ

Η εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου μπορεί να γίνει ιδιαίτερα αποδοτική αν προηγηθεί επεξεργασία των δεδομένων. Η προπαρασκευή των δεδομένων περιλαμβάνει τα ακόλουθα τρία στάδια:

- **Καθορισμός των δεδομένων**
- **Φιλτράρισμα των δεδομένων**
- **Προεπεξεργασία των δεδομένων**

Ο **καθορισμός των δεδομένων** είναι τις περισσότερες φορές το σημαντικότερο στάδιο της διαδικασίας της προπαρασκευής των δεδομένων και είναι συνυφασμένο με το τι θεωρείται σημαντικό για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Αυτό συμβαίνει διότι είναι σημαντικό **να προδιαγραφεί πλήρως το πρόβλημα και να καθορισθούν οι μεταβλητές εισόδου** του δικτύου. Σε μερικές περιπτώσεις δεν είναι εφικτό να συμπεριληφθούν όλα τα χαρακτηριστικά του προβλήματος σε ένα ΤΝΔ, διότι κάθε χαρακτηριστικό εισόδου αναπαρίσταται με ένα κόμβο εισόδου και επομένως ένας μεγάλος αριθμός χαρακτηριστικών συνεπάγεται τη δημιουργία ενός πολύ μεγάλου ΤΝΔ. Ένα **μεγάλο ΤΝΔ απαιτεί μεγάλο αριθμό υπολογισμών** και επιπλέον **συγκλίνει αργότερα**. Επομένως σε αυτή τη περίπτωση θα πρέπει να αναζητηθεί ο αριθμός και το είδος των εισόδων οι οποίες δίνουν την δυνατότητα στο ΤΝΔ να μάθει την σχέση μεταξύ της εισόδου-εξόδου.

Μετά την έναρξη της εκπαίδευσης, και αφού το ΤΝΔ έχει εκτελέσει μερικούς κύκλους εκπαίδευσης, τα βάρη των κόμβων του επιπέδου εισόδου μπορεί να δώσουν κάποιες ενδείξεις σχετικά με την συνεισφορά κάθε εισόδου. Κάποιες εισοδοί του ΤΝΔ οι οποίες δεν απαιτούνται πραγματικά για την αντιστοίχιση εισόδου-εξόδου του συστήματος, θα έχουν μικρά βάρη σε σύγκριση με άλλες οι οποίες είναι πιο σημαντικές. Επίσης, **κατά τη διαδικασία της προδιαγραφής** των

χαρακτηριστικών της εισόδου θα πρέπει να προσεχθεί εάν κάποια από αυτά αναπαρίστανται ήδη μέσω άλλων ήδη επιλεγμένων.

Στο δεύτερο στάδιο της προετοιμασίας των δεδομένων αναζητείται κάποια ασυνήθιστη συμπεριφορά ώστε να αποκλειστούν από το σύνολο εκπαίδευσης κάποια δεδομένα που δεν ακολουθούν τη γενικότερη συμπεριφορά των υπολοίπων. Το τρίτο και τελευταίο στάδιο της προετοιμασίας των δεδομένων περιλαμβάνει την **κανονικοποίηση των δεδομένων** για την εισαγωγή τους στο ΤΝΔ. Αυτή η διαδικασία είναι χρήσιμη όταν οι είσοδοι του ΤΝΔ διαφέρουν αρκετά ως προς την τιμή τους. Για την κανονικοποίηση των δεδομένων θα πρέπει να χρησιμοποιείται μια τυπική περιοχή κανονικοποίησης. Συνήθως είναι προτιμητέο οι τιμές των δεδομένων να παίρνουν τιμές μεταξύ του 0 και του 1 ή μεταξύ -1 και 1. Ο αριθμός των απαιτούμενων δεδομένων για την εκπαίδευση ενός ΤΝΔ είναι επίσης ένας πολύ σημαντικός παράγοντας. Εάν το πρόβλημα είναι σύνθετο τότε θα απαιτηθεί μεγάλο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης για να καθορισθεί ο χώρος του προβλήματος.

Κατά την διαδικασία εκπαίδευσης ενός ΤΝΔ χρησιμοποιούνται τρία είδη δεδομένων:

- **Εκπαίδευσης** (*Training data*)
- **Επαλήθευσης** (*Validation data*)
- **Εφαρμογής** (*Test data*)

Τα δεδομένα εκπαίδευσης χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μειούμενης κλίσης κατά την εκπαίδευση και για την προσαρμογή των βαρών των νευρώνων και της πόλωσης.

Τα δεδομένα επαλήθευσης χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό και την παρακολούθηση του σφάλματος επαλήθευσης. Κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης αυτό το σφάλμα μειώνεται όπως και **το σφάλμα εκπαίδευσης** (σφάλμα μεταξύ εξόδου ΤΝΔ και επιθυμητής εξόδου) όμως, **όταν το ΤΝΔ αρχίζει να υπερπροσαρμόζει** (over fitting) **τα δεδομένα το σφάλμα επαλήθευσης αυξάνεται**. Οι τιμές των βαρών των νευρώνων και της πόλωσης με τις οποίες έχουμε το μικρότερο σφάλμα επαλήθευσης αποθηκεύονται ως οι τελικές τιμές στην εσωτερική δομή του ΤΝΔ. Πρακτικά το σφάλμα επαλήθευσης υπολογίζεται σε κάθε επανάληψη

(epoch) των δεδομένων εκπαίδευσης και η μάθηση σταματάει όταν το σφάλμα επαλήθευσης δεν έχει μειωθεί μετά από καθορισμένο αριθμό επαναλήψεων.

Τα δεδομένα εφαρμογής δεν χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης και δεν επηρεάζουν την προσαρμογή των βαρών των νευρώνων και των πολώσεων του ΤΝΔ, χρησιμοποιούνται μόνο ως ένδειξη για την αποτελεσματικότητα των δεδομένων εκπαίδευσης και επαλήθευσης.

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που παρουσιάζεται κατά την εκπαίδευση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου είναι η **υπερπροσαρμογή των δεδομένων εκπαίδευσης**. Υπερπροσαρμογή ή υπερεκπαίδευση (overtraining) είναι η διαδικασία κατά την οποία το ΤΝΔ **εκπαιδεύεται πάρα πολύ καλά στα δεδομένα εισόδου-εξόδου** και το σφάλμα του δικτύου γίνεται πολύ μικρό με αποτέλεσμα όμως να μην μπορεί να έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα με δεδομένα τα οποία δεν έχει εκπαιδευτεί.

Τα δεδομένα επαλήθευσης προσφέρουν ένα μέτρο προστασίας ενάντια στην υπερπροσαρμογή όμως αυτό δεν είναι αρκετό. Το μέγεθος του ΤΝΔ (δηλαδή ο αριθμός των νευρώνων στα κρυφά επίπεδα) επηρεάζει έντονα την υπερπροσαρμογή. Όσο πιο πολύπλοκα είναι τα δεδομένα εισόδου τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι το ΤΝΔ όμως μια **πιθανή υπερδιαστασιολόγηση του ΤΝΔ οδηγεί σε φαινόμενα υπερπροσαρμογή** ενώ η χρησιμοποίηση λιγότερων νευρώνων από όσους χρειάζεται οδηγεί σε φτωχά αποτελέσματα. Επομένως είναι σημαντικό να γίνεται διερεύνηση και να χρησιμοποιούνται όσοι ακριβώς νευρώνες χρειάζονται για την εκπαίδευση ενός ΤΝΔ για κάποια δεδομένα εισόδου.

Για την εύρεση του κατάλληλου αριθμού νευρώνων ανάλογα με το πρόβλημα **χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι**. Μια απλή μέθοδος απαλοιφής περιττών νευρώνων είναι μετά την τελική προσαρμογή των βαρών του δικτύου να εξετάζονται τα βάρη των συνάψεων και αν υπάρχει κάποιο βάρος πολύ μικρότερο σε σχέση με τα άλλα βάρη να απαλείφεται ο αντίστοιχος νευρώνας. Πέρα από την σωστή διαστασιολόγηση του ΤΝΔ η υπερπροσαρμογή των δεδομένων μπορεί να αποτραπεί με την πρόωρη διακοπή της εκπαίδευσης του δικτύου (early stopping). Κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης του σφάλματος της εκπαίδευσης (network performance), της κλίσης εκπαίδευσης (gradient), του αριθμού των επαναλήψεων (epochs) και του χρόνου εκπαίδευσης (training time). Μεταβάλλοντας τις παραπάνω παραμέτρους και καθορίζοντας κατάλληλες τιμές μπορεί να αποτραπεί η υπερεκπαίδευση του ΤΝΔ.

Στο επόμενο κεφάλαιο γνωρίζοντας τις διαθέσιμες αρχιτεκτονικές των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, τον τρόπο εκπαίδευσης τους και την απαραίτητη επεξεργασία δεδομένων που πρέπει να προηγηθεί κατασκευάζονται κατάλληλα οι νευρωνικοί ελεγκτές για την ανεύρεση σημείου λειτουργίας που μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ.

Κεφάλαιο 5

Μέθοδος Ελέγχου Ανεμογεννήτριας Μονίμων Μαγνητών βασισμένη στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

5.1 Σχεδιασμός Τεχνητών Νευρωνικών Ελεγκτών για τον έλεγχο ανεμογεννήτριας

Γνωρίζοντας τις παραμέτρους που επηρεάζουν την υλοποίηση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων και ιδιαίτερα λαμβάνοντας υπόψη την αρχιτεκτονική των ΤΝΔ και τις μεθόδους εκπαίδευσης τους, κατασκευάζονται οι ελεγκτές που βασίζονται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Network Controllers - ANNC) για την ανεύρεση σημείου λειτουργίας που μεγιστοποιεί την ισχύ εξόδου.

Στο κεφάλαιο 3.5 έχει αναλυθεί η μέθοδος ελέγχου ανεμογεννήτριας αξιοποιώντας τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για την παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος και έχουν καθοριστεί οι εισοδοί - έξοδοι του δικτύου. Το διάνυσμα εισόδου [w_m , I_1 , P_{out}] έχει επιλεγεί έτσι ώστε η μεταβολή των μεγεθών αυτών να μπορεί να εκφράσει την μεταβολή της ταχύτητα τους ανέμου κάθε χρονική στιγμή. Το διάνυσμα εξόδου, που είναι ο λόγος κατάτμησης [$D1$] του μετατροπέα ισχύος, ελέγχει το ρεύμα εξόδου της γεννήτριας και επομένως και η ροπή στον άξονα της ανεμογεννήτριας. Ελέγχοντας την ροπή στον άξονα της ανεμογεννήτριας μπορούμε να παρακολουθήσουμε σε κάθε χρονική στιγμή για κάθε ταχύτητα του ανέμου την καμπύλη μέγιστης ισχύος πάνω στην οποία επιθυμούμε να λειτουργεί η ανεμογεννήτρια. Για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού των νευρωνικών ελεγκτών χρειάζεται να καθοριστεί η αρχιτεκτονική τους και ο τρόπος εκπαίδευσης τους.

Η αρχιτεκτονική των ελεγκτών επιλέγεται να είναι ένα πλήρως αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο με εξωγενής εισόδους με ένα κρυφό επίπεδο καθώς η δομή αυτή συναντάται συχνά στην βιβλιογραφία για τον έλεγχο συστημάτων και εμφανίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων δοκιμάστηκαν και άλλες αρχιτεκτονικές όπως τα προσωτροφοδοτούμενα νευρωνικά

δίκτυα αλλά και περισσότερα κρυφά επίπεδα τα οποία όμως εμφάνιζαν μη ικανοποιητικά ή παρόμοια αποτελέσματα και έτσι επιλέχθηκε η πιο οικονομική αρχιτεκτονική.

Οι ελεγκτές που βασίζονται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα **διαφέρουν στον αριθμό των** νευρώνων του κρυφού επιπέδου οι οποίοι **καθορίστηκαν από την χρονοσειρά ανέμου** με την οποία εκπαιδεύονται. Για τη διαμόρφωση των ελεγκτών **εξετάζονται τρεις διαφορετικές χρονοσειρές εκπαίδευσης** (ασθενής άνεμοι V_1 και V_2 , ισχυρός άνεμος V_3) οι οποίες **μπορούν να εκφράσουν τις ανεμολογικές συνθήκες** σε οποιαδήποτε περιοχή. Ο αριθμός των απαιτούμενων νευρώνων σε κάθε ελεγκτή επιλέχθηκε έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η έξοδος χωρίς να παρουσιάζονται φαινόμενα υπερεκπαίδευσης.

Επίσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, **ο αλγόριθμος με τον οποίο προσαρμόζονται τα βάρη των νευρώνων** σε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο είναι πολύ σημαντικός και η προσεκτική επιλογή του βελτιώνει την απόκριση του ελεγκτή. Με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία, **εξετάζονται δυο δημοφιλείς αλγόριθμοι εκπαίδευσης** οι οποίοι διαφέρουν στον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλουν τα βάρη των νευρώνων. Προκειμένου να καλυφθούν όλες οι παραπάνω περιπτώσεις διαμορφώνονται πέντε νευρωνικοί ελεγκτές (ANNC1, ANNC2, ANNC3, ANNC4 και ANNC5) οι οποίοι εξετάζονται και συγκρίνονται.

Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι παράμετροι των πέντε ελεγκτών που σχεδιάστηκαν για τις προσομοιώσεις.

Πίνακας 5.1 Παράμετροι νευρωνικών ελεγκτών

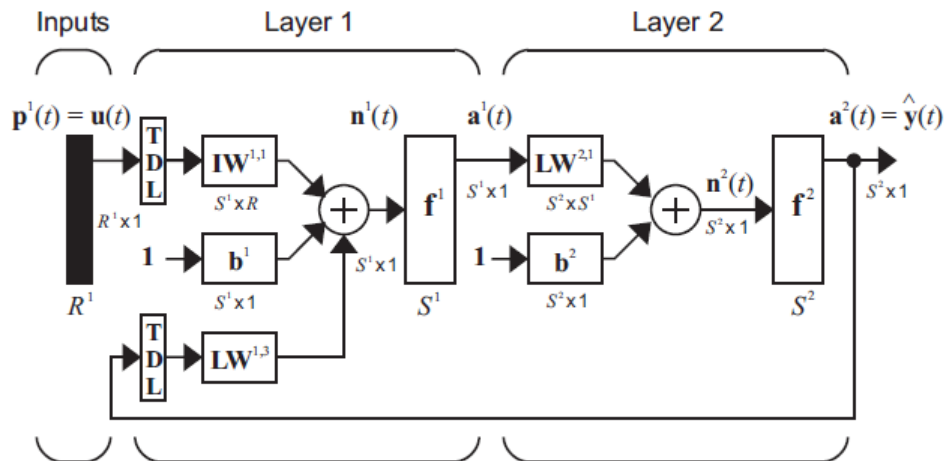
Νευρωνικός ελεγκτής	Αριθμός νευρώνων	Αλγόριθμος εκπαίδευσης	Χρονοσειρά εκπαίδευσης
ANNC1	17	Levenberg-Marquardt	V ₁
ANNC2	19	Gradient Descent	V ₁
ANNC3	22	Levenberg-Marquardt	V ₂
ANNC4	14	Levenberg-Marquardt	V ₃
ANNC5	14	Gradient Descent	V ₃

5.1.1 Αρχιτεκτονική των νευρωνικών ελεγκτών – Το μοντέλο NARX

Για την υλοποίηση των ελεγκτών χρησιμοποιείται η αρχιτεκτονική του μη-γραμμικού αυτο-παλινδρομικού δικτύου με εξωγενείς εισόδους (nonlinear autoregressive network with exogenous inputs – NARX) το οποίο **είναι ένα αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο με δρόμο ανάδρασης** από την έξοδο απευθείας στην είσοδο. Η εξίσωση που ορίζει το NARX που φαίνεται στο σχήμα 5.1 είναι:

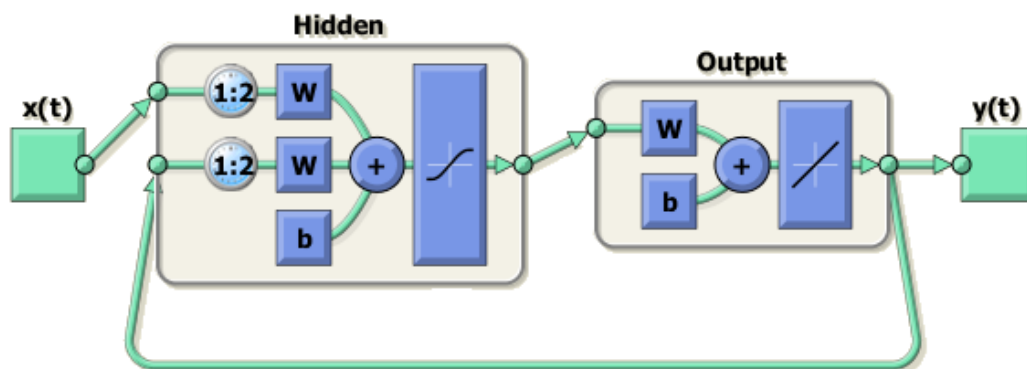
$$y(t) = f(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n_y), u(t-1), u(t-2), \dots, u(t-n_u))$$

Όπου η επόμενη τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής εξόδου $y(t)$ οπισθοδιαδίδεται στις προηγούμενες του σήματος εξόδου και στις προηγούμενες τιμές ενός ανεξάρτητου (εξωγενούς) σήματος εισόδου και f οι συναρτήσεις ενεργοποίησης.



Σχήμα 5.1 Μη-γραμμικό αυτο-παλινδρομικό δίκτυο με εξωγενείς εισόδους

Ο ελεγκτής NARX που φαίνεται στο σχήμα 5.2 χρησιμοποιεί **σιγμοειδή συνάρτηση ενεργοποίησης υπερβολικής εφαιτομένης** στο κρυφό επίπεδο και μια **γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης στο επίπεδο εξόδου** ενώ και στα δυο επίπεδα χρησιμοποιεί την πόλωση b . Η σιγμοειδής συνάρτηση ενεργοποίησης ομαλοποιεί τα δεδομένα εισόδου της, ενώ η γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης στο επίπεδο εξόδου φιλτράρει την έξοδο του νευρωνικού δικτύου έτσι ώστε να αποφεύγονται απότομες διακυμάνσεις. Επίσης, ο δείκτης 1:2 προσδιορίζει την πρόβλεψη ενός στοιχείου και την χρήση μνήμης για 2 στοιχεία στο διάνυσμα εισόδου και την ανάδραση. Ο αριθμός των νευρώνων στο κρυφό επίπεδο προσδιορίζεται από την πολυπλοκότητα της χρονοσειράς εκπαίδευσης για κάθε έναν ελεγκτή όπως δείχνεται στην εκπαίδευση των ελεγκτών.



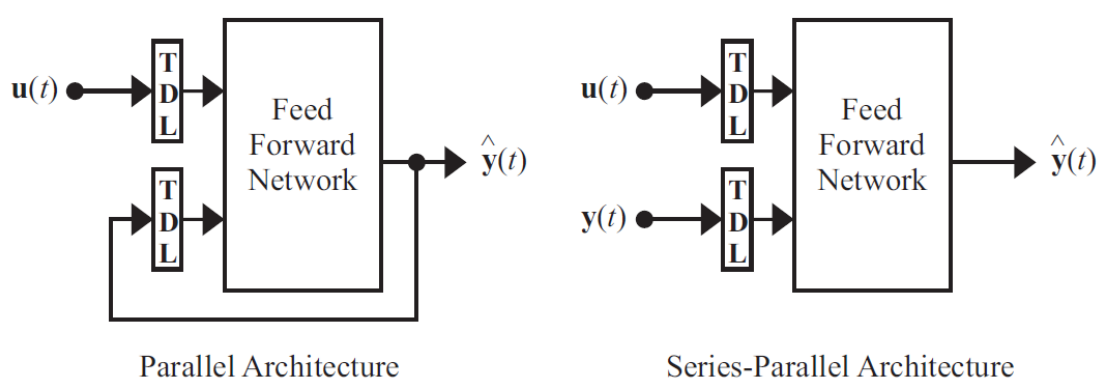
Σχήμα 5.2 Ο Ελεγκτής NARX

Τα πλεονεκτήματα που εμφανίζει η αρχιτεκτονική NARX για τον έλεγχο του συστήματος ανεμογεννήτριας παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Είναι σύστημα παράλληλων κατανεμημένων διεργασιών** (parallel distributed processing) το οποίο εξασφαλίζει μικρούς χρόνους απόκρισης στις γρήγορες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου.
- Έχει την δυνατότητα **χρήσης της ενσωματωμένης μνήμης και την δυνατότητα πρόβλεψης της επόμενης τιμής εξόδου** παρέχοντας **μεγαλύτερες ταχύτητες** και μειώνοντας την ευαισθησία του δικτύου σε μακροπρόθεσμες εξαρτήσεις οι οποίες λόγω της στοχαστικότητας του ανέμου είναι ανεπιθύμητες.
- Αποτελείται από τη σύνδεση νευρώνων, οι οποίοι είναι μη-γραμμικοί. Η μη-γραμμικότητα είναι πολύ σημαντική ιδιότητα, **αφού το σύστημα της ανεμογεννήτριας (Blades – I-loop – V-loop) είναι μη-γραμμικό όπως και ο έλεγχος της**. Το ΤΝΔ έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης οποιουδήποτε μη γραμμικού συστήματος.
- Εκπαιδεύεται να λειτουργεί κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και **προσαρμόζεται ανάλογα με τις αλλαγές του περιβάλλοντος του**. Μπορεί εύκολα να επαν-εκπαιδευτεί ώστε να χειρίζεται τις μεταβολές του περιβάλλοντος του και να μεταβάλλει την λειτουργία του κατά εποχές όταν και οι ανεμολογικές συνθήκες αλλάζουν.
- **Είναι ανεκτικό σε σφάλματα**. Ακόμα και η καταστροφή κάποιου νευρώνα δεν επηρεάζει τη συνολική του λειτουργία καθώς οι νευρώνες λειτουργούν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο και δεν χρειάζονται συγχρονισμό.
- **Το ΤΝΔ μπορεί και γενικεύει τα δεδομένα εισόδου-εξόδου του**. Μπορεί να εκπαιδευτεί κάτω από συγκεκριμένες ανεμολογικές συνθήκες(π.χ. ασθενής άνεμος) αλλά να συνεχίσει να λειτουργεί εξίσου καλά και σε συνθήκες που δεν έχει εκπαιδευτεί (ισχυρός άνεμος, βηματικές μεταβολές) προλαβαίνοντας οποιοσδήποτε ακραίες καιρικές συνθήκες. Η ενσωματωμένη μνήμη βελτιώνει την ιδιότητα αυτή.

5.1.2 Η εκπαίδευση των νευρωνικών ελεγκτών

Για την εκπαίδευση των νευρωνικών ελεγκτών, όπως περιγράφεται και στο κεφάλαιο 4.7, αξιοποιείται η **τεχνική της μάθησης με εκπαιδευτή** αφού υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης των επιθυμητών διανυσμάτων εισόδου-εξόδου τα οποία είναι διαθέσιμα. Το **μοντέλο NARX** που χρησιμοποιείται έχει τη δυνατότητα εκπαίδευσης με δυο διαφορετικούς τρόπους, σε ανοιχτό βρόχο (Series-Parallel Architecture) και σε κλειστό βρόχο (Parallel Architecture) όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2 Εκπαίδευση σε ανοιχτό και κλειστό βρόχο

Εφόσον όλα τα διανύσματα εισόδου-εξόδου είναι γνωστά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η **εκπαίδευση ανοιχτού βρόχου** κατά την οποία ανεξάρτητα από το ποια είναι η υπολογιζόμενη τιμή εξόδου του νευρωνικού δικτύου $\hat{y}(t)$ κατά την εκπαίδευση αυτή δεν ανατροφοδοτείται ως είσοδος. Αντιθέτως, χρησιμοποιείται η επιθυμητή τιμή $y(t)$ που είναι διαθέσιμη από το διάνυσμα εξόδου απευθείας ως δεύτερη είσοδος. Η αρχιτεκτονική ανοιχτού βρόχου **προσφέρει δυο πλεονεκτήματα**. Το πρώτο είναι ότι η **είσοδος** στο νευρωνικό δίκτυο **είναι πιο ακριβής** και το δίκτυο **εκπαιδεύεται πιο γρήγορα** ενώ το δεύτερο πλεονέκτημα ότι το δίκτυο εκπαιδεύεται σαν προσωτροφοδοτούμενο στατικό νευρωνικό δίκτυο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι αντίστοιχοι **βελτιωμένοι αλγόριθμοι**. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι χρειαζόμαστε όλα τα δεδομένα εισόδου – εξόδου εξαρχής, με αποτέλεσμα, **σφάλματα** που μπορεί να προκύψουν **στους υπολογισμούς των δεδομένων** επηρεάζουν άμεσα την εκπαίδευση.

Από την άλλη, η αρχιτεκτονική κλειστού βρόχου εκμεταλλεύεται τη δυνατότητα του NARX να προβλέπει την έξοδο και να χρησιμοποιεί ενσωματωμένη μνήμη. Η επιθυμητή τιμή εξόδου προβλέπεται και ανατροφοδοτείται στην είσοδο του νευρωνικού δικτύου. Είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση της μνήμης για την εκπαίδευση με αυτή την αρχιτεκτονική καθώς το σφάλμα εκπαίδευσης προσδιορίζεται από την προβλεπόμενη τιμή και την τιμή που βρίσκεται στην μνήμη του δικτύου. Έτσι, χρησιμοποιώντας αυτή την αρχιτεκτονική είναι απαραίτητες οι αρχικές τιμές στην μνήμη του δικτύου και **αποφεύγεται η απευθείας τροφοδότηση με το διάνυσμα εξόδου.**

Το επόμενο απαραίτητο στάδιο για την εκπαίδευση των ελεγκτών είναι η **κανονικοποίηση των διανυσμάτων εισόδου.** Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται διότι οι τιμές των διανυσμάτων εισόδου διαφέρουν κατά πολύ μεταξύ τους. Η περιοχή κανονικοποίησης που χρησιμοποιείται είναι $[-1, 1]$. **Στην έξοδο των νευρωνικών ελεγκτών το διάνυσμα εξόδου απόκανονικοποιείται.**

Στο τρίτο στάδιο της εκπαίδευσης καθορίζεται η **χρονοσειρά εκπαίδευσης**, τα δεδομένα εκπαίδευσης, τα δεδομένα επαλήθευσης και τα δεδομένα εφαρμογής. Οι διαθέσιμες **πραγματικές χρονοσειρές εκπαίδευσης** είναι τρεις και έχουν **διάρκεια 180sec** με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

1. **Ασθενής άνεμος με μέτριες μεταβολές (Περιοχή Αττικής) – V_1**
2. **Ασθενής άνεμος με μεγάλες μεταβολές (Περιοχή Λήμνου) – V_2**
3. **Ισχυρός άνεμος με μέτριες μεταβολές (Περιοχή Σερίφου) – V_3**

Η δειγματοληψία των χρονοσειρών είναι ανά 0.00165sec επομένως τα διανύσματα εισόδου-εξόδου αποτελούνται από 109091 στοιχεία. **Τα πρώτα 90sec** της χρονοσειράς χρησιμοποιούνται **για την εκπαίδευση** του τεχνητού νευρωνικού δικτύου και **τα υπόλοιπα 90sec για την προσομοίωση στην πραγματική λειτουργία** και την **αξιολόγηση της εκπαίδευσης.** Επομένως, τα διανύσματα εκπαίδευσης αποτελούνται από 54546 στοιχεία τα οποία είναι αρκετά για τον καθορισμό των βαρών των συνάψεων στο TND. Το 70% των 54546 στοιχείων επιλέγεται τυχαία και αποτελεί τα δεδομένα εκπαίδευσης, το 15% επιλέγεται τυχαία και αποτελεί τα δεδομένα επαλήθευσης και τέλος το υπόλοιπο 15% αποτελεί τα δεδομένα εφαρμογής. Η εκπαίδευση του TND δεν επηρεάζεται από την τυχαία επιλογή των δεδομένων εκπαίδευσης καθώς το δείγμα είναι αρκετά μεγάλο.

Στο τέταρτο στάδιο αρχικοποιούνται οι τιμές των βαρών των νευρώνων και της ενσωματωμένης μνήμης. Για τα βάρη των συνάψεων επιλέγονται τυχαία μικρές τιμές. Για την αρχικοποίηση της ενσωματωμένης μνήμης χρησιμοποιούνται τα διανύσματα εισόδου και εξόδου και ολισθαίνουν τα πρώτα δυο στοιχεία των διανυσμάτων αυτών στην μνήμη.

Στο πέμπτο στάδιο καθορίζεται ο αλγόριθμος εκπαίδευσης. Στους ελεγκτές που εξετάζονται στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικοί αλγόριθμοι που εμφανίζονται συχνά στην βιβλιογραφία, ο Levenberg-Marquardt backpropagation και ο αλγόριθμος Καθοδικής Κλίσης (Gradient Descent).

Οι ελεγκτές ANNC1, ANNC3 και ANNC4 χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt backpropagation. Ο αλγόριθμος αυτός αποσκοπεί στην προσέγγιση της δεύτερης τάξης ταχύτητα εκπαίδευσης χωρίς να χρειάζεται να υπολογίσει την μήτρα Hessian. Όταν το υπολογιζόμενο σφάλμα κατά την εκπαίδευση έχει την μορφή αθροίσματος η μήτρα Hessian μπορεί να προσδιοριστεί [22]:

$$H = J^T \cdot J$$

Και η κλίση της εκπαίδευσης είναι:

$$g = J^T \cdot e$$

Όπου J είναι ο Ιακωβιανός πίνακας που περιέχει τις πρώτες παραγώγους των σφαλμάτων του δικτύου σε σχέση με τα βάρη και τις πολώσεις, και e είναι το διάνυσμα με τα σφάλματα του δικτύου. Ο Ιακωβιανός πίνακας προσδιορίζεται με την κλασσική μέθοδο της οπισθοδιάδοσης. Ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt χρησιμοποιεί τα παραπάνω για τον προσδιορισμό της μήτρας Hessian με την παρακάτω επαναληπτική διαδικασία:

$$x_{k+1} = x_k - [J^T \cdot J + \mu \cdot I]^{-1} \cdot J^T \cdot e$$

Όπου το βαθμωτό μέγεθος μ όταν είναι μηδέν η παραπάνω διαδικασία μετατρέπεται στην μέθοδο του Newton για τον προσδιορισμό της μήτρας Hessian. Όταν το μ είναι πολύ μεγάλο η διαδικασία μετατρέπεται στον αλγόριθμο Gradient Descent με μικρό βήμα. Ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt προσπαθεί να συγκλίνει στον αλγόριθμο Newton μειώνοντας σε κάθε επανάληψη το μέγεθος μ όπου πραγματοποιείται μείωση του σφάλματος μεταξύ επιθυμητής και πραγματικής εξόδου ενώ αυξάνει όταν μεγαλώνει τα σφάλμα μεταξύ επιθυμητής εξόδου και πραγματικής.

Ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt είναι από τους γρηγορότερους αλγόριθμους με ικανοποιητικά αποτελέσματα που όμως απαιτεί πολύ περισσότερη μνήμη από άλλους αλγορίθμους.

Οι ελεγκτές ANNC2 και ANNC5 χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο Gradient Descent. Με βάση τον αλγόριθμο αυτό τα βάρη των συνάψεων προσαρμόζονται με τον κανόνα της αρνητικής κλίσης της συνάρτησης σφάλματος. Ο σταθερός ρυθμός μάθησης που επιλέγεται πολλαπλασιάζεται με την αρνητική κλίση και προσδιορίζει την προσαρμογή των βαρών των συνάψεων. Όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός μάθησης τόσο μεγαλύτερο είναι το βήμα των αλλαγών που θα γίνονται στα βάρη των συνάψεων με κίνδυνο όμως της αστάθειας του συστήματος αν ο ρυθμός είναι πολύ μεγάλος. Στην περίπτωση που ο ρυθμός μάθησης είναι πολύ μικρός ο αλγόριθμος θα συγκλίνει πολύ αργά. Η τιμή του αλγορίθμου μάθησης που επιλέχθηκε για την εκπαίδευση των ελεγκτών είναι: $lr = 0.1$

Κάθε αλγόριθμος εκπαίδευσης σταματάει με βάση κάποια κριτήρια, όπως το μικρότερο σφάλμα, τα οποία επιλέγονται πριν την έναρξη της εκπαίδευσης. Τα κριτήρια τερματισμού που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπαίδευση των πέντε νευρωνικών ελεγκτών είναι:

- Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (max epoch): 1000
- Μέγιστος χρόνος εκπαίδευσης: 4000sec
- Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) μικρότερο από: 10^{-7}
- Μικρότερη κλίση (gradient): 10^{-7}
- Αριθμός αποτυχημένων επαληθεύσεων: 6

5.1.3 Αποτελέσματα εκπαίδευσης των ελεγκτών που βασίζονται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστούν τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης για κάθε νευρωνικό ελεγκτή που σχεδιάστηκε για τον έλεγχο της ανεμογεννήτριας. Οι νευρώνες σε κάθε ελεγκτή καθορίστηκαν μετά από δοκιμές σε μια περιοχή από 5 έως 50 νευρώνες και επιλέχθηκαν οι λιγότεροι δυνατοί ώστε το δίκτυο να παρουσιάζει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

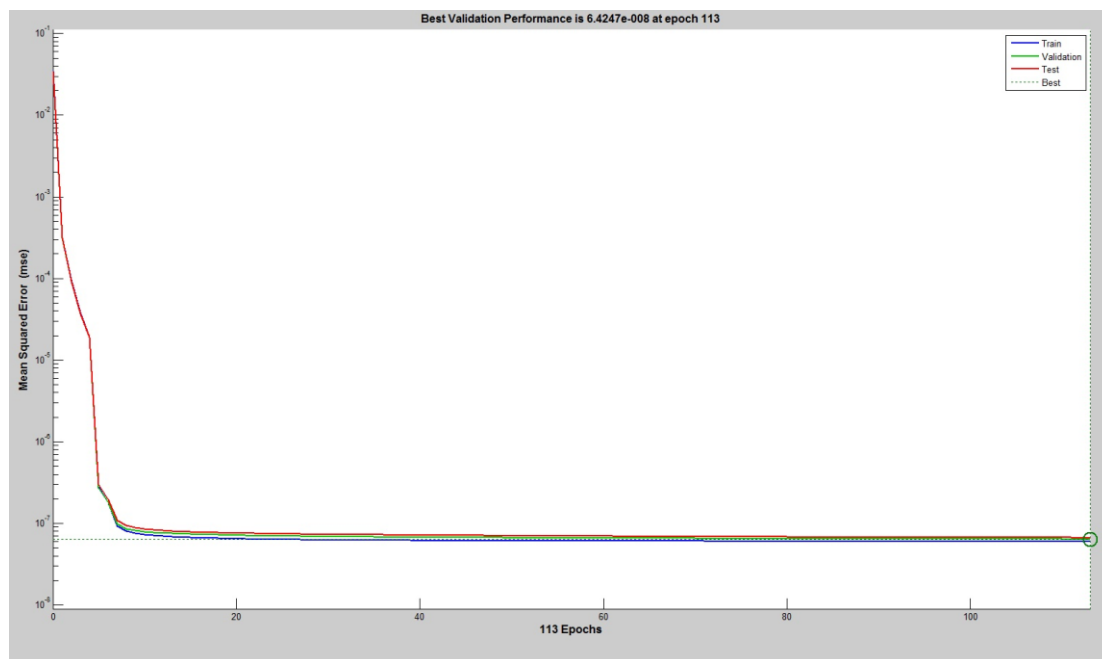
Ο ελεγκτής ANNC1 (Artificial Neural Network Controller 1) εκπαιδεύτηκε με την πραγματική χρονοσειρά εκπαίδευσης V_1 , με αλγόριθμο εκπαίδευσης τον

Levenberg-Marquardt και οι νευρώνες του καθορίστηκαν στους 17. Ο χρόνος εκπαίδευσης, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, η μικρότερη κλίση της καμπύλης εκπαίδευσης και ο αριθμός των επαναλήψεων για την εκπαίδευση του ANNC1 φαίνονται στον πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2 Παράμετροι εκπαίδευσης του ANNC1

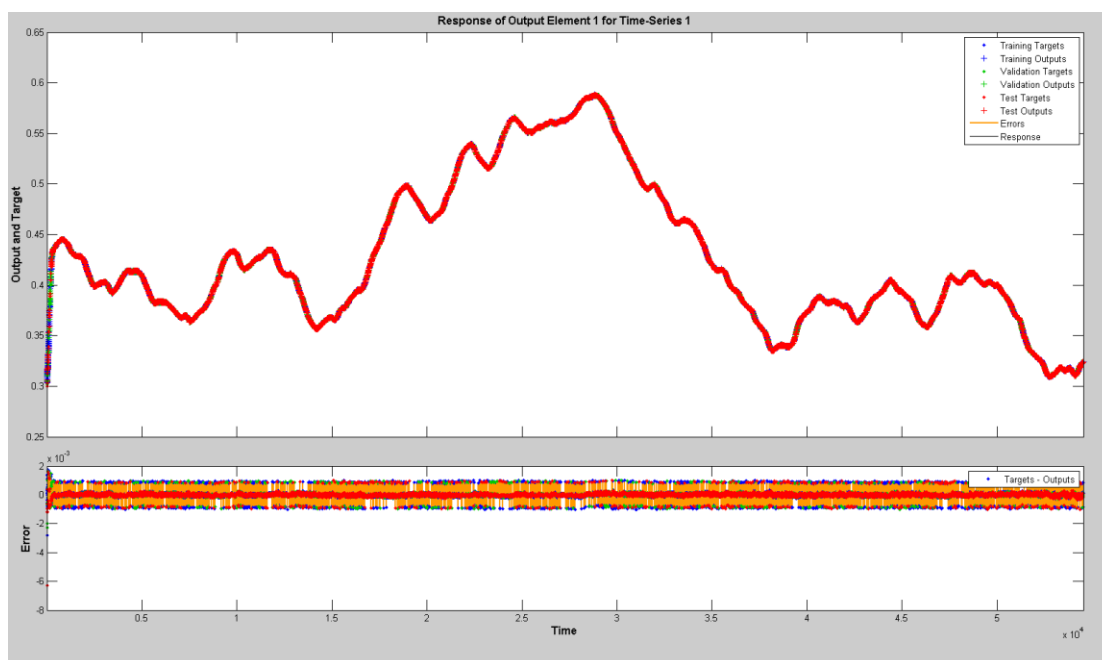
Χρόνος εκπαίδευσης	171sec
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE)	$6.16 \cdot 10^{-8}$
Minimum Gradient	$9.99 \cdot 10^{-8}$
Epochs	113

Η καμπύλη μάθησης φαίνεται στο σχήμα 5.3 όπου παρατηρείται ότι από τις πρώτες 20 επαναλήψεις το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι μικρότερο από 10^{-7} , το οποίο επιβεβαιώνει ότι ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt έχει πολύ γρήγορη σύγκλιση, δηλαδή τα βάρη των νευρώνων στις πρώτες επαναλήψεις έχουν διαμορφώσει την τελική τους τιμή σε μεγάλο βαθμό. Στις υπόλοιπες 93 επαναλήψεις το σφάλμα μειώνεται ελάχιστα ενώ η εκπαίδευση σταματάει μετά από 171sec εξαιτίας της υπέρβασης της ελάχιστης κλίσης (minimum Gradient).



Σχήμα 5.3 Καμπύλη μάθησης του ελεγκτή ANNC1

Η απόκριση της εκπαίδευσης του ANNC1 φαίνεται στο σχήμα 5.4. Παρατηρείται ότι το σφάλμα μετά από 113 επαναλήψεις των δεδομένων εισόδου εξόδου είναι μικρότερο από 0.002 το οποίο σημαίνει ότι έχει πετύχει καλή σύγκλιση. Η σύγκλιση αυτή δεν σημαίνει απαραίτητα και την άριστη συμπεριφορά του ελεγκτή αν δεν αποφευχθούν φαινόμενα υπερεκπαίδευσης.



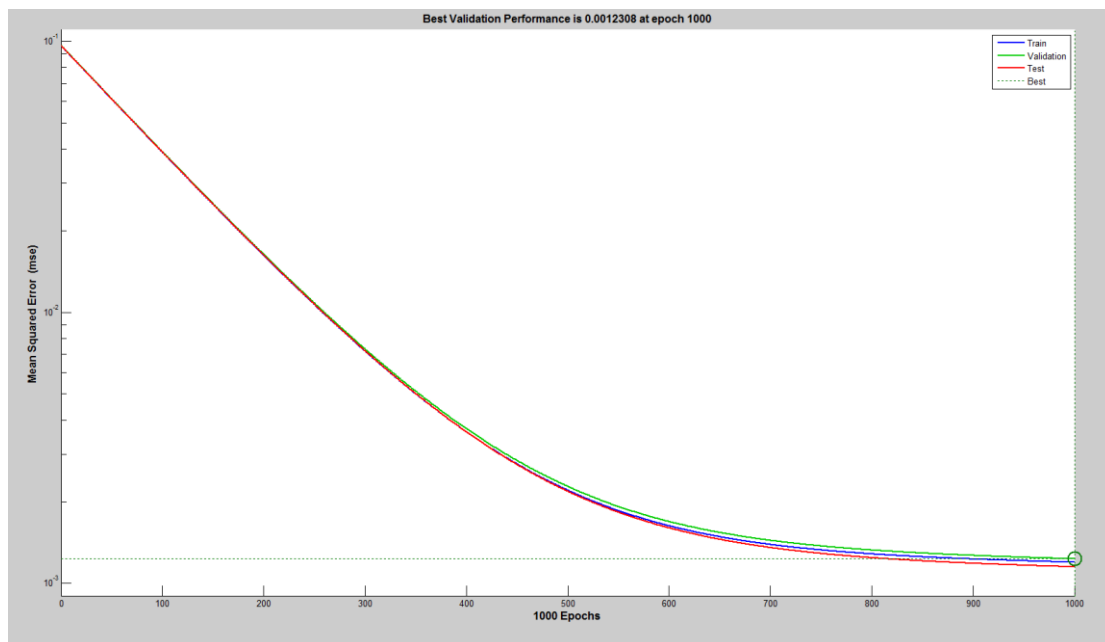
Σχήμα 5.4 Απόκριση εκπαίδευσης και σφάλμα ανα χρονική στιγμή από την επιθυμητή στην τελευταία επανάληψη του ελεγκτή ANNC1

Ο ελεγκτής ANNC2 (Artificial Neural Network Controller 2) εκπαιδεύτηκε με την πραγματική χρονοσειρά εκπαίδευσης V_1 , με αλγόριθμο εκπαίδευσης τον Gradient Descent και οι νευρώνες του καθορίστηκαν στους 19. Ο χρόνος εκπαίδευσης, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, η μικρότερη κλίση της καμπύλης εκπαίδευσης και ο αριθμός των επαναλήψεων για την εκπαίδευση του ANNC2 φαίνονται στον πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3 Παράμετροι εκπαίδευσης του ANNC2

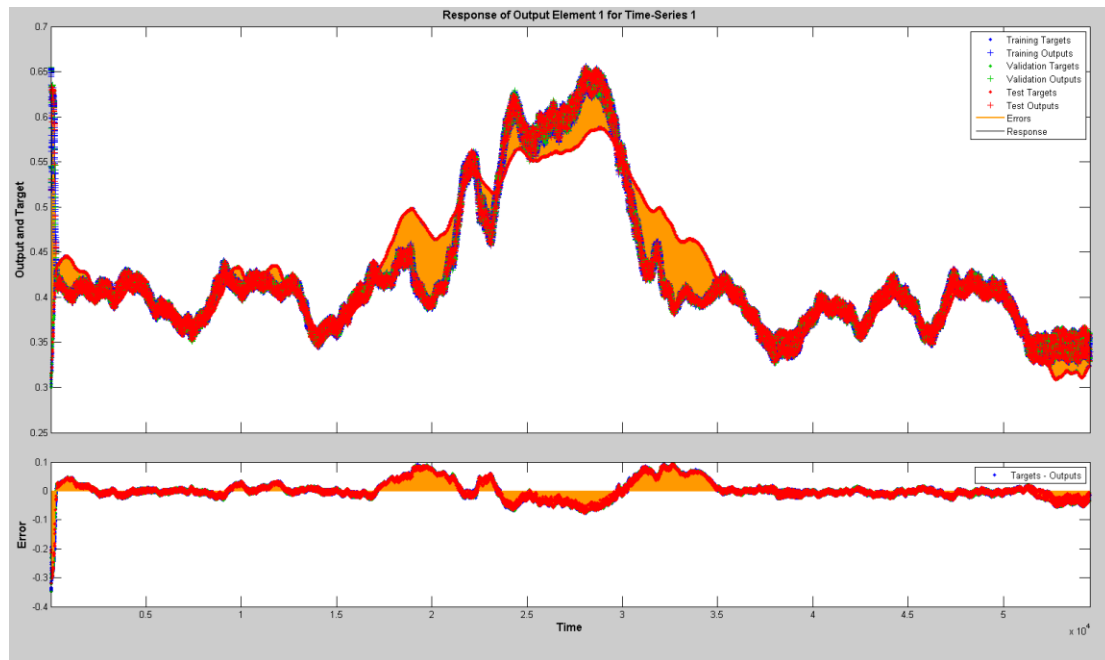
Χρόνος εκπαίδευσης	1206sec
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE)	$3.21 \cdot 10^{-5}$
Minimum Gradient	$2.89 \cdot 10^{-5}$
Epochs	1000

Η καμπύλη μάθησης του ANNC2 φαίνεται στο σχήμα 5.5 όπου παρατηρείται μια γραμμική μείωση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος στις πρώτες 500 επαναλήψεις και λογαριθμική μείωση του σφάλματος στις υπόλοιπες 500 επαναλήψεις της εκπαίδευσης. Σε αυτό το σημείο φαίνεται η πρώτη βασική διαφορά μεταξύ των δυο αλγόριθμων εκπαίδευσης. Ο Levenberg-Marquardt μέσα στις πρώτες επαναλήψεις πετυχαίνει πολύ καλή σύγκλιση ενώ ο Gradient Descent χρειάζεται περισσότερο χρόνο. Η εκπαίδευση σταματάει μετά από 1206sec επειδή έχουν επιτευχθεί οι μέγιστες επιτρεπτές επαναλήψεις (maximum epoch).



Σχήμα 5.5 Καμπύλη μάθησης για τον ελεγκτή ANNC2

Η απόκριση της εκπαίδευσης του ANNC2 φαίνεται στο σχήμα 5.6 όπου παρατηρείται ότι το σφάλμα μετά από 1000 επαναλήψεις των δεδομένων εισόδου-εξόδου είναι μικρότερο από 0.1 ανά χρονική στιγμή. Εδώ παρατηρείται η δεύτερη διαφορά μεταξύ των δυο αλγορίθμων μάθησης που χρησιμοποιούνται. Στις μικρές μεταβολές η σύγκλιση είναι πολύ καλή για τον αλγόριθμο τις Καθοδικής Κλίσης ενώ εμφανίζει απόλυτα σφάλματα έως και 0.1 στην απότομη αύξηση και μείωση του λόγου κατάτμησης.



Σχήμα 5.6 Απόκριση εκπαίδευσης και σφάλμα ανα χρονική στιγμή από την επιθυμητή στην τελευταία επανάληψη για τον ελεγκτή ANNC2

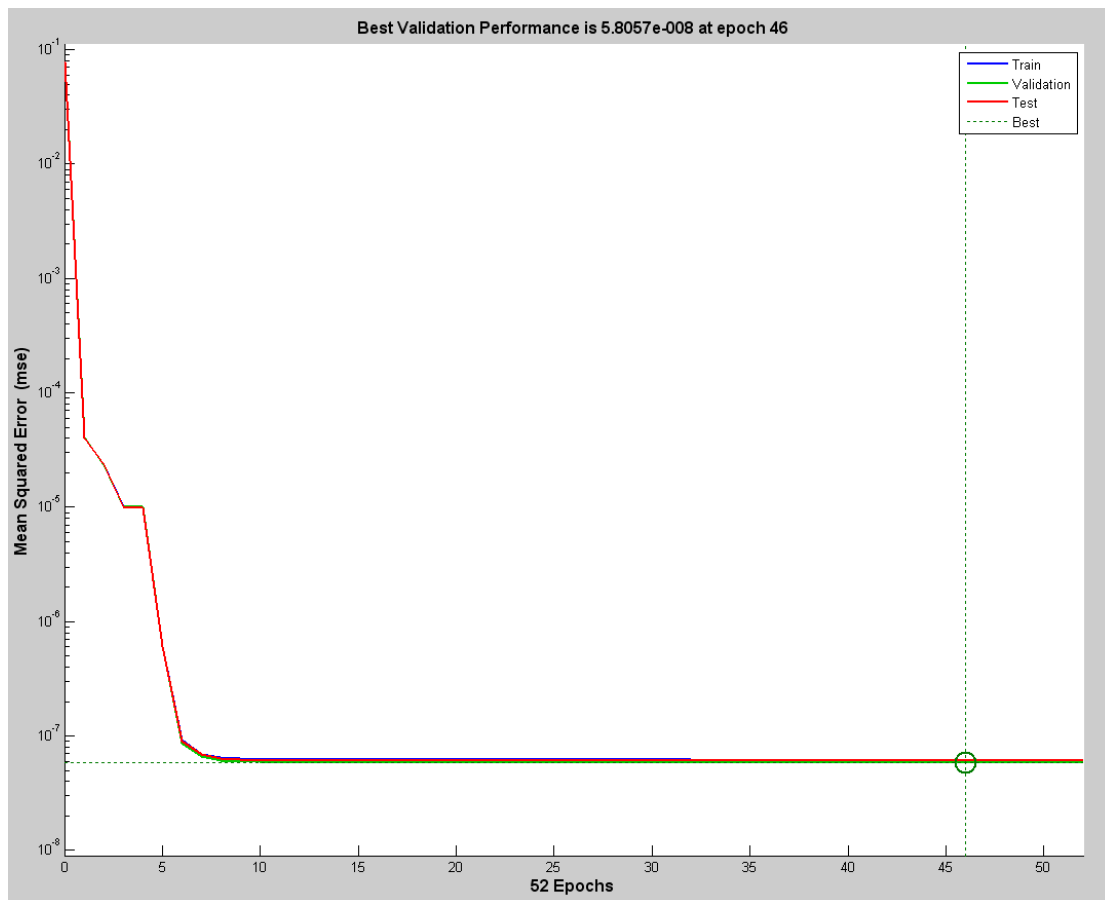
Ο ελεγκτής ANNC3 (Artificial Neural Network Controller 3) εκπαιδεύτηκε με την πραγματική χρονοσειρά εκπαίδευσης V_2 , με αλγόριθμο εκπαίδευσης τον Levenberg-Marquardt και οι νευρώνες του καθορίστηκαν στους 22. Ο χρόνος εκπαίδευσης, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, η μικρότερη κλίση της καμπύλης εκπαίδευσης και ο αριθμός των επαναλήψεων φαίνονται στον πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4 Παράμετροι εκπαίδευσης του ANNC3

Χρόνος εκπαίδευσης	89sec
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE)	$6.14 \cdot 10^{-8}$
Minimum Gradient	$1.65 \cdot 10^{-6}$
Epochs	52

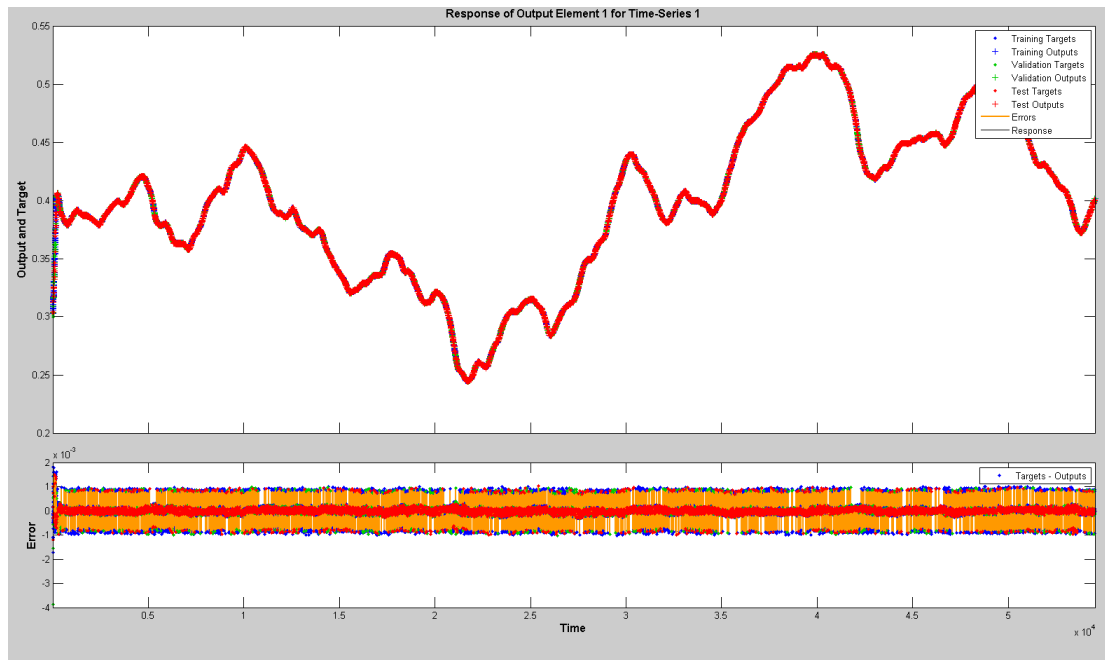
Η καμπύλη μάθησης του ANNC3 φαίνεται στο σχήμα 5.7 όπου παρατηρείται απότομη μείωση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος στις πρώτες 7 επαναλήψεις και ελάχιστη μείωση του σφάλματος στις υπόλοιπες 45 επαναλήψεις της εκπαίδευσης. Η εκπαίδευση σταματάει μετά από 89sec επειδή έχουν επιτευχθεί οι μέγιστες αποτυχημένες επαληθεύσεις (Validation stop). Το μικρότερο σφάλμα επαλήθευσης εμφανίζεται στην 46^η επανάληψη και οι τιμές που είχαν διαμορφώσει οι

νευρώνες σε αυτή την επανάληψη αποθηκεύονται ως οι τελικές τιμές του νευρωνικού ελεγκτή.



Σχήμα 5.7 Καμπύλη μάθησης για τον ελεγκτή ANNC3

Η απόκριση της εκπαίδευσης του ANNC3 φαίνεται στο σχήμα 5.8 όπου παρατηρείται ότι το σφάλμα ανά χρονική στιγμή μετά από 46 επαναλήψεις των δεδομένων εισόδου-εξόδου είναι μικρότερο από 0.002 πράγμα το οποίο σημαίνει ότι έχουμε πολύ καλή σύγκλιση στα δεδομένα εκπαίδευσης. Η σύγκλιση αυτή δεν σημαίνει απαραίτητα και την άριστη συμπεριφορά του ελεγκτή σε πραγματική λειτουργία αν δεν αποφευχθούν φαινόμενα υπερεκπαίδευσης.



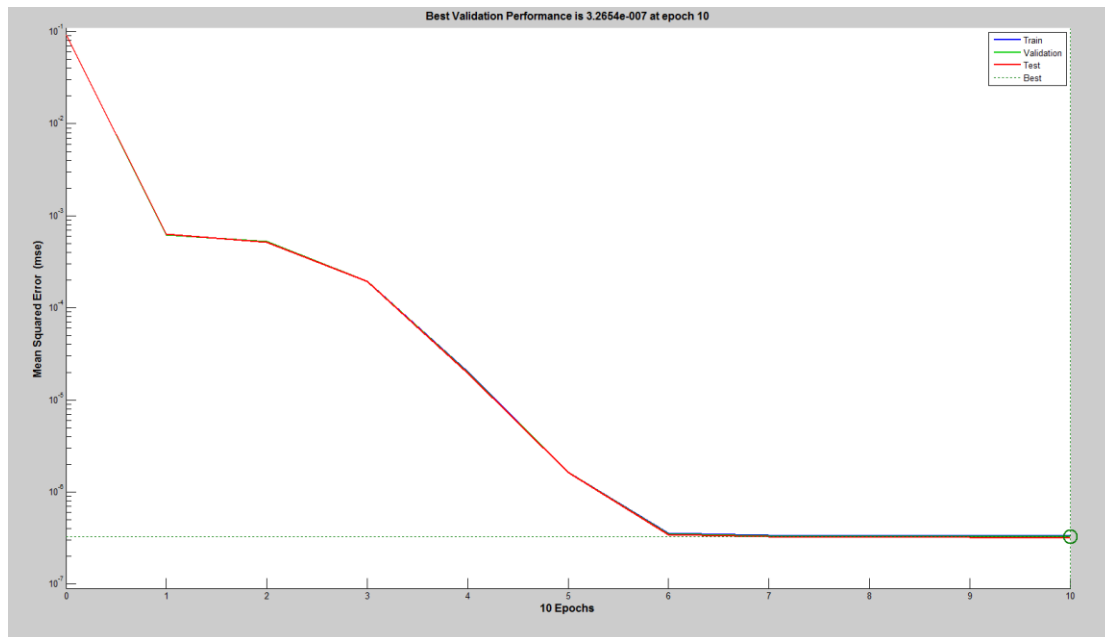
Σχήμα 5.8 Απόκριση εκπαίδευσης και σφάλμα ανα χρονική στιγμή από την επιθυμητή στην τελευταία επανάληψη για τον ελεγκτή ANNC3

Ο ελεγκτής ANNC4 (Artificial Neural Network Controller 4) εκπαιδεύτηκε με την πραγματική χρονοσειρά εκπαίδευσης V_3 , με αλγόριθμο εκπαίδευσης τον Levenberg-Marquardt και οι νευρώνες του καθορίστηκαν στους 14. Ο χρόνος εκπαίδευσης, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, η μικρότερη κλίση της καμπύλης εκπαίδευσης και ο αριθμός των επαναλήψεων φαίνονται στον πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5 Παράμετροι εκπαίδευσης του ANNC4

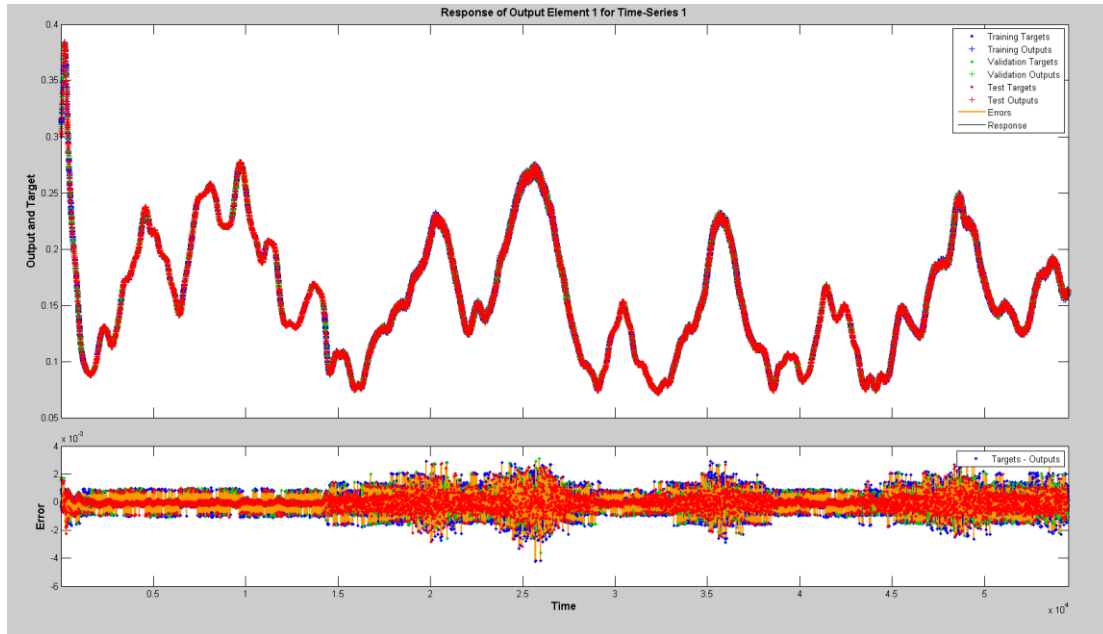
Χρόνος εκπαίδευσης	42sec
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE)	$3.28 \cdot 10^{-7}$
Minimum Gradient	$9.6 \cdot 10^{-8}$
Epochs	10

Η καμπύλη μάθησης του ANNC4 φαίνεται στο σχήμα 5.9. Παρατηρείται η απότομη μείωση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος στις πρώτες 6 επαναλήψεις και ελάχιστη μείωση του σφάλματος στις υπόλοιπες 4 επαναλήψεις της εκπαίδευσης. Η διαδικασία της εκπαίδευσης σταματάει μετά από 42sec εξαιτίας της υπέρβασης της ελάχιστης κλίσης (minimum Gradient).



Σχήμα 5.9 Καμπύλη μάθησης για τον ελεγκτή ANNC4

Η απόκριση της εκπαίδευσης του ANNC4 φαίνεται στο σχήμα 5.10 όπου παρατηρείται ότι το σφάλμα, ανά χρονική στιγμή, μετά από 10 επαναλήψεις των δεδομένων εισόδου-εξόδου είναι μικρότερο από 0.004 το οποίο σημαίνει ότι έχουμε πολύ καλή σύγκλιση στα δεδομένα εκπαίδευσης. Η σύγκλιση αυτή δεν σημαίνει και την άριστη συμπεριφορά του ελεγκτή σε πραγματική λειτουργία αν δεν αποφευχθούν φαινόμενα υπερεκπαίδευσης.



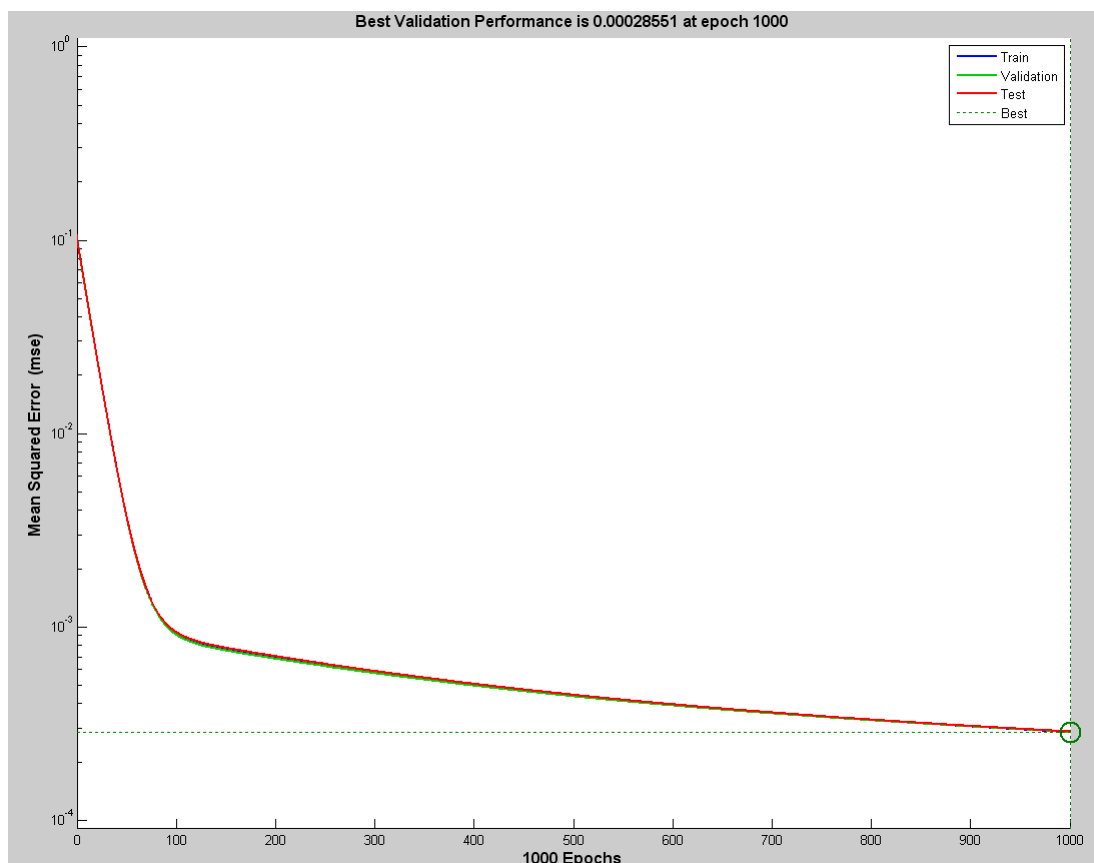
Σχήμα 5.10 Απόκριση εκπαίδευσης και σφάλμα ανα χρονική στιγμή από την επιθυμητή στην τελευταία επανάληψη για τον ελεγκτή ANNC4

Ο ελεγκτής ANNC5 (Artificial Neural Network Controller 5) εκπαιδεύτηκε με την πραγματική χρονοσειρά εκπαίδευσης V_3 , με αλγόριθμο μάθησης τον Gradient Descent και οι νευρώνες του καθορίστηκαν στους 14. Ο χρόνος εκπαίδευσης, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, η μικρότερη κλίση της καμπύλης εκπαίδευσης και ο αριθμός των επαναλήψεων για την εκπαίδευση του ANNC5 φαίνονται στον πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6 Παράμετροι εκπαίδευσης του ANNC5

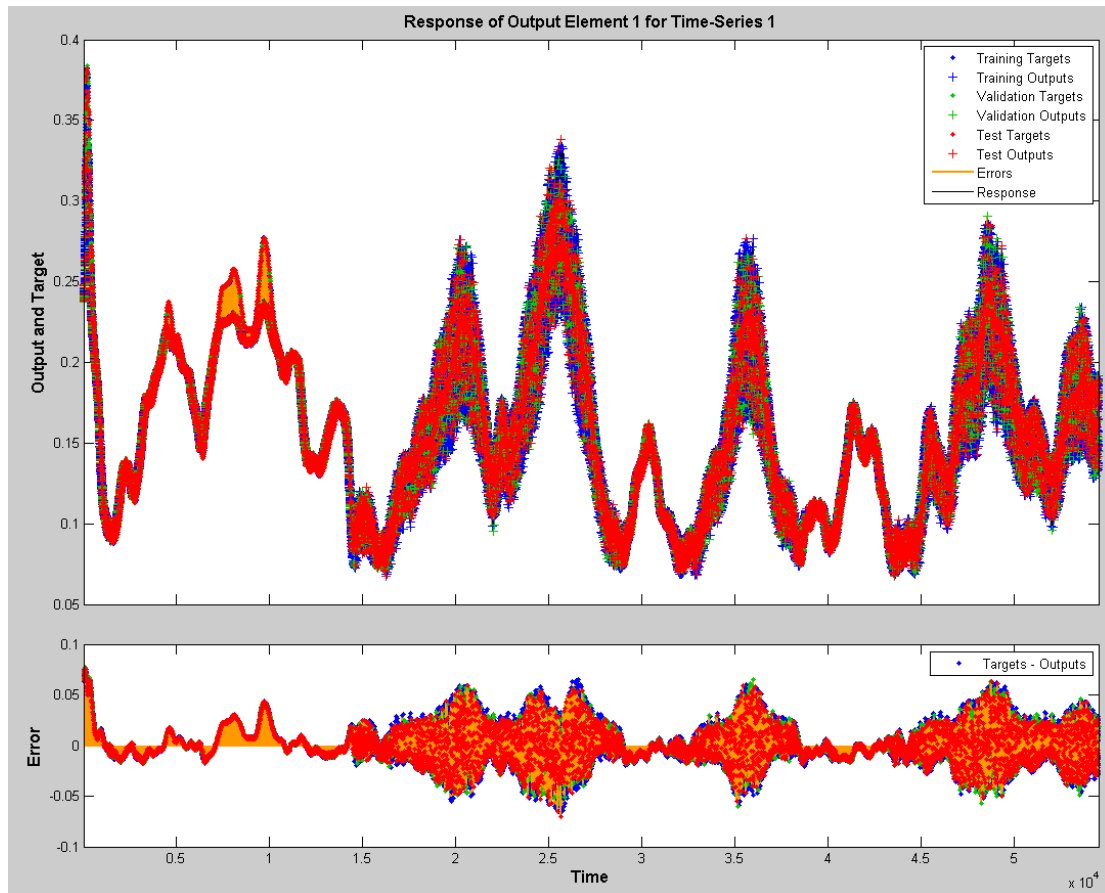
Χρόνος εκπαίδευσης	1085sec
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE)	$2.85 \cdot 10^{-4}$
Minimum Gradient	$1.35 \cdot 10^{-3}$
Epochs	1000

Η καμπύλη μάθησης του ANNC5 φαίνεται στο σχήμα 5.11 όπου παρατηρείται γραμμική μείωση με μεγάλη κλίση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος το οποίο φτάνει στο 10^{-3} στις πρώτες 100 επαναλήψεις και γραμμική μείωση με μικρή κλίση στις υπόλοιπες 900 επαναλήψεις της εκπαίδευσης. Η εκπαίδευση σταματάει μετά από 1085sec επειδή έχουν επιτευχθεί οι μέγιστες επιτρεπτές επαναλήψεις (maximum epoch).



Σχήμα 5.11 Καμπύλη μάθησης για τον ελεγκτή ANNC5

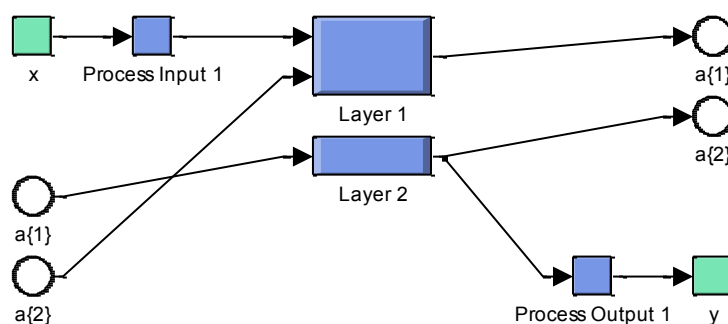
Η απόκριση της εκπαίδευσης του ANNC5 φαίνεται στο σχήμα 5.12 όπου παρατηρείται ότι το σφάλμα, ανά χρονική στιγμή, μετά από 1000 επαναλήψεις των δεδομένων εισόδου-εξόδου, είναι μικρότερο από 0.08. Ο ελεγκτής εμφανίζει μεγαλύτερο σφάλμα στις απότομες αυξήσεις ή μειώσεις του λόγου κατάτμησης.



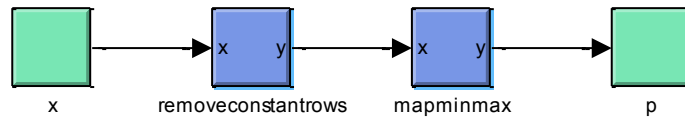
Σχήμα 5.12 Απόκριση εκπαίδευσης και σφάλμα ανα χρονική στιγμή από την επιθυμητή στην τελευταία επανάληψη για τον ελεγκτή ANNC5

5.2 Το μοντέλο προσομοίωσης

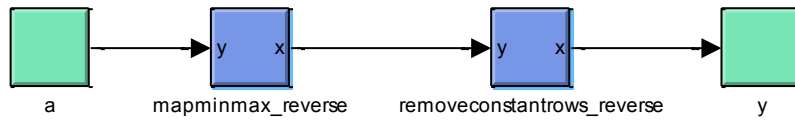
Το μοντέλο προσομοίωσης των ελεγκτών υλοποιήθηκε στο SIMULINK με την βοήθεια του Neural Network toolbox [22]. Στα σχήματα 5.13 έως 5.18 παρουσιάζονται τα διάφορα μέρη από τα οποία αποτελείται ο ελεγκτής. Στο σχήμα 5.19 φαίνεται το συνολικό μοντέλο ελέγχου ανεμογεννήτριας με νευρωνικά δίκτυα.



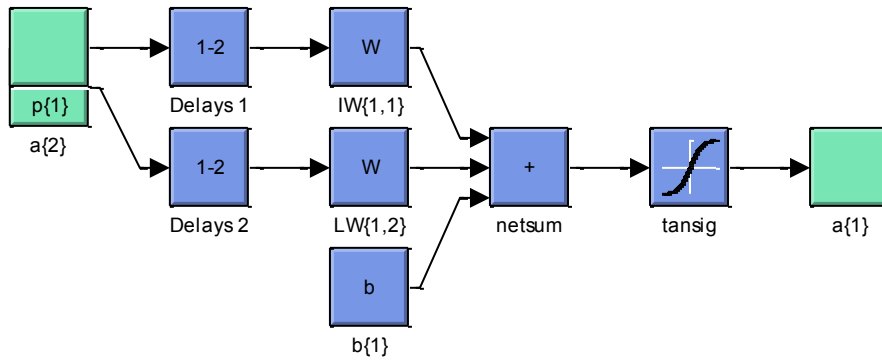
Σχήμα 5.13 Μοντέλο SIMULINK για το νευρωνικό ελεγκτή



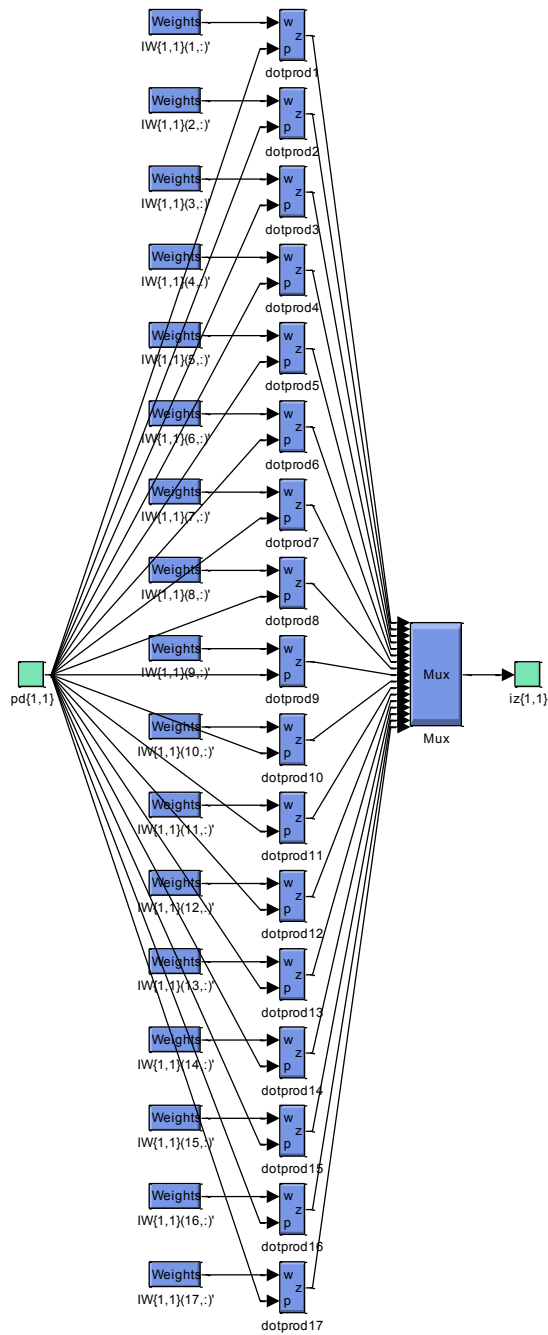
Σχήμα 5.14 Επεξεργασία δεδομένων εισόδου – κανονικοποίηση(Process input 1)



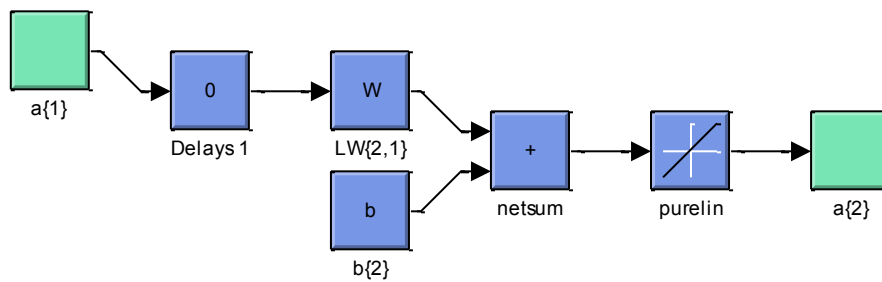
Σχήμα 5.15 Επεξεργασία δεδομένων εξόδου – αποκανονικοποίηση(Process input 1)



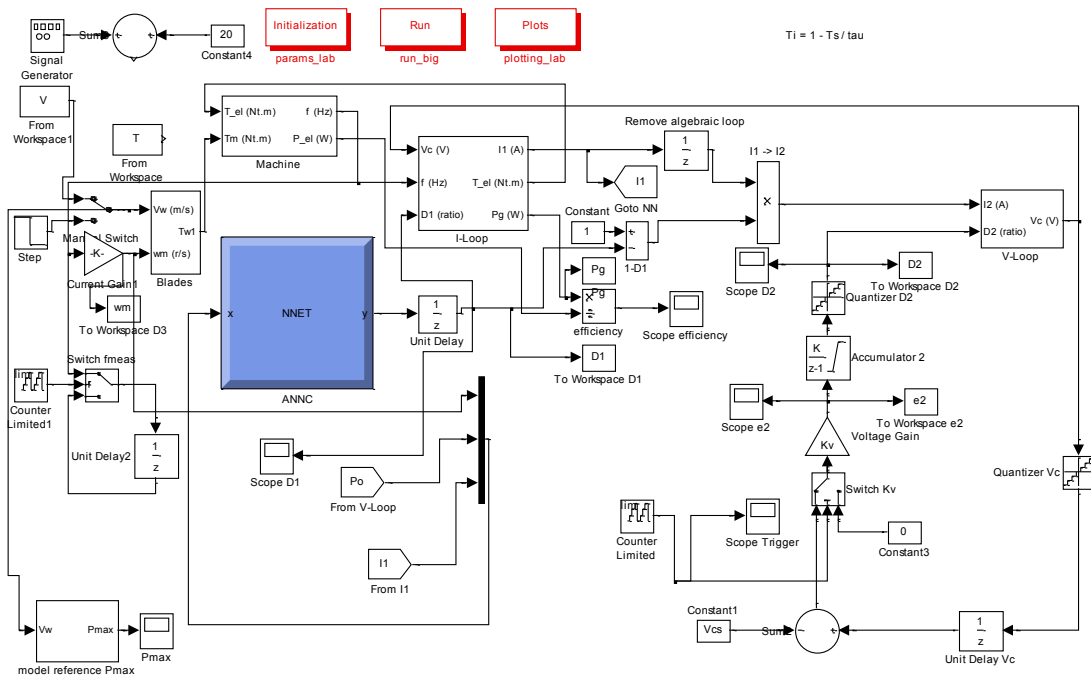
Σχήμα 5.16 Κρυφό επίπεδο νευρώνων (layer 1)



Σχήμα 5.17 Οι νευρώνες και τα βάρη των συνάψεων



Σχήμα 5.18 Το επίπεδο εξόδου (layer 2)

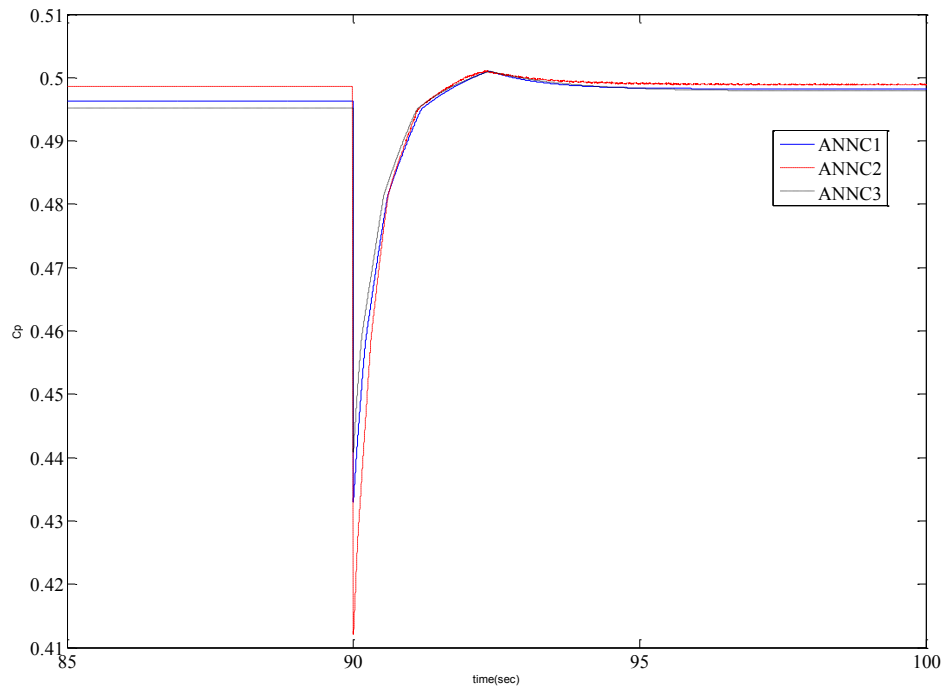


Σχήμα 5.19 Το συνολικό μοντέλο προσομοίωσης στο SIMULINK ανεμογεννήτριας με τον ελεγκτή ANNC

5.3 Απόκριση του συστήματος σε βηματικές αλλαγές του ανέμου

Για την αξιολόγηση των νευρωνικών ελεγκτών εξετάζονται πρώτα οι αποκρίσεις τους σε **βηματικές μεταβολές** του ανέμου στην μόνιμη κατάσταση. Πραγματοποιούνται **δύο προσομοιώσεις**, **βηματική αύξηση** της ταχύτητας του ανέμου από τα 6m/s στα 9m/s και **βηματική μείωση** της ταχύτητας του ανέμου από τα 9m/s στα 6m/s προκειμένου να διαπιστωθεί η συνολική συμπεριφορά τους στις απότομες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου.

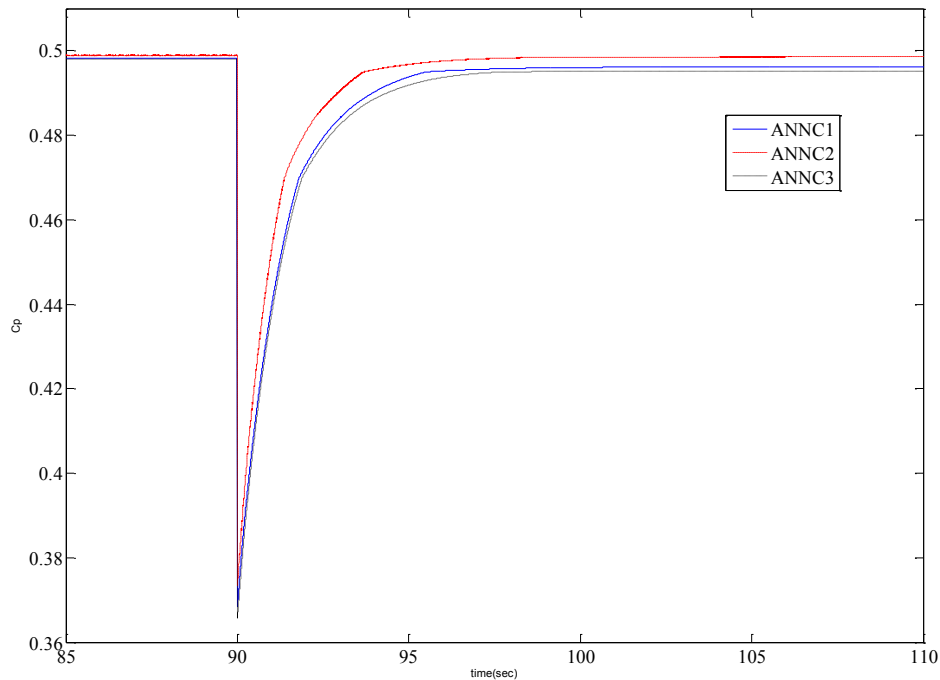
Η σύγκριση των ελεγκτών πραγματοποιείται με βάση το μέσο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος, τη μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος τη χρονική στιγμή της μεταβολής, το χρόνο που χρειάζεται ο αεροδυναμικός συντελεστής ώστε να επιστρέψει στη μόνιμη κατάσταση (χρόνος απόκρισης) αλλά και την αρχική και τελική τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος. Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος (C_p) δίνει πρακτικά ένα μέτρο για την απορρόφηση της αιολικής ενέργειας και η μέγιστη τιμή του σύμφωνα με το όριο Betz είναι 0.59, στην πραγματικότητα όμως λόγω απωλειών δεν ξεπερνάει το 0.51.



Σχήμα 5.20 Απόκριση του C_p σε βηματική μεταβολή ανέμου από τα 6 m/s στα 9 m/s για τους ελεγκτές *ANN1*, *ANN2* και *ANN3*

Στο σχήμα 5.20 φαίνεται η απόκριση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος για τους ελεγκτές ANN1, ANN2 και ANN3 σε βηματική αύξηση της μέσης ταχύτητας του ανέμου. Παρατηρείται ότι **ο ελεγκτής ANN1** από αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.4963 καταλήγει μετά τη μεταβολή σε 0.4982 μετά από **4.22 δευτερόλεπτα** με μέση τιμή 0.497. Αντίστοιχα, **ο ANN2** από αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.4986 πριν την μεταβολή καταλήγει μετά από **5.2 δευτερόλεπτα** σε 0.499 με μέση τιμή 0.4985. **Ο ANN3** από αεροδυναμικό συντελεστή 0.4951 πριν την μεταβολή καταλήγει μετά από **5.22 δευτερόλεπτα** σε συντελεστή 0.4979 με μέση τιμή 0.4962.

Η μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος, στο χρόνο $t = 90\text{ sec}$ όταν πραγματοποιείται η βηματική μεταβολή του ανέμου, για τον ANN1 φτάνει στο 0.433 για τον ANN2 το 0.4121 και για τον ANN3 το 0.4409. Διαπιστώνεται ότι **ο ANN1 έχει τη γρηγορότερη απόκριση** σε σχέση με τους υπόλοιπους δυο ελεγκτές και εμφανίζει αρκετά **υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος**, ενώ **ο ANN2** εμφανίζει τον **υψηλότερο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος**. Τέλος, **ο ANN3** έχει τη **μικρότερη βύθιση** αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος την στιγμή της βηματικής μεταβολής.

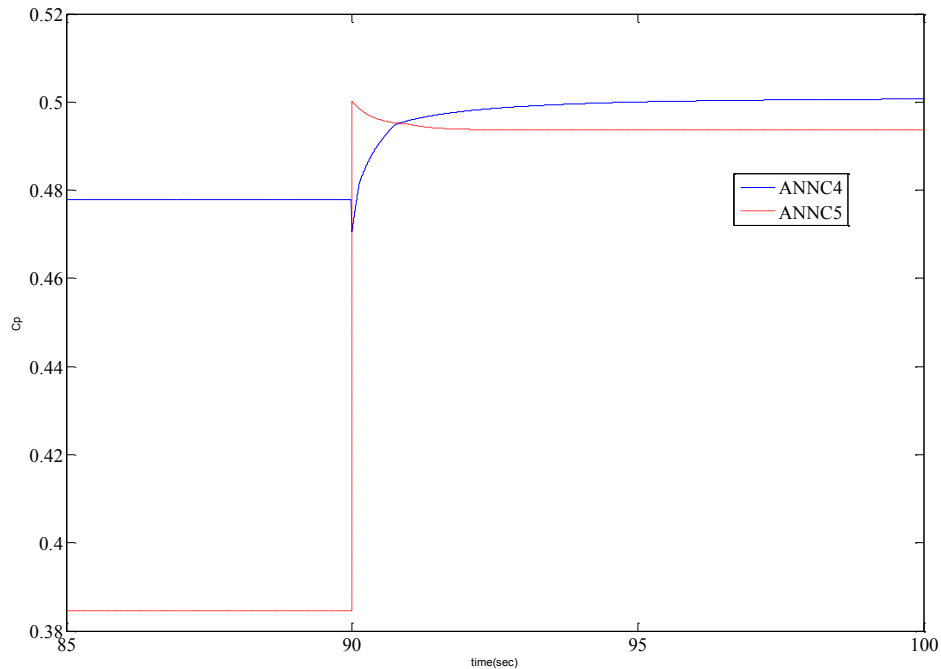


Σχήμα 5.21 Απόκριση του C_p σε βηματική μεταβολή ανέμου από τα 9m/s στα 6m/s για τους ελεγκτές ANN C1, ANN C2 και ANN C3

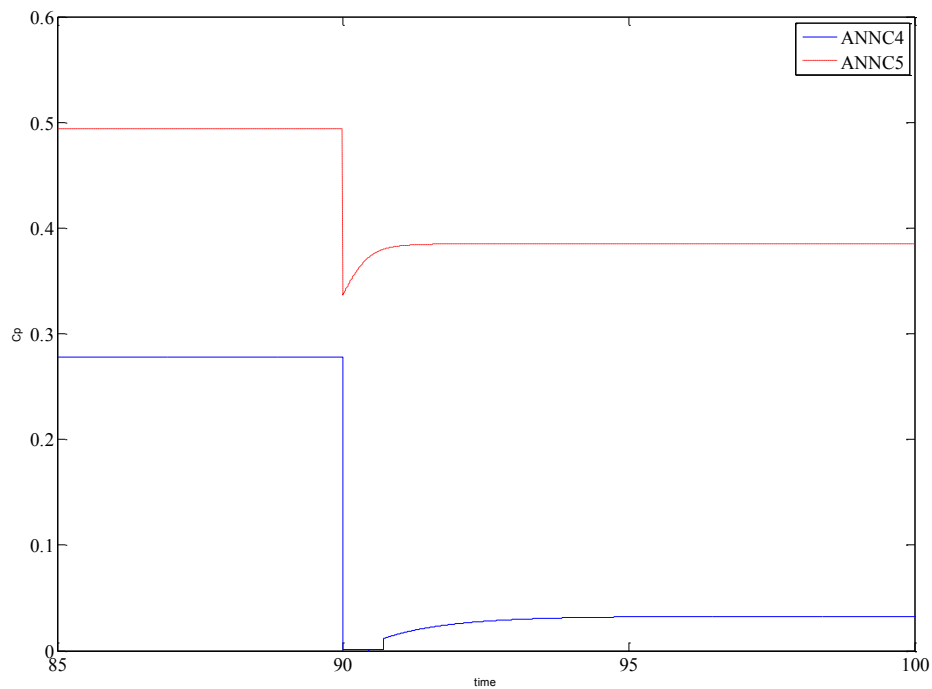
Στο σχήμα 5.21 φαίνεται η απόκριση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος για τους ελεγκτές ANN C1, ANN C2 και ANN C3 σε βηματική μείωση του ανέμου. Παρατηρείται ότι **ο ελεγκτής ANN C1** από αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.4983 καταλήγει μετά τη μεταβολή σε 0.496 μετά από **7.18 δευτερόλεπτα** με μέση τιμή 0.4963. Αντίστοιχα, **ο ANN C2** από αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.499 πριν τη μεταβολή καταλήγει, μετά από **7.35 δευτερόλεπτα**, σε 0.4985 με μέση τιμή 0.4979. **Ο ANN C3** από αεροδυναμικό συντελεστή 0.4979 πριν τη μεταβολή καταλήγει, μετά από **5.7 δευτερόλεπτα**, σε συντελεστή 0.495 με μέση τιμή 0.4956.

Η μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος, στο χρόνο $t = 90 \text{ sec}$ όταν πραγματοποιείται η βηματική μεταβολή του ανέμου, για τον ANN C1 φτάνει στο 0.3685 για τον ANN C2 το 0.3734 και για τον ANN C3 το 0.3656. Διαπιστώνεται ότι **ο ANN C3** έχει την **γρηγορότερη απόκριση** σε σχέση με τους υπόλοιπους δυο ελεγκτές, ενώ **ο ANN C2 εμφανίζει το μεγαλύτερο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος** ενώ έχει και την μικρότερη βύθιση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος την στιγμή της βηματικής μεταβολής.

Οι αποκρίσεις του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος για την βηματική αύξηση και μείωση της ταχύτητας του ανέμου με τους ελεγκτές ANNC4 και ANNC5 φαίνονται στα σχήματα 5.22 και 5.23:



Σχήμα 5.22 Απόκριση του C_p για βηματική μεταβολή ανέμου από τα 6m/s στα 9m/s για τους ελεγκτές ANNC4 και ANNC5



Σχήμα 5.23 Απόκριση του C_p για βηματική μεταβολή ανέμου από τα 9m/s στα 6m/s για τους ελεγκτές ANNC4 και ANNC5

Στο σχήμα 5.22 παρατηρείται η απόκριση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος για τους ελεγκτές ANNC4 και ANNC5 για βηματική αύξηση του ανέμου. Ο ελεγκτής ANNC4 από αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.4778 καταλήγει, μετά τη μεταβολή, σε 0.5008 μέσα σε 11 δευτερόλεπτα. Αντίστοιχα, ο ANNC5 από αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.3846 πριν την μεταβολή καταλήγει, μετά από 9.35 δευτερόλεπτα, σε 0.4985.

Η μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος, στο χρόνο $t = 90 \text{ sec}$ όταν πραγματοποιείται η βηματική μεταβολή του ανέμου, για τον ANNC4 φτάνει στο 0.4786 και για τον ANNC5 το 0.3834. Στο σχήμα 5.23 παρατηρείται η απόκριση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος για τους ελεγκτές ANNC4 και ANNC5 για βηματική μείωση του ανέμου. Όπως φαίνεται ο ελεγκτής ANNC4 από αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.2778 καταλήγει μετά την μεταβολή σε 0.03. Αντίστοιχα, ο ANNC5 από αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.4937 πριν την μεταβολή καταλήγει μετά από 11 δευτερόλεπτα σε 0.3847.

Οι ελεγκτές ANNC4 και ANNC5 έχουν εκπαιδευτεί με πραγματικές χρονοσειρές ισχυρού ανέμου μέσης τιμής 14.9m/s. Παρατηρείται ότι και οι δυο ελεγκτές εμφανίζουν **περιορισμένη γενίκευση** της εξόδου τους όταν διεγείρονται με δεδομένα που δεν έχουν εκπαιδευτεί. Η χαμηλή αρχική και τελική ταχύτητα του ανέμου στις βηματικές μεταβολές δυσκολεύει τους νευρωνικούς ελεγκτές οι οποίοι εμφανίζουν πολύ μειονεκτικά αποτελέσματα απόκρισης C_p . Συγκεκριμένα, ο ANNC4 εμφανίζει καλή απόκριση για βηματική αύξηση του ανέμου από 6m/s σε 9m/s αλλά αντίστοιχα άσχημη απόκριση αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος για βηματική μείωση του ανέμου από 6m/s σε 9m/s. Από την άλλη ο ελεγκτής ANNC5 εμφανίζει πιο σταθερή απόκριση με καλή γενίκευση για ταχύτητα ανέμου 9m/s και μέτρια απόκριση αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος για 6m/s.

Στον πίνακα 5.7 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των ελεγκτών, που βασίζονται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, για βηματικές μεταβολές της μέσης ταχύτητας του ανέμου.

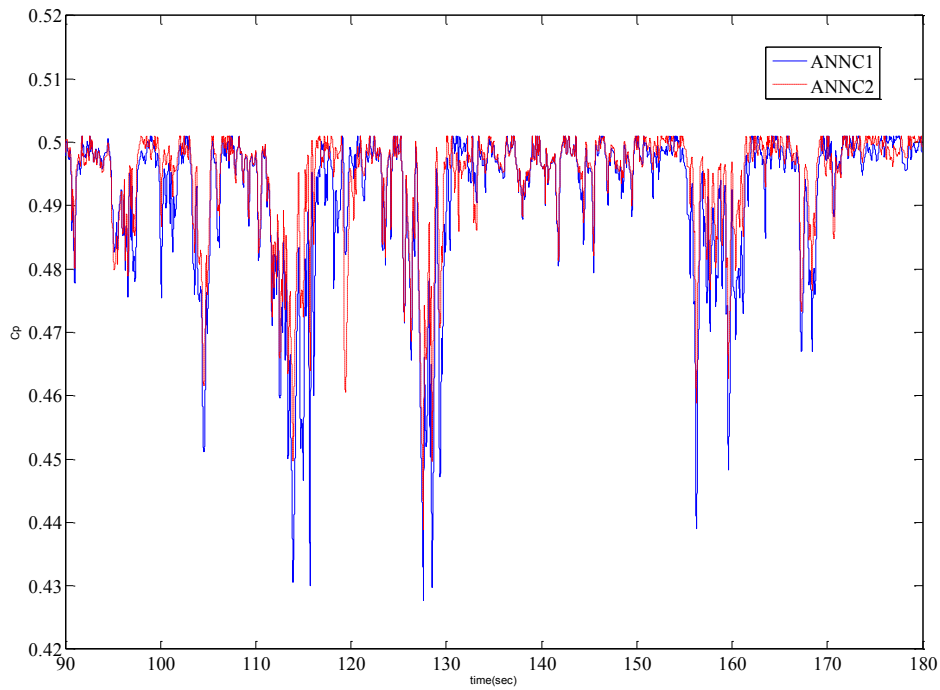
Πίνακας 5.7 Χρόνος απόκρισης και μέσος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος για βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου

Ελεγκτής	Ταχύτητα ανέμου 6m/s σε 9 m/s		Ταχύτητα ανέμου 9m/s σε 6 m/s	
	Μέσο C_p	T (sec)	Μέσο C_p	T (sec)
ANNC1	0.497	4.22	0.4963	7.18
ANNC2	0.4985	5.2	0.4979	7.35
ANNC3	0.4962	5.22	0.4956	5.7
ANNC4	0.4892	11	0.158	10
ANNC5	0.4399	9.35	0.4391	11

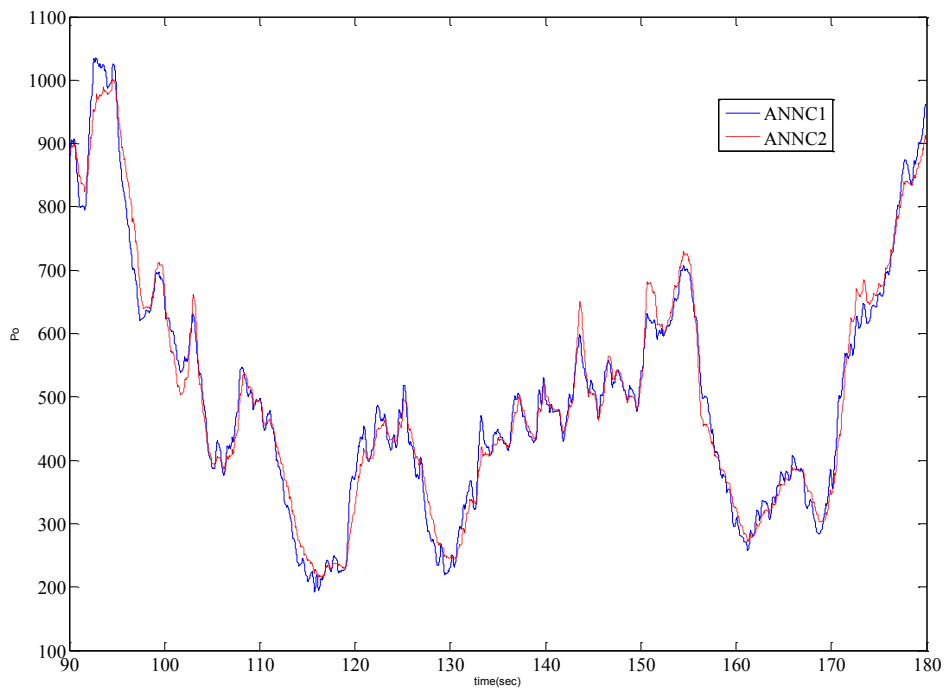
5.4 Απόκριση του συστήματος σε πραγματικές χρονοσειρές ανέμου

Το δεύτερο στάδιο αξιολόγησης των ελεγκτών, που βασίζονται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, αφορά την παρακολούθηση της απόκρισης τους **σε πραγματική λειτουργία**. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, κάθε ελεγκτής έχει εκπαιδευτεί με τα πρώτα 90sec μιας πραγματικής χρονοσειράς, σε αυτό το στάδιο εξετάζεται η απόκριση των ελεγκτών στα υπόλοιπα 90sec της ίδιας χρονοσειράς. Οι ελεγκτές συγκρίνονται με βάση τον **μέσο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος** και την **μέση ισχύ** καθώς μας δίνουν ένα μέτρο για την αξιοποίηση της εισερχόμενης αιολικής ενέργειας. Επίσης, εξετάζονται ως προς την **μέγιστη μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος** αφού αποτελεί ένα μέτρο για την ταχύτητα απόκρισης του ελεγκτή.

Στα σχήματα 5.24 – 5.25 φαίνεται η σύγκριση των ελεγκτών ANNC1 και ANNC2 οι οποίοι έχουν εκπαιδευτεί με την χρονοσειρά V_1 .



Σχήμα 5.24 Απόκριση του C_p για την χρονοσειρά εκπαίδευσης V_1 των ελεγκτών ANNC1 και ANNC2

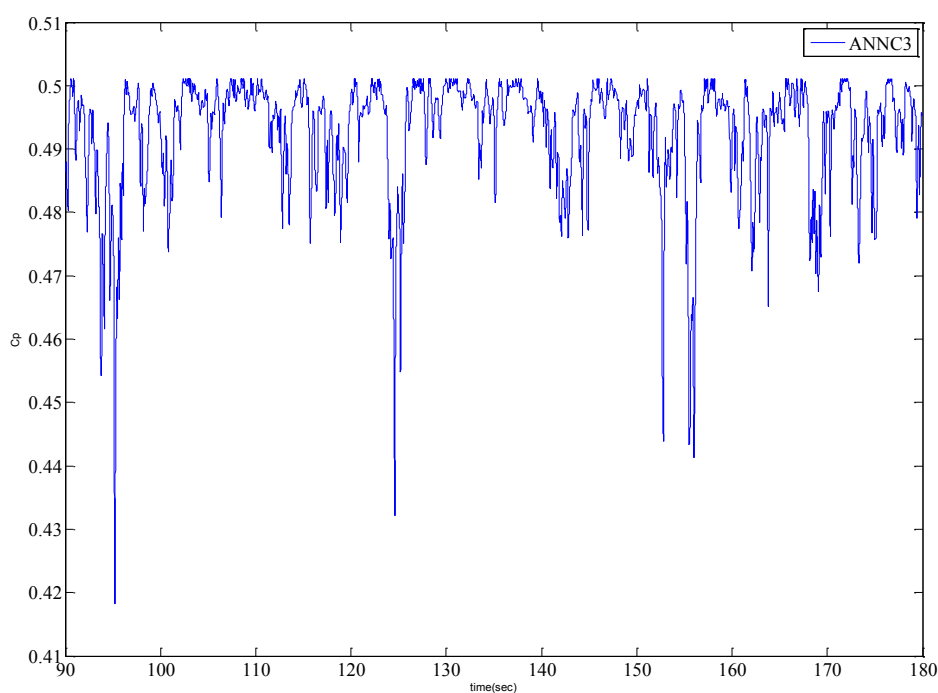


Σχήμα 5.25 Ισχύς εξόδου P_o για την χρονοσειρά εκπαίδευσης V_1 των ελεγκτών ANNC1 και ANNC2

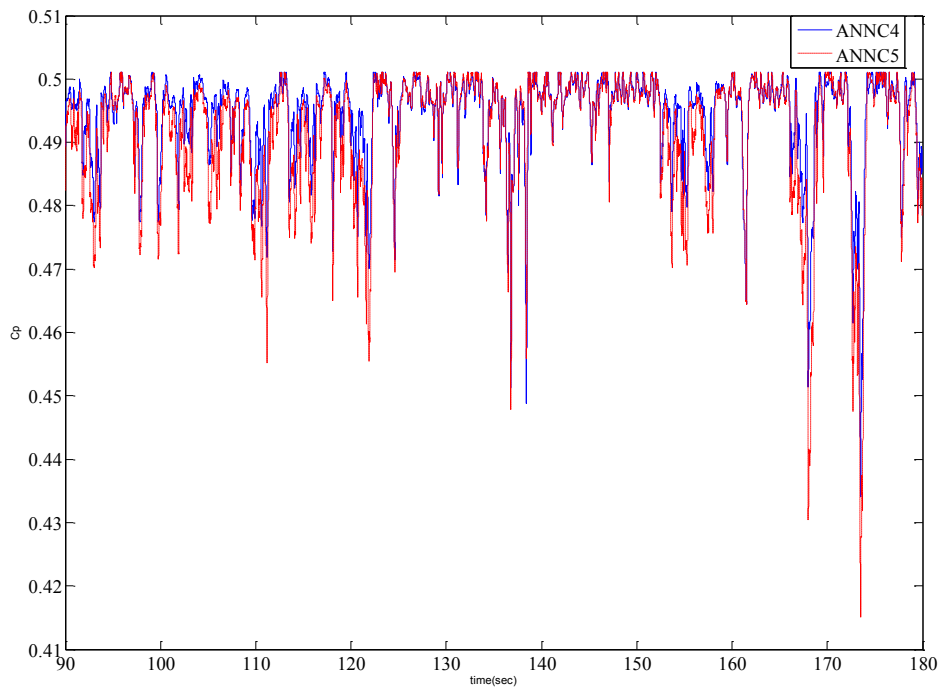
Όπως φαίνεται στα σχήματα 5.24 και 5.25 ο ελεγκτής ANNC1 έχει μεγαλύτερες μειώσεις του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος που φτάνουν μέχρι

το 0.4277 ενώ η μείωση του για τον ελεγκτή ANNC2 είναι αρκετά μικρότερη και φτάνει το 0.4388. Η μέση τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος για τον ελεγκτή ANNC1 είναι **0.4917** και η μέση ισχύς 500.6W ενώ για τον ελεγκτή ANNC2 **0.4941** και 501.4 αντίστοιχα. Οι διαφορές που εμφανίζουν οι ελεγκτές είναι γενικά μικρές ενώ και οι δυο εμφανίζουν υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος και μέση ισχύ.

Στο σχήμα 5.26 φαίνεται η απόκριση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος με ελεγκτή τον ANNC3 ο οποίος έχει εκπαιδευτεί με την χρονοσειρά ανέμου V_2 . Η μέση τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος είναι 0.4927 και η μέση τιμή της ισχύος 540.7W. Η ελάχιστη τιμή του συντελεστή ισχύος που εμφανίζεται είναι 0.4182. Ο ελεγκτής ANNC3 εμφανίζει πολύ καλή απόκριση δεδομένου ότι η χρονοσειρά είναι μεγάλης μεταβλητότητας.



Σχήμα 5.26 Απόκριση του C_p για την χρονοσειρά εκπαίδευσης V_2 του ελεγκτή ANNC3



Σχήμα 5.27 Απόκριση του C_p για την χρονοσειρά εκπαίδευσης V_3 των ελεγκτών ANNC4 και ANNC5

Στο σχήμα 5.27 παρατηρείται η απόκριση των ελεγκτών ANNC4 και ANNC5 στον ισχυρό άνεμο. Ο ελεγκτής ANNC4 έχει μέσο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.4913 και μέση ισχύς εξόδου 3981W. Ο ANNC5 έχει μεγαλύτερες μειώσεις του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος που φτάνουν μέχρι το 0.4151 ενώ η μείωση του για τον ελεγκτή ANNC4 είναι αρκετά μικρότερη και φτάνει το 0.4341. Η μέση τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος για τον ελεγκτή ANNC5 είναι 0.4919 και η μέση ισχύς 4008W. **Οι δυο ελεγκτές εμφανίζουν παρόμοια απόκριση και ταυτόχρονα μεγάλη τιμή μέσης ισχύς και αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος.**

Στον πίνακα 5.8 φαίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των ελεγκτών που βασίζονται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα σε πραγματικές χρονοσειρές ανέμου.

Πίνακας 5.8 Μέσος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος, μέση ισχύς και βύθιση ισχύος για όλους τους νευρωνικούς ελεγκτές για την πραγματική χρονοσειρά εκπαίδευσης ανέμου.

Ελεγκτής	Πραγματική χρονοσειρά	Μέσο C_p	Μέση Ισχύς P_o (W)	Μέγιστη μείωση C_p
ANNC1	V_1	0.4917	500.6	0.4277
ANNC2	V_1	0.4941	501.4	0.4388
ANNC3	V_2	0.4927	540.7	0.4182
ANNC4	V_3	0.4913	3981	0.4341
ANNC5	V_3	0.4919	4008	0.4151

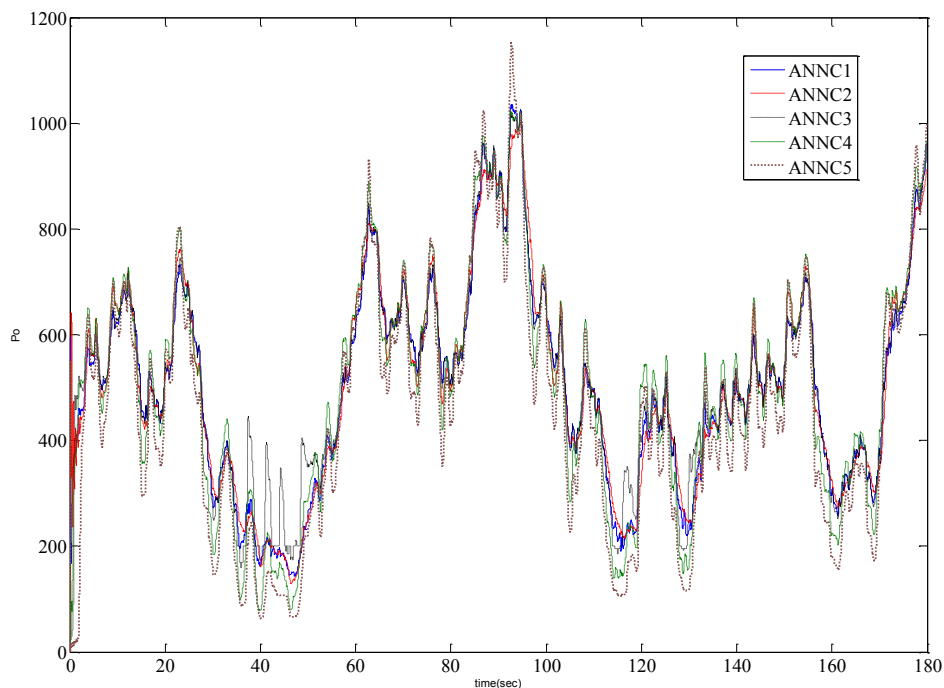
5.5 Προτεινόμενος ελεγκτής που βασίζεται σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί από τις προσομοιώσεις κάθε ελεγκτής έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του. Ο ελεγκτής ANNC1 εμφανίζει την γρηγορότερη απόκριση και συνολικά καλή απόδοση μέσης ισχύς και αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος όμως έχει τις μεγαλύτερες μειώσεις του C_p . Από την άλλη ο ελεγκτής ANNC2 εμφανίζει την μεγαλύτερη μέση ισχύ και αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος με καλή ταχύτητα απόκρισης και μέτρια βύθιση του συντελεστή ισχύος στις μεταβολές. Ο ελεγκτής ANNC3 εμφανίζει μικρότερο μέσο συντελεστή ισχύος το οποίο αντισταθμίζεται από την καλή απόκριση στις μεταβολές και τις μικρές βυθίσεις του συντελεστή ισχύος στις μεγάλες μεταβολές. Από τους ελεγκτές που εκπαιδεύτηκαν με ισχυρό άνεμο ο ANNC4 εμφανίζει καλύτερο μέσο συντελεστή αεροδυναμική ισχύος και μικρότερες βυθίσεις του συντελεστή σε σχέση με τον ANNC5.

Αν και τα παραπάνω δίνουν μια εικόνα για την αποτελεσματικότητα του κάθε ελεγκτή, αποφασιστικής σημασίας παράμετρος για την επιλογή ενός ελεγκτή ως προτεινόμενου για την υλοποίηση του είναι η γενίκευση και η απόκριση που θα παρουσιάζει κάτω από απρόβλεπτες συνθήκες. Η στοχαστικότητα του ανέμου και η μεταβολή των ανεμολογικών συνθηκών ανά εποχή δημιουργεί την ανάγκη υλοποίησης ενός νευρωνικού ελεγκτή ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος ο οποίος θα είναι καθολικός και θα αποκρίνεται ικανοποιητικά σε ασθενής και ισχυρούς

ανέμους, μικρής και μεγάλης μεταβλητότητας, χωρίς να εξαρτάται από άλλες παραμέτρους, όπως οι ελεγκτές με δεδομένες καμπύλες και ασαφή λογική που έχουν δοκιμαστεί έως τώρα.

Επομένως, **εξετάζεται κάθε ελεγκτής** εφαρμόζοντας του **και τις τρεις πραγματικές χρονοσειρές** και υπολογίζονται η μέση ισχύ και ο μέσος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος. Η ισχύς εξόδου P_o για κάθε ελεγκτή όταν εφαρμόζεται η χρονοσειρά V_1 φαίνεται στο σχήμα 5.28 και τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για κάθε ελεγκτή σε κάθε χρονοσειρά φαίνονται στον πίνακα 5.9.



Σχήμα 5.28 Ισχύς εξόδου P_o για κάθε ελεγκτή για την χρονοσειρά V_1

Αντίστοιχα μπορούν να αναπαρασταθούν και οι ισχύς εξόδου P_o και για τις χρονοσειρές V_2 και V_3 .

Πίνακας 5.9 Μέσος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος και μέση ισχύς για όλους τους νευρωνικούς ελεγκτές για κάθε πραγματική χρονοσειρά ανέμου.

Ελεγκτής	V ₁		V ₂		V ₃	
	Μέσο C _p	Μέσο P _o	Μέσο C _p	Μέσο P _o	Μέσο C _p	Μέσο P _o
ANNC1	0.4917	503.186	0.4934	571.665	0.4844	3742
ANNC2	0.4947	504.143	0.4951	572.457	0.462	3047
ANNC3	0.4842	500.514	0.4929	571.656	0.4913	3807
ANNC4	0.4824	500.352	0.4443	531.549	0.4933	3692
ANNC5	0.4220	455.984	0.4359	525.558	0.4917	3876

Όπως διαπιστώνεται και από τα παραπάνω ο ελεγκτής ANNC1 παρουσιάζει **άριστη συμπεριφορά σε ασθενής ανέμους μέτριας και μεγάλης μεταβλητότητας** ενώ έχει **πολύ καλή συμπεριφορά και σε ισχυρούς ανέμους**. Ελάχιστα βελτιωμένη απόκριση έχει ο ελεγκτής ANNC2 για ασθενής ανέμους ενώ σε ισχυρούς παρουσιάζει μειονεκτικά αλλά όχι απογοητευτικά αποτελέσματα σε σχέση με τον ANNC1. Βασική διαφορά των δυο ελεγκτών είναι ο αλγόριθμος εκπαίδευσης.

Επομένως, παρατηρούμε ότι ο ελεγκτής που εκπαιδεύτηκε με τον Levenberg-Marquardt παρουσιάζει βελτιωμένη γενίκευση των δεδομένων εισόδου του σε σχέση με τον ελεγκτή που εκπαιδεύτηκε με τον αλγόριθμο Gradient Descent. Ωστόσο, ο ελεγκτής ANNC2 που εκπαιδεύτηκε με τον αλγόριθμο Gradient Descent εμφανίζει **άριστα αποτελέσματα σε ασθενής ανέμους**.

Ο ANNC3 εμφανίζει **χαμηλότερο μέσο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος** για ασθενής ανέμους σε σχέση με τους ANNC1 και ANNC2, παρουσιάζει όμως μεγαλύτερο μέσο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος για ισχυρούς ανέμους. **Οι ελεγκτές ANNC4 και ANNC5 εμφανίζουν μη ικανοποιητική γενίκευση των δεδομένων τους** καθώς **σε ασθενής ανέμους** έχουν χαμηλό μέσο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος ενώ **σε ισχυρό άνεμο παρουσιάζουν βελτιωμένη απόδοση** σε σχέση με τους ελεγκτές ANNC1, ANNC2 και ANNC3. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των ελεγκτών ANNC4 και ANNC5 επιβεβαιώνεται ότι οι ελεγκτές που έχουν εκπαιδευτεί με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt εμφανίζουν καλύτερη γενίκευση σε σχέση με τους ελεγκτές που έχουν εκπαιδευτεί με τον αλγόριθμο Gradient Descent.

Συμπερασματικά, ο τεχνητός νευρωνικός ελεγκτής που μπορεί να ανταποκριθεί ικανοποιητικά σε όλο το εύρος ταχυτήτων του αέρα είναι ο ANNC1 ενώ ο νευρωνικός ελεγκτής που παρουσιάζει άριστη συμπεριφορά σε ασθενής ανέμους είναι ο ANNC2. Στη συνέχεια θα συγκριθεί ο προτεινόμενος ελεγκτής ANNC1 με τις μεθόδους των δεδομένων χαρακτηριστικών καμπυλών και της ασαφούς λογικής προκειμένου να διαπιστωθούν τα πλεονεκτήματα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων στον έλεγχο των ανεμογεννητριών.

Κεφάλαιο 6

Σύγκριση των συστημάτων ελέγχου ανεμογεννήτριας

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεθόδων ελέγχου ανεμογεννήτριας με δεδομένες καμπύλες και ασαφούς λογικής, οι οποίες έχουν δοκιμαστεί στο εργαστήριο και η μέθοδος ελέγχου τους έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 3, και ταυτόχρονα, τα αποτελέσματα των μεθόδων της ασαφούς λογικής και της μεθόδου που χρησιμοποιεί δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα της μεθόδου ελέγχου ανεμογεννήτριας με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Η μέθοδος με δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες εμφανίζει σφάλματα αρχικών υπολογισμών και γήρανσης. Στο εργαστήριο έχει κατασκευαστεί ένα μοντέλο προσομοίωσης της μεθόδου με δεδομένες καμπύλες (OCT Controller) για την σύγκριση των μεθόδων. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου με δεδομένες καμπύλες ξεπεράστηκαν εισάγοντας την **μέθοδο ελέγχου ανεμογεννήτριας με ασαφή λογική**. Η μέθοδος αυτή **δεν χρησιμοποιεί προγενέστερη γνώση** αλλά βασίζεται σε ένα **σύνολο ασαφών κανόνων** οι οποίοι προσδιορίζονται από την εμπειρία. Η εισαγωγή κανόνων από την εμπειρία καθιστά το σύστημα **επιρρεπές σε λάθη** ενώ ταυτόχρονα δεν του επιτρέπει να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων του ανέμου.

Με την **εισαγωγή των τεχνητών νευρωνικών δικτύων** στον έλεγχο ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος στο σύστημα ανεμογεννήτριας φαίνεται να εξαλείφονται τα προβλήματα που εμφάνιζαν οι προηγούμενες μέθοδοι. Τα νευρωνικά δίκτυα με την ικανότητα τους να **εκπαιδεύονται** μπορούν ταυτόχρονα, να **αξιοποιούν την προγενέστερη γνώση** η οποία είναι διαθέσιμη ενώ ταυτόχρονα να μην εξαρτιέται η λειτουργίας τους από τις δεδομένες καμπύλες αλλά να **προσαρμόζονται στις αλλαγές** του περιβάλλοντος τους.

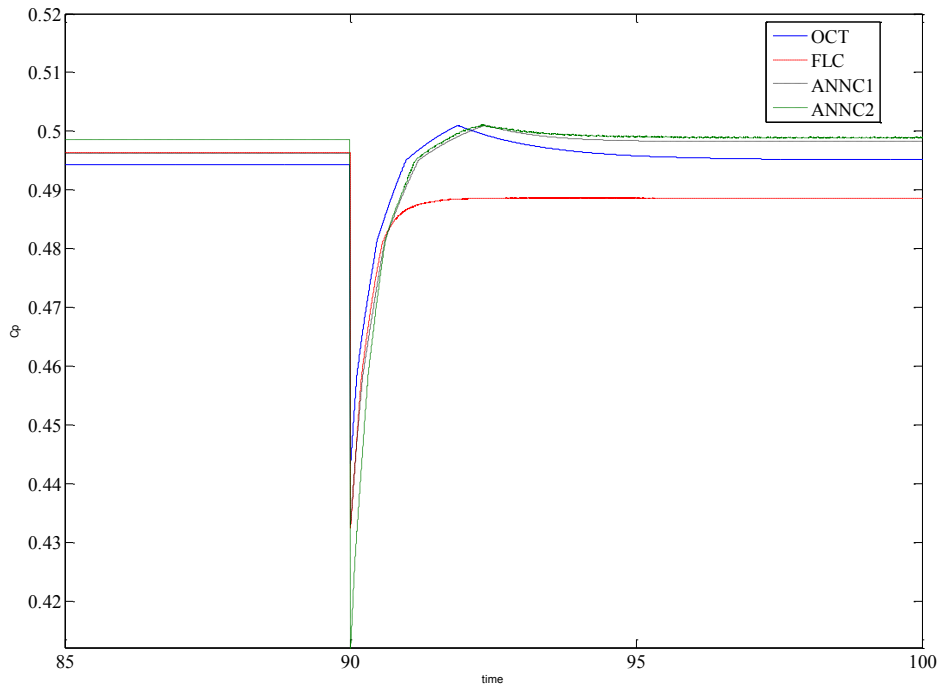
Η σύγκριση των μεθόδων ελέγχου που ακολουθεί πραγματοποιείται με βάση την **απόκριση τους στη μόνιμη κατάσταση** σε βηματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου και σε δεύτερο στάδιο με βάση την **απόκριση τους σε πραγματικές χρονοσειρές ανέμου**. Η εξέταση των μεθόδων σε βηματικές αλλαγές της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου, ενώ στην πραγματικότητα φαίνονται ως μη ρεαλιστική κατάσταση, πραγματοποιούνται κυρίως ώστε να παρακολουθηθεί η ταχύτητα που χρειάζεται ο ελεγκτής ώστε να επιστρέψει το σύστημα ξανά στην μόνιμη κατάσταση. Στο στάδιο παρακολούθησης των ελεγκτών σε πραγματικές χρονοσειρές ανέμου εξετάζεται η συνολική συμπεριφορά του ελεγκτή σε γρήγορες μεταβολές παρακολουθώντας τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος αλλά και την ισχύ εξόδου.

6.2 Διερεύνηση απόκρισης σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

Σε αυτό το στάδιο οι μέθοδοι ελέγχου συγκρίνονται οι μέθοδοι ελέγχου με βάση την απόκριση τους σε βηματική αύξηση και μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Οι νευρωνικοί ελεγκτές θα συγκριθούν με τον ελεγκτή με δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες (OCT Controller) και τον ελεγκτή βασισμένο σε ασαφή λογική (Fuzzy Logic Controller). Από τους νευρωνικούς ελεγκτές επιλέγονται ο προτεινόμενος ελεγκτής ANNC1 και ο ελεγκτής ANNC2 ο οποίος παρουσίαζε την βέλτιστη απόκριση σε ασθενής ανέμους.

6.2.1 Σύγκριση συστημάτων ελέγχου ανεμογεννήτριας σε απότομη αύξηση της ταχύτητας του ανέμου

Αρχικά τα συστήματα συγκρίνονται σε **βηματική αύξηση της μέσης ταχύτητας** του ανέμου από τα 6m/s στα 9m/s. Οι μέθοδοι ελέγχου συγκρίνονται με βάση τις βηματικές μεταβολές καθώς έτσι δίνεται ένα **μέτρο για την ταχύτητα και ευστάθεια των ελεγκτών**. Κριτήρια για την αξιολόγηση των μεθόδων ελέγχου είναι **ο χρόνος απόκρισης** για την επαναφορά του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος σε μόνιμη κατάσταση, **η μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή** την στιγμή της μεταβολής και **η τελική τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή** μετά την βηματική μεταβολή του ανέμου.



Σχήμα 6.1 Απόκριση του C_p σε βηματική μεταβολή ανέμου από τα 6m/s στα 9m/s για τους OCT , FLC , $ANNC1$ και $ANNC2$

Στο σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η απόκριση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος για τις μεθόδους ελέγχου OCT , FLC , $ANNC1$ και $ANNC2$ σε βηματική αύξηση του ανέμου από τα 6m/s στα 9m/s . Όπως παρατηρείται, ο **OCT** από αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.4943 στα 6m/s καταλήγει μετά την μεταβολή σε 0.4952 μετά από **7.3 δευτερόλεπτα** με μέση τιμή 0.4945 . Αντίστοιχα, ο **FLC** από αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.4963 πριν την μεταβολή καταλήγει μετά από **2.4 δευτερόλεπτα** σε 0.4886 με μέση τιμή 0.4923 .

Ο **ελεγκτής $ANNC1$** από αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.4963 καταλήγει μετά την μεταβολή σε 0.4982 μετά από **4.22 δευτερόλεπτα** με μέση τιμή 0.497 και ο **$ANNC2$** από αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.4986 πριν την μεταβολή καταλήγει μετά από **5.2 δευτερόλεπτα** σε 0.499 με μέση τιμή 0.4985 . Η μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος, στο χρόνο $t = 90 \text{ sec}$ όταν πραγματοποιείται η βηματική μεταβολή του ανέμου, για τον OCT φτάνει στο 0.4433 , για τον FLC το 0.4325 και για τους $ANNC1$ και $ANNC2$, 0.433 και 0.4121 αντίστοιχα. Συγκεντρωτικά τα παραπάνω φαίνονται στον πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1 Απόκριση C_p σε βηματική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου από τα 6m/s στα 9m/s

Μέθοδος ελέγχου	C_p σε μόνιμη κατάσταση		Ελάχιστη τιμή C_p	Χρόνος απόκρισης (sec)
	6m/s	9m/s		
OCT	0.4943	0.4952	0.4433	7.3
FLC	0.4963	0.4886	0.4325	2.4
ANNC1	0.4963	0.4982	0.433	4.22
ANNC2	0.4986	0.499	0.4121	5.2

Διαπιστώνεται ότι, οι νευρωνικοί ελεγκτές ANNC1 και ANNC2 παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος σε σύγκριση με της μεθόδους OCT και FLC. Για ταχύτητα ανέμου 6m/s ο ελεγκτής ANNC2 έχει την μεγαλύτερη τιμή C_p να εμφανίζει όμως αργή επαναφορά του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος στην μόνιμη κατάσταση σε σχέση με τους ελεγκτές ANNC1 και FLC. Οι ελεγκτές FLC και ANNC1 ενώ για ταχύτητα ανέμου 6m/s ξεκινούν με τον ίδιο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος, για ταχύτητα ανέμου 9m/s ο ANNC1 βελτιώνει το C_p σε αντίθεση με τον FLC του οποίου ο αεροδυναμικός συντελεστής μειώνεται σημαντικά.

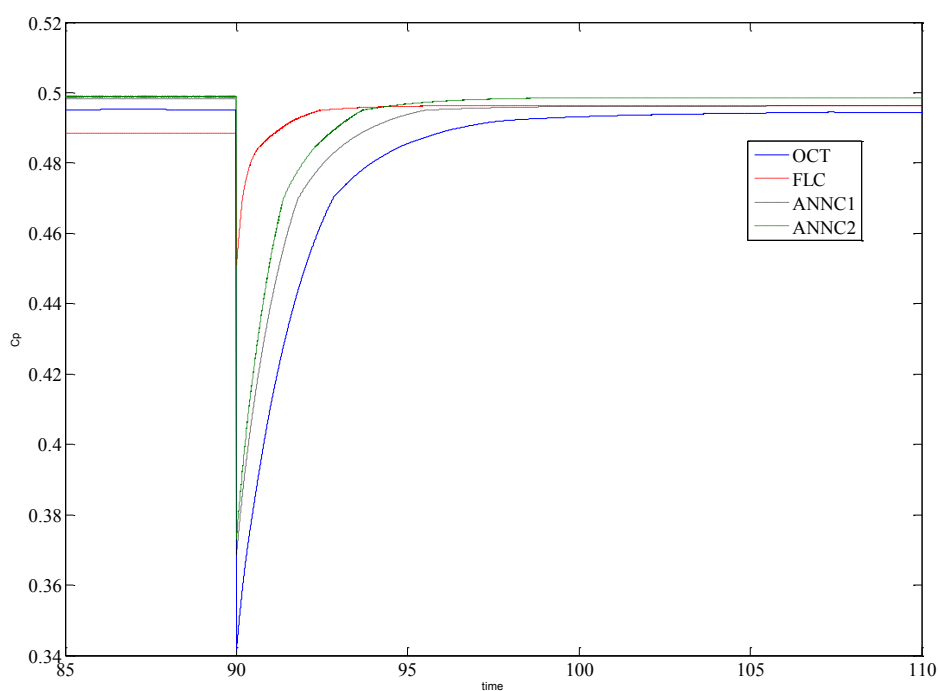
Συνολικά, συνυπολογίζοντας την μικρή μείωση αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος και τον μικρό χρόνο απόκρισης που έχει ο ελεγκτής ANNC1 παρατηρείται μια συνολικά ικανοποιητική συμπεριφορά του ελεγκτή αυτού σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους.

6.2.2 Σύγκριση συστημάτων ελέγχου ανεμογεννήτριας σε απότομη μείωση της ταχύτητας του ανέμου

Στο δεύτερο στάδιο αξιολόγησης των μεθόδων ελέγχου εξετάζεται η συμπεριφορά των ελεγκτών OCT, FLC, ANNC1 και ANNC2 σε απότομη μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Στο σχήμα 6.2 φαίνεται η απόκριση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος για τους OCT, FLC, ANNC1 και ANNC2 για βηματική μείωση του ανέμου από τα 9m/s στα 6m/s. Παρατηρείται ότι, ο OCT από αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.4952 καταλήγει μετά την μεταβολή σε 0.4943 μέσα σε 15

δευτερόλεπτα με μέση τιμή 0.4934. Αντίστοιχα, ο **FLC** από αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.4885 πριν την μεταβολή καταλήγει μετά από **5.97 δευτερόλεπτα** σε 0.4963 με μέση τιμή 0.4922.

Ο **ελεγκτής ANNC1** από αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.4983 καταλήγει μετά την μεταβολή σε 0.496 μετά από **7.18 δευτερόλεπτα με μέση τιμή 0.4963** και ο **ANNC2** από αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος 0.499 πριν την μεταβολή καταλήγει μετά από **7.35 δευτερόλεπτα** σε 0.4985 με μέση τιμή **0.4979**. Η μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος, στο χρόνο $t = 90 \text{ sec}$ όταν πραγματοποιείται η βηματική μεταβολή του ανέμου, για τον **OCT** φτάνει στο 0.3419 για τον **FLC** το 0.4511 και για τους **ANNC1** και **ANNC2**, 0.3685 και 0.3734 αντίστοιχα. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των μεθόδων ελέγχου για απότομη μείωση της ταχύτητας του ανέμου φαίνονται στον πίνακα 6.2.



Σχήμα 6.2 Απόκριση του C_r για βηματική μεταβολή ανέμου από τα 9m/s στα 6m/s για τους *OCT*, *FLC*, *ANNC1* και *ANNC2*

Πίνακας 6.2 Απόκριση C_p σε βηματική μείωση της ταχύτητας του ανέμου

Μέθοδος ελέγχου	C_p σε μόνιμη κατάσταση		Ελάχιστη τιμή C_p	Χρόνος απόκρισης (sec)
	9m/s	6m/s		
OCT	0.4952	0.4943	0.3419	15
FLC	0.4885	0.4963	0.4511	5.97
ANNC1	0.4983	0.4963	0.3685	7.18
ANNC2	0.499	0.4985	0.3734	7.35

Διαπιστώνεται ότι **οι νευρωνικοί ελεγκτές** εξακολουθούν και στην απότομη μείωση της ταχύτητας του ανέμου να **εμφανίζουν μεγαλύτερο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος** σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Οι ελεγκτές ANNC1 και ANNC2 εμφανίζουν πολύ υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος για ταχύτητα ανέμου 9m/s σε σχέση με τους OCT και FLC. **Ο FLC έχει την γρηγορότερη απόκριση με μειονεκτικότερα αποτελέσματα** όμως στην απόκριση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους ελέγχου το οποίο οφείλεται στην αδυναμία του ελεγκτή να λειτουργήσει σε όλο το εύρος των ταχυτήτων του ανέμου όπως οι νευρωνικοί ελεγκτές.

Συμπερασματικά, από τα πειράματα των βηματικών μεταβολών, φαίνεται ότι η βελτιωμένη εικόνα που παρουσιάζουν **οι νευρωνικοί ελεγκτές** οφείλεται στην διαδικασία της εκπαίδευσης και στον σχεδιασμό τους. Οι συγκεκριμένοι ελεγκτές **έχουν εκπαιδευτεί σε χαμηλές ταχύτητες πραγματικού ανέμου**, ενώ οι **κατάλληλες παραμετροποιήσεις** για τον τερματισμό της εκπαίδευσης, η **επιλογή του σωστού αριθμού νευρώνων** και η **αρχιτεκτονική της απευθείας ανάδρασης** επιτρέπουν στους ελεγκτές να γενικεύουν με αποτελεσματικότητα τα δεδομένα τους χωρίς να εμφανίζονται φαινόμενα υπερ-εκπαίδευσης.

6.3 Διερεύνηση απόκρισης σε μεταβατική λειτουργία

Σε αυτό το στάδιο οι μέθοδοι ελέγχου συγκρίνονται με βάση την απόκριση τους σε **πραγματικές χρονοσειρές ανέμου**. Από τους νευρωνικούς ελεγκτές επιλέγεται ο προτεινόμενος ελεγκτής ANNC1 και συγκρίνεται με τις μεθόδους OCT

και FLC. Οι ανεμογεννήτριες προορίζονται να λειτουργούν κάτω από συγκεκριμένες ανεμολογικές συνθήκες σε μια περιοχή. Αυτές, οι συνθήκες μπορεί να αλλάζουν ανάλογα με τις εποχές. Έτσι κρίνεται απαραίτητο να εξεταστεί η λειτουργία των ελεγκτών σε πραγματικές συνθήκες έτσι ώστε να διαπιστωθεί η απόκριση τους στις γρήγορες, στοχαστικές μεταβολές του ανέμου.

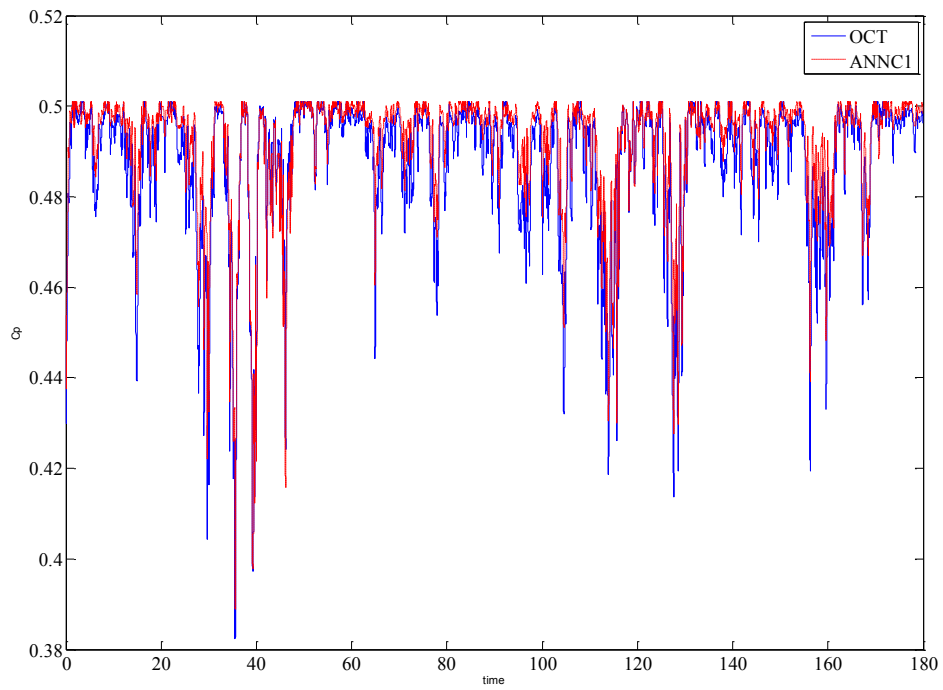
Με δεδομένες τις πραγματικές χρονοσειρές ανέμου που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των νευρωνικών ελεγκτών πραγματοποιούνται **τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις**. Στο πρώτο στάδιο συγκρίνονται οι μέθοδοι ελέγχου σε **ασθενή άνεμο μέτριας μεταβλητότητας**, σε δεύτερο στάδιο σε **ασθενή άνεμο μεγάλης μεταβλητότητας** και σε τρίτο στάδιο με **ισχυρό άνεμο μέτριας μεταβλητότητας**.

Να επισημανθεί ότι ο νευρωνικός ελεγκτής ANNC1 έχει εκπαιδευτεί με ασθενή άνεμο μέτριας μεταβλητότητας και οι νευρώνες του έχουν καθοριστεί στους 17. Η **σύγκριση των μεθόδων** γίνεται με βάση τη **μέση και ελάχιστη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος** και την **μέση τιμή της ισχύς εξόδου** της ανεμογεννήτριας. Η μέση τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος παρέχει εικόνα για τη συνολική συμπεριφορά του ελεγκτή για κάθε πραγματική χρονοσειρά που θα εφαρμοστεί. Η μείωση του C_p παρακολουθείται καθώς η επαναφορά του συντελεστή ισχύος σε υψηλές τιμές δίνει ένα μέτρο για την ταχύτητα του ελεγκτή ενώ η μέση ισχύς αποτελεί ουσιαστικά το τελικό αποτέλεσμα εφαρμογής του ελεγκτή.

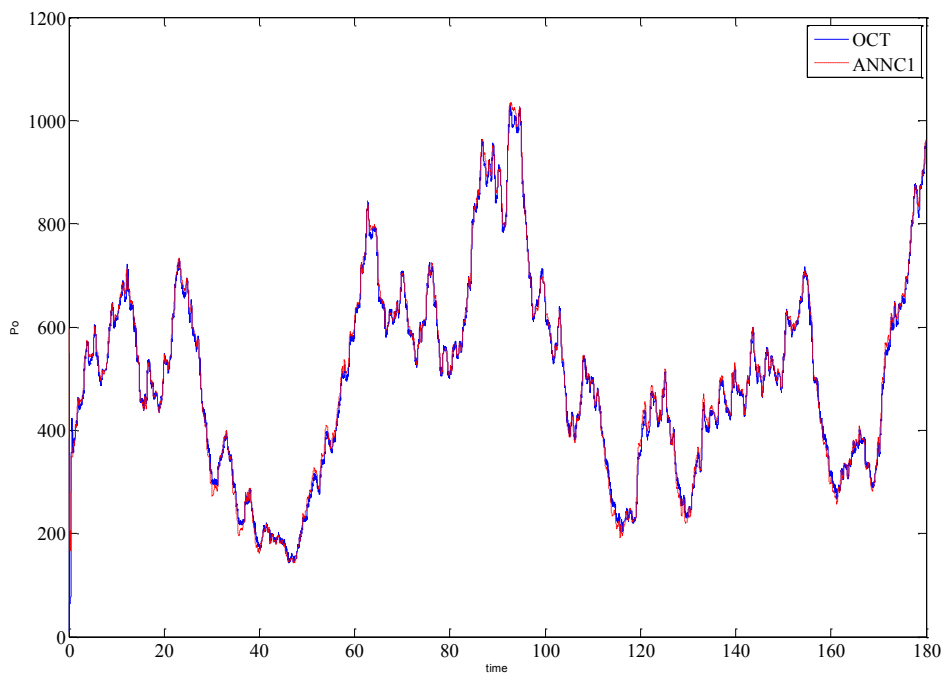
6.3.1 Σύγκριση συστημάτων ελέγχου ανεμογεννήτριας σε ασθενή άνεμο μέτριας μεταβλητότητας

Σε αυτό το στάδιο συγκρίνονται **οι ελεγκτές** OCT, FLC και ANNC1 όταν στο σύστημα της ανεμογεννήτριας εφαρμόζεται **ασθενής άνεμος μέτριας μεταβλητότητας** (V_1).

Στα σχήματα 6.3 και 6.4 συγκρίνονται ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p και η ισχύς εξόδου P_o για τις μεθόδους ελέγχου OCT και ANNC1.



Σχήμα 6.3 Σύγκριση απόκρισης του C_p για την πραγματική χρονοσειρά ανέμου V_1 για τις μεθόδους OCT και ANNCI



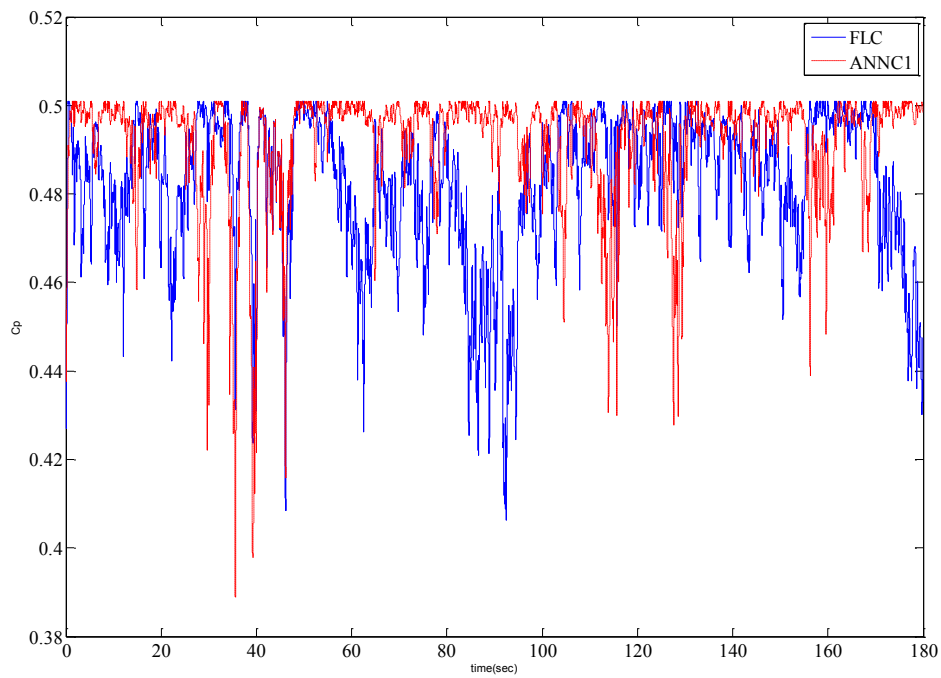
Σχήμα 6.4 Σύγκριση της ισχύς εξόδου P_o για την πραγματική χρονοσειρά ανέμου V_1 για τις μεθόδους OCT και ANNCI

Η μέση τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος με την μέθοδο OCT είναι **0.4878** και η ελάχιστη τιμή που φτάνει είναι 0.3824. Βελτιωμένα αποτελέσματα σε σχέση με τον OCT εμφανίζει ο ελεγκτής ANNC1 με μέση και ελάχιστη τιμή αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος **0.4917 και 0.3889 αντίστοιχα**. Η μέση τιμή της ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας με την μέθοδο OCT είναι 500.2W ενώ με τον ANNC1 503.2W.

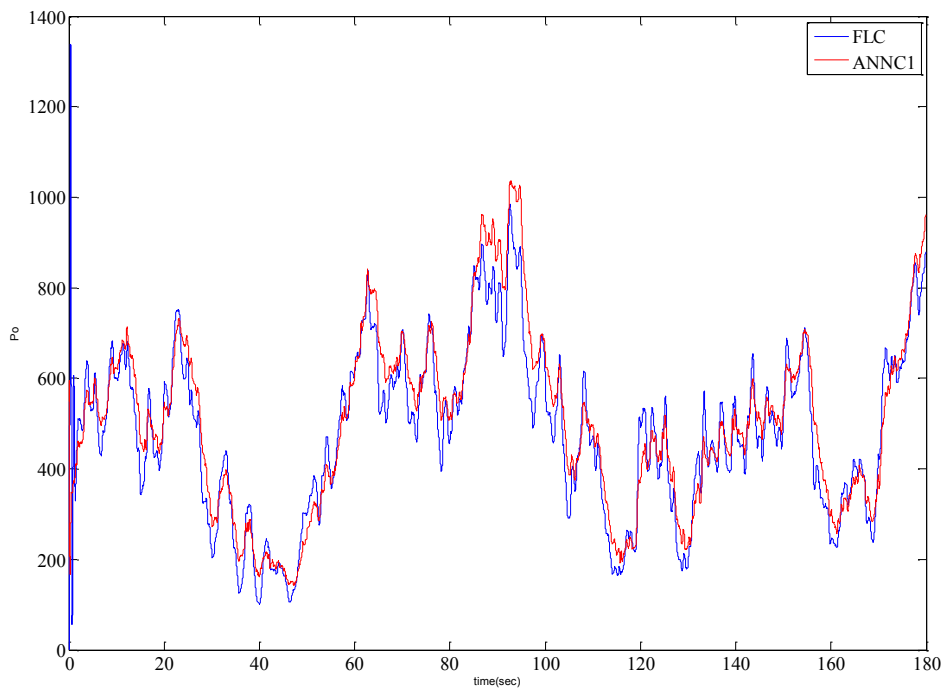
Παρατηρείται ότι η συμπεριφορά των δυο ελεγκτών είναι παρόμοια, καθώς στην πρώτη απότομη μείωση της ταχύτητας του ανέμου περίπου στα 40sec, και στις δυο περιπτώσεις ελεγκτών, ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος μειώνεται απότομα. Ο νευρωνικός ελεγκτής όμως, σε όλες τις περιπτώσεις στις οποίες υπάρχουν απότομες μεταβολές, παρουσιάζει μικρότερη μείωση του C_p με αποτέλεσμα να εμφανίζει μεγαλύτερη μέση τιμή αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος και μεγαλύτερη τιμή μέσης ισχύος.

Στη συνέχεια συγκρίνονται ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p και η ισχύς εξόδου P_o για τις μεθόδους ελέγχου FLC και ANNC1, όταν σαν είσοδος στο σύστημα της ανεμογεννήτριας εφαρμόζεται η πραγματική χρονοσειρά ανέμου V_1 όπως φαίνεται στα σχήματα 6.5 και 6.6. Η μέση τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος με την μέθοδο FLC είναι **0.4825, 2% μικρότερη** από την τιμή του νευρωνικού ελεγκτή, και η ελάχιστη τιμή που φτάνει είναι 0.4063. Η μέση τιμή της ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας με την μέθοδο FLC είναι **481.5W, 4.5% μικρότερη** από την αντίστοιχη ισχύ εξόδου με την μέθοδο του νευρωνικού ελεγκτή.

Όπως παρατηρείται από το σχήμα 6.5 ο νευρωνικός ελεγκτής έχει μεγαλύτερες βυθίσεις αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος σε σχέση με τον ελεγκτή FLC. Όμως όπως φαίνεται και στις χρονικές στιγμές $t = 60\text{sec}$ και $t = 90\text{sec}$ ο ελεγκτής FLC παρουσιάζει μια εκτεταμένη μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος στις απότομες αυξήσεις της ταχύτητας του ανέμου σε αντίθεση με τον νευρωνικό ελεγκτή. Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος του νευρωνικού ελεγκτή παρουσιάζει μεγάλες μειώσεις στις απότομες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου οι οποίες όμως είναι μικρής διάρκειας και ο ελεγκτής επαναφέρει τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα σε υψηλές τιμές.



Σχήμα 6.5 Σύγκριση απόκρισης του C_p για την πραγματική χρονοσειρά ανέμου V_1 για τις μεθόδους FLC και ANNCI



Σχήμα 6.5 Σύγκριση της ισχύς εξόδου P_o για την πραγματική χρονοσειρά ανέμου V_1 για τις μεθόδους FLC και ANNCI

Στον πίνακα 6.3 παρουσιάζονται συνοπτικά ο μέσος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος και η μέση ισχύς για τις προσομοιώσεις με την χρονοσειρά V_1 για τους ελεγκτές ANNC1, OCT και FLC.

Πίνακας 6.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μεθόδων ελέγχου για την χρονοσειρά ανέμου V_1

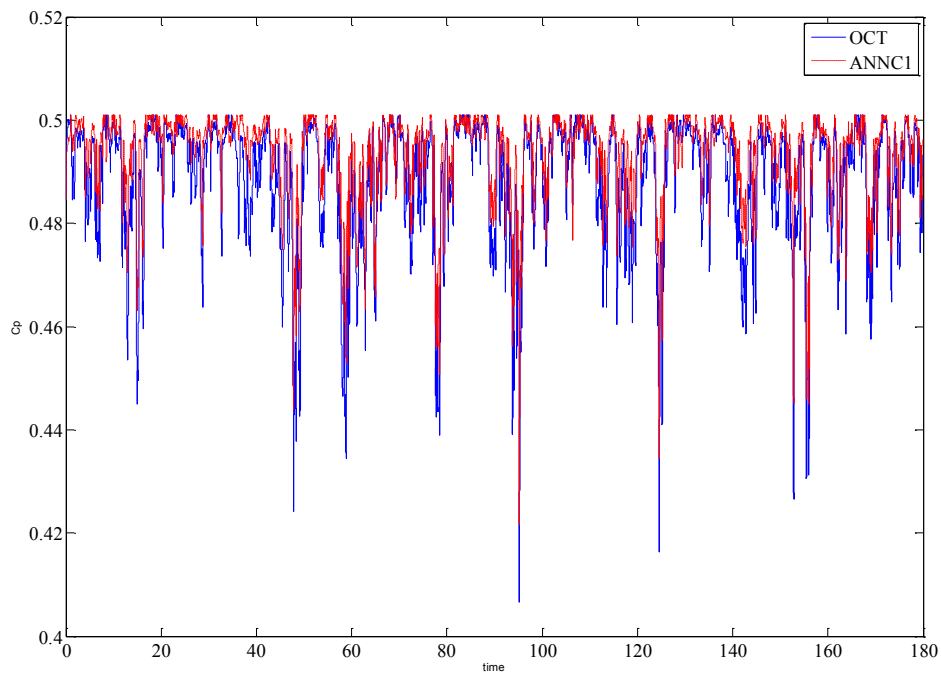
Ασθενής άνεμος μέτριας μεταβλητότητας – V_1			
Μέθοδος ελέγχου	Μέσο C_p	Ελάχιστο C_p	Μέση Ισχύς (W)
OCT	0.4878	0.3824	500.2
FLC	0.4825	0.4063	481.5
ANNC1	0.4917	0.3889	503.2

Συνολικά, διαπιστώνεται ότι ο ελεγκτής ANNC1 υπερέχει, για ασθενή άνεμο μέτριας μεταβλητότητας, έναντι των υπολοίπων μεθόδων στον έλεγχο συστήματος ανεμογεννήτριας εμφανίζοντας υψηλότερο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος και μέση ισχύ. **Η εκπαίδευση του ελεγκτή ANNC1** πάνω σε δεδομένη καμπύλη τον καθιστά ικανό να ακολουθεί με ανάλογο τρόπο, όπως η μέθοδος που είναι βασισμένη σε δεδομένες καμπύλες, τα σημεία μέγιστης ισχύος με **μεγαλύτερη ταχύτητα απόκρισης** και **μικρότερες βυθίσεις** αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος στις απότομες μεταβολές. Εξαιτίας της ταχύτητας και της προσαρμοστικότητας του νευρωνικού ελεγκτή, η εισαγωγή του στο σύστημα ανεμογεννήτριας βελτιώνει την απορρόφηση της αιολικής ενέργειας.

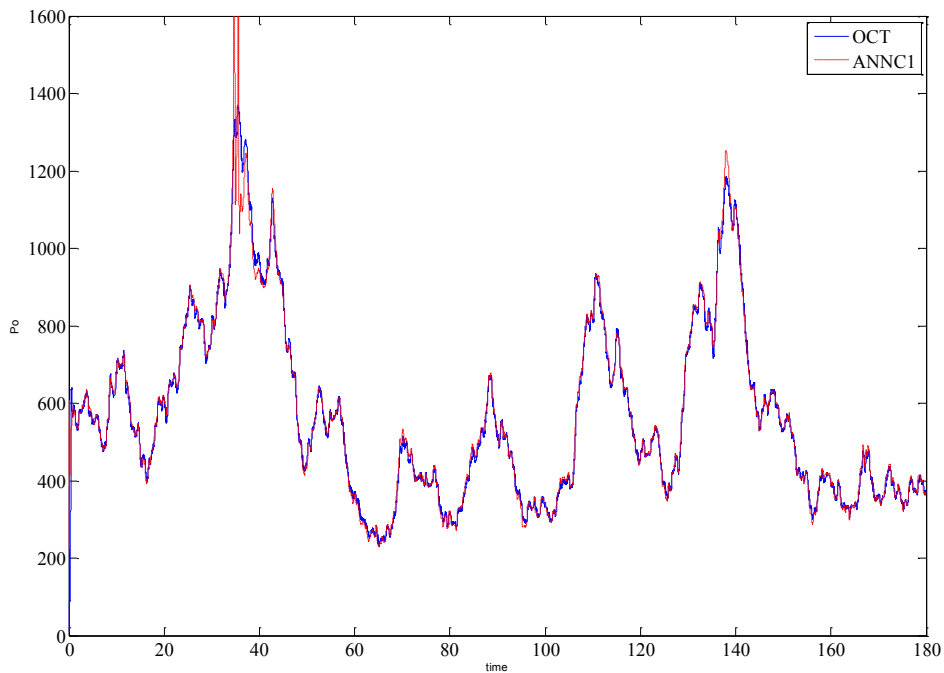
6.3.2 Σύγκριση συστημάτων ελέγχου ανεμογεννήτριας σε ασθενή άνεμο μεγάλης μεταβλητότητας

Σε αυτό το στάδιο συγκρίνονται **οι ελεγκτές OCT, FLC και ANNC1** όταν στο σύστημα της ανεμογεννήτριας εφαρμόζεται **ασθενής άνεμος μεγάλης μεταβλητότητας (V_2)**.

Στα σχήματα 6.6 και 6.7 συγκρίνονται ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p και η ισχύς εξόδου P_o για τις μεθόδους ελέγχου OCT και ANNC1.



Σχήμα 6.6 Σύγκριση απόκρισης του C_p για την πραγματική χρονοσειρά ανέμου V_2 για τις μεθόδους *OCT* και *ANNCI*



Σχήμα 6.7 Σύγκριση της ισχύς εξόδου P_o για την πραγματική χρονοσειρά ανέμου V_2 για τις μεθόδους *OCT* και *ANNCI*

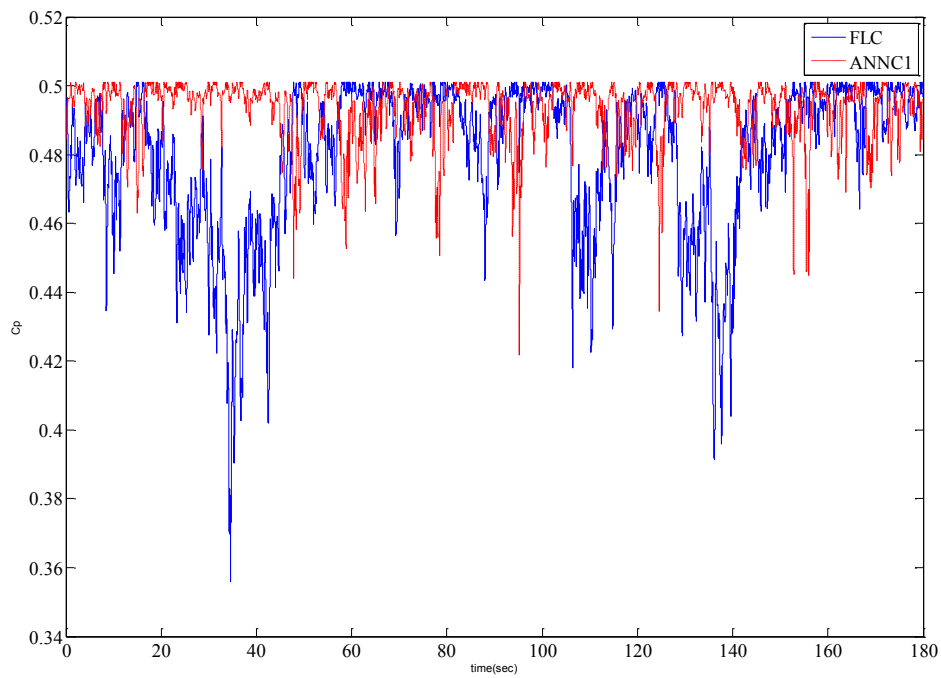
Η μέση τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος με την μέθοδο **OCT**, για την πραγματική χρονοσειρά V_2 , είναι **0.4887** και η ελάχιστη τιμή που φτάνει είναι

0.4067. Βελτιωμένα αποτελέσματα, σε σχέση με τον OCT, εμφανίζει ο ελεγκτής ANNC1 με μέση και ελάχιστη τιμή αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος **0.4934 και 0.4217 αντίστοιχα**. Η μέση τιμή της ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας με την μέθοδο OCT είναι 568.6W ενώ με τον ANNC1 572.5W.

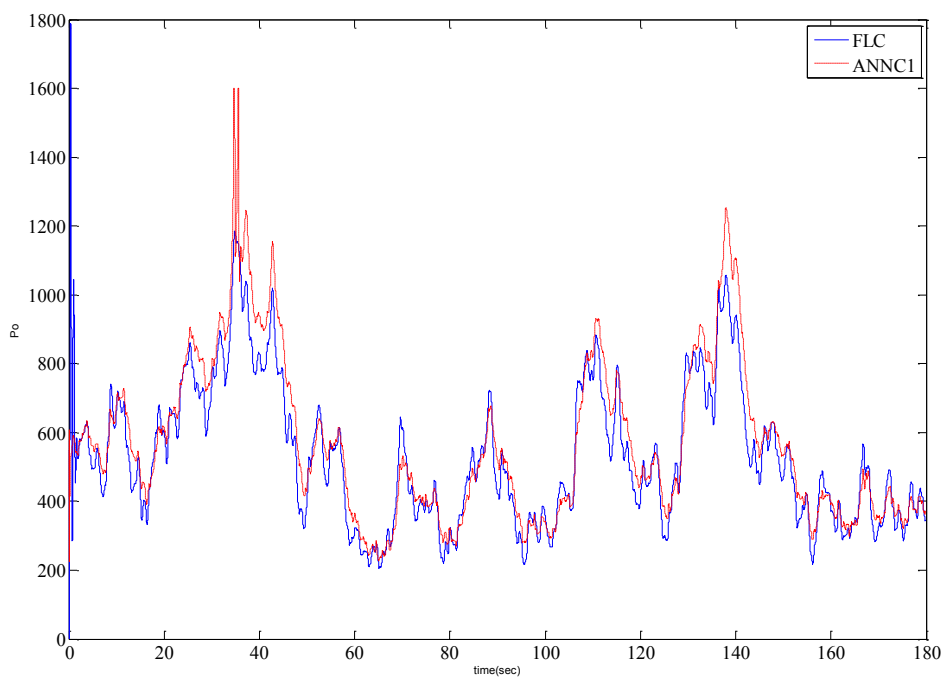
Παρατηρείται ότι η συμπεριφορά των δυο ελεγκτών είναι παρόμοια με τον νευρωνικό ελεγκτή όμως, να εμφανίζει **μεγαλύτερη μέση τιμή** αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος και μεγαλύτερη τιμή μέσης ισχύος. Επίσης, ο νευρωνικός ελεγκτής παρά την μεγάλη μεταβλητότητα του ανέμου **εμφανίζει μικρότερες μειώσεις** του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος σε σχέση με τον ελεγκτή OCT.

Στην συνέχεια, συγκρίνονται ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p και η ισχύς εξόδου P_o για τις μεθόδους ελέγχου FLC και ANNC1, όταν σαν είσοδος στο σύστημα της ανεμογεννήτριας είναι η πραγματική χρονοσειρά ανέμου V_2 , όπως φαίνεται στα σχήματα 6.8 - 6.9. **Η μέση τιμή** του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος με την **μέθοδο FLC είναι 0.4802**, περίπου **3% μικρότερη** από την τιμή του νευρωνικού ελεγκτή και η βύθιση του συντελεστή ισχύος φτάνει το 0.356. **Η μέση τιμή της ισχύος εξόδου** της ανεμογεννήτριας με την **μέθοδο FLC είναι 533.9W**, **6.7% μικρότερη** από την αντίστοιχη ισχύ εξόδου με την μέθοδο του νευρωνικού ελεγκτή.

Στα παρακάτω σχήματα διακρίνεται μια **βασική διαφορά** στην συμπεριφορά των ελεγκτών. **Ο ελεγκτής FLC εμφανίζει σημαντικές βυθίσεις** στον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος κατά την **απότομη αύξηση** της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό περισσότερο εμφανές στις χρονικές στιγμές $t = 40\text{sec}$ και $t = 140\text{sec}$ όπου ο ελεγκτής FLC δεν ανταποκρίνεται τόσο γρήγορα όσο ο νευρωνικός ελεγκτής. Από την άλλη ο **ελεγκτής ANNC1 εμφανίζει μικρές πτώσεις** στον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος στις απότομες μειώσεις της ταχύτητας του ανέμου που **επηρεάζουν όμως ελάχιστα την μέση τιμή** του C_p καθώς η **γρήγορη απόκριση του ελεγκτή** δεν επιτρέπει βυθίσεις του συντελεστή ισχύος κάτω από 0.4217.



Σχήμα 6.8 Σύγκριση απόκρισης του C_p για την πραγματική χρονοσειρά ανέμου V_2 για τις μεθόδους FLC και ANNCI



Σχήμα 6.9 Σύγκριση της ισχύς εξόδου P_o για την πραγματική χρονοσειρά ανέμου V_2 για τις μεθόδους FLC και ANNCI

Στον πίνακα 6.4 παρουσιάζονται συνοπτικά ο μέσος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος και η μέση ισχύς για τις προσομοιώσεις με την χρονοσειρά V_2 για τους ελεγκτές ANNC1, OCT και FLC.

Πίνακας 6.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μεθόδων ελέγχου για την χρονοσειρά ανέμου V_2

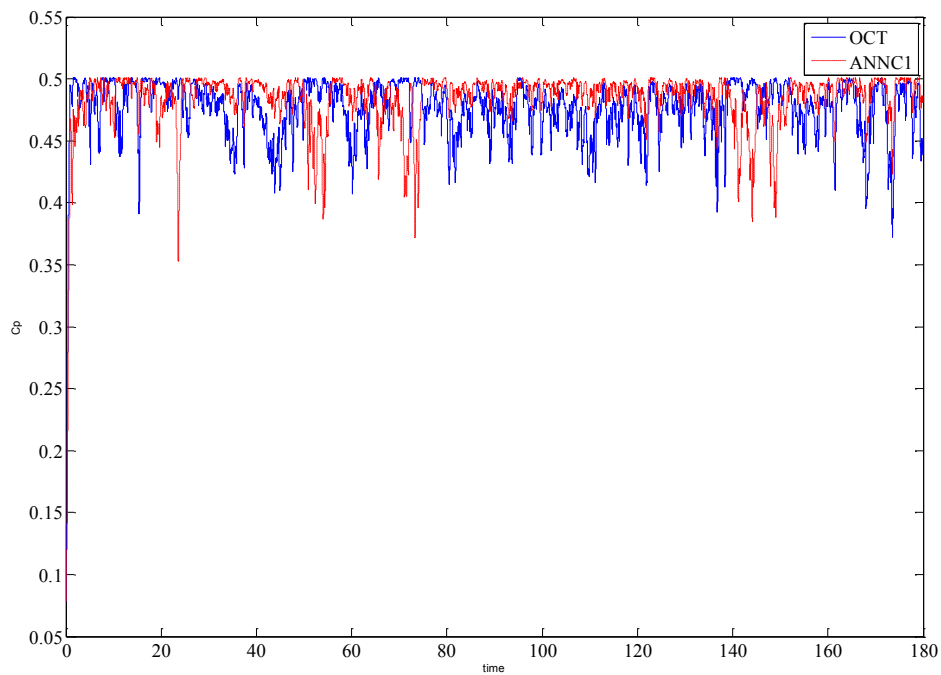
Ασθενής άνεμος μεγάλης μεταβλητότητας – V_2			
Μέθοδος ελέγχου	Μέσο C_p	Ελάχιστο C_p	Μέση Ισχύς (W)
OCT	0.4887	0.4067	568.6
FLC	0.4802	0.356	533.9
ANNC1	0.4934	0.4217	572.5

Συμπερασματικά, ο ελεγκτής ANNC1 εμφανίζει **υψηλότερο C_p** και μέση ισχύ, σε σχέση με τους ελεγκτές FLC και OCT για ασθενή άνεμο μεγάλης μεταβλητότητας. Οι ελεγκτές OCT και ANNC1 παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με το νευρωνικό ελεγκτή να υπερέχει εξαιτίας της γρηγορότερης απόκρισης στις μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου. Ο ελεγκτής που είναι βασισμένος στην ασαφή λογική εμφανίζει αδυναμία στην γρήγορη απόκριση στις απότομες αυξήσεις της ταχύτητας του ανέμου με αποτέλεσμα να υπάρχουν παρατεταμένα διαστήματα κατά τα οποία ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος είναι μικρότερος από 0.48.

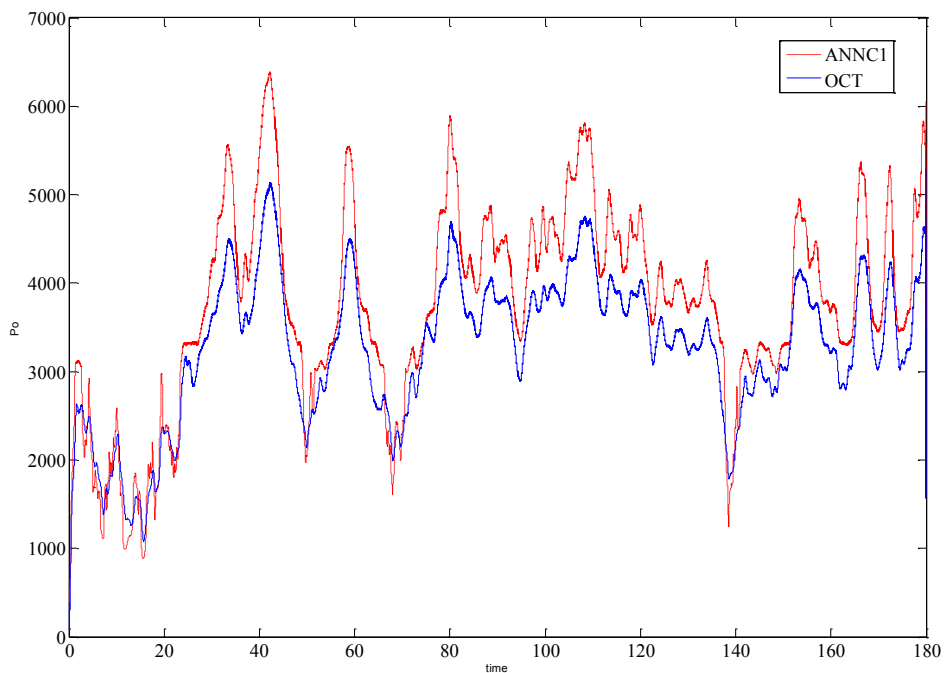
6.3.3 Σύγκριση συστημάτων ελέγχου ανεμογεννήτριας σε ισχυρό άνεμο μέτριας μεταβλητότητας

Στο τρίτο στάδιο συγκρίνονται **οι ελεγκτές OCT, FLC και ANNC1** όταν στο σύστημα της ανεμογεννήτριας εφαρμόζεται **ισχυρός άνεμος μέτριας μεταβλητότητας (V_3)**.

Στα σχήματα 6.10 και 6.11 παρουσιάζονται ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p και η ισχύς εξόδου P_o για τις μεθόδους ελέγχου OCT και ANNC1.



Σχήμα 6.10 Σύγκριση απόκρισης του C_p στην πραγματική χρονοσειρά ανέμου V_3 για τις μεθόδους *OCT* και *ANNCI*



Σχήμα 6.11 Σύγκριση της ισχύος εξόδου P_o στην πραγματική χρονοσειρά ανέμου V_3 για τις μεθόδους *OCT* και *ANNCI*

Η μέση τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος με την μέθοδο **OCT**, για την πραγματική χρονοσειρά V_3 , είναι **0.4763**. Βελτιωμένη απόκριση, σε σχέση με τον

OCT, εμφανίζει ο ελεγκτής ANNC1 με μέση τιμή αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος **0.4844**. Η μέση τιμή της ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας με την μέθοδο OCT είναι 3280W ενώ με τον ANNC1 3742W.

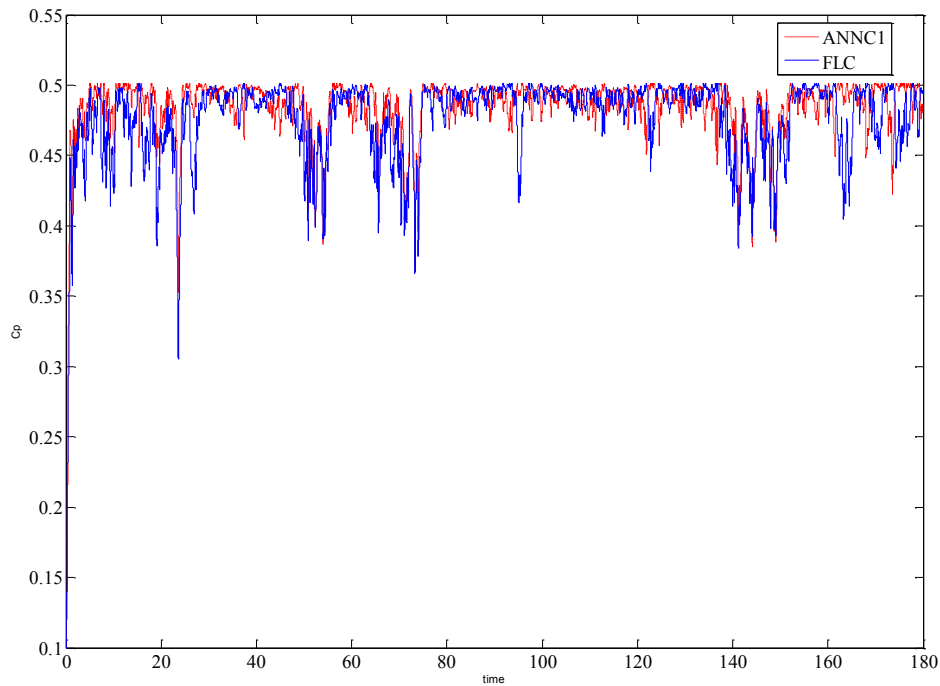
Παρατηρείται ότι ο νευρωνικός ελεγκτής εμφανίζει **μεγαλύτερη μέση τιμή** αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος και μεγαλύτερη τιμή μέσης ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί ότι, ο νευρωνικός ελεγκτής έχει εκπαιδευτεί με ασθενή άνεμο. Παρόλα αυτά η συμπεριφορά του ελεγκτή σε **συνθήκες ανέμου πολύ διαφορετικές** από αυτές για τις οποίες έχει εκπαιδευτεί είναι ικανοποιητική εμφανίζοντας μάλιστα **αρκετά καλύτερη συμπεριφορά** από την μέθοδο των δεδομένων καμπυλών. Επίσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.10, οι ελεγκτές για ισχυρό άνεμο εμφανίζουν βασικές λειτουργικές διαφορές. Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος του νευρωνικού ελεγκτή μειώνεται κατά την μείωση της ταχύτητας του ανέμου ενώ ο ελεγκτής που βασίζεται στις δεδομένες καμπύλες εμφανίζει μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος στην αύξηση της ταχύτητας του ανέμου.

Στην συνέχεια, συγκρίνονται ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p και η ισχύς εξόδου P_o για τις μεθόδους ελέγχου FLC και ANNC1, όταν σαν είσοδος στο σύστημα της ανεμογεννήτριας είναι η πραγματική χρονοσειρά ανέμου V_3 , όπως φαίνεται στα σχήματα 6.12 και 6.13. **Η μέση τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος με την μέθοδο FLC είναι 0.4764. Η μέση τιμή της ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας με την μέθοδο FLC είναι 3362W.**

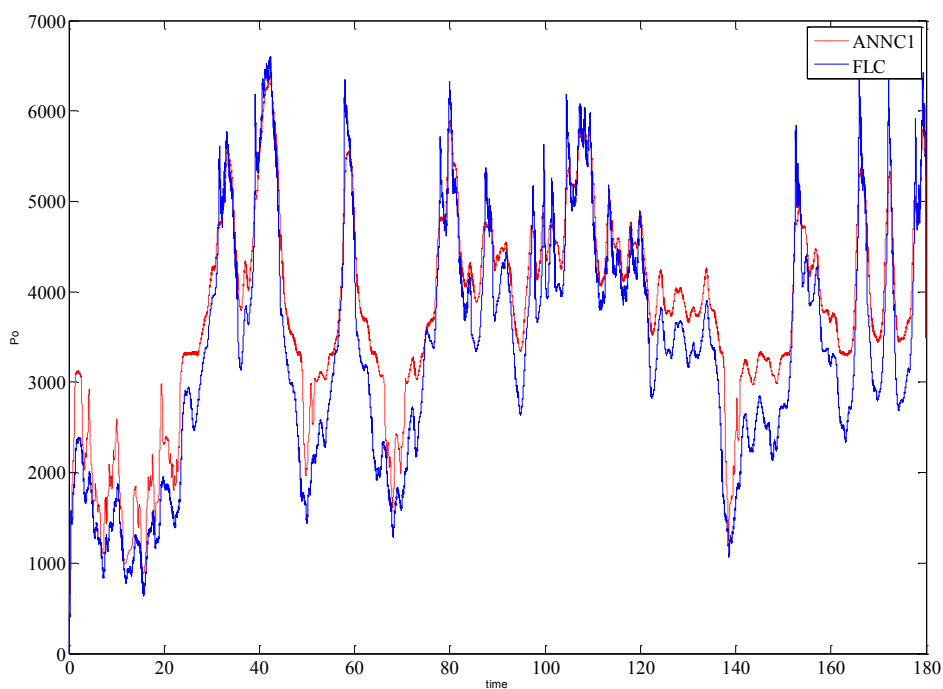
Παρατηρείται ότι ο ελεγκτής που βασίζεται στην ασαφή λογική εμφανίζει **2% μικρότερο μέσο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος και 10% μικρότερη μέση ισχύ** σε σχέση με το νευρωνικό ελεγκτή όταν στο σύστημα της ανεμογεννήτριας εφαρμόζεται ισχυρός άνεμος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα βάρη του ασαφούς ελεγκτή καθορίζονται με την εμπειρία και ο ελεγκτής μπορεί να εμφανίσει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε ένα περιορισμένο εύρος ταχυτήτων του ανέμου. Προκειμένου, ο ελεγκτής που βασίζεται στην ασαφή λογική, να έχει ικανοποιητική συμπεριφορά σε ισχυρό άνεμο πρέπει να επανασχεδιαστεί και να αλλάξουν τα βάρη του. Από την άλλη, ο νευρωνικός ελεγκτής παρότι σχεδιάστηκε να αποκρίνεται αποτελεσματικά σε ασθενείς ανέμους δεν εμφανίζει σημαντικά προβλήματα ούτε σε ισχυρούς ανέμους.

Αναλύοντας σε βάθος τις αποκρίσεις των ελεγκτών με ασαφή λογική και νευρωνικά δίκτυα παρατηρείται ότι ο ελεγκτής που βασίζεται στην ασαφή λογική εμφανίζει **μεγάλη πτώση** του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος και της μέσης ισχύος

στις απότομες μειώσεις της ταχύτητας του ανέμου. Οι βυθίσεις αυτές που αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος και της μέσης ισχύς είναι που εμφανίζουν τον ελεγκτή με ασαφή λογική να παρουσιάζει μειονεκτικότερα αποτελέσματα σε σχέση με το νευρωνικό ελεγκτή καθώς, όπως φαίνεται στις απότομες αυξήσεις της ταχύτητας του ανέμου ο ελεγκτής που βασίζεται στην ασαφή λογική φαίνεται να αντιδρά ελαφρώς αποτελεσματικότερα από το νευρωνικό ελεγκτή.



Σχήμα 6.12 Σύγκριση απόκρισης του C_p στην πραγματική χρονοσειρά ανέμου V_3 για τις μεθόδους *FLC* και *ANNC1*



Σχήμα 6.13 Σύγκριση της ισχύς εξόδου P_o στην πραγματική χρονοσειρά ανέμου V_3 για τις μεθόδους FLC και ANNC1

Στον πίνακα 6.5 παρουσιάζονται συνοπτικά ο μέσος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος και η μέση ισχύς για τις προσομοιώσεις με την χρονοσειρά V_3 για τους ελεγκτές ANNC1, OCT και FLC.

Πίνακας 6.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μεθόδων ελέγχου για την χρονοσειρά ανέμου V_3

Ισχυρός άνεμος μέτριας μεταβλητότητας – V_3		
Μέθοδος ελέγχου	Μέσο C_p	Μέση Ισχύς (W)
OCT	0.4763	3280
FLC	0.4764	3362
ANNC1	0.4844	3742

6.4 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν οι μέθοδοι ελέγχου MPPT που βασίζονται σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες και σε ασαφή λογική με την μέθοδο ελέγχου MPPT που βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Τα αντίστοιχα

προσομοιωμένα μοντέλα δοκιμάστηκαν σε μια σειρά από μεταβολές προκειμένου να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα για το ποια μέθοδος ελέγχου εκμεταλλεύεται αποτελεσματικότερα την εισερχόμενη αιολική ενέργεια στο σύστημα της ανεμογεννήτριας. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, για την δοκιμή των συστημάτων ελέγχου, αφορούσαν βηματικές μεταβολές της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου και πραγματικές χρονοσειρές ασθενούς ανέμου μέτριας και μεγάλης μεταβλητότητας και ισχυρού ανέμου μέτριας μεταβλητότητας.

Συγκεκριμένα, από τις **βηματικές μεταβολές** που πραγματοποιήθηκαν η μέθοδος ελέγχου που βασίζεται στα **τεχνητά νευρωνικά δίκτυα** εμφανίζει τον **υψηλότερο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος** με αρκετά **καλό χρόνο απόκρισης**. Η μέθοδος ελέγχου που βασίζεται στην **ασαφή λογική** έχει την **γρηγορότερη απόκριση** με **φτωχά αποτελέσματα στον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος** ενώ η μέθοδος που βασίζεται σε **δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες** έχει **πολύ αργούς χρόνους απόκρισης** και **μέτριο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος**.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τις **πραγματικές χρονοσειρές ανέμου** παρατηρείται ότι συνολικά **ο ελεγκτής που βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα** εμφανίζει **υψηλές μέσες τιμές αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος** ακόμα και για χρονοσειρές ανέμου πολύ διαφορετικές από αυτές με τις οποίες έχει εκπαιδευτεί (Ισχυρός άνεμος). Από την άλλη, **η μέθοδος ελέγχου που βασίζεται στην ασαφή λογική** εμφανίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ασθενείς ανέμους ενώ δεν ανταποκρίνεται τόσο αποτελεσματικά **σε ισχυρούς ανέμους** αφού χρειάζεται **εκ νέου επαναπροσδιορισμό των βαρών**.

Επίσης, παρατηρήθηκε ότι ο ελεγκτής που βασίζεται στην ασαφή λογική εμφάνιζε σημαντικές μειώσεις στον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος και την ισχύ εξόδου σε απότομες αυξήσεις της ταχύτητας του ανέμου για ασθενής ανέμους και αντίστοιχες μειώσεις στις απότομες μειώσεις της ταχύτητας του ανέμου για ισχυρούς ανέμους, σε αντίθεση με το νευρωνικό ελεγκτή που ανταποκρινόταν αποτελεσματικά στις απότομες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

7.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου ελέγχου ανεμογεννήτριας μονίμων μαγνητών, για την παρακολούθηση σημείου λειτουργίας που μεγιστοποιεί την ισχύ, η οποία βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Για την πειραματική επιβεβαίωση χρησιμοποιήθηκε μια διάταξη που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο και αποτελείται από μια σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών που οδηγείται άμεσα από έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος, ο οποίος προσομοιώνει τη ροπή του ανεμοκινητήρα. Η γεννήτρια ανορθώνεται από έναν ανορθωτή διόδων και ανυψώνεται με τη βοήθεια ενός DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης 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 παραπάνω εργαστηριακή διάταξη έχει μοντελοποιηθεί με την βοήθεια του SIMULINK™ με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα μελέτης της συμπεριφοράς της μεθόδου ελέγχου που βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα προσομοιωμένα μοντέλα.

Για την μελέτη όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν την λειτουργία ενός ελεγκτή που βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν στο SIMULINK™ πέντε νευρωνικοί ελεγκτές με την αρχιτεκτονική της απευθείας ανάδρασης με εξωγενείς εισόδους (NARX). Η λειτουργία των νευρωνικών ελεγκτών βασίζεται στον έλεγχο του λόγου κατάτμησης του DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης έτσι ώστε να ελέγχεται η ροπή στον άξονα της ανεμογεννήτριας. Οι πληροφορίες εισόδου του νευρωνικού ελεγκτή, για την εύρεση

κάθε χρονική στιγμή του κατάλληλου λόγου κατάτμησης έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η παραγόμενη ισχύς, προέρχονται από την γωνιακή ταχύτητα της ανεμογεννήτριας, την ισχύ εξόδου, το ρεύμα εξόδου του DC/DC μετατροπέα και τις προηγούμενες δυο τιμές του λόγου κατάτμησης.

Πραγματοποιήθηκαν δυο σειρές προσομοιώσεων για τον έλεγχο και την σύγκριση των πέντε νευρωνικών ελεγκτών. Στο πρώτο στάδιο, οι νευρωνικοί ελεγκτές συγκρίθηκαν σε βηματική αύξηση και μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Παρατηρήθηκε, ότι οι ελεγκτές που εκπαιδεύτηκαν με ασθενείς ανέμους παρουσίαζαν γρήγορη απόκριση και υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος, σε αντίθεση με τους νευρωνικούς ελεγκτές που εκπαιδεύτηκαν σε υψηλές ταχύτητες ανέμου και αδυνατούσαν να παρακολουθήσουν τις μεταβολές.

Σε δεύτερο στάδιο, οι νευρωνικοί ελεγκτές συγκρίθηκαν με βάση την απόκριση τους σε πραγματικές χρονοσειρές ανέμου. Και οι πέντε νευρωνικοί ελεγκτές παρουσίασαν υψηλές τιμές αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος, για το αντίστοιχο εύρος ανέμου για το οποίο εκπαιδεύτηκαν και υψηλές μέσες ισχύς.

Επίσης, διαπιστώθηκε ότι οι ελεγκτές που εκπαιδεύτηκαν με τον αλγόριθμο Καθοδικής Κλίσης (Gradient Descent) εμφάνιζαν βελτιωμένα αποτελέσματα για το εύρος των ταχυτήτων ανέμου με το οποίο εκπαιδεύτηκαν, σε αντίθεση με του ελεγκτές οι οποίοι εκπαιδεύτηκαν με τον αλγόριθμο Levenberg – Marquart, οι οποίοι παρότι εμφάνιζαν ελαφρά μικρότερο μέσο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος, παρουσίαζαν βελτιωμένη γενίκευση των δεδομένων εισόδου τους.

Τέλος, επιχειρήθηκε να διαμορφωθεί ένας νευρωνικός ελεγκτής ο οποίος να έχει την ικανότητα να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά σε όλο το εύρος των ταχυτήτων του ανέμου αφού συγκριθεί με άλλες μεθόδους ελέγχου ανεμογεννήτριας για την παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος οι οποίες συναντώνται στην βιβλιογραφία. Για το λόγο αυτό εξετάστηκαν όλοι οι ελεγκτές σε όλες τις πραγματικές χρονοσειρές ανέμου και επιλέχθηκε ο ελεγκτής ANNC1, ο οποίος εμφάνιζε υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος, σε όλο το εύρος των ταχυτήτων του ανέμου.

Στη συνέχεια, για να αποτιμηθεί η συμπεριφορά του προτεινόμενου ελεγκτή, συγκρίθηκε με άλλες μεθόδους ελέγχου που συναντώνται συχνά στην βιβλιογραφία. Για το λόγο αυτό συγκρίθηκαν οι μέθοδοι με δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες και η μέθοδος που βασίζεται στην ασαφή λογική με την μέθοδο ελέγχου που βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, σε βηματικές και πραγματικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου. Διαπιστώθηκε ότι ο ελεγκτής που βασίζεται στην ασαφή

λογική, έχει γρηγορότερη απόκριση, εμφανίζει όμως μικρότερη μέση τιμή αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος από την μέθοδο με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Επιπλέον, ο ελεγκτής που βασίζεται στην ασαφή λογική εμφάνιζε αδυναμία στις απότομες αυξήσεις της ταχύτητας ανέμου με αποτέλεσμα να μειώνεται για μεγάλα χρονικά διαστήματα ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος σε αντίθεση με τον νευρωνικό ελεγκτή που για οποιαδήποτε μεταβολή αποκρινόταν ικανοποιητικά. Ένα ακόμα μειονέκτημα της ασαφούς λογικής διαπιστώθηκε ότι είναι η αδυναμία του ελεγκτή να αποκριθεί ικανοποιητικά σε όλο το πιθανό εύρος ταχυτήτων του αέρα χωρίς την αλλαγή των βαρών σε αντίθεση με τον προτεινόμενο νευρωνικό ελεγκτή ο οποίος αποκρίνεται ικανοποιητικά σε όλο το εύρος των ταχυτήτων του αέρα.

Ο ελεγκτής που βασίζεται σε δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες εμφάνιζε παρόμοια αλλά μειονεκτικότερα αποτελέσματα από τον αντίστοιχο νευρωνικό ελεγκτή κυρίως λόγω της χαμηλής ταχύτητας απόκρισης στις απότομες μεταβολές και των πιθανών σφαλμάτων γήρανσης και αρχικών υπολογισμών.

Συμπερασματικά, οι ελεγκτές που βασίζονται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, αφού η ικανότητα τους να εκπαιδεύονται αρχικά με τις δεδομένες χαρακτηριστικές καμπύλες και κατά δεύτερον να γενικεύουν τα δεδομένα τους, ώστε να μην εξαρτιούνται αποκλειστικά από τις χαρακτηριστικές καμπύλες, τους προσδίδουν γρήγορη δυναμική συμπεριφορά σε σχέση με άλλες μεθόδους. Είναι σημαντικό, επίσης, να τονισθεί πως στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δεν αναδείχθηκε μία μόνο μέθοδος ελέγχου καταλληλότερη σε όλες τις περιπτώσεις. Επομένως, ανάλογα με το κριτήριο σύγκρισης, μπορούμε να διακρίνουμε ποια μέθοδος είναι η καταλληλότερη για κάθε εφαρμογή.

7.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Η εργασία περιλαμβάνει τα παρακάτω καινοτομικά σημεία :

- Δημιουργία αλγορίθμου παρακολούθησης σημείου μέγιστης ισχύος, βασισμένου στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και σχεδίαση πέντε ελεγκτών. Κάθε ελεγκτής σχεδιάστηκε να αποκρίνεται με μεγάλη απόδοση σε συγκεκριμένες ανεμολογικές συνθήκες, αντίστοιχα.
- Πραγματοποιήθηκε ανάλυση και σύγκριση του νευρωνικού ελεγκτή με δύο διαφορετικής λογικής ελεγκτές παρακολούθησης σημείου μέγιστης ισχύος. Ο

ένας ελεγκτής βασίζεται σε δοσμένη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής στροφών, λειτουργώντας με ντετερμινιστικό τρόπο ενώ ο άλλος ελεγκτής βασίζεται στην ασαφή λογική για την εύρεση σημείου μέγιστης ισχύος.

7.3. Εργασίες για Περαιτέρω Διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδείχθηκαν τα παρακάτω σημεία που χρίζουν περαιτέρω διερεύνησης:

- Η πειραματική επιβεβαίωση του ελεγκτή που βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, ο οποίος σχεδιάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.
- Επίσης, ένα θέμα που χρήζει περισσότερης μελέτης αποτελεί η βελτιστοποίηση της μεθόδου ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος που βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα εφαρμόζοντας εκπαίδευση κατά την διάρκεια λειτουργίας του ελεγκτή εισάγοντας έναν όρο σφάλματος (online training).
- Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει η προσπάθεια ανεύρεσης ενός ελεγκτή που να βασίζεται σε νευρο-ασαφή δίκτυα.

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 2010 REPORT από το global wind energy council
- [7] Δ. ΑΛΙΠΡΑΝΤΗΣ, “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] Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα, Επίσημη υποβολή, Αθήνα 2007
- [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] ΔΕΣΜΗΕ, Μηνιαίο Πληροφοριακό Δελτίο Δεκέμβριος 2010.
- [21] Simon Haykin, “Νευρωνικά Δίκτυα και Μηχανική μάθηση”, Τρίτη Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2010.
- [22] M. H. Beale, M. T. Hagan, H. B. Demuth, “Neural Network Toolbox™ 7, User’s Guide, version 2” The MathWorks, Inc.
- [23] K. S. NARENDRA, K. PARTHASARATHY, “Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks”, IEEE Transactions on Neural Networks. VOL. 1, NO. 1, March 1990.
- [24] Μαρία Σ. Ρώτα, “Σύγκριση Κλασσικού και Ελέγχου Βασισμένου σε Ασαφή Λογική Ανεμογεννήτριας Μονίμων Μαγνητών”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2008
- [25] Φ. Δ. Κανέλλος, “Συμβολή στην Προσομοίωση και Αναγνώριση Ανεμογεννητριών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για την Δημιουργία Μειωμένης Τάξης Ισοδυνάμων Μοντέλων”, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ 2003.

[26] Π. Αργυράκης, “Νευρωνικά Δίκτυα και Εφαρμογές”, ΟΜΑΔΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΕΡΓΟΥ ΕΑΠ / 1997–2001, Πάτρα 2001.

[27] C. Patsios, A. Chaniotis, M. Rotas, A. Kladas, “A Comparison of Maximum Power Point Tracking Control Techniques for Low Power Variable Speed Wind-Generators”, NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS