



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

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΜΕ
ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΣΥΝΕΧΗ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΓΓΕΛΟΣ Ι. ΤΣΟΥΧΝΙΚΑΣ

Επιβλέποντες : ΝΙΚΟΛΑΟΣ Δ. ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.
ΦΩΤΗΣ Δ. ΚΑΝΕΛΛΟΣ
ΔΙΔΑΚΤΟΡΑΣ ΗΛ/ΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2004



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

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΜΕ
ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΣΥΝΕΧΗ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΓΓΕΛΟΣ Ι. ΤΣΟΥΧΝΙΚΑΣ

Επιβλέποντες : ΝΙΚΟΛΑΟΣ Δ. ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.
ΦΩΤΗΣ Δ. ΚΑΝΕΛΛΟΣ
ΔΙΔΑΚΤΟΡΑΣ ΗΛ/ΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τη 16^η Μαρτίου 2004

.....
ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

.....
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΒΟΥΡΝΑΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

.....
ΣΤΑΥΡΟΣ
ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ
ΛΕΚΤΟΡΑΣ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2004

.....
ΑΓΓΕΛΟΣ Ι. ΤΣΟΥΧΝΙΚΑΣ

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

Copyright © ΑΓΓΕΛΟΣ Ι. ΤΣΟΥΧΝΙΚΑΣ, 2004

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.

Πρόλογος

Η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του Διδάκτορα Μηχανικού Ε.Μ.Π. Φώτη Κανέλλου, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για τη βοήθεια, τη συμπαράσταση και την άριστη καθοδήγησή του.

Ευχαριστώ τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για τις γνώσεις που μου μετέδωσε τόσο κατά την προπτυχιακή περίοδο, όσο και κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ το Λέκτορα Ε.Μ.Π. κ. Σταύρο Παπαθανασίου για τις χρήσιμες υποδείξεις και διορθώσεις του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του εργαστηρίου των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας για την άψογη συνεργασία και το εξαιρετικά φιλικό περιβάλλον που αναπτύχθηκε ανάμεσά μας.

Αθήνα, Μάρτιος 2004
Άγγελος Ι. Τσουχνικός

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	8
ABSTRACT	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	10
1.1. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	10
1.2. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ	11
1.3. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	18
1.3.1. Ο ΠΥΡΓΟΣ.....	18
1.3.2. ΈΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΤΕΡΥΓΙΑ.....	19
1.3.3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ (YAW CONTROL)	20
1.3.4. ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	20
1.3.5. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΤΟΥ ΕΜΠΟΡΙΟΥ.....	20
1.4. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ	23
1.4.1. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ.....	23
1.4.2. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ	24
1.5. ΕΪΔΟΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	25
1.6. ΤΥΠΟΣ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ	27
1.7. ΑΝΤΙΚΕΪΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	30
2.1. ΓΕΝΙΚΟΤΕΡΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	30
2.2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	31
2.3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ	32
2.4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ	36
2.4.1. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΗΡΟΥΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (4 ^Η ΤΑΞΗΣ).....	36
2.4.2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (2 ^Η ΤΑΞΗΣ).....	37
2.5. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ	38
2.5.1. ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΑ ΤΡΙΦΑΣΙΚΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ	44
2.6. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ	47
2.6.1. ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	48
2.6.2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	53
3.1. ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	53
3.1.1. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ.....	53
3.1.2. ΙΣΧΥΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ	56
3.2. ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ	56
3.3. ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΣ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ	57
3.4. ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΣΥΜΜΕΤΡΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	59
3.5. ΑΣΥΜΜΕΤΡΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΜΕ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ	60
3.5.1. ΑΣΥΜΜΕΤΡΙΑ ΜΕΤΡΩΝ ΣΤΙΣ ΤΑΣΕΙΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΤΟΥ ΣΤΑΘΗ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	60

3.5.2. ΑΣΥΜΜΕΤΡΙΑ ΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΦΑΣΗΣ ΣΤΙΣ ΤΑΣΕΙΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΤΟΥ ΣΤΑΤΗ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	66
4.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ	66
4.2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ : I-V ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	67
4.3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΪΩΝ	69
4.4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΛΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	72
4.5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΕΠΤΥΧΘΕΝΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	73
4.6. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΔΙΧΟΤΟΜΗΣΗΣ	74
4.7. ΠΡΟΣΟΜΟΪΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1	89
Π1.1. ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΑ ΠΛΑΪΣΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	89
Π1.2. ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΣΥΣΤΗΜΑ (P.U. SYSTEM)	91
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2	94
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3	99
Π.3.1. ΘΕΩΡΙΑ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ	99
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	110

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος πραγματεύεται την προσομοίωση ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής, ενώ το δεύτερο τη λειτουργία φωτοβολταϊκών γεννητριών.

Αναλυτικότερα, στο πρώτο μέρος περιγράφονται τα λεπτομερή μαθηματικά μοντέλα του αεροδυναμικού και του μηχανικού συστήματος, ενώ η γεννήτρια επαγωγής προσομοιώνεται τόσο από το πλήρες, όσο και από τα μειωμένης τάξης ισοδύναμα μοντέλα της. Η προσομοίωση της συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας λαμβάνει χώρα τόσο σε συμμετρικές, όσο και σε ασύμμετρες συνθήκες

Τέλος, στο δεύτερο μέρος αναπτύσσεται το μοντέλο της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, με σύστημα λειτουργίας σε μέγιστη ισχύ. Εξάγονται οι $I - V$ χαρακτηριστικές της και μελετάται η επίδραση της θερμοκρασίας τόσο στην ένταση όσο και στην τάση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας στο λειτουργικό σημείο της μέγιστης ισχύος.

Λέξεις κλειδιά : ανεμογεννήτριες, ασύμμετρες συνθήκες, μειωμένης τάξης μοντέλα, φωτοβολταϊκές γεννήτριες, σύστημα λειτουργίας υπό μέγιστη ισχύ.

ABSTRACT

This Diploma Thesis, consists of two parts. The first part deals with the simulation of fixed speed wind turbines equipped with induction generators and the second one with the operation of photovoltaic generators.

In more detail, in the first part detailed mathematical models of the aerodynamic and mechanical system are described. As far as induction generator is concerned, both detailed and reduced order equation models are used. The wind turbine performance is simulated in both balanced and unbalanced conditions.

In the second part, the model of photovoltaic generators equipped with maximum power point tracking system is described. I – V characteristics are derived and the influence of temperature on the generator's current and voltage at the maximum power operating point is under study.

Key words : wind turbines, unbalanced operation, models with reduced order equations, photovoltaic generators, maximum power point tracking system.

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), αποτελούν ένα από τα πλέον σημαντικά θέματα στον τομέα των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Η ανάγκη για μεγαλύτερη και ταυτόχρονα καλύτερη αξιοποίηση της προερχόμενης ενέργειας από ΑΠΕ, άρχισε να γίνεται διεθνώς αντιληπτή με αφορμή την πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του 1970, μέσα στο ευρύτερο πλαίσιο συνειδητοποίησης για περαιτέρω καλύτερη αξιοποίηση όλων των ενεργειακών πόρων.

Με τον όρο Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία κυρίως οι ακόλουθες :

- ❖ Η αιολική ενέργεια
- ❖ Η ηλιακή ενέργεια
- ❖ Η ενέργεια από μικρά υδροηλεκτρικά
- ❖ Η ενέργεια από κυψέλες καυσίμου
- ❖ Η ενέργεια των θαλασσίων κυμάτων
- ❖ Η γεωθερμική ενέργεια
- ❖ Η ενέργεια της βιομάζας

Το κυριότερο πλεονέκτημα όλων των προαναφερθέντων μορφών ενέργειας σε σύγκριση με τις συμβατικές μορφές, είναι η φιλικότητα προς το περιβάλλον. Το πρωτόκολλο του Κυότο ήταν μία από τις μεγαλύτερες κινήσεις περιβαλλοντικής ευαισθησίας και φυσικά αποτέλεσε αιτία για τη στροφή του παγκόσμιου ενδιαφέροντος προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι τεχνολογικά ανεπτυγμένες χώρες καταβάλλουν προσπάθειες τα τελευταία 35 χρόνια να προσαρμοστούν στις νέες συνθήκες, με τη λήψη κατάλληλων νομοθετικών μέτρων και ενημέρωση των πολιτών, καθώς και την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ΑΠΕ κατά τρόπο ώστε το κόστος τους να είναι συγκρίσιμο με αυτό των συμβατικών πηγών ενέργειας.

Ανάμεσα στις προαναφερθέντες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, οι δύο πρώτες, δηλαδή η αιολική και η ηλιακή, έχουν γνωρίσει τη μεγαλύτερη άνθηση σε παγκόσμιο επίπεδο. Την εξάπλωσή τους αυτή, την οφείλουν κυρίως στην ευρύτητα της γεωγραφικής εμφάνισής τους (πολλά μέρη σε όλο τον κόσμο έχουν υψηλό αιολικό δυναμικό ή υψηλή ηλιακή ακτινοβολία), καθιστώντας έτσι εύκολη την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πολύ κοντά στο μέρος κατανάλωσής της. Το πλεονέκτημα αυτό, εξαλείφει την ανάγκη ύπαρξης των

γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης σε διάφορες γεωγραφικά άγονες περιοχές.

Στον πίνακα 1.1, δίνεται συνοπτικά η επικρατούσα κατάσταση ανάμεσα στις συμβατικές και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ	ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ
Κάρβουνο, πετρέλαιο, πυρηνική ενέργεια, φυσικό αέριο	Αιολική, ηλιακή, βιομάζα, θαλασσιών κυμάτων, γεωθερμική
Πλήρως ανεπτυγμένες (κορεσμένες) τεχνολογίες	Ταχέως αναπτυσσόμενες τεχνολογίες
Πολυάριθμοι φόροι και επιχορηγούμενες επενδύσεις από εθνικές οικονομίες	Ολιγάριθμοι και μικροί φόροι, επιχορήγηση από μερικές κυβερνήσεις ή προγράμματα
Αποδοχή από την κοινωνία ως «αναγκαίο κακό»	Αποδοχή από την κοινωνία με την πρόεπουσα σημασία, ακόμη και με ελάχιστη εκτίμηση των περιβαλλοντικών και κοινωνικών τους πλεονεκτημάτων

Πίνακας 1.1 Συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

1.2. Αιολική ενέργεια – Ευρωπαϊκή και Ελληνική πραγματικότητα

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, αποτελεί σήμερα τον παγκόσμιο ηγέτη στην αιολική ενέργεια, καθώς και στη βιομηχανία των ανεμογεννητριών. Το 70% περίπου της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος που προέρχεται από ανεμογεννήτριες βρίσκεται στην Ευρώπη, ενώ περισσότερο από 80% των ανεμογεννητριών που εγκαθίστανται παγκοσμίως, κατασκευάζονται σε αυτή. Χαρακτηριστικά στατιστικά στοιχεία για την αλματώδη ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, εμφανίζονται στον πίνακα 1.2

ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ Α/Γ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ				
Χώρα	Τέλη 1997 (MW)	Τέλη 2002 (MW)	Ιανουάριος έως Ιούνιος 2003 (MW)	Τέλη Ιουνίου 2003 (MW)
ΓΕΡΜΑΝΙΑ	2079	12001	835	12836
ΙΣΠΑΝΙΑ	455	4830	230	5060
ΔΑΝΙΑ	1141	2881	36	2916
ΟΛΛΑΝΔΙΑ	325	678	125	803
ΙΤΑΛΙΑ	99	788	12	800
ΑΓΓΛΙΑ	308	552	34	586
ΣΟΥΗΔΙΑ	122	328	36	364

ΕΛΛΑΔΑ	29	297	57	354
ΓΑΛΛΙΑ	10	148	72	220
ΑΥΣΤΡΙΑ	20	139	80	219
ΠΟΡΤΟΓΑΛΙΑ	19	196	21	217
ΙΡΛΑΝΔΙΑ	50	137	0	137
ΒΕΛΓΙΟ	7	44	12	56
ΦΙΛΑΝΔΙΑ	12	41	0	41
ΛΟΥΞΕΜΒΟΥΡΓΟ	3	16	0	16
ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ	4679	23076	1550	24626

Πίνακας 1.2 Σύγκριση εγκατεστημένης ισχύος Α/Γ στην Ευρωπαϊκή Ένωση 1997 – 2003
(Πηγή : *European Wind Energy Association – EWEA*)

Στην Ελλάδα ειδικότερα, το έναυσμα για την ανάπτυξη των ΑΠΕ δόθηκε ουσιαστικά από το νόμο 2244/94, ο οποίος έδωσε τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ σε ιδιώτες με σκοπό την πώλησή της στη ΔΕΗ. Παράλληλα ορίστηκαν τιμές πώλησης της ενέργειας με συμβάσεις δεκαετούς διάρκειας. Οι μελλοντικές προοπτικές για την ελληνική αγορά αιολικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα ευσίωνες. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), εάν το αιολικό δυναμικό εκμεταλλευτεί συστηματικά, μπορεί 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 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.

Από τεχνικής πλευράς η περαιτέρω ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα είναι εφικτή στο βαθμό που θα ξεπεραστεί το βασικό τεχνικό πρόβλημα των ασθενών ηλεκτρικών δικτύων κυρίως στις περιοχές που διαθέτουν το κατάλληλο αιολικό δυναμικό.

Ο τύπος και τα μεγέθη των ανεμογεννητριών που εγκαθίστανται στην Ελλάδα, ακολουθούν μέχρι στιγμής τις διεθνείς εξελίξεις και είναι κυρίως εισαγωγής από άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Ωστόσο, υπάρχει μία σημαντική προστιθέμενη αξία από ελληνικές κατασκευαστικές επιχειρήσεις τόσο για την κατασκευή επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών όσο και για την εγκατάσταση και τη δημιουργία της κατάλληλης υποδομής για τη λειτουργία τους. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι η ελληνική βιομηχανία είναι αναγκαίο να συνεισφέρει και να δημιουργήσει νέες τεχνολογίες ώστε η ελληνική προστιθέμενη αξία να γίνει ακόμα μεγαλύτερη.

Στις σελίδες που ακολουθούν, παρατίθενται για στατιστικούς λόγους, τα υφιστάμενα αιολικά πάρκα στον ελλαδικό χώρο είτε αυτά ανήκουν στη ΔΕΗ είτε σε διάφορους άλλους ανεξάρτητους παραγωγούς.

ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ Α/Γ	ΙΣΧΥΣ/Α/Γ (kW)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΓΚ/ΝΗ ΙΣΧΥΣ (kW)
ΚΑΛΙΒΑΡΙ, ΑΝΔΡΟΣ	7	225	1575
ΠΥΘΑΓΟΡΕΙΟ, ΣΑΜΟΣ	9	225	2025
ΜΕΛΑΝΙΟΣ, ΧΙΟΣ	11	225	2475
ΠΡΟΦΗΤΗΣ ΗΛΙΑΣ, ΨΑΡΑ	9	225	2025
ΣΙΓΡΙ, ΛΕΣΒΟΣ	9	225	2025
ΜΟΝΗ ΤΟΠΛΟΥ, ΚΡΗΤΗ	17	300	5100
ΜΑΡΜΑΡΙ, ΕΥΒΟΙΑ	17	300	5100
ΣΑΜΟΘΡΑΚΗ	4	55	220
ΠΕΡΔΙΚΙ, ΙΚΑΡΙΑ	7	55	385
ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, ΚΑΡΠΑΘΟΣ	5	55	275
ΒΙΓΛΑ, ΛΗΜΝΟΣ	7	100	700
ΒΟΥΝΑΡΟΣ, ΛΗΜΝΟΣ	8	55	440
ΜΑΡΑΘΟΚΑΜΠΟΣ, ΣΑΜΟΣ	9	100	900
ΠΟΤΑΜΙΑ, ΧΙΟΣ	10	100	1000
ΚΥΘΝΟΣ	5	33	165
ΜΟΝΗ ΤΟΠΛΟΥ, ΚΡΗΤΗ	3	500	1500
ΚΟΥΚΟΥΒΑΓΙΑ, ΚΥΘΝΟΣ	1	500	500
ΞΗΡΟΛΙΜΝΗ, ΚΡΗΤΗ	17	600	10200
ΣΥΝΟΛΟ			36610

Πίνακας 1.3 Αιολικά Πάρκα ιδιοκτησίας Δ.Ε.Η. (Πηγή:Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, 31/12/2001)

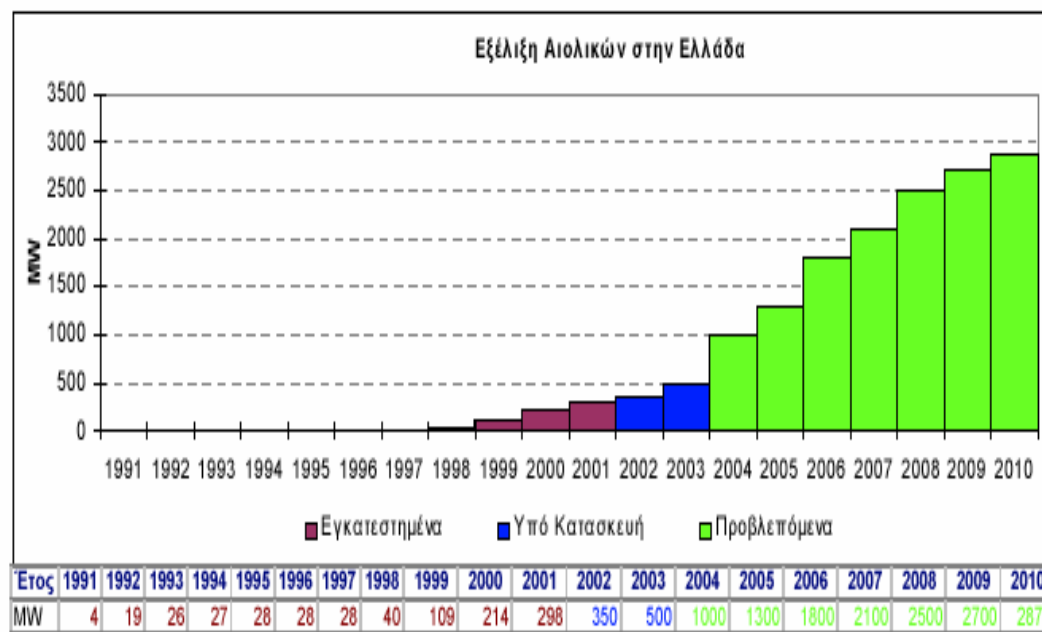
ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΙΔΙΟΚΤΗΤΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ Α/Γ	ΙΣΧΥΣ/Α/Γ (kW)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΓΚ/ΝΗ ΙΣΧΥΣ (kW)
ΣΥΡΟΣ	ΟΤΕ	1	110	110
ΚΕΑ	ΟΤΕ	1	60	60
ΠΑΡΟΣ	ΟΤΕ	1	110	110
ΚΩΣ	ΟΤΕ	1	60	60
ΚΑΤΑΒΙΑ, ΡΟΔΟΣ	ΟΤΕ	1	110	110
ΑΤΑΒΥΡΟΣ, ΡΟΔΟΣ	ΟΤΕ	1	110	110
ΣΥΡΟΣ	ΔΑΛΕΖΙΟΣ	1	90	90
ΑΝΩΓΙΑ, ΚΡΗΤΗ	ΔΕΤΕΑ	1	55	55
ΡΟΔΟΣ	ΝΕΟΦΥΤΟΥ ΚΕΡΑΜΙΚΑ	1	150	150
ΡΟΔΟΣ	ΚΑΛΛΙΘΕΑ SUN	1	75	75
ΡΟΔΟΣ	ΓΕΝΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ Α.Ε.	1	110	110
ΚΑΡΠΕΝΗΣΙ	ΕΥΡΥΤΑΝΙΑ	1	110	110
ΒΡΟΝΤΑΔΟΣ, ΧΙΟΣ	ΠΡΟΜΗΘΕΥΤΙΚΗ	1	110	110
ΜΥΤΙΛΗΝΗ	ΑΙΟΛΙΚΗ, ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΜΥΤΙΛΗΝΗΣ	3	300	825
			225	
ΕΓΓΑΡΕΣ, ΝΑΞΟΣ	ΕΝΩΣΗ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΣΥΝ/ΣΜΩΝ ΝΑΞΟΥ	1	75	75
ΖΗΡΟΣ, ΚΡΗΤΗ	ΣΗΤΕΙΑ, ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ	1	500	500
ΑΝΩ ΣΥΡΟΣ	ΔΗΜΟΣ ΑΝΩ ΣΥΡΟΥ	1	200	200
ΠΛΑΚΟΚΕΡΑΤΙΑ, ΚΡΗΤΗ	ΡΟΚΑΣ Α.Ε.	17	600	10200
ΣΥΡΟΣ	ENERCON Ε.Π.Ε.	1	500	500
ΑΓΙΟΣ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ	ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΑΓΙΟΥ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΥ	1	100	100
ΜΑΡΜΑΡΙ, ΕΥΒΟΙΑ	ENERCON Ε.Π.Ε.	2	250	750
			500	
ΚΟΥΤΣΟΥΝΟΡΑΧΗ, ΜΗΛΟΣ	ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΚΥΚΛΑΔΩΝ Α.Ε.	2	600	1200
ΧΑΝΔΡΑΣ, ΚΡΗΤΗ	ΑΕΟΛΟΣ Α.Ε.	18	550	9900
ΜΕΓΑΛΗ ΒΡΥΣΗ, ΚΡΗΤΗ	IWECO ΜΕΓΑΛΗ ΒΡΥΣΗ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	9	550	4950

ΜΑΡΑΘΟΚΑΜΠΟΣ, ΣΑΜΟΣ	Α.Ε.Β.Ε. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΑΜΟΥ Α.Ε.	2	250	1000
			750	
ΣΗΤΕΙΑ, ΚΡΗΤΗ	ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΑΧΛΑΔΙΩΝ Α.Ε.	20	500	10000
ΣΗΤΕΙΑ, ΚΡΗΤΗ	ΑΝΕΜΟΕΣΣΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ Α.Ε.	10	500	5000
ΣΗΤΕΙΑ, ΚΡΗΤΗ	ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΚΡΥΩΝ Α.Ε.	20	500	10000
ΠΟΛΥΠΟΤΑΜΟΣ, ΕΥΒΟΙΑ	ΕΝΤΕΚΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ Α.Ε.	2	750	1500
ΜΟΜΙΛΙ, ΕΥΒΟΙΑ	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΕΠΕ	1	400	400
ΜΑΚΡΥΡΡΑΧΗ, ΕΥΒΟΙΑ	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΥΒΟΙΑ Α.Β.Ε.Ε.	40	600	24000
ΑΓ. ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ/ΜΕΓΑΛΗ ΡΑΧΗ, ΕΥΒΟΙΑ	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΥΒΟΙΑ Α.Β.Ε.Ε.	21	600	12600
ΤΣΟΥΚΑ, ΕΥΒΟΙΑ	ΤΕΡΝΑ Α.Ε.	16	750	12000
ΣΤΥΡΑ, ΕΥΒΟΙΑ	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΥΒΟΙΑ Α.Β.Ε.Ε.	19	600	11400
ΣΤΥΡΑ, ΕΥΒΟΙΑ	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΥΒΟΙΑ Α.Β.Ε.Ε.	21	600	12600
ΣΤΥΡΑ, ΕΥΒΟΙΑ	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΥΒΟΙΑ Α.Β.Ε.Ε.	19	600	11400
ΣΤΥΡΑ, ΕΥΒΟΙΑ	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΥΒΟΙΑ Α.Β.Ε.Ε.	21	600	12600
ΣΤΥΡΑ, ΕΥΒΟΙΑ	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΥΒΟΙΑ Α.Β.Ε.Ε.	21	600	12600
ΜΠΟΥΡΛΑΡΙ, ΚΑΡΥΣΤΟΣ	ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΚΥΚΛΑΔΩΝ Α.Ε.	13	600	7800
ΑΓ. ΜΑΡΙΝΑ, ΤΗΝΟΣ	ΑΙΟΛΙΚΗ ΚΥΚΛΑΔΩΝ	1	400	400
ΜΑΡΜΑΡΙ, ΕΥΒΟΙΑ	ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΕΛΛΑΔΑΣ - ΠΗΓΑΣΟΣ	2	500 280	780
ΠΟΛΥΠΟΤΑΜΟΣ, ΕΥΒΟΙΑ	ΠΟΛΥΠΟΤΑΜΟΣ Ε.Π.Ε.	20	600	12000
ΑΝΩ ΜΕΡΑ, ΜΥΚΟΝΟΣ	ΔΕΥΑ ΜΥΚΟΝΟΥ	1	300	300
ΕΥΒΟΙΑ	ΜΕΛΤΕΜΙ ΚΑΣΤΡΙ	10	500	5000

		A.B.E.T.E.			
ΠΥΡΓΑΡΙ, Δ. ΔΥΣΤΙΩΝ, ΕΥΒΟΙΑ		IWECO SA	9	600	5400
ΗΛΙΟΛΟΥΣΤΗ, Δ. ΣΤΥΡΕΩΝ, ΕΥΒΟΙΑ		ΔΙΕΘΝΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗ Α.Τ.Ε.Β.Ε.	10	600	6000
ΖΑΡΑΚΕΣ, Δ. ΔΥΣΤΙΩΝ, ΕΥΒΟΙΑ		ΡΟΚΑΣ Α.Ε.	39	600	23400
ΠΑΡΑΛΙΑ ΖΑΡΑΚΩΝ, Δ. ΔΥΣΤΙΩΝ, ΕΥΒΟΙΑ		ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΙΚΟΝΤΟΡ Α.Ε.	5	600	3000
ΑΓΙΟΙ ΠΑΝΤΕΣ, ΜΑΡΑΘΟΚΑΜΠΟΣ, ΣΑΜΟΣ		ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΑΜΟΥ Α.Ε.	1	750	750
ΡΟΧΙΑΔΕΣ, Δ. ΑΜΑΝΗΣ, ΧΙΟΣ		ΑΙΓΑΙΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΑΡΔΑΜΥΛΩΝ Α.Ε.	1	280	280
ΣΤΡΩΤΟΣ, ΜΑΡΑΘΟΚΑΜΠΟΣ, ΣΑΜΟΣ		ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΑΜΟΥ Α.Ε.	2	600	1200
ΛΑΥΡΙΟ, ΑΤΤΙΚΗ		Κ.Α.Π.Ε	4	500	2000
ΤΣΙΚΝΑ, ΠΡΟΦ. ΗΛΙΑΣ, Δ. ΔΥΣΤΙΩΝ, ΕΥΒΟΙΑ		ΤΕΡΝΑ Α.Ε.	17	660	11220
ΚΑΡΠΑΘΟΣ		ΖΕΦΥΡΟΣ Ε.Π.Ε.	1	500	500
ΤΣΙΛΙΚΩΚΑ ΠΡΑΣΙΝΟΥ, ΕΥΒΟΙΑ		ΤΕΡΝΑ Α.Ε.	17	600	10200
ΣΥΝΟΛΟ					257515

Πίνακας 1.4 Αιολικά Πάρκα ανεξάρτητων παραγωγών και αυτοπαραγωγών. (Πηγή:Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, 31/12/2001)

Στο σχήμα 1.1 που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα, απεικονίζεται σχηματικά η εξέλιξη της ισχύος προερχόμενη από ανεμογεννήτριες στην Ελλάδα. Θα ήταν παράλειψη να μην τονίσουμε σε αυτό το σημείο, ότι πολλές φορές η πρόβλεψη για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας συναντά την πραγματικότητα πολύ νωρίτερα, ιδιαίτερα σε μία χώρα όπως η Ελλάδα η οποία είναι προικισμένη με ένα υψηλό αιολικό δυναμικό, γεγονός που κάνει τις επενδύσεις στον τομέα αυτό πολύ ελκυστικές και ενδιαφέρουσες.



Σχήμα 1.1 Εγκατεστημένη ισχύς αιολικών πάρκων στην Ελλάδα και πρόβλεψη της εξέλιξής τους έως το έτος 2010 (πηγή : ΚΑΠΕ)

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, μετά το 1998 παρατηρείται μία ραγδαία αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών πάρκων στην Ελλάδα. Μέχρι το τέλος του 2001 είχαν υποβληθεί 693 αιτήσεις στη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) που αντιστοιχούσαν σε 11.325 MW, εκ των οποίων, αιτήσεις αντιστοιχούσες σε 1593 MW είχαν εξασφαλίσει τη θετική της γνώμη. Παράλληλα, η ΔΕΗ προχωράει στην οριστική μελέτη των αναγκαίων ενισχύσεων των ήδη υπαρχόντων δικτύων. Σύμφωνα με τα στοιχεία του ΚΑΠΕ, ο στόχος που έχει τεθεί είναι να δοθεί δυνατότητα συνδέσεως αιολικών πάρκων συνολικής ισχύος μέχρι 530MW στην Εύβοια και μέχρι 400MW στη Λακωνία. Επίσης, η σχεδιαζόμενη επέκταση του συστήματος προς την Τουρκία, θα δώσει τη δυνατότητα για την εγκατάσταση αρκετών αιολικών πάρκων στην περιοχή της Θράκης.

Οι βασικοί παράγοντες που αποτελούν κριτήριο για την περαιτέρω επέκταση της χρήσης της αιολικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού, μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω δύο μεγάλες κατηγορίες :

- ❖ Τεχνικά θέματα – περιορισμοί σύνδεσης των Α/Γ στα ήδη υπάρχοντα δίκτυα
- ❖ Περιβαλλοντικά ζητήματα

Τα θέματα της πρώτης κατηγορίας, που πηγάζουν από τη στοχαστική φύση, την έντονη μεταβλητότητα και την αδυναμία ελέγχου της ενέργειας του ανέμου, αποτελούν αντικείμενο έντονης ερευνητικής δραστηριότητας σε διεθνές επίπεδο.

Τα ζητήματα της δεύτερης κατηγορίας είναι κατά γενική ομολογία μικρότερης σημασίας και μπορούν να επιλυθούν με προσεκτική τοπογραφική μελέτη των αιολικών πάρκων καθώς και τη συνεχή εξέλιξη των ηλεκτρικών μηχανών.

Τέλος, αξίζει να τονιστεί ότι τροχοπέδη στην ανάπτυξη των ΑΠΕ και ιδιαίτερα των αιολικών πάρκων στη χώρα μας αποτελούν και τρεις ακόμη λόγοι. Πρώτον, οι χρονοβόρες και επίπονες διαδικασίες έκδοσης αδειών εγκατάστασης που οφείλονται κυρίως στην έλλειψη χωροταξικού σχεδιασμού και τη μη επαρκή στελέχωση και εκπαίδευση των αρμόδιων περιφερειακών υπηρεσιών. Δεύτερον, η έλλειψη κτηματολογίου και γενικότερου σχεδιασμού της χρήσης της γης και τρίτον η ελλιπής ενημέρωση των πολιτών για τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

1.3. Γενικά στοιχεία περί ανεμογεννητριών

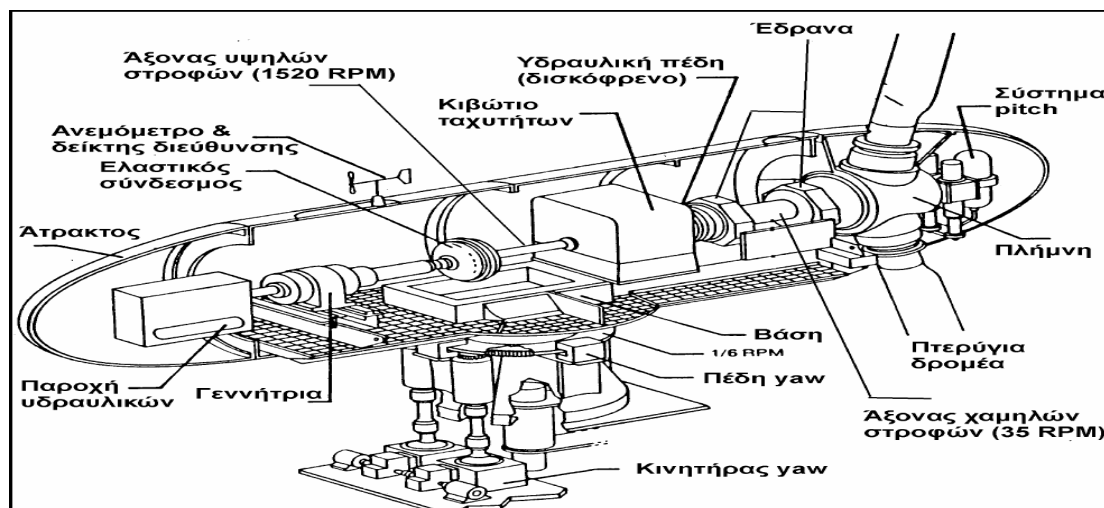
Τα τελευταία χρόνια, η βιομηχανία παραγωγής ανεμογεννητριών έχει γνωρίσει μεγάλη οικονομική άνθηση. Τα αποτελέσματα της άνθησης αυτής είναι να παρουσιάζονται στην αγορά πολλοί τύποι ανεμογεννητριών που διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους και παράλληλα μία ραγδαία αύξηση στα μεγέθη τους.

Ανεξάρτητα από τον τύπο της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιείται σε κάθε εφαρμογή, αυτή αποτελείται από τα παρακάτω τμήματα :

- ❖ Τον πύργο
- ❖ Την έλικα με δύο ή τρία πτερύγια
- ❖ Το μηχανισμό περιστροφής και προσανατολισμού
- ❖ Το μηχανικό φρένο
- ❖ Τη γεννήτρια
- ❖ Τους αισθητήρες ταχύτητας και τον έλεγχο αυτής

1.3.1. Ο πύργος

Ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζει την έλικα και την άτρακτο η οποία περιέχει το μηχανικό φρένο, το κιβώτιο ταχυτήτων, τη γεννήτρια και το μηχανισμό περιστροφής. Το ύψος του πύργου κατά το παρελθόν κυμαινόταν στο εύρος των 20-50 μέτρων. Για ανεμογεννήτριες μεσαίου και μεγάλου μεγέθους, ο πύργος είναι ελαφρά ψηλότερος από τη διάμετρο της έλικας. Για ανεμογεννήτριες μικρού μεγέθους ο πύργος είναι συνήθως λίγες φορές μεγαλύτερος από τη διάμετρο της έλικας για να αποφεύγεται το φτωχό αιολικό περιεχόμενο σε μικρά ύψη πάνω από το έδαφος.



Σχήμα 1.2 Εσωτερικό ατράκτου ανεμογεννήτριας

Οι πύργοι οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις μέρες μας, είναι είτε από οπλισμένο σκυρόδεμα, είτε μεταλλικοί. Η κατασκευή τους είναι συνηθέστερα σωληνωτή και πιο σπάνια δικτυωτή.

Το κύριο μέλημα στην κατασκευή του πύργου, είναι η δυναμική του συμπεριφορά. Οι ταλαντώσεις του και οι περιοδικές καταπονήσεις του που προέρχονται από τις διακυμάνσεις του ανέμου, πρέπει όσο το δυνατό να ελαχιστοποιούνται κατά τη σχεδιάσή του. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να αποφεύγονται συνθήκες συντονισμού. Ζωτικής σημασίας για την επιλογή του πύργου είναι επίσης ο προβλεπόμενος τρόπος μεταφοράς και εγκατάστασής του.

1.3.2. Έλικα και πτερύγια

Δύο ή τρία πτερύγια χρησιμοποιούνται στους σύγχρονους ανεμοκινητήρες. Η σταθερή μηχανική καταπόνηση που οφείλεται στις φυγόκεντρες δυνάμεις καθώς και αυτή που οφείλεται στις ταλαντώσεις των πτερυγίων, κάνουν το σχεδιασμό των πτερυγίων τον πιο αδύναμο μηχανικό σύνδεσμο του συστήματος.

Η μηχανική καταπόνηση των πτερυγίων σε συνθήκες πολύ υψηλού ανέμου, περιορίζεται σε ανεκτά επίπεδα. Αυτό επιτυγχάνεται με τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής, η οποία περιορίζεται μέσα στα επιθυμητά όρια. Ο έλεγχος αυτός όχι μόνο προστατεύει τα πτερύγια, αλλά και τη χρησιμοποιούμενη ηλεκτρική γεννήτρια από υπερφόρτιση και υπερθέρμανση.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τα πτερύγια, διαφέρουν ανάλογα με το μέγεθος του ανεμοκινητήρα. Για τους μεγάλους ανεμοκινητήρες η κατασκευή των πτερυγίων είναι εφάμιλλη με αυτή των ελίκων των αεροπλάνων, για μεσαίου μεγέθους ανεμοκινητήρες χρησιμοποιούνται υαλονήματα σε πολλαπλές στρώσεις και εναλλαγές κατευθύνσεων, ενώ για μικρού μεγέθους χρησιμοποιούνται διάφορα υλικά όπως πολυουρεθάνη, ξύλο και υαλόνημα.

1.3.3. Μηχανισμός περιστροφής και προσανατολισμού (yaw control)

Ο μηχανισμός περιστροφής και προσανατολισμού, συνεχώς στρέφει την έλικα προς την κατεύθυνση του ανέμου. Θεωρητικές μελέτες υπαγορεύουν τον ελεύθερο ρυθμό περιστροφή της έλικας, όσο το δυνατόν περισσότερο. Από την άλλη μεριά όμως, τα στρεφόμενα πτερύγια έχοντας μεγάλες σταθερές αδράνειας παράγουν υψηλές γυροσκοπικές ροπές κατά τη διάρκεια του προσανατολισμού, που συχνά έχουν ως αποτέλεσμα υψηλό θόρυβο. Πολύ γρήγορος προσανατολισμός, μπορεί να προκαλέσει θόρυβο που να υπερβαίνει τα τοπικά αποδεκτά όρια. Συνεπώς, ένας ελεγχόμενος ρυθμός προσανατολισμού συχνά απαιτείται και είναι αυτός που εφαρμόζεται στην πράξη.

1.3.4. Έλεγχος ταχύτητας

Η ταχύτητα του δρομέα πρέπει να ελέγχεται για τρεις λόγους :

- ❖ Μέγιστη απόληψη ισχύος από τον άνεμο
- ❖ Προστασία του δρομέα, της γεννήτριας και των ηλεκτρονικών ισχύος από υπερφόρτιση σε συνθήκες υψηλού ανέμου
- ❖ Προστασία του δρομέα από υπερταχύτητα κατά τη διάρκεια αποσύνδεσης ή άλλου φαινομένου

Μπορούν να διακριθούν οι εξής περιοχές για τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου :

- ❖ Την ταχύτητα σύνδεσης της ανεμογεννήτριας (cut-in speed), στην οποία αρχίζει η ανεμογεννήτρια να παράγει ισχύ
- ❖ Την περιοχή βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή (constant maximum C_p region), όπου η ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου έτσι ώστε η απόληψη ισχύος από τον άνεμο να βελτιστοποιείται
- ❖ Την περιοχή σταθερής ισχύος εξόδου (constant power output region)
- ❖ Την ταχύτητα αποσύνδεσης (cut-out speed)

1.3.5. Στοιχεία ανεμογεννητριών του εμπορίου

Ο πίνακας 1.5 περιέχει τα κυριότερα μοντέλα ανεμογεννητριών που κυριαρχούν τη στιγμή αυτή στο εμπόριο.

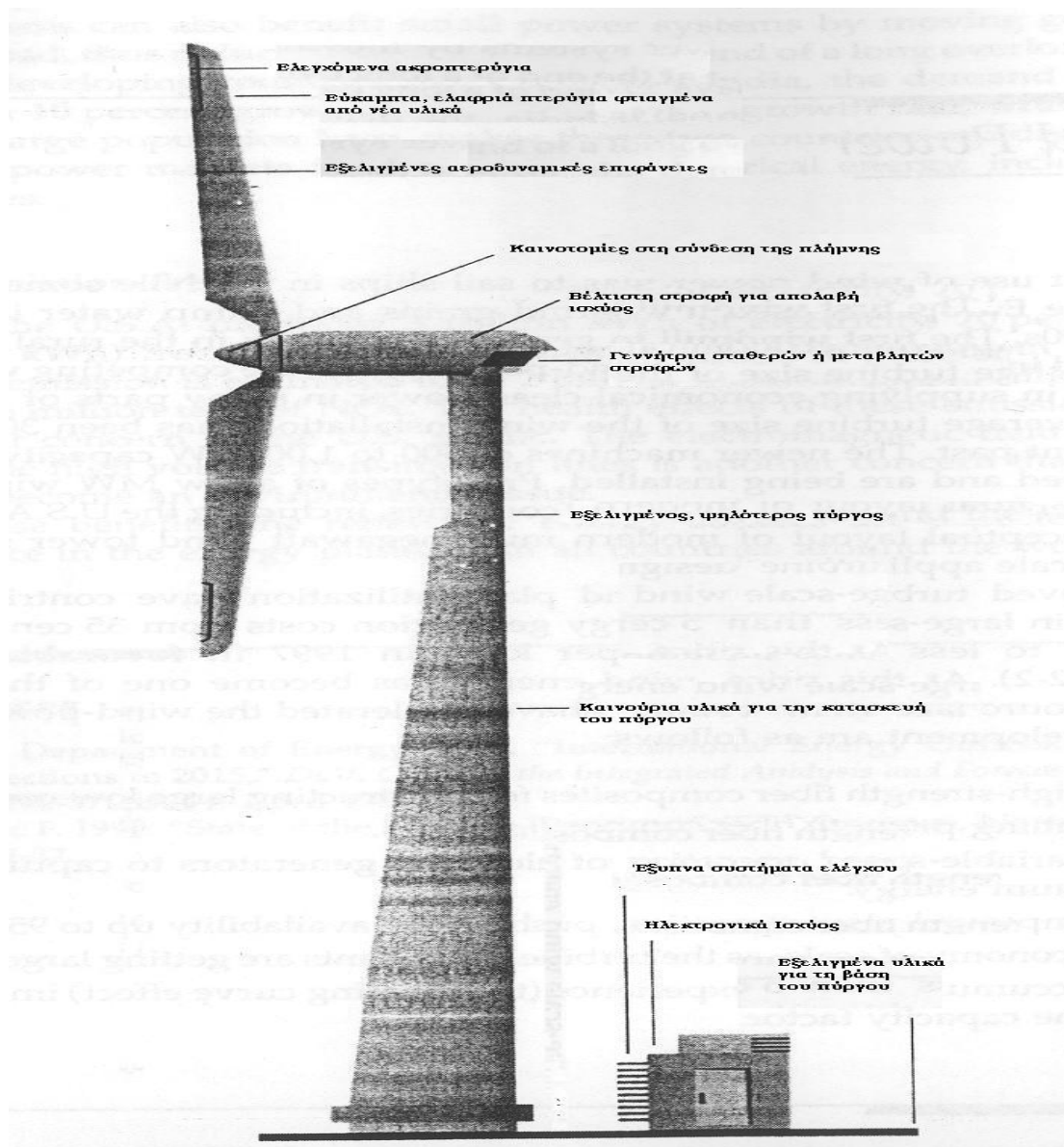
Κατασκευάστριες Εταιρείες, Τύποι Ανεμογεννητριών και επίπεδα ισχύος		
Κατασκευαστής	Τύπος	Ισχύς
Bonus (Δανία)	CT/CS // CT/AS	600 kW // 1-2.3 MW
DeWind (Γερμανία / Αγγλία)	VTDI	600 kW - 2 MW
Enercon (Γερμανία)	VTDD	300 kW - 4.5 MW
GE Wind Energy (ΗΠΑ/Γερμανία)	CT/CS // VTDI	600 kW // 900 kW - 3.6 MW
Lagerwey (Ολλανδία)	VT/AGP // VTDD	250 kW // 750 kW - 2 MW
Jeumont Industrie (Γαλλία)	VTDD	750 kW - 1.5 MW
MADE (Ισπανία)	CT/CS // VTSGP	660 kW - 1.3 MW; 2 MW
NEG Micon (Δανία)	CT/CS // CT/AS // VTDI	600 kW - 1.5 MW // 1.5-2 MW // 2.75 MW
Nordex (Γερμανία)	CT/CS // VTDI	600 kW - 1.3 MW // 1.5-2.5 MW
REpower Systems (Γερμανία)	CT/CS // CT/AGP // VTDI	600 - 750 kW // 1.5-2 MW 1050 kW
Vestas (Δανία)	SVT/OSP // VTDI	660 kW - 2.75 MW // 850 kW - 3 MW
CT/CS = Σταθερών Στροφών, Σταθερό βήμα έλικας CT/AS = Σταθερών Στροφών, Ενεργό stall (αρνητικό μεταβλητό βήμα έλικας, 3-5 degrees) VTDI = Μεταβλητής ταχύτητας (+ έλεγχος pitch), Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης VTDD = Μεταβλητής ταχύτητας, Σύγχρονη Γεννήτρια + έλεγχος pitch (Enercon + Lagerwey + 1.5 MW Jeumont), Σταθερό βήμα έλικας (Jeumont J48 (750 kW)) VTSGP = Μεταβλητής ταχύτητας + έλεγχος pitch, με Σύγχρονη Γεννήτρια VT/AGP = Μεταβλητής ταχύτητας /+ έλεγχος pitch, με Ασύγχρονη Γεννήτρια (100% τροφοδότηση μέσω των μετατροπέων) CT/AGP = Σταθερών Στροφών + έλεγχος pitch με Ασύγχρονη Γεννήτρια SVT/OSP = Ημι-μεταβλητής ταχύτητας + έλεγχος pitch (Σύστημα OptiSlip)		

Πίνακας 1.5 Ανεμογεννήτριες του εμπορίου

Το πρώτο σύστημα οδήγησης μεταβλητών στροφών αναπτύχθηκε από την αυστριακή *Villas* στο 600 kW μοντέλο της. Το σύστημα περιελάμβανε επίσης έλεγχο του βήματος των πτερυγίων, αλλά λόγω του κόστους των ηλεκτρονικών μετατροπέων και άλλων προβλημάτων δε σημείωσε εμπορική επιτυχία. Επίσης η γερμανική εταιρεία *Enercon* εισήγαγε μια ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών 80 kW με πτερύγια σταθερού βήματος και το 1993 παρήγαγε το πρώτο εμπορικό μοντέλο 500 kW για μεσαίου μεγέθους ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με έλεγχο του βήματος των πτερυγίων. Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών παράγονται επίσης από την ολλανδική *Lagerwey*, τη γαλλική *Jeumont* και τη σουηδική εταιρεία *ABB*. Οι δύο τελευταίες χρησιμοποιούν σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών.

Στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών κυριαρχούν τα μοντέλα της *Enercon* η οποία χρησιμοποιεί σύγχρονες γεννήτριες. Με την χρήση σύγχρονης γεννήτριας απαλείφεται η απαίτηση της παραγωγής άεργου ισχύος

από τους μετατροπείς. Αυτό είναι και το βασικό πλεονέκτημα αυτών των διατάξεων αφού έτσι μειώνεται το μέγεθος και το κόστος των μετατροπέων (ο μετατροπέας της γεννήτριας μπορεί να είναι ακόμη και ένας απλός ανορθωτής διόδων). Με τη χρήση σύγχρονων γεννητριών μεγάλου αριθμού πόλων είναι δυνατή η κατάργηση του κιβωτίου ταχυτήτων κάτι που μειώνει σημαντικά το κόστος, το βάρος της διάταξης και τον εκπεμπόμενο θόρυβο.



Σχήμα 1.3 Άποψη μιας σύγχρονης ανεμογεννήτριας

Σήμερα, μπορούμε να διακρίνουμε τις ανεμογεννήτριες με πάρα πολλά κριτήρια που μπορεί να αφορούν το είδος της χρησιμοποιούμενης γεννήτριας, τη χρήση ή όχι ηλεκτρονικών μετατροπέων, το είδος των πτερυγίων (stall-controlled, pitch-controlled), την τοποθέτηση των πτερυγίων ως προς το έδαφος (οριζοντίου ή κάθετου άξονα), τη φορά πρόπτωσης του ανέμου (down-stream, up-stream) κτλ.

Τα κύρια κριτήρια για το διαχωρισμό των ανεμογεννητριών της εποχής μας είναι τρία :

- ❖ Η λειτουργία με σταθερές ή μεταβλητές στροφές
- ❖ Το είδος της χρησιμοποιούμενης ηλεκτρικής γεννήτριας (ασύγχρονη, σύγχρονη, συνεχούς ρεύματος)
- ❖ Ο τύπος των πτερυγίων

1.4. Λειτουργία σταθερών και μεταβλητών στροφών

1.4.1. Λειτουργία σταθερών στροφών

Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών αποτελούν τις «συμβατικές» ανεμογεννήτριες του παρελθόντος που όμως ακόμα και σήμερα αποτελούν το σημαντικότερο κομμάτι από τις ήδη λειτουργούσες ανεμογεννήτριες. Μπορούν να χρησιμοποιούν είτε γεννήτριες επαγωγής είτε σύγχρονες γεννήτριες, με τις πρώτες όμως να χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά λόγω σημαντικών μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν οι δεύτερες, όπως η ιδιαίτερα αυξημένη ταλαντωτικότητα της απόκρισής τους σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ανέμου και το αυξημένο κόστος και βάρος τους.

Οι ανεμογεννήτριες αυτές χρωστάνε τη μεγάλη εξάπλωσή τους κυρίως στο μικρό τους κόστος, αφού για τη σύνδεσή τους με το δίκτυο δε χρειάζεται να παρεμβάλλονται ηλεκτρονικοί μετατροπείς, των οποίων το κόστος είναι πολύ σημαντικό. Η σύνδεση αυτή γίνεται απευθείας, με αποτέλεσμα η ταχύτητα του δρομέα να είναι σταθερή και πρακτικά ίση με τη σύγχρονη, με αποκλίσεις της τάξης περίπου του 1%, δηλαδή όσο και η ολίσθηση ονομαστικής λειτουργίας. Επίσης, οι ανεμογεννήτριες αυτού του είδους παρουσιάζουν και τα πλεονεκτήματα της εξαιρετικής απλότητας, της εξαιρετικής αξιοπιστίας, καθώς και των μηδενικών αναγκών συντήρησής τους.

Παράλληλα όμως, η λειτουργία των σταθερών στροφών παρουσιάζει και κάποια πολύ σημαντικά μειονεκτήματα, τα σημαντικότερα από τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω :

- ❖ Λειτουργία με μη βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή
- ❖ Αυξημένη μεταβλητότητα ισχύος εξόδου
- ❖ Χαμηλός συντελεστής ισχύος εξόδου
- ❖ Μεταβατικά φαινόμενα εκκίνησης και ζεύξης - απόζευξης

Όλα τα προαναφερθέντα σημαντικά προβλήματα, έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη στροφή τόσο του επιστημονικού ενδιαφέροντος όσο και των κατασκευαστών προς τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, οι οποίες φαίνονται να δίνουν εάν όχι ριζική, τουλάχιστον ικανοποιητική λύση σε πολλά από τα παραπάνω.

1.4.2. Λειτουργία μεταβλητών στροφών

Η ιδέα των μεταβλητών στροφών, στηρίζεται στις αρχές λειτουργίας ενός σφονδύλου. Όταν παρατηρείται αύξηση της αεροδυναμικής ισχύος, μέρος της μετατρέπεται σε κινητική αποκόπτοντας με αυτόν τον τρόπο τις γρήγορες μεταβολές της. Η αντίστροφη λειτουργία συμβαίνει κατά τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου.

Για να είναι η απόδοση της ανεμογεννήτριας βέλτιστη, πρέπει η ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων να είναι ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας απαιτεί σημαντική μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων. Κάτι τέτοιο πήγε παλαιότερα να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους, όπως με χρήση υδραυλικών συστημάτων ή κιβωτίων ταχυτήτων μεταβαλλόμενου λόγου, αλλά αργότερα οι μέθοδοι αυτοί εγκαταλείφθηκαν.

Τη θέση των παραπάνω μεθόδων πήρανε τα συστήματα ηλεκτρονικών μετατροπών συχνότητας τα οποία έχουν λίγες απώλειες και είναι αρκετά αξιόπιστα. Τα συστήματα αυτά παρεμβάλλονται ανάμεσα στο δίκτυο και στην ηλεκτρική γεννήτρια και έτσι η ταχύτητα περιστροφής αποδεσμεύεται από τη σταθερή συχνότητα του δικτύου και είναι δυνατή η μεταβολή της εντός ευρέων ορίων.

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών έχουν αρχίσει να κυριαρχούν στην αγορά λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν, μερικά εκ των οποίων παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω :

- ❖ Βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης της ανεμογεννήτριας
- ❖ Εξομάλυνση της μεταβλητότητας των μηχανικών ροπών
- ❖ Περιορισμός καταπονήσεων – μεγαλύτερη διάρκεια ζωής
- ❖ Μείωση τυχαίας μεταβλητότητας της ισχύος εξόδου
- ❖ Περιορισμός ταχέων διακυμάνσεων της τάσης (flicker)
- ❖ Δυνατότητα μείωσης ενεργού ισχύος εξόδου
- ❖ Δυνατότητα ελέγχου αέργου ισχύος εξόδου
- ❖ Χαμηλά επίπεδα θορύβου
- ❖ Διευκόλυνση διαδικασιών εκκίνησης

Τα μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, μπορούν να τοποθετηθούν κυρίως στον οικονομικό τομέα. Πιο συγκεκριμένα, τα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρονικά ισχύος που είναι απαραίτητα για τη σύνδεση τέτοιου τύπου ανεμογεννητριών στο δίκτυο, επιβαρύνουν κατά πολύ το κόστος τους, μιας και αυτά αντιπροσωπεύουν από οικονομικής πλευράς το μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Εκτός από τα οικονομικά μειονεκτήματα της λειτουργίας των μεταβλητών στροφών, κρίνεται απαραίτητο να σταθούμε και σε μερικά ακόμη που ενδεικτικά αναφέρονται παρακάτω :

- ❖ Αυξημένη πολυπλοκότητα
- ❖ Έγχυση αρμονικών συχνοτήτων στο δίκτυο
- ❖ Εγκατάσταση φίλτρων

❖ Παραμόρφωση ρευμάτων γεννήτριας – αύξηση απωλειών

Όμως, τα παραπάνω προβλήματα καθώς και το πρόβλημα του κόστους, αναμένεται να επιλυθούν σε σημαντικό βαθμό τα επόμενα χρόνια χάρη στην πρόοδο της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος, η οποία θα επιτρέψει τόσο τη σταδιακή μείωση του κόστους τους, όσο και τη βελτίωση των λειτουργικών τους χαρακτηριστικών, γεγονότα που θα κάνουν τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών ακόμη πιο ελκυστικές και ενδιαφέρουσες.

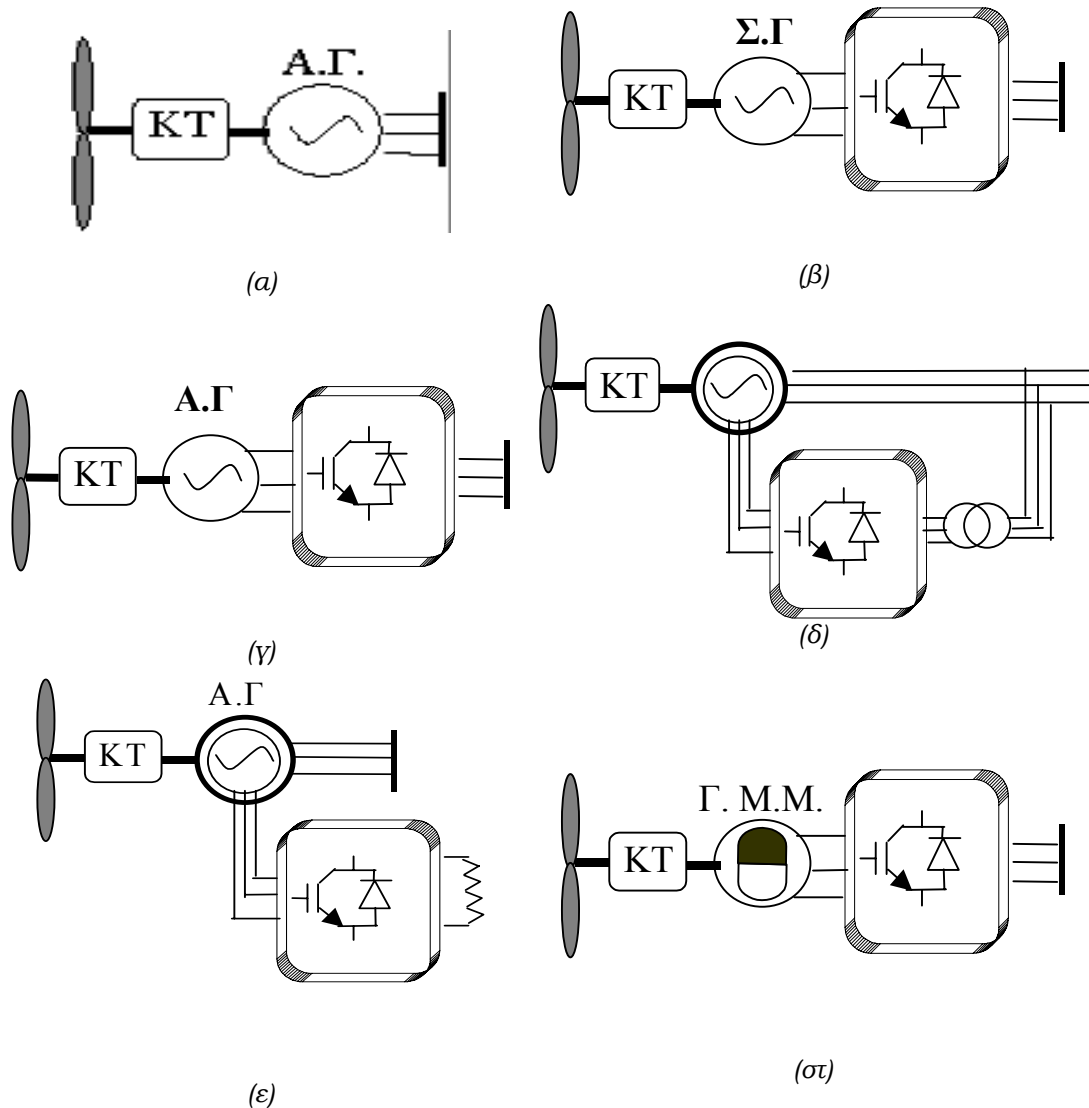
1.5. Είδος χρησιμοποιούμενης ηλεκτρικής γεννήτριας

Τόσο η γεννήτρια επαγωγής όσο και η σύγχρονη γεννήτρια απαντώνται συχνά στις ανεμογεννήτριες, η κάθε μία για διαφορετικούς λόγους. Η γεννήτρια επαγωγής με δρομέα κλωβού χρησιμοποιείται σε σχετικά μικρά μεγέθη ανεμογεννητριών, ενώ αυτή με τυλιγμένο δρομέα και δακτυλίους απαντάται σε ανεμογεννήτριες μέσου και μεγάλου μεγέθους. Η σύγχρονη γεννήτρια χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για μέσου και μεγάλου μεγέθους ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες αυτές, μπορούν να διακριθούν σε ηλεκτρικά διεγειρόμενες, (συνήθως αυτοδιεγειρόμενες μέσω ανορθωτών) και με μόνιμους μαγνήτες. Πλεονέκτημα των πρώτων είναι η δυνατότητα ελέγχου της διεγέρσεως και συνεπώς της παραγωγής αέργου ισχύος, ενώ οι δεύτερες είναι απλούστερες και στιβαρότερες. Τέλος, γεννήτριες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται σε πολύ μικρή έκταση, κυρίως για μικρού μεγέθους ανεμογεννήτριες, ιδίως όταν γίνεται απευθείας χρήση συνεχούς ρεύματος.

Στον πίνακα 1.6 που έπεται, περιγράφονται οι τυπικές διαμορφώσεις του ηλεκτρικού μέρους της ανεμογεννήτριας, ενώ στο σχήμα 1.4 φαίνονται σχηματικά οι κυριότερες τοπολογίες σύνδεσης ανεμογεννητριών.

ΓΕΝΗΤΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ		ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΗΤΡΙΑ		ΓΕΝΗΤΡΙΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ
Δρομέας κλωβού	Απ' ευθείας σύνδεση, σταθερών στροφών	Ηλεκτρική διέγερση	Απ' ευθείας σύνδεση, σταθερών στροφών	Απ' ευθείας σύνδεση σε δίκτυο DC
	Σύνδεση μέσω ανορθωτή και αντιστροφή (AC\DC\AC), μεταβλητών στροφών		Σύνδεση μέσω ανορθωτή και αντιστροφή (AC\DC\AC), μεταβλητών στροφών	
	Σύνδεση μέσω κυκλομετατροπέα (AC\AC), μεταβλητών στροφών			
Δρομέας με δακτυλίους	Με έλεγχο ολισθήσεως (optislip), μεταβλητών στροφών	Μόνιμοι μαγνήτες	Σύνδεση μέσω ανορθωτή και αντιστροφή (AC\DC\AC), μεταβλητών στροφών	Σύνδεση μέσω αντιστροφή (DC\AC) σε δίκτυο AC
	Διπλή τροφοδότηση μέσω ανορθωτή και αντιστροφή (AC\DC\AC), μεταβλητών στροφών		Σύνδεση μέσω κυκλομετατροπέα (AC\AC), μεταβλητών στροφών	
	Διπλή τροφοδότηση μέσω κυκλομετατροπέα (AC\AC), μεταβλητών στροφών			

Πίνακας 1.6 Διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους A/Γ



Σχήμα 1.4 Κυριότερες τοπολογίες σύνδεσης ανεμογεννητριών
 α) Α/Γ σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής
 β) Διάταξη μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια
 γ) Διάταξη μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής
 δ) Διάταξη διπλής τροφοδότησης
 ε) Διάταξη μεταβλητών στροφών με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση του δρομέα (optislip)
 στ) Διάταξη εφοδιασμένη με γεννήτρια μονίμων μαγνητών

1.6. Τύπος των πτερυγίων

A) Πτερύγια με έλεγχο του βήματος (pitch controlled), που μπορούν να περιστραφούν κατά το διαμήκη άξονά τους. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου και κατά συνέπεια η προσπίπτουσα σε αυτά αεροδυναμική ισχύς. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του σχήματος είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω του συστήματος ελέγχου τους, αλλά και της

χρήσης υδραυλικών και ηλεκτρομηχανικών μέσων για τη στροφή των πτερυγίων.

Β) Οι ανεμογεννήτριες με αεροδυναμικό έλεγχο της ροής και ισχύος του δρομέα (stall controlled), διαθέτουν πτερύγια σταθερής κλίσης τα οποία σε υψηλές ταχύτητες ανέμου (χαμηλές τιμές του λ) εμφανίζουν απώλεια αεροδυναμικής στήριξης. Έτσι περιορίζεται η αναπτυσσόμενη ροπή και η παραγόμενη ενέργεια.

Γ) Τελευταία παρατηρείται η τάση να χρησιμοποιείται ενεργός έλεγχος του βήματος των πτερυγίων στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες (active stall). Η διαφορά αυτού του τρόπου ελέγχου σε σχέση με τον κλασικό έλεγχο του βήματος των πτερυγίων είναι ότι όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή, η γωνία pitch μεταβάλλεται αντίθετα, μεγαλώνει δηλαδή η γωνία με τον άνεμο αποκόπτοντας με αυτόν τον τρόπο την περίσσεια αεροδυναμικής ισχύος. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η ισχύς εξόδου της γεννήτριας μπορεί να ελεγχθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και κατά συνέπεια δεν καταπονείται το σύστημα σε περιόδους ριπών ανέμου. Ο ενεργός έλεγχος της γωνίας pitch χρησιμοποιείται σε μεγάλες ανεμογεννήτριες, άνω του 1 MW.

1.7. Αντικείμενο και δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την προσομοίωση ανεμογεννητριών σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής και των φωτοβολταϊκών γεννητριών.

Πιο συγκεκριμένα, αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Το **πρώτο κεφάλαιο**, αποτελεί μία προκαταρκτική εισαγωγή στις ανεμογεννήτριες και στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γενικότερα. Περιγράφεται σε γενικές γραμμές η λειτουργία των ανεμογεννητριών σταθερής και μεταβλητής ταχύτητας, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται οι πλέον χρησιμοποιούμενες ανεμογεννήτριες τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε ελληνικό επίπεδο. Τέλος, σε όλη την έκταση του κεφαλαίου, παρουσιάζονται χρήσιμα στατιστικά στοιχεία για την ανάπτυξη της χρήσης των ανεμογεννητριών.

Στο **κεφάλαιο 2**, περιγράφονται όλα τα χρησιμοποιούμενα από την ανεμογεννήτρια υποσυστήματα. Εξάγονται τα ακριβή μαθηματικά μοντέλα για το αεροδυναμικό και μηχανικό μέρος, ενώ για τη γεννήτρια επαγωγής εξάγεται τόσο το πλήρες (τέταρτης τάξης) όσο και το μειωμένης τάξης μοντέλο της (δεύτερης τάξης). Επιχειρείται η προσομοίωση της ανεμογεννήτριας και με τα δύο μοντέλα και εμφανίζονται συγκριτικά διαγράμματα για τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, τη ζεύξη της ανεμογεννήτριας, καθώς και για συμμετρικά τριφασικά βραχυκυκλώματα ως προς γη στους ακροδέκτες της.

Στο **τρίτο κεφάλαιο**, αρχικά αναπτύσσεται η θεωρία των συμμετρικών συνιστωσών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Εξάγονται δύο μοντέλα για τη γεννήτρια επαγωγής που χρησιμοποιούν την παραπάνω θεωρία, τα οποία δοκιμάζονται υπό τυπικές ασύμμετρες συνθήκες του στάτη (ασυμμετρία

μέτρων και ασυμμετρία μέτρων και φάσης). Διάφορα χαρακτηριστικά σφάλματα, όπως μονοφασικά ή διφασικά βραχυκυκλώματα και αποκοπές γραμμών, δεν προσομοιώνονται στην παρούσα εργασία αφού δεν είναι διαθέσιμο το μοντέλο δικτύου που να μπορεί να προσομοιώνει ασύμμετρες καταστάσεις. Οι ασύμμετρες συνθήκες στο στάτη της ανεμογεννήτριας εξετάζονται επίσης και με το πλήρες μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής.

Τέλος, το **κεφάλαιο 4**, αποτελεί μία εισαγωγή στις φωτοβολταϊκές γεννήτριες. Εξάγεται το μοντέλο φωτοβολταϊκής γεννήτριας η οποία λειτουργεί σε συνθήκες μέγιστης ισχύος. Για το φωτοβολταϊκό πίνακα χρησιμοποιείται το απλοποιημένο μοντέλο μίας διόδου και εξετάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας στις συνθήκες μέγιστης ισχύος.

Στο **πρώτο παράρτημα**, δίνονται επιπλέον πληροφορίες για το ανά μονάδα σύστημα (p.u. system) καθώς και κάποια στοιχεία από τη θεωρία των στρεφόμενων πλασίων αναφοράς, ενώ στο **δεύτερο** παρουσιάζονται στατιστικοί πίνακες όσον αφορά την παρούσα κατάσταση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον ελλαδικό χώρο και τις προοπτικές εξέλιξής τους.

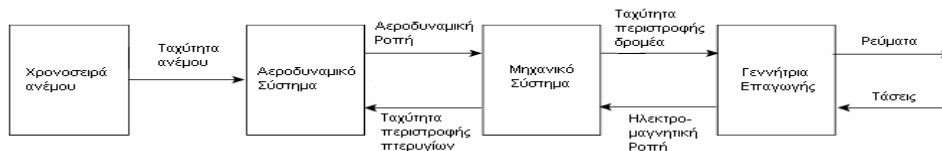
Στο **τρίτο** και στο **τέταρτο παράρτημα**, παρουσιάζονται η θεωρία των συμμετρικών συνιστωσών στη γενικότερη μορφή της και τα αναλυτικά αποτελέσματα της τάσης και της έντασης της φωτοβολταϊκής γεννήτριας σε λειτουργία μέγιστης ισχύος, σε διάφορες χαρακτηριστικές θερμοκρασίες.

Κεφάλαιο 2

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

2.1. Γενικότερη περιγραφή του μοντέλου

Η γενικότερη δομή του μοντέλου της ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής, εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.1) :



Σχήμα 2.1 Σχηματικό διάγραμμα μοντέλου Α/Γ με γεννήτρια επαγωγής

Αρχικά, από τη δεδομένη χρονοσειρά ανέμου (που μπορεί να είναι είτε πραγματικές μετρήσεις, είτε τεχνητή αναπαραγωγή) διαβάζεται η ταχύτητα του ανέμου (V_w) για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Η παραπάνω ταχύτητα αποτελεί την είσοδο του αεροδυναμικού υποσυστήματος, παράλληλα με την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων. Η ταχύτητα του ανέμου μετατρέπεται σε αεροδυναμική ροπή η οποία με τη σειρά της αποτελεί τη μία είσοδο του μηχανικού υποσυστήματος της κίνησης. Την άλλη είσοδο συμπληρώνει μία ακόμη ροπή, η ηλεκτρομαγνητική, που προέρχεται από το μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής. Το προαναφερθέν μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής, απαιτεί σαν είσοδο τάσεις (είτε του δικτύου εάν μιλάμε για ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών, είτε του αντιστροφέα εάν μιλάμε για ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών), ενώ σαν έξοδοι χρησιμοποιούνται τα παραγόμενα ρεύματα από αυτήν. Εναλλακτικά, αντί των ρευμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έξοδος και η ισχύς της ανεμογεννήτριας (τόσο η ενεργός όσο και η άεργος) στη λειτουργία σταθερών στροφών.

Για όλα τα υποσυστήματα που εμφανίζονται στο σχήμα 2.1, θα αναφερθούμε λεπτομερώς στις παρακάτω παραγράφους. Το μοντέλο του δικτύου καθώς και το μοντέλο του αντιστροφέα στη μεριά του δικτύου, δεν έχουν υλοποιηθεί στην εργασία αυτή.

2.2. Ανάπτυξη μοντέλου του αεροδυναμικού συστήματος

Η μετατροπή της αεροδυναμικής ισχύος του προσπίπτοντος ανέμου σε μηχανική από το δρομέα της Α/Γ, μπορεί να υπολογιστεί μέσω της παρακάτω σχέσης :

$$P_w = \frac{\rho}{2} C_p A V_w^3 \quad (2.1)$$

όπου:

- P_w** είναι η μηχανική ισχύς του δρομέα (W)
- ρ** είναι η πυκνότητα του αέρα (1.25 kg/m³)
- V_w** είναι η ταχύτητα του ανέμου
- C_p** είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος του δρομέα
- $A = \pi R^2$** είναι η επιφάνεια του δίσκου του δρομέα ακτίνας R (m²)

Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p , εξαρτάται από δύο παράγοντες, δηλαδή είναι μια συνάρτηση της μορφής :

$$C_p = C_p(\lambda, \beta) \quad (2.2)$$

Ο παράγοντας β , υπεισέρχεται στον υπολογισμό του αεροδυναμικού συντελεστή όταν θεωρούμε ανεμογεννήτριες με πτερύγια μεταβλητού βήματος. Στην παρούσα εργασία, προσομοιώνονται ανεμογεννήτριες με αεροδυναμικό έλεγχο της ροής και ισχύος του δρομέα (stall controlled) και συνεπώς η σχέση 2.2 μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής :

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (2.3)$$

όπου λ είναι ο λόγος της ταχύτητας του ακροπερυγίου (tip speed ratio) προς την ταχύτητα του ανέμου και ορίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$\lambda = \omega_R \frac{R}{V_w} \quad (2.4)$$

Η τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή C_p , εξαρτάται από τον τύπο του ανεμοκινητήρα που χρησιμοποιείται. Τυπικές βέλτιστες τιμές του κυμαίνονται μεταξύ 0.4 ÷ 0.5, ενώ παράλληλα υπάρχει το μέγιστο θεωρητικό όριο του που είναι το 0.593 (ιδανική έλικα – όριο του Beltz).

Για την εύρεση της τιμής του αεροδυναμικού συντελεστή C_p στην εργασία αυτή, θα χρησιμοποιηθεί μία προσεγγιστική πολυωνυμική παράσταση του λ , τετάρτου βαθμού.

Η αεροδυναμική ροπή που αντιστοιχεί στην αεροδυναμική ισχύ που προσδιορίζεται μέσω της σχέσης (2.1), είναι :

$$T_w = \frac{P_w}{\omega_R} \quad (2.5)$$

όπου ω_R είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της έλικας (rad/sec).

Τέλος, στο τέλος της παραγράφου αυτής, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η μοντελοποίηση του αεροδυναμικού μέρους έχει γίνει κατά τον απλούστερο τρόπο εσκεμμένα, αφού μια διαφορετική μοντελοποίηση που να χρησιμοποιεί τη θεωρία της έλικας θα ήταν δύσχρηστη για τους παρακάτω λόγους :

- ❖ Απαιτεί περισσότερες γνώσεις αεροδυναμικής από αυτές που συνήθως κατέχουν οι ηλεκτρολόγοι μηχανικοί, καθιστώντας έτσι το μοντέλο δυσνόητο προς το ενδιαφερόμενο κοινό
- ❖ Απαιτεί λεπτομερή γνώση της γεωμετρίας της έλικας, η οποία συνήθως δεν είναι διαθέσιμη, ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια μελέτης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας
- ❖ Καθιστά δύσκολη τη χρησιμοποίηση χρονοσειράς ανέμου

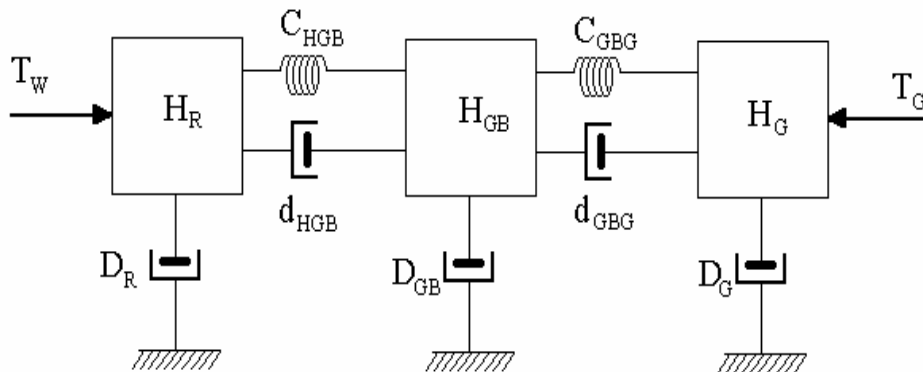
Για τους λόγους αυτούς, στα μοντέλα ανεμογεννητριών που παρουσιάζονται παρακάτω, χρησιμοποιείται ένα στατικό μοντέλο για το αεροδυναμικό υποσύστημα, στο οποίο γίνεται η υπόθεση ενός αλγεβρικού συσχετισμού μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και της μηχανικής ισχύος που δημιουργείται από αυτόν. Το μειονέκτημα χρησιμοποίησης του μοντέλου αυτού είναι η μειωμένη του ακρίβεια, γεγονός που οφείλεται τόσο στη χρησιμοποίηση χρονοσειρών ανέμου, όσο και στο ότι αμελείται ο δυναμικός τρόπος μετατροπής του ανέμου σε μηχανική ροπή.

2.3. Μοντελοποίηση του μηχανικού μέρους μετάδοσης της κίνησης

Για την προσομοίωση του μηχανικού μέρους των ανεμογεννητριών, λαμβάνεται υπ' όψη μόνο το στρεπτικό σύστημα μετάδοσης της κίνησης στην παρούσα εργασία. Για την αναπαράσταση των στρεπτικών χαρακτηριστικών του συστήματος μετάδοσης της κίνησης χρησιμοποιείται η κλασική μέθοδος μοντελοποίησης των ελαστικά συνδεδεμένων στρεφόμενων μαζών, αφού οι ανεμογεννήτριες κάνουν χρήση ελαστικών αξόνων για τη μείωση της καταπόνησης του μηχανικού μέρους και της μεταβλητότητας της παραγόμενης ισχύος. Η ελαστικότητα του συστήματος μετάδοσης της κίνησης σε συνδυασμό με τη μεγάλη αδράνεια του δρομέα και το σχετικά πλούσιο φασματικό περιεχόμενο του ανέμου οδηγούν στην εμφάνιση στρεπτικών ταλαντώσεων, οι οποίες δε μπορούν να αγνοηθούν κατά την προσομοίωση.

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται εδώ είναι αυτό των τριών μαζών, το οποίο έχει δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα στα περισσότερα προβλήματα, ακόμη και στην περίπτωση γρήγορων μεταβατικών φαινομένων όπως τα

βραχυκυκλώματα. Το μοντέλο αυτό αναπαρίσταται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 Χρησιμοποιούμενο ισοδύναμο μοντέλο τριών στρεφόμενων μαζών για την προσομοίωση του μηχανικού μέρους της ανεμογεννήτριας

Για τη γραφή των εξισώσεων κατάστασης N στρεφόμενων ελαστικά συνδεδεμένων μαζών, υπάρχουν δύο διαφορετικές μεθοδολογίες. Σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο γραφής ως μεταβλητές κατάστασης θεωρούνται οι γωνιακές θέσεις και ταχύτητες των μαζών, ενώ κατά το δεύτερο ως μεταβλητές κατάστασης θεωρούνται οι γωνιακές ταχύτητες και οι ροπές ελαστικότητας. Στην εργασία αυτή, χρησιμοποιείται ο πρώτος τρόπος γραφής (ως μεταβλητές κατάστασης επιλέγονται οι γωνιακές θέσεις και ταχύτητες των μαζών), ο οποίος περιγράφεται παρακάτω για N μάζες στη γενικότερή του μορφή καθώς και για τρεις μάζες ειδικότερα, η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

Ξεκινώντας από την εξίσωση κίνησης κάθε μάζας ξεχωριστά, καταλήγουμε στη μητρική εξίσωση κίνησης :

$$2\mathbf{H}\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{D}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{C}\boldsymbol{\theta}_m = \mathbf{T} \quad (2.6)$$

όπου :

$$\boldsymbol{\theta}_m = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T \quad \begin{array}{l} \text{το } Nx1 \text{ διάνυσμα των γωνιακών θέσεων} \\ \text{των σωμάτων.} \end{array}$$

$$\boldsymbol{\omega} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N]^T \quad \text{το } Nx1 \text{ διάνυσμα των γωνιακών ταχυτήτων.}$$

$$\mathbf{T} = [T_1, T_2, \dots, T_N]^T \quad \begin{array}{l} \text{το } Nx1 \text{ διάνυσμα των εξωτερικών ροπών} \\ \text{των σωμάτων.} \end{array}$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_1 & & \\ & \ddots & \\ & & H_N \end{bmatrix}$$

ο διαγώνιος $N \times N$ πίνακας των σταθερών αδράνειας.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \cdot & & & \\ & \cdot & D_{i-1,i} & \\ & & D_{i,i} & \\ & & D_{i+1,i} & \cdot \\ & & & & \cdot \end{bmatrix}$$

ο $N \times N$ τρι-διαγώνιος πίνακας απόσβεσης με διαγώνια στοιχεία το άθροισμα των στοιχείων απόσβεσης που καταλήγουν στην αντίστοιχη αδράνεια και μη διαγώνια στοιχεία (i,j) το αντίθετο του στοιχείου απόσβεσης μεταξύ των αδρανειών i και j .

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cdot & & & \\ & \cdot & C_{i-1,i} & \\ & & C_{i,i} & \\ & & C_{i+1,i} & \cdot \\ & & & & \cdot \end{bmatrix}$$

ο $N \times N$ τρι-διαγώνιος πίνακας δυσκαμψίας με διαγώνια στοιχεία το άθροισμα των στοιχείων δυσκαμψίας που καταλήγουν στην αντίστοιχη αδράνεια και μη διαγώνια στοιχεία (i,j) το αντίθετο του στοιχείου δυσκαμψίας μεταξύ των αδρανειών i και j .

Για την περίπτωση συστήματος τριών μαζών οι προηγούμενοι πίνακες γίνονται:

$$\boldsymbol{\theta}_m = [\theta_R, \theta_{GB}, \theta_G], \quad \boldsymbol{\omega} = [\omega_R, \omega_{GB}, \omega_G],$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_R & 0 & 0 \\ 0 & H_{GB} & 0 \\ 0 & 0 & H_G \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_R + d_{HGB} & -d_{HGB} & 0 \\ -d_{HGB} & D_{GB} + d_{HGB} + d_{GBG} & -d_{GBG} \\ 0 & -d_{GBG} & D_G + d_{GBG} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{HGB} & -C_{HGB} & 0 \\ -C_{HGB} & C_{HGB} + C_{GBG} & -C_{GBG} \\ 0 & -C_{GBG} & C_{GBG} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Επιλέγοντας ως διάνυσμα κατάστασης τις γωνίες και τις γωνιακές ταχύτητες περιστροφής των σωμάτων η εξίσωση (2.6) χωρίζεται στις επόμενες εξισώσεις οι οποίες στην συνέχεια κατάλληλα διαμορφωμένες δίνουν το μοντέλο του μηχανικού συστήματος στον χώρο κατάστασης:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\theta}}_m &= \boldsymbol{\omega} \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}}_m &= \frac{1}{2} \mathbf{H}^{-1} (-\mathbf{C}\boldsymbol{\theta} - \mathbf{D}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{T}) \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}(N \times N) & \mathbf{I}(N \times N) \\ -\frac{1}{2} \mathbf{H}^{-1} \mathbf{C} & -\frac{1}{2} \mathbf{H}^{-1} \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}(N \times N) \\ \frac{1}{2} \mathbf{H}^{-1} \end{bmatrix} \mathbf{T} \quad (2.8)$$

$\mathbf{0}(N \times N)$ ο μηδενικός $N \times N$ πίνακας

$\mathbf{I}(N \times N)$ ο μοναδιαίος $N \times N$ πίνακας

ενώ επιλέγοντας σαν διάνυσμα κατάστασης τις ροπές ελαστικότητας και τις γωνίες των σωμάτων το μοντέλο του μηχανικού συστήματος είναι αυτό της (2.9). Τα επιπλέον υπεισερχόμενα μεγέθη περιγράφονται στην συνέχεια.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega} \\ \mathbf{T}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \mathbf{H}^{-1} \mathbf{D} & -\frac{1}{2} \mathbf{H}^{-1} \mathbf{G} \\ \mathbf{K} & \mathbf{0}(M \times M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega} \\ \mathbf{T}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \mathbf{H}^{-1} \\ \mathbf{0}(M \times N) \end{bmatrix} \mathbf{T} \quad (2.9)$$

όπου :

ο $N \times M$ πίνακας όπου N ο αριθμός των μαζών και M ο αριθμός των ελαστικοτήτων του οποίου τα στοιχεία είναι μονάδες σε θέσεις που αντιστοιχούν σε σύνδεση ελαστικότητας με μάζα και επιπλέον έχουν θετικό πρόσημο εάν η άλλη μάζα στην οποία συνδέεται το στοιχείο ελαστικότητας, είναι κοντινότερη στον δρομέα της γεννήτριας π.χ για το σύστημα τριών μαζών .

G

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} C_{HGB} & C_{GBG} \\ H_R \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

ο $M \times N$ πίνακας του οποίου τα στοιχεία είναι αυτά του ανάστροφου G πολλαπλασιασμένα με την κατάλληλη ελαστικότητα. π.χ για το σύστημα τριών

 K

μαζών

$$K = \begin{matrix} & H_R & H_{GB} & H_G \\ \begin{matrix} C_{HGB} \\ C_{GBG} \end{matrix} & \begin{bmatrix} C_{HGB} & -C_{HGB} & 0 \\ 0 & C_{GGB} & -C_{GGB} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

 T_t

$M \times 1$ διάνυσμα των ροπών ελαστικότητας. Για σύστημα τριών μαζών $T_t = [T_{c,R} \quad T_{c,GB} \quad T_{c,G}]$

 $O(M \times M)$, $O(M \times N)$ Μηδενικοί πίνακες $M \times M$ και $M \times N$ διάστασης

Ως έξοδοι του μηχανικού υποσυστήματος χρησιμοποιούνται οι γωνιακές ταχύτητες του δρομέα της έλικας και της γεννήτριας, ω_R και ω_G αντίστοιχα.

2.4. Ανάπτυξη μοντέλου της γεννήτριας επαγωγής

Για την ανάπτυξη του μοντέλου της ασύγχρονης γεννήτριας, γίνονται οι παρακάτω παραδοχές :

- ❖ Αγνοούνται τα φαινόμενα των άκρων, ο κορεσμός του μαγνητικού υλικού, τα ρεύματα υστέρησης και τα δινορρεύματα
- ❖ Συμμετρική μορφή του δρομέα της γεννήτριας
- ❖ Ημιτονοειδής μαγνητική ροή

2.4.1. Ανάπτυξη πλήρους μοντέλου (4^{ης} τάξης)

Το χρησιμοποιούμενο μοντέλο για την προσομοίωση της ασύγχρονης γεννήτριας, είναι εκφρασμένο στο αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς και ως μεταβλητές κατάστασης χρησιμοποιούνται οι ροές των τυλιγμάτων. Ως μεταβλητές κατάστασης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα ρεύματα, μόνο που στην περίπτωση αυτή οι εξισώσεις κατάστασης περιέχουν δύο παραγωγίσεις. Έτσι, είναι πιο αξιόπιστο να χρησιμοποιηθεί σε μία προσομοίωση γεννήτριας επαγωγής, το μοντέλο με μεταβλητές κατάστασης τις ροές των τυλιγμάτων. Υιοθετώντας σύμβαση γεννήτριας, δηλαδή ότι τα ρεύματα του στάτη είναι εξερχόμενα από τους αντίστοιχους ακροδέκτες, οι εξισώσεις του μοντέλου είναι οι εξής (σε ανά μονάδα σύστημα) :

$$\begin{aligned}
U_{sd} &= -i_{sd} * R_s - \omega * \Psi_{sq} + \frac{1}{\omega_0} * \frac{d}{dt} \Psi_{sd} \\
U_{sq} &= -i_{sq} * R_s + \omega * \Psi_{sd} + \frac{1}{\omega_0} * \frac{d}{dt} \Psi_{sq} \\
U_{rd} &= i_{rd} * R_r - (\omega - \omega_r) * \Psi_{rq} + \frac{1}{\omega_0} * \frac{d}{dt} \Psi_{rd} \\
U_{rq} &= i_{rq} * R_r + (\omega - \omega_r) * \Psi_{rd} + \frac{1}{\omega_0} * \frac{d}{dt} \Psi_{rq}
\end{aligned} \quad (2.10)$$

Οι ανεμογεννήτριες που προσομοιώνονται σε αυτή την εργασία, έχουν βραχυκυκλωμένο δρομέα και έτσι οι δύο τελευταίες εξισώσεις του συστήματος (2.10), γίνονται ίσες με το μηδέν.

Συνεπώς, οι τελικές εξισώσεις που χαρακτηρίζουν τη γεννήτρια επαγωγής με βραχυκυκλωμένο δρομέα και χρησιμοποιούνται στο συγκεκριμένο μοντέλο, είναι αυτές που φαίνονται στην επόμενη σελίδα (σε ανά μονάδα σύστημα) :

$$\begin{aligned}
U_{sd} &= -i_{sd} * R_s - \omega * \Psi_{sq} + \frac{1}{\omega_0} * \frac{d}{dt} \Psi_{sd} \\
U_{sq} &= -i_{sq} * R_s + \omega * \Psi_{sd} + \frac{1}{\omega_0} * \frac{d}{dt} \Psi_{sq} \\
0 &= i_{rd} * R_r - (\omega - \omega_r) * \Psi_{rq} + \frac{1}{\omega_0} * \frac{d}{dt} \Psi_{rd} \\
0 &= i_{rq} * R_r + (\omega - \omega_r) * \Psi_{rd} + \frac{1}{\omega_0} * \frac{d}{dt} \Psi_{rq}
\end{aligned} \quad (2.11)$$

όπου:

- U_{sd}, U_{sq}** είναι οι d-,q- συνιστώσες της τάσης του στάτη
- I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}, I_{rq}** είναι οι d-,q- συνιστώσες των ρευμάτων του στάτη και του δρομέα
- d/dt** είναι ο τελεστής παραγωγής
- ω** είναι η ταχύτητα περιστροφής του αυθαίρετου πλαισίου
- ω₀** είναι η βασική ηλεκτρική κυκλική συχνότητα
- ω_r** είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας
- R_s** είναι η αντίσταση του στάτη
- R_r** είναι η αντίσταση του δρομέα

2.4.2. Ανάπτυξη μεταβατικού μοντέλου (2^{ης} τάξης)

Η ανάπτυξη μεταβατικών μοντέλων, αποτελεί κριτήριο για την ταχύτητα της προσομοίωσης ηλεκτρικών συστημάτων. Για την ασύγχρονη γεννήτρια ειδικότερα, υπάρχουν δύο είδη μοντέλων μειωμένης τάξης. Το πιο γνωστό από αυτά (που όμως δε θα χρησιμοποιηθεί σε αυτή την παράγραφο), είναι αυτό που αμελεί τα μεταβατικά φαινόμενα τόσο στο στάτη όσο και στο δρομέα της

γεννήτριας. Το μοντέλο αυτό είναι το πολύ γνωστό και ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο μόνιμης κατάστασης.

Για τους σκοπούς της εργασίας αυτής θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο, στο οποίο αγνοούνται μόνο τα μεταβατικά του στάτη. Στο μοντέλο αυτό, οι εξισώσεις του δρομέα της γεννήτριας παραμένουν ίδιες. Αυτό που αλλάζει είναι η ταχύτητα του πλαισίου αναφοράς η οποία γίνεται τώρα ίση με τη σύγχρονη. Αυτό γίνεται γιατί μόνο στη σύγχρονη ταχύτητα μπορούν να αμεληθούν οι παράγωγοι των ροών του στάτη. Σε οποιαδήποτε άλλη διαφορετική ταχύτητα, οι παράγωγοι των ροών του στάτη δεν είναι μηδενικές, λόγω της σχετικής κίνησης του πλαισίου αναφοράς ως προς το διάνυσμα της ροής. Άρα για την εξαγωγή του μοντέλου αυτού, θεωρούμε τα παρακάτω :

$$\frac{d}{dt}\Psi_s = \left(\frac{d}{dt}\Psi_{sd}, \frac{d}{dt}\Psi_{sq} \right) = (0,0)$$

$$\omega = \omega_s \quad (2.12)$$

Έτσι, οι εξισώσεις που διέπουν το μοντέλο αυτό για γεννήτρια επαγωγής με βραχυκυκλωμένο δρομέα, είναι οι παρακάτω :

$$U_{sd} = -i_{sd} * R_s - \omega_s * \Psi_{sq}$$

$$U_{sq} = -i_{sq} * R_s + \omega_s * \Psi_{sd}$$

$$0 = i_{rd} * R_r - (\omega_s - \omega_r) * \Psi_{rq} + \frac{1}{\omega_s} * \frac{d}{dt}\Psi_{rd} \quad (2.13)$$

$$0 = i_{rq} * R_r + (\omega_s - \omega_r) * \Psi_{rd} + \frac{1}{\omega_s} * \frac{d}{dt}\Psi_{rq}$$

Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθεί ότι το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για συμμετρικές καταστάσεις (balanced events), αφού ασύμμετρες καταστάσεις, για παράδειγμα ασυμμετρία τάσεων είτε ασύμμετρα βραχυκυκλώματα, δε μηδενίζουν τις παραγωγούς των ροών του στάτη. Συνεπώς, το παραπάνω σύστημα εξισώσεων (2.13), μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συμμετρικές καταστάσεις, όπως συμμετρική τριφασική τροφοδότηση, ζεύξη και απόζευξη της ανεμογεννήτριας, αλλαγή της μηχανικής ροπής της γεννήτριας και συμμετρικά τριφασικά βραχυκυκλώματα.

2.5. Λειτουργία σταθερών στροφών

Στη λειτουργία σταθερών στροφών, η ανεμογεννήτρια είναι απ' ευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο. Οι στροφές της είναι περίπου σταθερές και ίσες με :

$$n_s = 120 * \frac{f}{p} \quad (2.14)$$

όπου f είναι η σταθερή συχνότητα του δικτύου (50 Hz), και p οι πόλοι της γεννήτριας (p/2 είναι τα ζεύγη πόλων της γεννήτριας). Στην πραγματικότητα,

οι στροφές της γεννήτριας δεν παραμένουν εντελώς σταθερές αλλά μεταβάλλονται μόνο κατά το ποσοστό της ολίσθησης λειτουργίας.

Στην παράγραφο αυτή, γίνεται η προσομοίωση λειτουργίας σταθερών στροφών στο πεδίο του χρόνου, χρησιμοποιώντας και τα δύο μοντέλα για τη γεννήτρια επαγωγής που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο (4^{ης} και 2^{ης} τάξης). Η ανεμογεννήτρια είναι απ' ευθείας συνδεδεμένη σε έναν άπειρο ζυγό. Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p , υπολογίζεται προσεγγιστικά μέσω του πολυωνύμου 4^{ης} τάξης που περιγράφεται στη σχέση (2.15) :

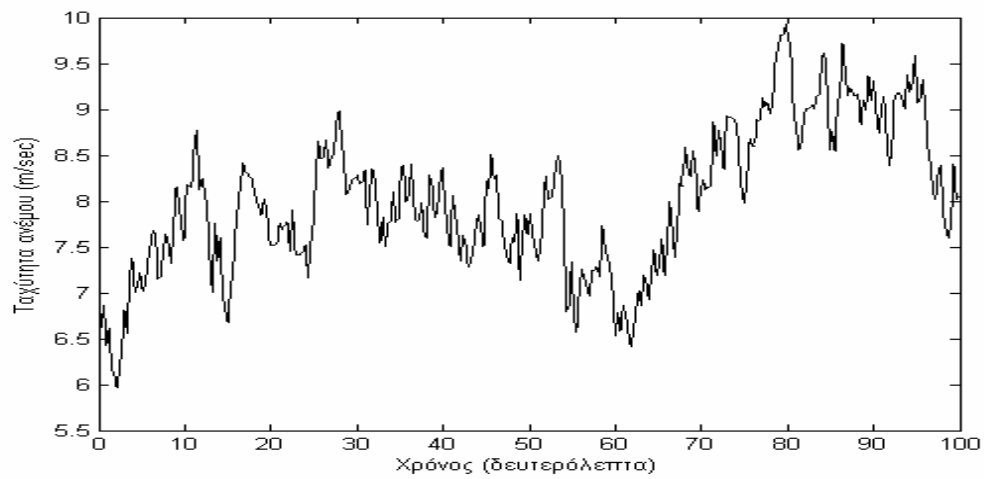
$$C_p = 10^{-3} * (0.185 * \lambda^4 - 5.28 * \lambda^3 + 40.7 * \lambda^2 - 28.6 * \lambda - 6.6) \quad (2.15)$$

Στο στάτη της ανεμογεννήτριας εφαρμόζονται ονομαστικές τάσεις, ενώ για την προσομοίωση του ανέμου χρησιμοποιείται η χρονοσειρά που φαίνεται στο σχήμα 2.3. Τέλος, οι παράμετροι του εξεταζόμενου μοντέλου ανεμογεννήτριας, φαίνονται στον πίνακα 2.1 [5] :

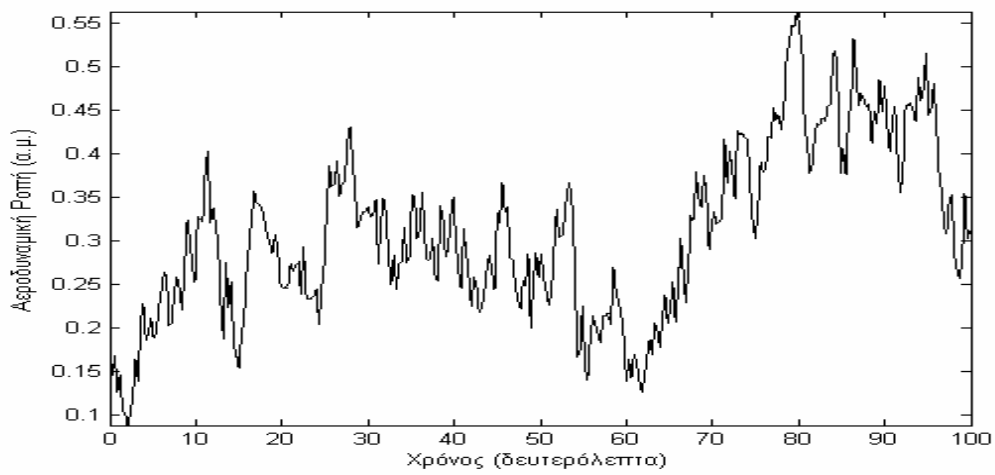
Παράμετροι της Ανεμογεννήτριας				
Μηχανικό Σύστημα			Γεννήτρια επαγωγής	
Παράμετρος	Μέγεθος	α.μ.	Παράμετρος	Μέγεθος
J_R, H_R	21125 kgm ²	1.9277	Ονομαστική ενεργός ισχύς	175 kW
J_{GB}, H_{GB}	882.77 kgm ²	0.0806	Ονομαστική τάση	380V 50Hz
			Ροπή	1100 Nm
J_G, H_G	2.3 kgm ²	0.1419	Αριθμός πόλων	4
J_{tot}, H_{tot}	23562.57 kgm ²	2.1502	cosφ	0.76
C_{HGB}	Η ελαστικότητα του άξονα χαμηλών στροφών είναι μεταβαλλόμενη.	40	Ονομαστικές στροφές	1520 rpm
			Αντίδραση σκεδάσεως στάτη (X_{ls})	0.1157 Ω

	Για τις εφαρμογές της παρούσας εργασίας υποτίθεται ίση με 40 α.μ.		Αντίδραση Σκεδάσεως δρομέα (X_r)	0.19 Ω
C_{GBG}	1486710 ⁴ Nm/rad	1834.1	Αντίσταση στάτη (r_s)	0.0167 Ω
D_R	120.528 Nm/(rad/sec)	0.022	Αντίσταση δρομέα (r_r)	0.0089 Ω
D_{GB}	120.528 Nm/(rad/sec)	0.022	Αντίδραση Μαγνητίσεως (X_m)	2.3113 Ω
D_G	0.0811 Nm/(rad/sec)	0.01	Λόγος κιβωτίου 1:26 Μεταβλητές στροφές 1:29 Σταθερές στροφές Ακτίνα πτερυγίου R=10m	
D_{HGB}	1.9178 10 ⁴ Nm/(rad/sec)	3.5		
D_{GBG}	81.057 Nm/(rad/sec)	10.0		
S_b=200 kVA				

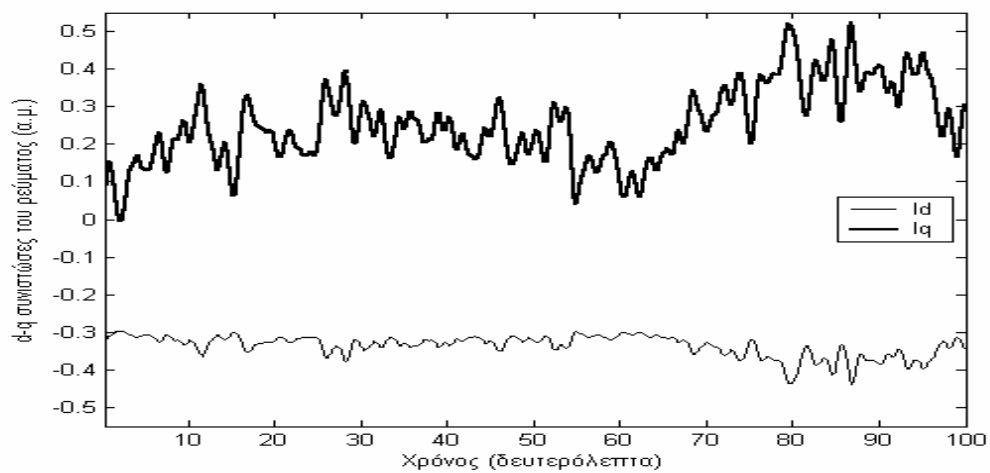
Πίνακας 2.1 Παράμετροι της εξεταζόμενης ανεμογεννήτριας



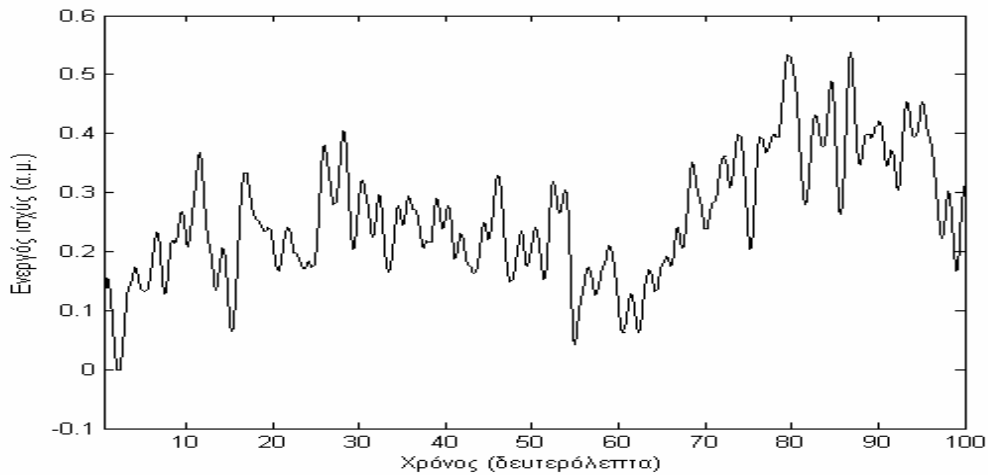
Σχήμα 2.3 Χρησιμοποιούμενη χρονοσειρά ανέμου



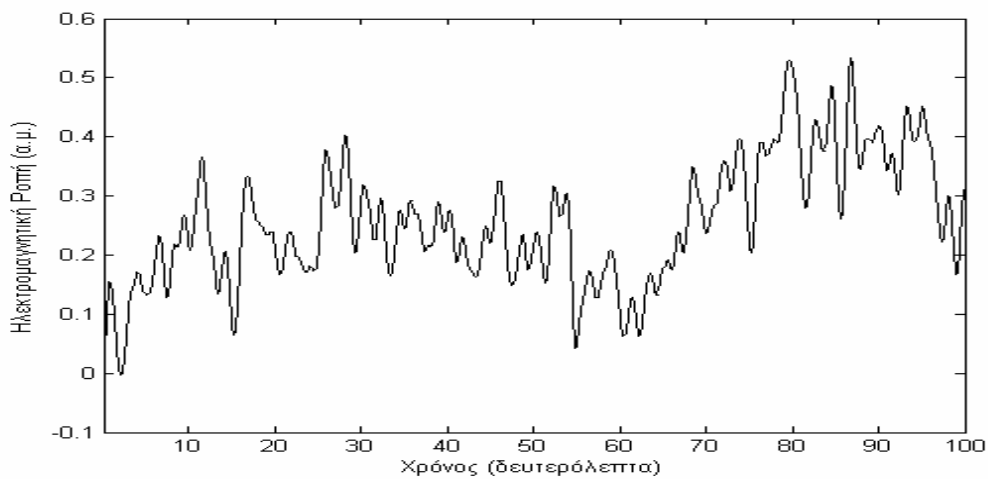
Σχήμα 2.4 Αεροδυναμική ροπή (α.μ.)



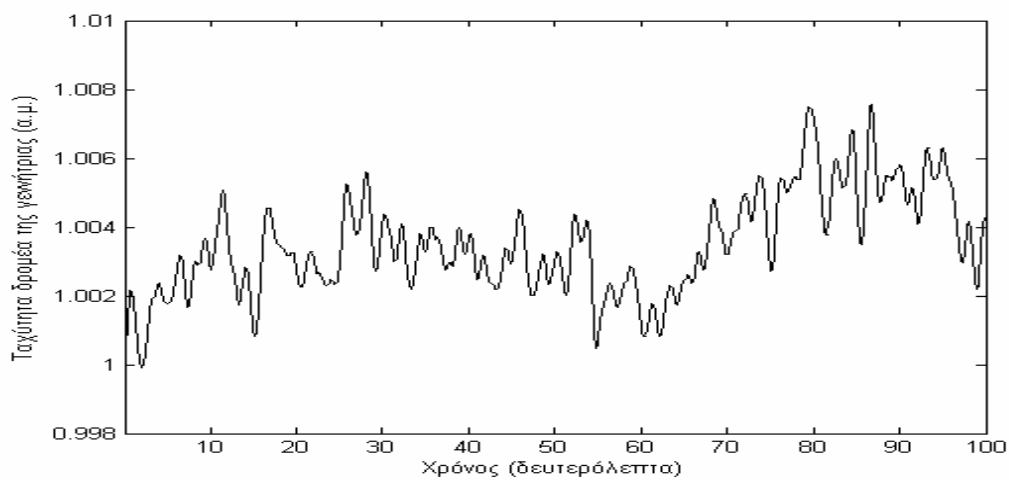
Σχήμα 2.5 d,q συνιστώσες του ρεύματος εξόδου της ανεμογεννήτριας (α.μ.)



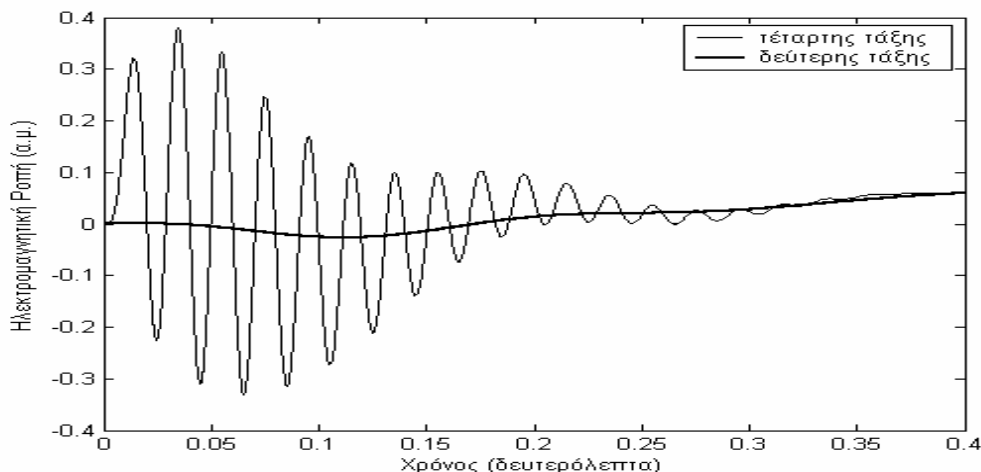
Σχήμα 2.6 Ενεργός ισχύς της ανεμογεννήτριας (α.μ.)



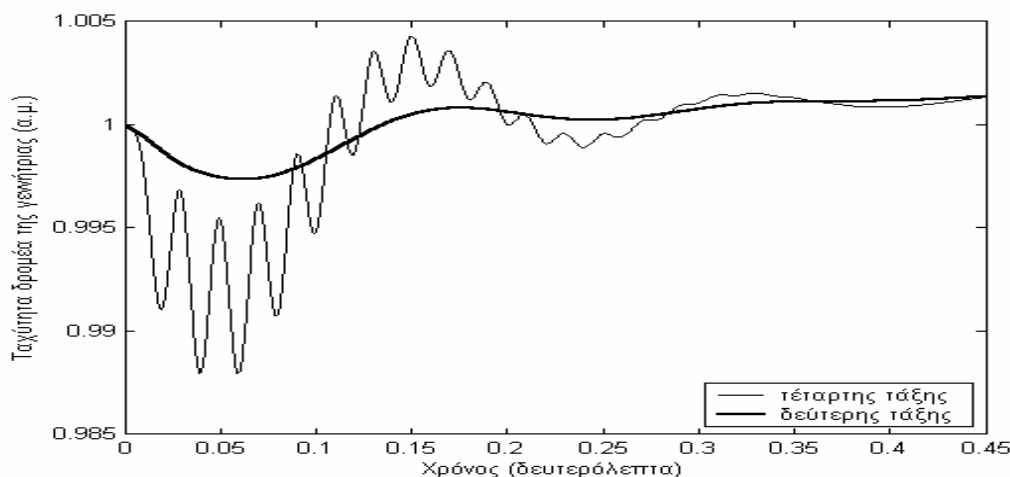
Σχήμα 2.7 Ηλεκτρομαγνητική ροπή (α.μ.)



Σχήμα 2.8 Ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας (α.μ.)



Σχήμα 2.9 Ηλεκτρομαγνητική ροπή (α.μ.) – ζεύξη ανεμογεννήτριας



Σχήμα 2.10 Ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας (α.μ.) – ζεύξη ανεμογεννήτριας

Από τα παραπάνω σχήματα, μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής. Η αεροδυναμική ροπή, εμφανίζει μεγάλη μεταβλητότητα αφού σε αυτήν περιέχονται οι γρήγορες μεταβολές του ανέμου. Ένα αρκετά μεγάλο μέρος από το υψίσυχνο περιεχόμενο της αεροδυναμικής ροπής, διατηρείται και στην ηλεκτρομαγνητική. Η μειωμένη μεταβλητότητα της δεύτερης, οφείλεται στην «ελαστικότητα» που προσφέρει η ολίσθηση, καθώς και στις ελαστικότητες των αξόνων των υψηλών και χαμηλών στροφών. Τα ίδια συμπεράσματα ισχύουν και για την παραγόμενη ενεργό ισχύ, της οποίας οι μεταβολές συμβαίνουν κατά μη προγραμματισμένο και ελεγχόμενο τρόπο. Η ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας μεταβάλλεται ελάχιστα, εκτός από την εκκίνηση, όπου πέφτει σε 0.988 α.μ.

Η κύρια διαφορά μεταξύ των μοντέλων δεύτερης και τέταρτης τάξης, εστιάζεται στη ζεύξη της ανεμογεννήτριας και πιο συγκεκριμένα στην ηλεκτρομαγνητική ροπή της (συνεπώς μεταφέρεται και στην ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας). Αν και στην ηλεκτρομαγνητική ροπή που προκύπτει από τη

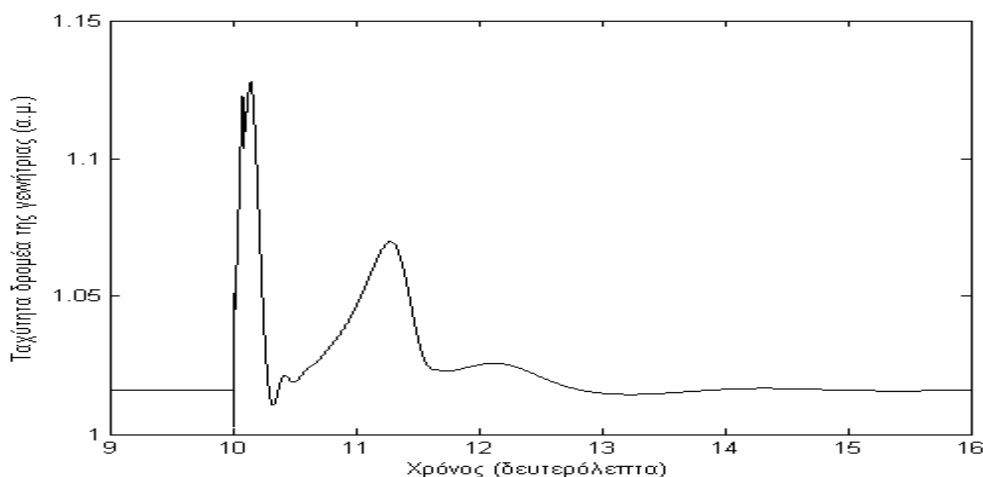
χρήση του μοντέλου δεύτερης τάξης της γεννήτριας υπάρχει μία αρχική μεταβατική κατάσταση, η κατάσταση αυτή είναι πολύ πιο εξομαλυμένη σε σχέση με το μεταβατικό φαινόμενο που λαμβάνει χώρα όταν δεν αμελούνται τα μεταβατικά του στάτη. Η βασική ανακρίβεια του μοντέλου 2^{ης} τάξης είναι η απουσία των ταλαντώσεων συχνότητας ω_s , τόσο από την ηλεκτρομαγνητική ροπή, όσο και από την ταχύτητα του δρομέα.

2.5.1. Συμμετρικά τριφασικά βραχυκυκλώματα

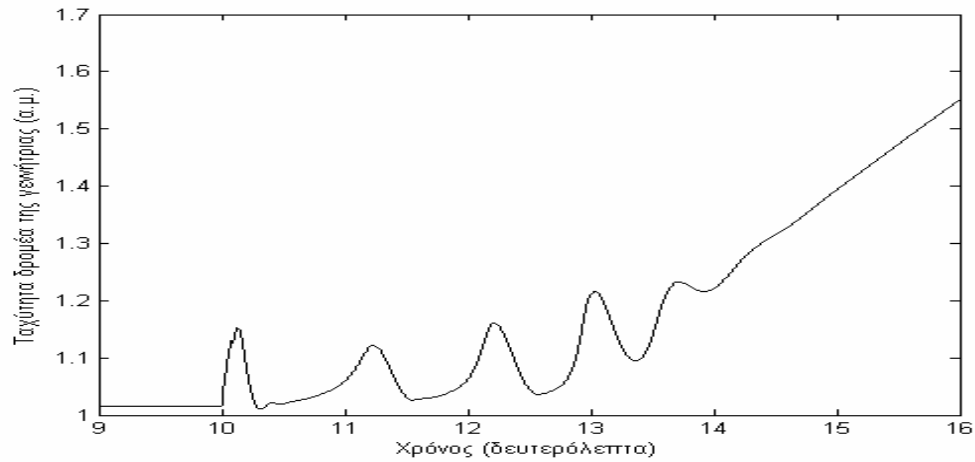
Στην παράγραφο αυτή, επιχειρείται η προσομοίωση συμμετρικών τριφασικών βραχυκυκλωμάτων ως προς γη (δηλαδή η χειρότερη περίπτωση βραχυκυκλωμάτων) που λαμβάνουν χώρα στους ακροδέκτες της ανεμογεννήτριας, χρησιμοποιώντας τόσο το πλήρες όσο και το μεταβατικό μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής.

Εξακολουθεί να χρησιμοποιείται η ανεμογεννήτρια που προσομοιώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, καθώς και η ίδια χρονοσειρά. Το βραχυκύκλωμα λαμβάνει χώρα στα δέκα δευτερόλεπτα και για διάφορες τιμές του ανέμου, βρίσκεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος. Ο κρίσιμος αυτός χρόνος στην πραγματικότητα μπορεί να είναι πολύ μικρότερος από τον υπολογιζόμενο σε αυτή την παράγραφο, αφού κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος μπορεί να λειτουργήσει είτε ο ελεγκτής υπερταχύτητας που διαθέτει η ανεμογεννήτρια, είτε η προστασία της εάν το μέτρο του ρεύματος βραχυκύκλωσης υπερβεί μία συγκεκριμένη τιμή (τιμή για την οποία είναι προγραμματισμένοι οι ηλεκτρονόμοι).

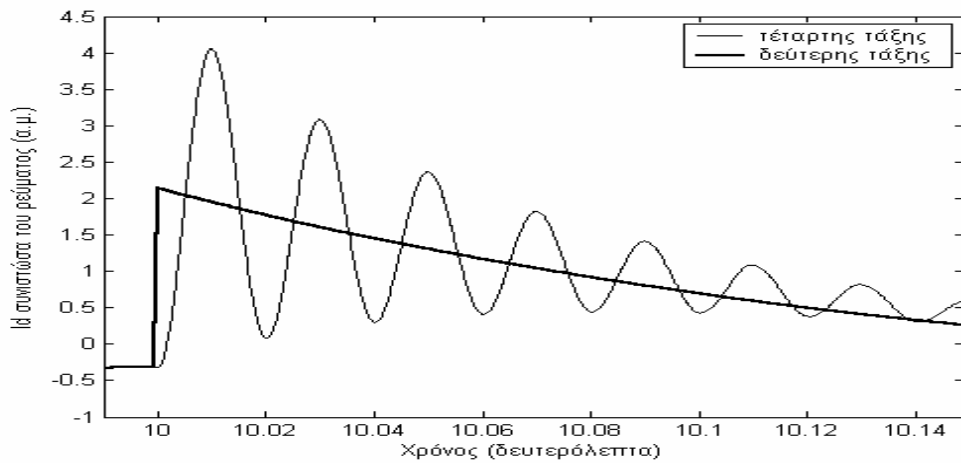
Στα παρακάτω σχήματα, φαίνονται κάποιες χαρακτηριστικές γραφικές παραστάσεις της ταχύτητας του δρομέα και του ρεύματος της γεννήτριας για τριφασικά βραχυκυκλώματα ως προ γη, τόσο για το μοντέλο της τέταρτης όσο και για το μειωμένο μοντέλο δεύτερης τάξης :



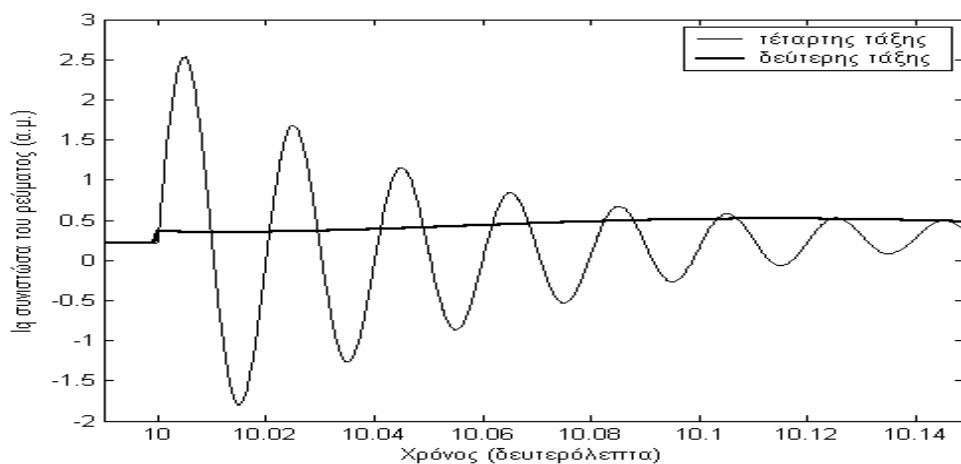
Σχήμα 2.11 Ταχύτητα του δρομέα για σταθερή ταχύτητα ανέμου 13m/sec και διάρκεια εκκαθάρισης του σφάλματος 0.08 sec – πλήρες μοντέλο



Σχήμα 2.12 Ταχύτητα του δρομέα για σταθερή ταχύτητα ανέμου 13m/sec και διάρκεια εκκαθάρισης του σφάλματος 0.08 sec – μοντέλο δεύτερης τάξης



Σχήμα 2.13 Id συνιστώσα του ρεύματος της γεννήτριας για βραχυκύκλωμα διάρκειας 150msec και τυχαία χρονοσειρά ανέμου



Σχήμα 2.14 Id συνιστώσα του ρεύματος της γεννήτριας για βραχυκύκλωμα διάρκειας 150msec και τυχαία χρονοσειρά ανέμου

Στα σχήματα 2.13 και 2.14, μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής. Το μεταβατικό μοντέλο δεύτερης τάξης, προσομοιώνει τη συμπεριφορά του ρεύματος κατά το βραχυκύκλωμα, χωρίς να λαμβάνει υπ' όψιν του τα μεταβατικά της βασικής κυκλικής συχνότητας. Έτσι, το μέτρο του ρεύματος του μοντέλου δεύτερης τάξης, είναι μικρότερο από αυτό του μοντέλου της τέταρτης. Το μέτρο του ρεύματος της γεννήτριας είναι σημαντική παράμετρος για τον καθορισμό της προστασίας της. Εάν η τιμή του υπερβεί για παράδειγμα την τιμή στην οποία είναι προγραμματισμένοι οι ηλεκτρονόμοι, τότε η γεννήτρια θα αποσυνδεθεί από το δίκτυο. Σε μελέτες δυναμικής ευστάθειας τάσεως, αποσύνδεση γεννήτριας σημαίνει απώλεια ισχύος η οποία απαιτεί άμεσα εφεδρεία.

Επίσης μπορούν να παρατηρηθούν σημαντικές διαφορές και στην ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας, όπως φαίνεται από τα σχήματα 2.11 και 2.12. Στο μοντέλο δεύτερης τάξης, η ταχύτητα του δρομέα αυξάνει απ' ευθείας αμέσως μετά το βραχυκύκλωμα, ενώ σε αυτό της τέταρτης μειώνεται προσωρινά και αυξάνεται αμέσως μετά.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της διαφοράς στον υπολογισμό της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα από τα δύο μοντέλα, είναι αυτό που εμφανίζεται στα δύο προαναφερθέντα σχήματα. Με το μοντέλο της δεύτερης τάξης, έχουμε αποσύνδεση της γεννήτριας από το δίκτυο, ενώ χρησιμοποιώντας το πλήρες μοντέλο βλέπουμε ότι η γεννήτρια παραμένει συγχρονισμένη. Δηλαδή, το μεταβατικό μοντέλο θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι πιο «απαισιόδοξο», όσον αφορά τη μελέτη δυναμικής ευστάθειας, όπου συνήθως χρησιμοποιείται. Σε τέτοιες μελέτες και γενικότερα σε μελέτες διαταραχών που αφορούν το ηλεκτρικό μέρος μιας γεννήτριας, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται το πλήρες μοντέλο.

Στον πίνακα 2.2 που ακολουθεί, εμφανίζονται ενδεικτικά πέντε κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης του συμμετρικού τριφασικού βραχυκυκλώματος ως προς γη για σταθερή ταχύτητα ανέμου, όπως υπολογίστηκαν κατά την προσομοίωση της ανεμογεννήτριας, χρησιμοποιώντας και τα δύο μοντέλα της γεννήτριας επαγωγής.

Κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος		
<i>Ταχύτητα ανέμου (m/ sec)</i>	<i>4ης τάξης</i>	<i>2ης τάξης</i>
	<i>Χρόνος (δευτερόλεπτα)</i>	
10	1.273	1.255
11	0.781	0.768
12	0.404	0.393
13	0.083	0.075
14	0.035	0.031

Πίνακας 2.2 *Κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης τριφασικού βραχυκυκλώματος*

2.6. Λειτουργία μεταβλητών στροφών

Κατά τη λειτουργία μεταβλητών στροφών, γίνεται η προσπάθεια για μέγιστη απόληψη ισχύος από τον άνεμο. Για να καταστεί αυτό δυνατό, πρέπει η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα να είναι τέτοια ώστε να μεγιστοποιείται ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p . Η τιμή του λ που μεγιστοποιεί τον αεροδυναμικό συντελεστή, συνηθίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία να αναφέρεται ως λ_{opt} , και συνδέεται με τη βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής με την παρακάτω σχέση :

$$\omega_{R,opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} * V_w \quad (2.16)$$

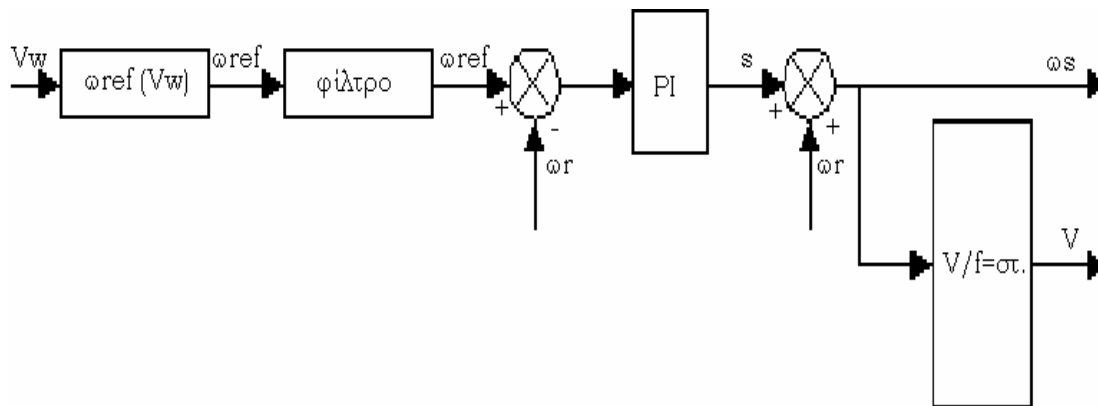
Στην παρούσα εργασία, ο συντελεστής λ_{opt} υπολογίζεται από το μηδενισμό της παραγώγου της μαθηματικής σχέσης (2.15) και αντικαθίσταται στη σχέση (2.16). Από την τελευταία, εξάγεται και η βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής για κάθε τιμή της ταχύτητας του ανέμου V_w .

Το σημαντικότερο όμως πρόβλημα στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, δεν είναι η επίτευξη της βέλτιστης ταχύτητας περιστροφής και συνεπώς της μέγιστης απολαβής ισχύος από τον άνεμο, αλλά η διατήρηση των στροφών πολύ κοντά στην τιμή αναφοράς για μεγάλες ταχύτητες ανέμου. Η επιτυχία στη λύση του προβλήματος αυτού, εξαρτάται σε μεγάλο ποσοστό από τον τύπο του ελεγκτή της γεννήτριας.

Στις υψηλές ταχύτητες ανέμου εκτός από το γεγονός ότι η ενεργειακή απόδοση της μηχανής δε βελτιστοποιείται, η δυναμική συμπεριφορά επηρεάζεται σημαντικά από τις ριπές του ανέμου με αποτέλεσμα την πιθανή εμφάνιση μηχανικών ταλαντώσεων οι οποίες με τη σειρά τους μπορεί να συνεπάγονται υπερφορτίσεις του συστήματος. Κύριο μέλημα είναι ο περιορισμός της μεταβλητότητας της ροπής λειτουργώντας σε στενή περιοχή ταχυτήτων ώστε να εκμεταλλεύεται το φαινόμενο stall. Η επιλογή της μέγιστης αναπτυσσόμενης ροπής και της αντίστοιχης ταχύτητας περιστροφής, εξαρτάται προφανώς από τα ονομαστικά μεγέθη των μετατροπέων και της γεννήτριας. Επίσης είναι επιθυμητή η χρήση μιας ζώνης ασφαλείας ώστε οι ριπές του ανέμου να μην προκαλούν μεταβατική υπέρβαση της μέγιστης επιτρεπόμενης ισχύος. Η αύξηση της αεροδυναμικής ισχύος ή ροπής πέραν του ορίου μπορεί να αποφευχθεί με ταχεία μείωση των στροφών η οποία όμως συνεπάγεται ανάπτυξη επιβραδύνουσας ηλεκτρομαγνητικής ροπής κατά πολύ μεγαλύτερης της ονομαστικής.

2.6.1. Έλεγχος του μετατροπέα της γεννήτριας

Στην εργασία αυτή, ο έλεγχος της ταχύτητας της ανεμογεννήτριας είναι βαθμωτός. Το σύστημα ελέγχου της γεννήτριας επαγωγής, αποτελείται από δύο υποβρόχους ελέγχου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 2.15 Σύστημα ελέγχου της συχνότητας και της τάσης της γεννήτριας επαγωγής

Το παραπάνω τυπικό αναλογικό σύστημα ελέγχου, εξασφαλίζει ικανοποιητική ακρίβεια και καλά χαρακτηριστικά λειτουργίας, χωρίς να είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο. Στόχος του συστήματος αυτού, είναι η ρύθμιση της ταχύτητας της ανεμογεννήτριας, ώστε να είναι ίση με τη βέλτιστη ω_{ref} , για την εκάστοτε ταχύτητα του ανέμου V_w . Βασικό στοιχείο του είναι ο αναλογικός – ολοκληρωτικός ελεγκτής PI, έξοδος του οποίου είναι η συχνότητα ω_s της γεννήτριας. Το μέτρο της τάσης εξόδου V_s ρυθμίζεται έτσι ώστε ο λόγος V_s/ω_s να διατηρείται σταθερός στην ονομαστική του τιμή. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι η πυκνότητα της μαγνητικής ροής στη γεννήτρια διατηρείται στην ονομαστική της τιμή και συνεπώς μπορούμε να έχουμε ονομαστική ηλεκτρομαγνητική ροπή σε κάθε συχνότητα λειτουργίας. Το φίλτρο έχει συνάρτηση μεταφοράς $\frac{1}{1+sT}$ και χρησιμοποιείται για την αποφυγή των αρνητικών επιπτώσεων των υψίσυχνων μεταβολών της ταχύτητας του ανέμου. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, η σταθερά του φίλτρου T έχει τεθεί ίση με 4.

Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα ότι έχουμε μία αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, οπότε η ανεμογεννήτρια πρέπει να λειτουργήσει σε υψηλότερες στροφές για να επιτευχθεί βέλτιστη απόδοση. Το θετικό σφάλμα $\omega_{ref}-\omega_r$, προκαλεί αύξηση της συχνότητας ω_s του στάτη της γεννήτριας, που ισοδυναμεί με μείωση απολύτως της ολίσθησής της, γιατί οι στροφές της δεν έχουν προλάβει να αλλάξουν. Μείωση της ολίσθησης όμως, συνεπάγεται μείωση της επιβραδύνουσας ηλεκτρομαγνητικής ροπής, η οποία θα επιταχύνει το δρομέα στη νέα ταχύτητα αναφοράς.

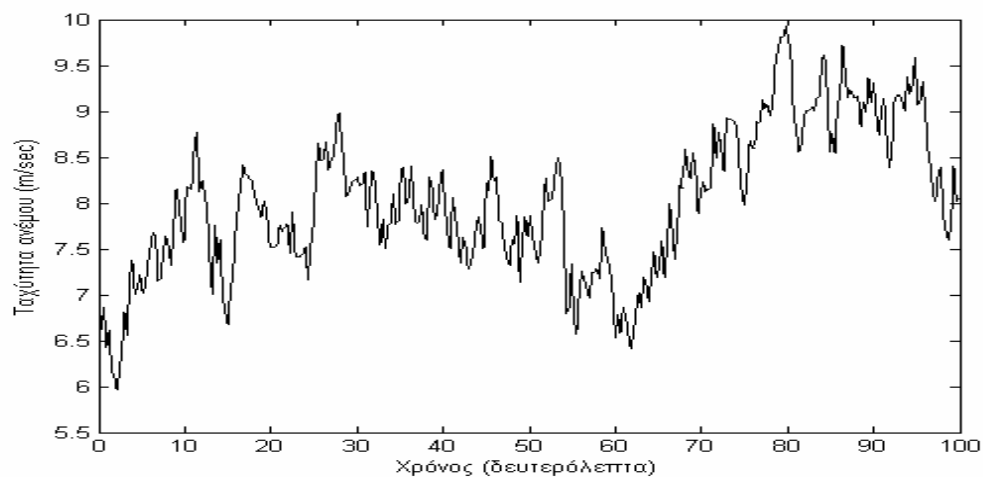
Ο έλεγχος που περιγράφηκε παραπάνω είναι αρκετά διαδεδομένος λόγω της απλότητάς του και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις για τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος δεν είναι ιδιαίτερα αυξημένες

και ενδείκνυται για την περίπτωση ελέγχου της γεννήτριας επαγωγής μιας ανεμογεννήτριας, αφού ο απαιτούμενος χρόνος απόκρισης του συστήματος είναι της τάξης των μερικών δευτερολέπτων.

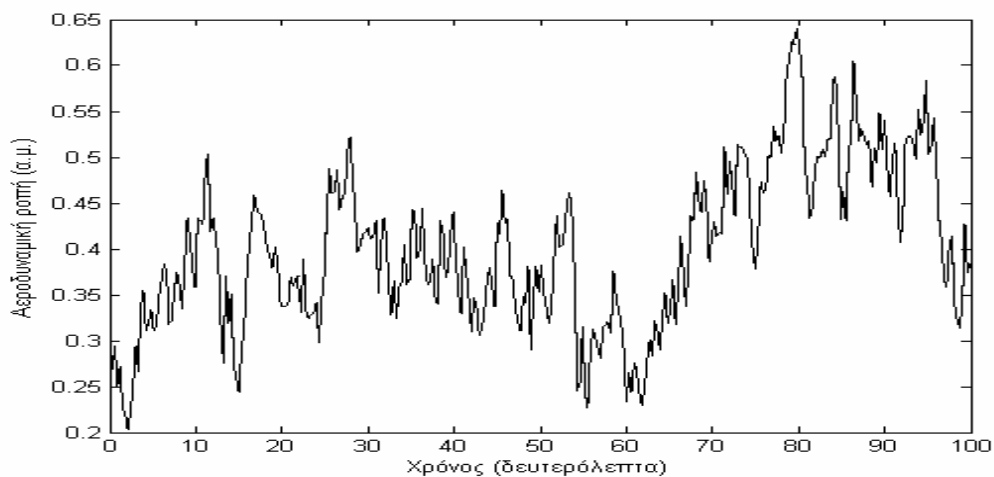
Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι στο μοντέλο της ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών, χρησιμοποιείται το πλήρες μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής, αφού όταν στο στάτη της γεννήτριας συνδέονται μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος, τότε η εξαγωγή του μεταβατικού μοντέλου δεν είναι εφικτή ή δεν ενδείκνυται.

2.6.2. Προσομοίωση λειτουργίας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών

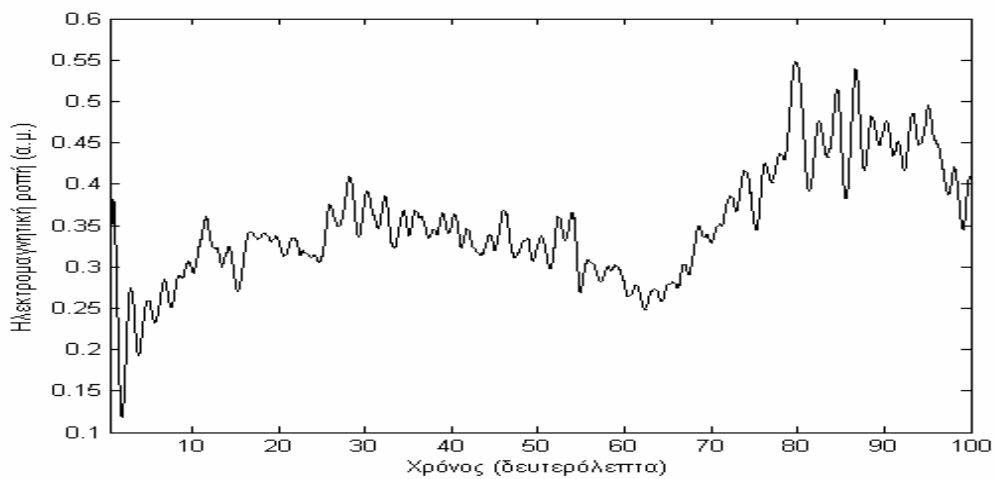
Για την προσομοίωση λειτουργίας μεταβλητών στροφών, χρησιμοποιείται η ίδια ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε και στην παράγραφο 2.5, καθώς και η ίδια χρονοσειρά ανέμου, ούτως ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ των δύο λειτουργιών και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.



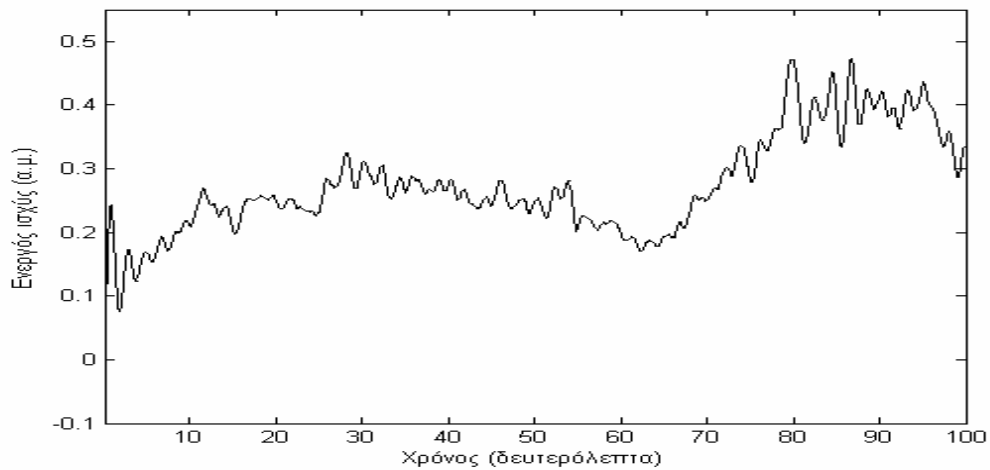
Σχήμα 2.16 Χρησιμοποιούμενη χρονοσειρά ανέμου



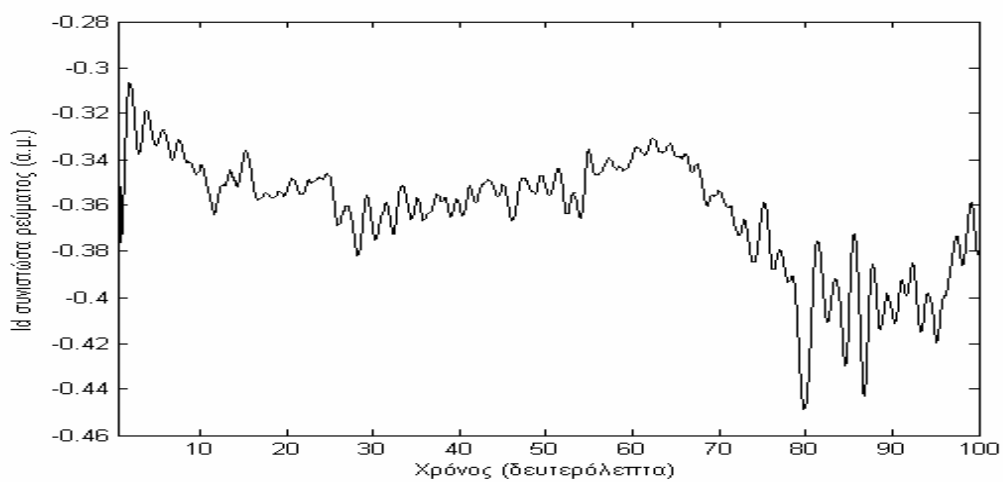
Σχήμα 2.17 Αεροδυναμική ροπή (α.μ.)



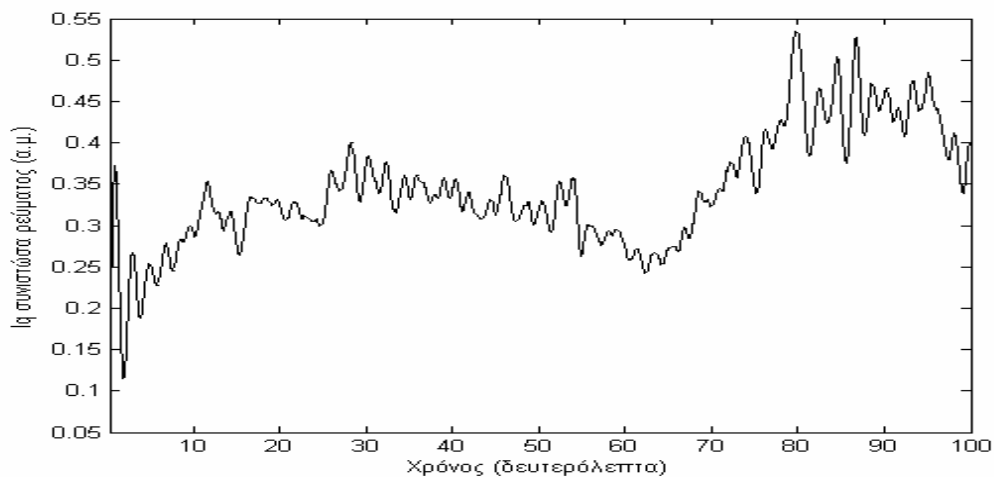
Σχήμα 2.18 Ηλεκτρομαγνητική ροπή (α.μ.)



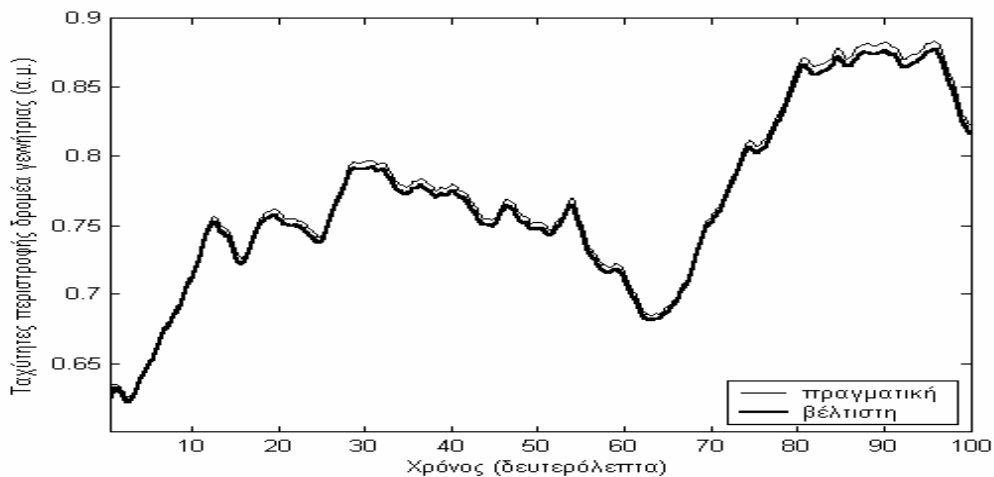
Σχήμα 2.19 Ενεργός ισχύς (α.μ.)



Σχήμα 2.20 Id συνιστώσα του ρεύματος της γεννήτριας (α.μ.)



Σχήμα 2.21 I_d συνιστώσα του ρεύματος της γεννήτριας (α.μ.)



Σχήμα 2.22 Ταχύτητες περιστροφής, βέλτιστη και πραγματική (α.μ.)

Από τα παραπάνω παρατιθέμενα σχεδιαγράμματα, μπορούμε να συμπεράνουμε για τη λειτουργία των μεταβλητών στροφών τα εξής. Σε αντίθεση με τη λειτουργία σταθερών στροφών είναι φανερό ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή διατηρεί μικρότερο μέρος από το υψίσυχο περιεχόμενο της αεροδυναμικής ροπής. Αυτό είναι αποτέλεσμα της σχεδίασης του συστήματος ελέγχου αλλά και του γεγονότος ότι ο ανεμοκινητήρας αποθηκεύει κινητική ενέργεια κατά την αύξηση του ανέμου και την αποδίδει στις περιόδους μείωσής του. Η αναφορά στο σύστημα ελέγχου γίνεται λόγω της χρήσης του βαθυπερατού φίλτρου για την παραγωγή της ταχύτητας αναφοράς. Μικρότερη χρησιμοποιούμενη χρονική σταθερά για το βαθυπερατό φίλτρο, συνεπάγεται μεγαλύτερο υψίσυχο περιεχόμενο για την ηλεκτρομαγνητική ροπή. Αντίστοιχες μεταβολές με την ηλεκτρομαγνητική ροπή παρουσιάζει και η παραγόμενη ενεργός ισχύς. Εδώ πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι η παραγόμενη ενεργός ισχύς από την ανεμογεννήτρια, δεν είναι και αυτή που προσφέρεται προς το δίκτυο, αφού αυτή καθορίζεται από τον μετατροπέα του δικτύου (αντιστροφέας). Παράλληλα με την ενεργό από τον

αντιστροφή καθορίζεται και η ροή της αέργου ισχύος. Οι πιο αργές μεταβολές της παραγόμενης ενεργού ισχύος συνεπάγονται και τη βελτίωση της ποιότητάς της.

Τέλος, η πολύ καλή λειτουργία του συστήματος ελέγχου, φαίνεται χαρακτηριστικά από το σχήμα 2.22, όπου η ταχύτητα περιστροφής συμπίπτει σχεδόν απόλυτα με την επιθυμητή της τιμή, κάτι που εξασφαλίζει μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος.

Πριν το τέλος του κεφαλαίου αυτού, πρέπει να τονιστεί ότι η τελευταία παράγραφος (2.6. Λειτουργία μεταβλητών στροφών), έχει εισαχθεί για λόγους πληρότητας στην παρούσα εργασία και έτσι δεν γίνεται αναφορά σε πολυπλοκότερα συστήματα ελέγχου καθώς και στη μοντελοποίηση του αντιστροφέα του δικτύου. Συνεπώς, στο παρακάτω κεφάλαιο η λειτουργία μεταβλητών στροφών δεν εξετάζεται.

Κεφάλαιο 3**ΜΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ****3.1. Συμμετρικές συνιστώσες τριφασικού συστήματος**

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, η αναπαράσταση με μονοφασικά ισοδύναμα προτιμάται λόγω της απλότητάς της. Η λύση των προβλημάτων συμμετρικών τριφασικών δικτύων επιτυγχάνεται εύκολα αλλάζοντας όλες τις κατά τρίγωνο συνδέσεις σε αστέρα και επιλύοντας μόνο τη μία φάση. Λόγω της συμμετρίας του συστήματος, τα αποτελέσματα για τις άλλες δύο φάσεις, διαφέρουν από αυτά της πρώτης κατά 120° και έτσι προκύπτει η πλήρης λύση του προβλήματος.

Η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών παρέχει ένα τρόπο επέκτασης της επίλυσης του μονοφασικού ισοδύναμου, σε δίκτυα με ασυμμετρία. Αυτό έχει καταστεί δυνατό, λόγω της απόδειξης του Fortescue ότι ένα σύστημα αποτελούμενο από N μη συμμετρικά φασικά διανύσματα, μπορεί να αναλυθεί σε $N-1$ συστήματα αποτελούμενα από N συμμετρικά φασικά διανύσματα ακολουθούμενα από ένα επιπλέον σύστημα N μονοφασικών διανυσμάτων (Παράρτημα 3).

3.1.1. Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος των συμμετρικών συνιστωσών

Ας θεωρήσουμε το τριφασικό σύστημα των φασικών διανυσμάτων, που ορίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις :

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a3} \\ V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b3} \\ V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c3} \end{aligned} \quad (3.1)$$

όπου :

$\mathbf{V}_a, \mathbf{V}_b, \mathbf{V}_c$ = ένα ασύμμετρο τριφασικό σύστημα φασικών διανυσμάτων

$\mathbf{V}_{a1}, \mathbf{V}_{b1}, \mathbf{V}_{c1}$ = το πρώτο συμμετρικό τριφασικό σύστημα φασικών διανυσμάτων με γωνία $2\pi/3$ μεταξύ των συνιστωσών a,b,c

$\mathbf{V}_{a2}, \mathbf{V}_{b2}, \mathbf{V}_{c2}$ = το δεύτερο συμμετρικό τριφασικό σύστημα φασικών διανυσμάτων με γωνία $2 \cdot 2\pi/3 = 4\pi/3$ μεταξύ των συνιστωσών a,b,c

$\mathbf{V}_{a3}, \mathbf{V}_{b3}, \mathbf{V}_{c3}$ = το τρίτο συμμετρικό τριφασικό σύστημα φασικών διανυσμάτων με γωνία $3 \cdot 2\pi/3 = 2\pi$ μεταξύ των συνιστωσών a,b,c, δηλαδή τα φασικά διανύσματα με δείκτη 3 είναι ταυτόσημα.

Εάν ορίσουμε τον τελεστή a ως :

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (3.2)$$

τότε με μαθηματική επεξεργασία της σχέσης (3.1), μπορούμε να καταλήξουμε στην παρακάτω έκφραση :

$$\begin{aligned} V_{a1} &= \frac{1}{3} * (V_a + aV_b + a^2V_c) \\ V_{a2} &= \frac{1}{3} * (V_a + a^2V_b + aV_c) \\ V_{a3} &= \frac{1}{3} * (V_a + V_b + V_c) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Επειδή η τελευταία εξίσωση της σχέσης (3.3) είναι η πιο απλή, ορίζουμε το δείκτη 3 σαν δείκτη 0 και τη γράφουμε πρώτη. Συνεπώς, φτάνουμε στην επόμενη μαθηματική διατύπωση :

$$\begin{aligned} V_{a0} &= \frac{1}{3} * (V_a + V_b + V_c) \\ V_{a1} &= \frac{1}{3} * (V_a + aV_b + a^2V_c) \\ V_{a2} &= \frac{1}{3} * (V_a + a^2V_b + aV_c) \end{aligned} \quad (3.4)$$

η οποία σε μητρική μορφή γράφεται ως εξής :

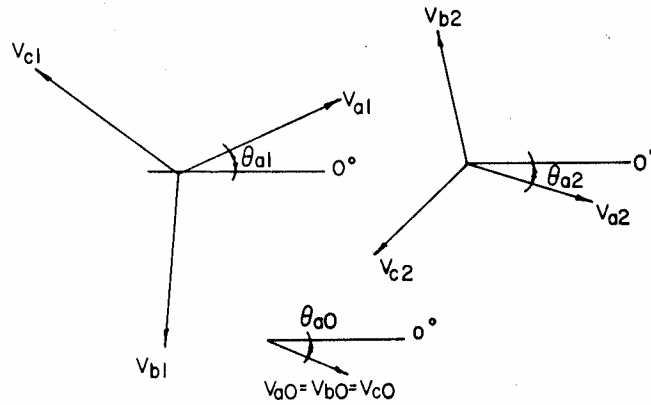
$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

όπου :

ο δείκτης **0** αναφέρεται ως «**μηδενική ακολουθία**»

ο δείκτης **1** αναφέρεται ως «**θετική ακολουθία**»

ο δείκτης **2** αναφέρεται ως «**αρνητική ακολουθία**»



Σχήμα 3.1 Ένα τυπικό σύστημα τάσεων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας

Οι παραπάνω ονομασίες των ακολουθιών γίνονται ιδιαίτερα κατανοητές, με τη βοήθεια του παραπάνω σχήματος (Σχήμα 3.1). Είναι αρκετά φανερό ότι η θετική ακολουθία (V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}) είναι η ίδια με τις τάσεις που παράγονται από μία γεννήτρια η οποία έχει σειρά φάσεων a-b-c, ενώ η αρνητική ακολουθία (V_{a2}, V_{b2}, V_{c2}) έχει την ίδια μορφή με τις τάσεις που παράγονται από γεννήτρια με σειρά φάσεων a-c-b. Η μηδενική ακολουθία αποτελείται από τρία ίσα φασικά διανύσματα.

Ορίζουμε ως μήτρα μετασχηματισμού S τη μήτρα :

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

ενώ η αντίστροφη της είναι η :

$$S^{-1} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Συνεπώς, τα μεγέθη των φάσεων a-b-c μπορούν να εκφραστούν ως μεγέθη συμμετρικών συνιστωσών (και αντίστροφα) ως εξής :

$$[V_{abc}] = [S] * [V_{0+-}] \quad [V_{0+-}] = [S]^{-1} * [V_{abc}]$$

και (3.8)

$$[I_{abc}] = [S] * [I_{0+-}] \quad [I_{0+-}] = [S]^{-1} * [I_{abc}]$$

3.1.2. Ισχύς συμμετρικών συνιστωσών

Η τριφασική ισχύς με αναφορά στα φυσικά μεγέθη, είναι :

$$\tilde{S}_{abc} = \tilde{I}_a^* * \tilde{V}_a + \tilde{I}_b^* * \tilde{V}_b + \tilde{I}_c^* * \tilde{V}_c \quad (3.9)$$

ενώ η ισχύς με αναφορά στις συμμετρικές συνιστώσες είναι :

$$[\tilde{S}_{+-0}] = [\tilde{I}_{+-0}]^* * [\tilde{V}_{+-0}] \quad (3.10)$$

όπου ο δείκτης T δηλώνει τον ανάστροφο πίνακα. Από τη σχέση (3.10) και δεδομένου της συμμετρίας των μητρών S και S⁻¹, δηλαδή ότι ισχύει S = S^T και (S⁻¹)^T = S⁻¹, έχουμε ότι :

$$[\tilde{S}_{+-0}] = [\tilde{I}_{abc}]^* * [S^{-1}]^* * [S]^{-1} * [\tilde{V}_{abc}] \quad (3.11)$$

Για τις συζυγείς μιγαδικές μήτρες μετασχηματισμού των S και S⁻¹ ισχύει ότι :

$$[S]^* = 3 * [S]^{-1} \quad \text{και} \quad [S^{-1}]^* = \frac{1}{3} * [S] \quad (3.12)$$

και συνεπώς η σχέση (3.11) με τη βοήθεια της παραπάνω σχέσης γίνεται:

$$[\tilde{S}_{+-0}] = [\tilde{I}_{abc}]^* * \frac{1}{3} * [S] * [S]^{-1} * [\tilde{V}_{abc}] = \frac{1}{3} * [\tilde{I}_{abc}]^* * [\tilde{V}_{abc}] = \frac{1}{3} * [\tilde{S}_{abc}] \quad (3.13)$$

Η παραπάνω σχέση (σχέση 3.13) υποδηλώνει ότι ο μετασχηματισμός σε συμμετρικές συνιστώσες δε διατηρεί το αναλλοίωτο της ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, η τριφασική ισχύς συναρτήσσει συμμετρικών συνιστωσών ισούται με το ένα τρίτο της φυσικής τριφασικής ισχύος.

3.2. Γενική θεώρηση συνεισφοράς μηχανών επαγωγής σε βραχυκυκλώματα

Οι μηχανές επαγωγής, λαμβάνουν τη διέγερσή τους από το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένες, σε αντίθεση με τις σύγχρονες μηχανές οι οποίες έχουν ένα ξεχωριστό σύστημα διέγερσης. Η διαφορά αυτή στο μηχανισμό της διέγερσης κάνει πολύ διαφορετική τη συμπεριφορά των σύγχρονων μηχανών από αυτή των μηχανών επαγωγής κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος. Ένα σφάλμα στους ακροδέκτες μίας σύγχρονης μηχανής δε θα επηρεάσει το συνεχούς ρεύματος σύστημα διέγερσης. Συνεπώς, καθώς η μηχανική ροπή συνεχίζει να κινεί το δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας (στο σημείο αυτό κάνουμε αναφορά στις σύγχρονες γεννήτριες που είναι και η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη σύγχρονη μηχανή), λόγω της διέγερσης η σύγχρονη γεννήτρια θα αντιδράσει στο σφάλμα συνεισφέροντας μεγάλες τιμές μεταβατικών ρευμάτων προς τους ακροδέκτες της. Από την άλλη μεριά, εάν ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα

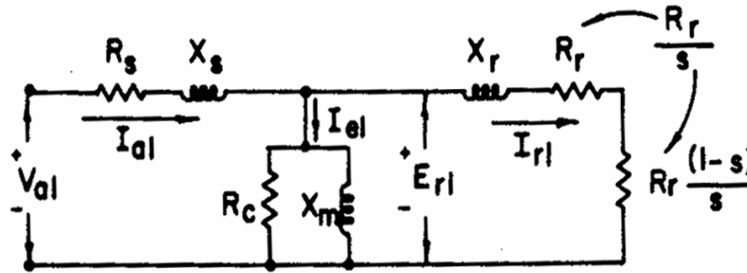
συμβεί στους ακροδέκτες μίας μηχανής επαγωγής, χάνεται εντελώς η διέγερσή της. Όμως, λόγω του θεωρήματος της σταθερής μαγνητικής ροής, η παραμένουσα διέγερση της μηχανής, θα αναγκάσει τη ροή ρευμάτων προς το δίκτυο για λίγους κύκλους. Σε αυτούς τους λίγους κύκλους που ακολουθούν ένα βραχυκύκλωμα, η συνεισφορά των μηχανών επαγωγής στο ρεύμα βραχυκυκλώσεως, δεν πρέπει να αμελείται. Ιδιαίτερα όταν αυτή η μηχανή έχει ένα αρκετά μεγάλο μέγεθος σε ισχύ, η συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι αρκετά σημαντική και ενδιαφέρουσα. Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό σύνδεσης ενός αιολικού πάρκου. Εάν αντικαταστήσουμε το αιολικό πάρκο με μία ισοδύναμη ανεμογεννήτρια που φέρει γεννήτρια επαγωγής, τότε το μέγεθός της είναι συγκρίσιμο με τα μεγέθη των σύγχρονων γεννητριών που τυχόν υπάρχουν στο δίκτυο (της τάξης των MVA) και συνεπώς η αγνόηση της συνεισφοράς του αιολικού πάρκου στο ρεύμα βραχυκυκλώσεως κατά την υπομεταβατική περίοδο εισάγει ένα σημαντικό σφάλμα. Το σφάλμα αυτό γίνεται ακόμη μεγαλύτερο εάν το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένο το αιολικό πάρκο είναι ασθενές, περίπτωση πολύ συνηθισμένη για τα ελληνικά δεδομένα, αφού πολλά από τα ελληνικά νησιά είναι μικρά, αυτόνομα, ασθενή δίκτυα με μεγάλη διείσδυση αιολικών πάρκων. Για τους λόγους αυτούς, είναι σημαντικό να μελετηθεί η συμπεριφορά των ανεμογεννητριών σε συνθήκες βραχυκυκλώσεως. Απαραίτητο στοιχείο για τη μελέτη αυτή, αποτελούν τα κυκλώματα ακολουθίας των μηχανών επαγωγής.

3.3. Κυκλώματα ακολουθίας μηχανών επαγωγής

Οι μηχανές επαγωγής, συνήθως αναπαρίστανται με ένα T ισοδύναμο, όπου ξεχωριστοί κλάδοι χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση του στάτη και του δρομέα. Στο ισοδύναμο αυτό υπάρχει και ακόμη ένας κλάδος, ο λεγόμενος κλάδος μαγνήτισης ο οποίος χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση των απωλειών του πυρήνα.

Ο κλάδος του στάτη καθώς και ο κλάδος μαγνήτισης, είναι σταθεροί όσον αφορά τη σύνθετη αντίστασή τους για σταθερή συχνότητα τροφοδοσίας. Από την άλλη μεριά, ο κλάδος του δρομέα παρουσιάζει μία σύνθετη αντίσταση η οποία δεν είναι σταθερή για σταθερή συχνότητα τροφοδοσίας από το δίκτυο, αλλά είναι μία συνάρτηση της ολίσθησης s της μηχανής ($s > 0$ για λειτουργία κινητήρα και $s < 0$ για λειτουργία γεννήτριας).

Όσον αφορά το ισοδύναμο κύκλωμα θετικής ακολουθίας των μηχανών επαγωγής, αυτό είναι το T ισοδύναμο μόνιμης κατάστασης που χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 3.2 Ισοδύναμο κύκλωμα θετικής ακολουθίας μηχανής επαγωγής (σύμβαση κινητήρα)

Η σύνθετη αντίσταση του δρομέα της μηχανής όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, είναι :

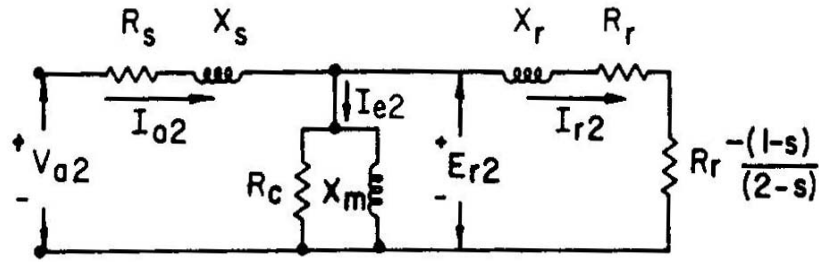
$$Z_r = \frac{R_r}{s} + jX_r \quad (3.14)$$

Η παραπάνω σχέση συνήθως γράφεται ως εξής :

$$Z_r = (R_r + jX_r) + \frac{1-s}{s} R_r \quad (3.15)$$

όπου ο πρώτος όρος του δεξιού μέρους είναι η σύνθετη αντίσταση του δρομέα της μηχανής κατά την εκκίνησή της ($s=1$) και δεν είναι συνάρτηση της ολίσθησης s , ενώ ο δεύτερος αντιπροσωπεύει την κινητήρια ή αποδίδουσα μηχανική ισχύ της μηχανής και είναι συνάρτηση της ολίσθησης.

Εάν στο στάτη της μηχανής επαγωγής υφίσταται τάση αρνητικής ακολουθίας, τότε υπάρχει ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο κινείται σε αντίθετη κατεύθυνση από αυτό της θετικής ακολουθίας. Συνεπώς, το πεδίο αυτό κινείται με ολίσθηση 2 α.μ. (θεωρείται ότι η μηχανή επαγωγής στρέφεται κατά τη φορά που επιβάλλεται από τις τάσεις θετικής ακολουθίας). Έτσι η ολίσθηση του δρομέα σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο της αρνητικής ακολουθίας, είναι $s_2=2-s$. Συνήθως επειδή η ολίσθηση είναι αρκετά μικρή, σε πολλές περιπτώσεις γίνεται η παραδοχή ότι η ολίσθηση του δρομέα στο κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας είναι περίπου ίση με το 2. Στην εργασία αυτή ακολουθείται η πρώτη μεθοδολογία, όπου η ολίσθηση στο κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας τίθεται ίση με το $s_2=2-s$. Το ισοδύναμο κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας της μηχανής επαγωγής, δεν είναι τίποτε άλλο παρά το κύκλωμα της θετικής ακολουθίας όπου η ολίσθηση s αντικαθίσταται από την ολίσθηση $s_2=2-s$ και δίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.3) :



Σχήμα 3.3 Ισοδύναμο κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας μηχανής επαγωγής (σύμβαση κινητήρα)

Η σύνθετη αντίσταση του δρομέα της γεννήτριας για το κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας είναι :

$$Z_r = \frac{R_r}{s_2} + jX_r = \frac{R_r}{2-s} + jX_r \quad (3.16)$$

Στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της γεννήτριας επαγωγής στην παρούσα εργασία η ωμική αντίσταση του κλάδου μαγνήτισης R_c , θεωρείται μηδενική.

3.4. Χρησιμοποιούμενα μοντέλα για την προσομοίωση ασύμμετρων συνθηκών

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα χρησιμοποιηθούν τρία διαφορετικά μοντέλα για την ασύγχρονη γεννήτρια.

Το πρώτο είναι το πλήρες μοντέλο (τέταρτης τάξης) που χρησιμοποιήθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, το οποίο χαρακτηρίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις :

$$\begin{aligned} U_{sd} &= -i_{sd} * R_s - \omega * \Psi_{sq} + \frac{1}{\omega_0} * \frac{d}{dt} \Psi_{sd} \\ U_{sq} &= -i_{sq} * R_s + \omega * \Psi_{sd} + \frac{1}{\omega_0} * \frac{d}{dt} \Psi_{sq} \\ 0 &= i_{rd} * R_r - (\omega - \omega_r) * \Psi_{rq} + \frac{1}{\omega_0} * \frac{d}{dt} \Psi_{rd} \\ 0 &= i_{rq} * R_r + (\omega - \omega_r) * \Psi_{rd} + \frac{1}{\omega_0} * \frac{d}{dt} \Psi_{rq} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Το δεύτερο μοντέλο, το οποίο ονομάζουμε στην εργασία αυτή δεύτερης τάξης, αποτελείται από κυκλώματα της θετικής και αρνητικής ακολουθίας. Το κύκλωμα της αρνητικής ακολουθίας που χρησιμοποιείται στο μοντέλο αυτό, είναι αυτό που εμφανίζεται στο σχήμα 3.3 (με την ωμική αντίσταση του κλάδου μαγνήτισης να θεωρείται ίση με το μηδέν), ενώ για τη θετική ακολουθία χρησιμοποιούνται οι παρακάτω εξισώσεις :

$$\begin{aligned}
U_{sd} &= -i_{sd} * R_s - \omega_s * \Psi_{sq} \\
U_{sq} &= -i_{sq} * R_s + \omega_s * \Psi_{sd} \\
0 &= i_{rd} * R_r - (\omega_s - \omega_r) * \Psi_{rq} + \frac{1}{\omega_s} * \frac{d}{dt} \Psi_{rd} \\
0 &= i_{rq} * R_r + (\omega_s - \omega_r) * \Psi_{rd} + \frac{1}{\omega_s} * \frac{d}{dt} \Psi_{rq}
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Το σύστημα εξισώσεων (3.18), όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο κάτω από συμμετρικές συνθήκες. Η χρησιμοποίηση δηλαδή των παραπάνω εξισώσεων για το κύκλωμα θετικής ακολουθίας είναι απόλυτα σωστή, αφού η θετική ακολουθία αποτελεί ένα συμμετρικό σύστημα τάσεων.

Τέλος, το μοντέλο ακολουθιών μόνιμης κατάστασης χρησιμοποιεί για τη θετική και αρνητική ακολουθία τα κυκλώματα των σχημάτων 3.2 και 3.3 αντίστοιχα.

3.5. Ασύμμετρη λειτουργία ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής

Από την παράγραφο αυτή και μέχρι το τέλος του κεφαλαίου, θα επιχειρηθεί η προσομοίωση της ασύμμετρης λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας εφοδιασμένης με γεννήτρια επαγωγής η οποία είναι συνδεδεμένη απ' ευθείας στο δίκτυο. Οι εξεταζόμενες ασυμμετρίες θα εφαρμοστούν και στα τρία μοντέλα της γεννήτριας επαγωγής (τέταρτης τάξης, δεύτερης τάξης, ακολουθιών μόνιμης κατάστασης), με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τη λειτουργία σε τυπικές ασύμμετρες συνθήκες, καθώς και για τα σφάλματα που εισάγει στους υπολογισμούς διαφόρων μεγεθών η χρησιμοποίηση απλουστευμένων μοντέλων.

Οι εξεταζόμενες ασυμμετρίες που προσομοιώνονται στη συνέχεια, είναι οι εξής:

- ❖ Ασυμμετρία μέτρων στις τάσεις τροφοδοσίας του στάτη
- ❖ Ασυμμετρία μέτρων και φάσης στις τάσεις τροφοδοσίας του στάτη

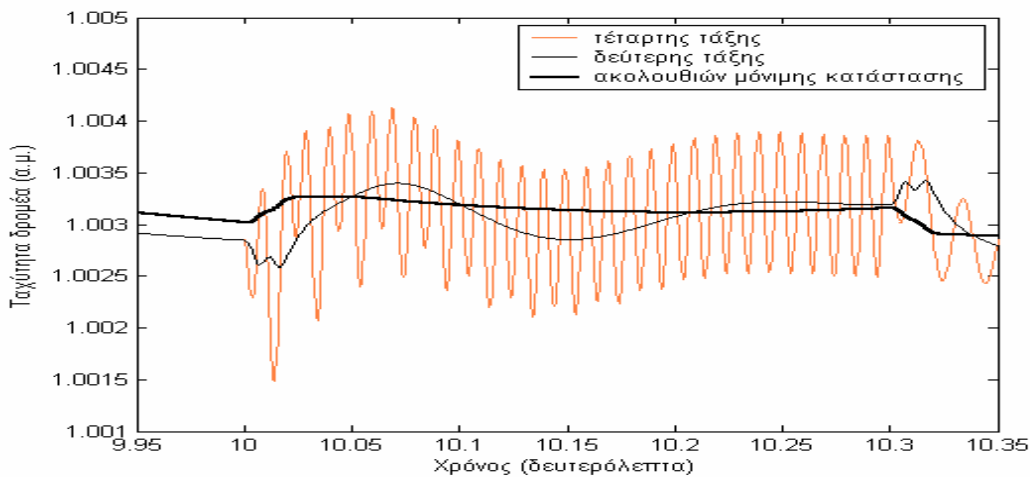
3.5.1. Ασυμμετρία μέτρων στις τάσεις τροφοδοσίας του στάτη της ανεμογεννήτριας

Πρόκειται ίσως για τη συνηθέστερη περίπτωση ασυμμετρίας (μαζί με την ασυμμετρία μέτρων και φάσης ταυτόχρονα) σε ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων. Αυτή συνήθως προκαλείται από κάποιο βραχυκύκλωμα είτε από ασυμμετρία φορτίων στις τρεις φάσεις του δικτύου. Ιδιαίτερα στη δεύτερη περίπτωση η ασυμμετρία στα μέτρα των τάσεων τροφοδοσίας μπορεί να υπάρχει για ένα αρκετά σημαντικό χρονικό διάστημα.

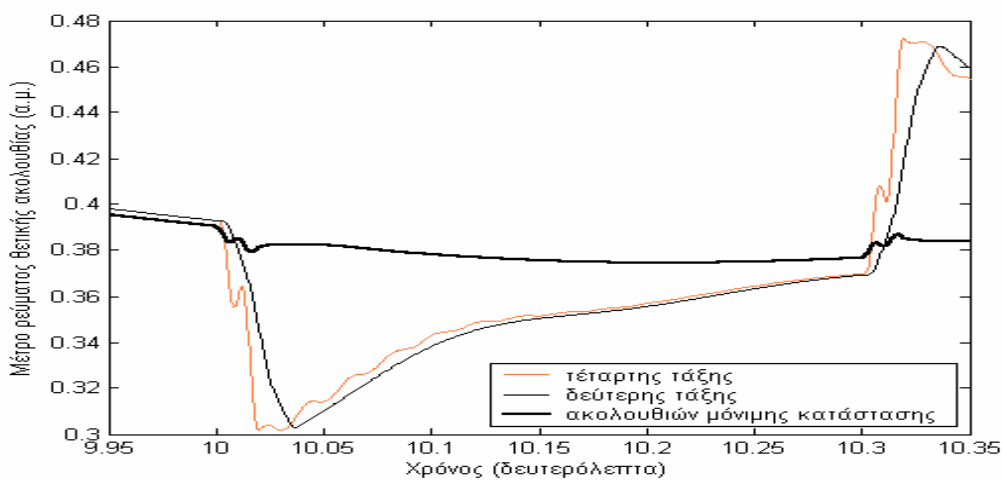
Η εφαρμογή των ασύμμετρων τάσεων στο στάτη της ανεμογεννήτριας γίνεται στα δέκα (10) δευτερόλεπτα, ενώ η συμμετρία στις τάσεις τροφοδοσίας αποκαθίσταται μετά από 0.3 δευτερόλεπτα. Χρησιμοποιείται η χρονοσειρά ανέμου του προηγούμενου κεφαλαίου (Σχήμα 2.3, § 2.5), ενώ τα μέτρα των εφαρμοζόμενων ασύμμετρων τάσεων είναι τα εξής :

- ❖ Φάση α : $|\tilde{V}_a| = 0.85$ α.μ.
- ❖ Φάση β : $|\tilde{V}_b| = 0.94$ α.μ. (3.19)
- ❖ Φάση γ : $|\tilde{V}_c| = 1.05$ α.μ.

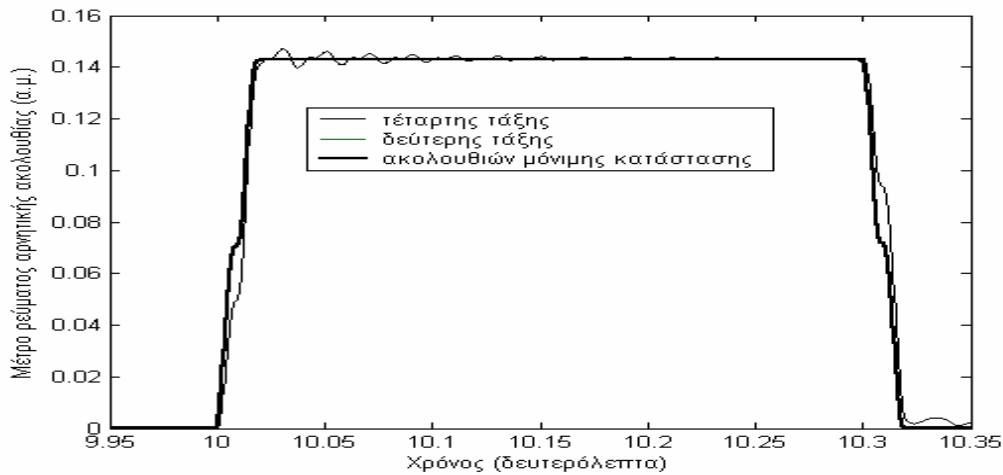
Η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς της εξεταζόμενης ανεμογεννήτριας, φαίνεται στα παρακάτω σχήματα όπου παρουσιάζονται χαρακτηριστικά μεγέθη της τόσο στη συμμετρική (λίγο πριν και λίγο μετά από την επιβολή των ασύμμετρων τάσεων) όσο και κατά τη διάρκεια της ασύμμετρης κατάστασης.



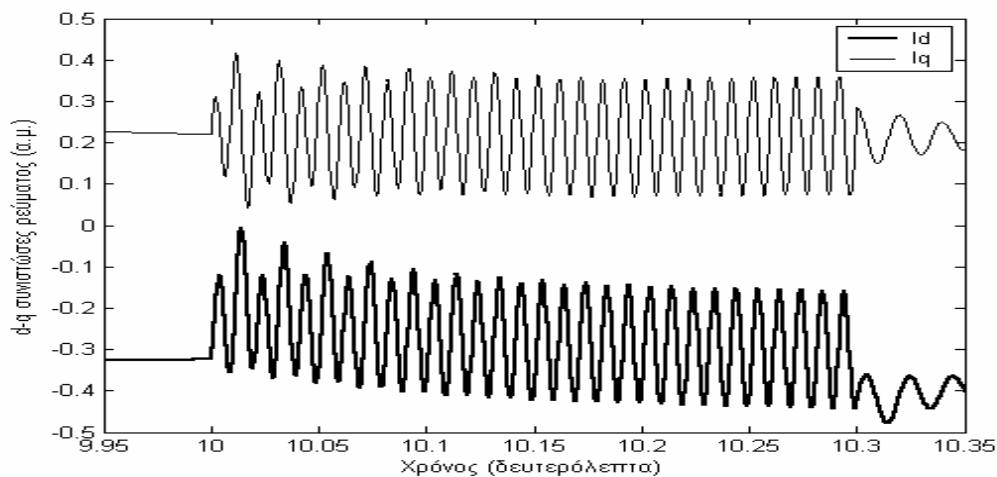
Σχήμα 3.4 Ταχύτητα δρομέα (α.μ.)



Σχήμα 3.6 Ρεύμα θετικής ακολουθίας (α.μ.)



Σχήμα 3.7 Ρεύμα αρνητικής ακολουθίας (α.μ.)



Σχήμα 3.8 $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος (πλήρες μοντέλο)

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της ασυμμετρίας, γίνονται φανερά από τα παραπάνω διαγράμματα. Η ύπαρξη αρνητικής ακολουθίας που συνεπάγεται η ασυμμετρία επηρεάζει σημαντικά τόσο την ταχύτητα όσο και τη ροπή της ανεμογεννήτριας. Πιο συγκεκριμένα, στα δύο προαναφερθέντα μεγέθη παρατηρείται μία ταλάντωση των 100 Hz. Αυτό είναι απολύτως φυσιολογικό, αφού στο δρομέα της γεννήτριας υπάρχουν δύο στρεφόμενα μαγνητικά πεδία συχνότητας 50Hz με αντίθετη φορά μεταξύ τους. Η σχετική τους κίνηση δίνει ένα συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο συχνότητας 100 Hz. Η συχνότητα αυτή είναι και η συχνότητα της ηλεκτρικής ταλάντωσης της αναπτυσσόμενης ηλεκτρομαγνητικής ροπής και συνεπώς και της συχνότητας ταλάντωσης της ταχύτητας του δρομέα της γεννήτριας.

Εάν η ταχύτητα του ανέμου θεωρηθεί σταθερή για το χρονικό διάστημα ύπαρξης της ασυμμετρίας (μία παραδοχή πολύ κοντινή στην πραγματικότητα, αφού η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να παρουσιάσει μία πολύ μικρή μεταβλητότητα σε χρονικό διάστημα 0.3 δευτερολέπτων), τότε επίσης σταθερή μπορεί να θεωρηθεί και η αεροδυναμική ροπή. Η ασυμμετρία, επιβάλλει μία

ηλεκτρομαγνητική ροπή αρνητικής ακολουθίας η οποία αφαιρείται από αυτή της θετικής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του μέτρου της συνιστάμενης επιβραδύνουσας ηλεκτρομαγνητικής ροπής και κατά συνέπεια αφού η αεροδυναμική ροπή έχει θεωρηθεί σταθερή για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ο δρομέας της ανεμογεννήτριας αρχίζει να επιταχύνεται. Η επιτάχυνση του δρομέα φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 3.5 από την προσομοίωση των δύο μοντέλων που αμελούν τα μεταβατικά του στάτη.

Τέλος, κατά τη διάρκεια της ασυμμετρίας των τάσεων υφίσταται ρεύμα αρνητικής ακολουθίας. Η χρησιμοποίηση των διαφορετικών μοντέλων για τη γεννήτρια επαγωγής, γίνεται φανερό σε όλα τα μεγέθη που παρατίθενται στα παραπάνω σχεδιαγράμματα. Μόνο στο πλήρες μοντέλο (τέταρτης τάξης) φαίνονται οι ηλεκτρικές ταλαντώσεις. Τα άλλα δύο μοντέλα είναι όμοια όσον αφορά την αρνητική ακολουθία (αφού χρησιμοποιούν το ίδιο κύκλωμα για αυτή), ενώ παρουσιάζουν κάποιες μικρές διαφορές για τη θετική ακολουθία. Το μεν μοντέλο δεύτερης τάξης παρουσιάζει μία μικρή μηχανική ταλάντωση του δρομέα της γεννήτριας προτού αυτός μεταβεί σε μία μόνιμη κατάσταση, ενώ το μοντέλο ακολουθιών μόνιμης κατάστασης μεταβαίνει κατευθείαν σε αυτή. Ανάμεσα στα τρία μοντέλα, είναι φανερό η διαφορά των μέγιστων τιμών των μεγεθών καθώς και των χρονικών στιγμών που αυτές εμφανίζονται.

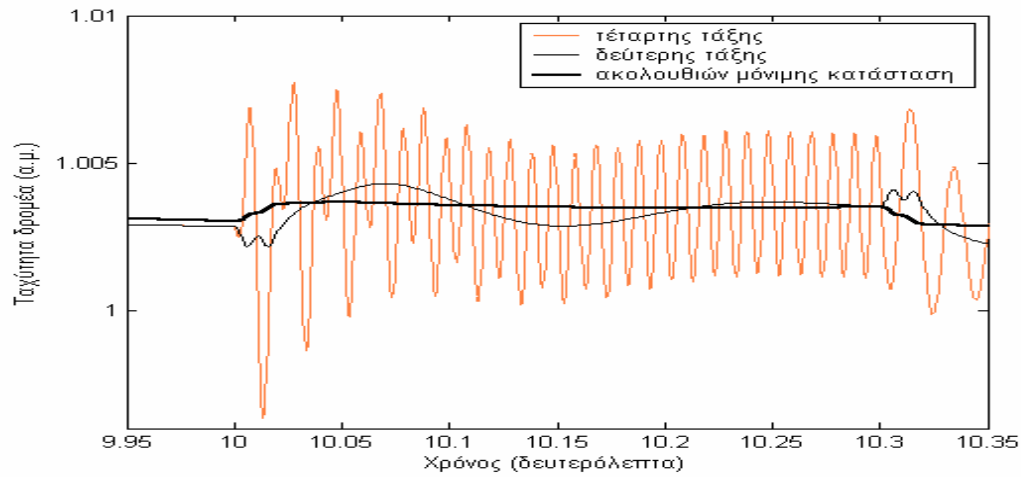
3.5.2. Ασυμμετρία μέτρων και φάσης στις τάσεις τροφοδοσίας του στάτη της ανεμογεννήτριας

Η περίπτωση αυτή εκτός από την ασυμμετρία φορτίων ή την περίπτωση βραχυκυκλωμάτων στο δίκτυο, καλύπτει και την περίπτωση της ασυμμετρίας των σύνθετων αντιστάσεων.

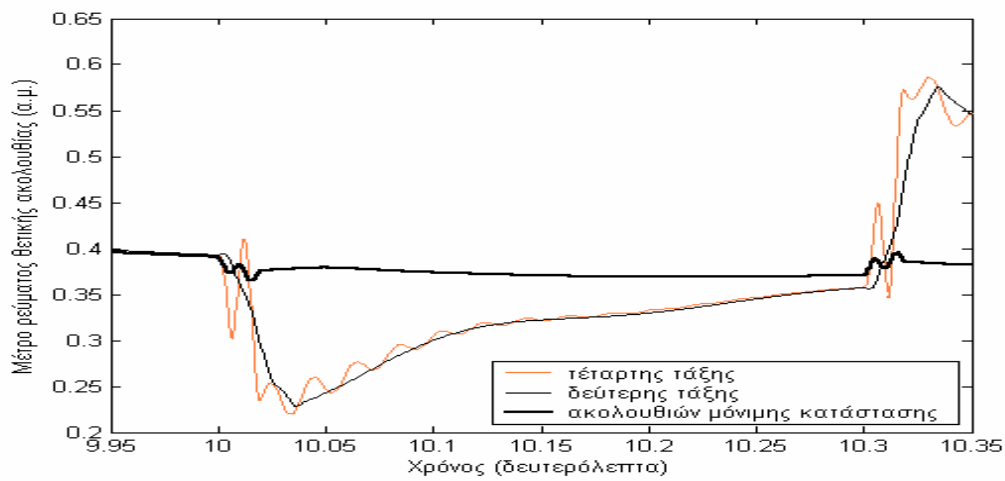
Εξακολουθεί να χρησιμοποιείται η ίδια χρονοσειρά ανέμου και η εφαρμογή των ασύμμετρων τάσεων γίνεται την ίδια χρονική στιγμή. Η επιβολή της ασυμμετρίας σταματά μετά από 0.3 δευτερόλεπτα. Τα διανύσματα των τάσεων κατά το χρονικό διάστημα της ασυμμετρίας, έχουν μέτρο και γωνία όπως περιγράφονται παρακάτω :

$$\begin{aligned}
 & \diamond \quad |\tilde{V}_a| = 0.7 \text{ και } \angle \tilde{V}_a = -18^\circ \\
 & \diamond \quad |\tilde{V}_b| = 0.86 \text{ και } \angle \tilde{V}_b = -113^\circ \\
 & \diamond \quad |\tilde{V}_c| = 1.15 \text{ και } \angle \tilde{V}_c = 126^\circ
 \end{aligned} \quad (3.20)$$

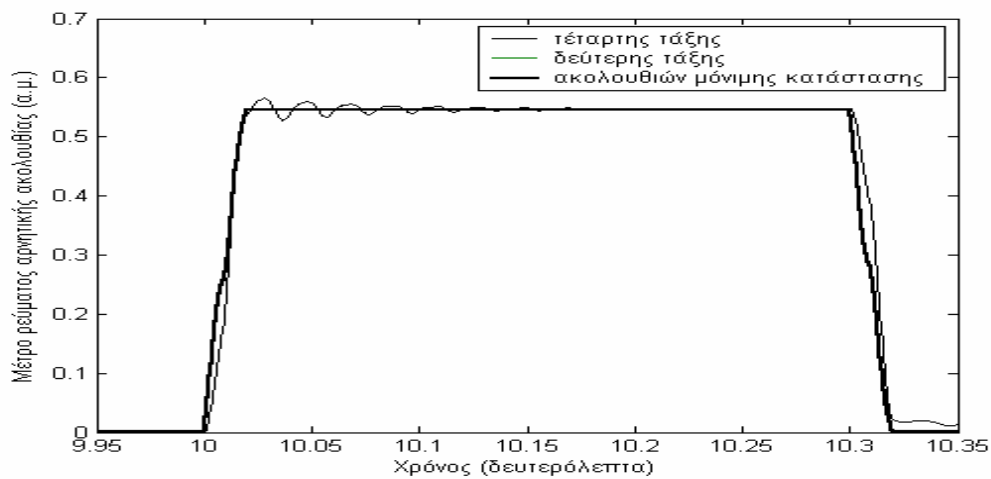
Χαρακτηριστικά μεγέθη της ανεμογεννήτριας φαίνονται στα παρακάτω σχήματα :



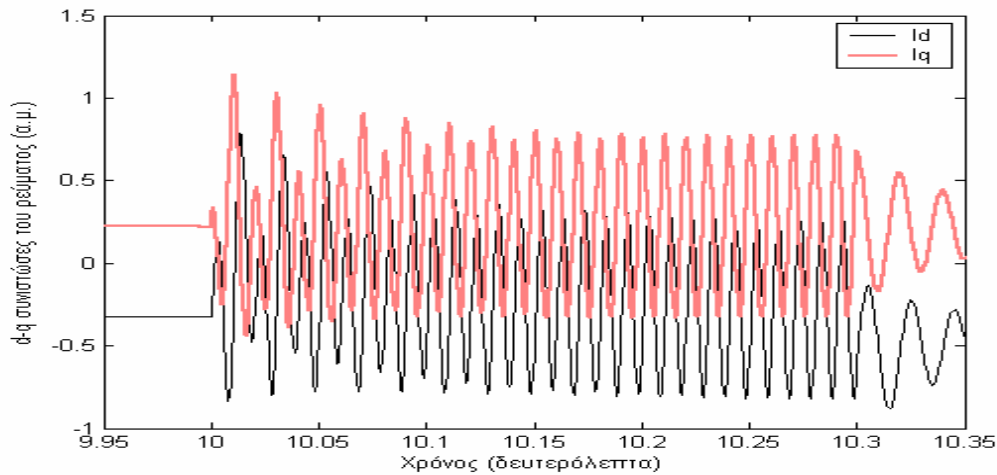
Σχήμα 3.9 Ταχύτητα δρομέα (α.μ.)



Σχήμα 3.10 Ρεύμα θετικής ακολουθίας (α.μ.)



Σχήμα 3.11 Ρεύμα αρνητικής ακολουθίας (α.μ.)



Σχήμα 3.12 $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος (πλήρες μοντέλο)

Τα συμπεράσματα από τα παραπάνω σχήματα, είναι παρόμοια με αυτά της προηγούμενης παραγράφου. Η μόνη διαφορά είναι ότι η δυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας γίνεται σε αυτή την περίπτωση πιο αισθητή, αφού εκτός από τη μεγαλύτερη ασυμμετρία μέτρων από αυτή της προηγούμενης παραγράφου, υπάρχει επιπρόσθετα και ασυμμετρία φάσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα μέτρα του ρεύματος της θετικής ακολουθίας καθώς και των $d - q$ συνιστωσών του πλήρους μοντέλου, όπου η ταλάντωσή τους σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή της προηγούμενης παραγράφου. Επίσης, πολύ σημαντικές διαφορές παρατηρούνται τόσο στην ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας, όσο και στο μέτρο του ρεύματος της αρνητικής ακολουθίας, το μέτρο των οποίων παρουσιάζεται σημαντικά αυξημένο σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση.

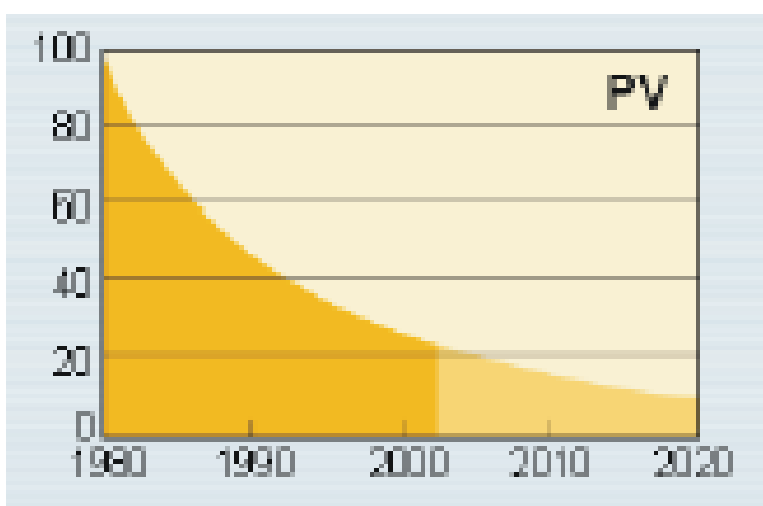
Κεφάλαιο 4

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (MPPT)

4.1. Γενικά στοιχεία περί φωτοβολταϊκών

Αν και το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ήταν γνωστό από πολύ παλιά και συγκεκριμένα από το 1839, όταν πρωτοανακαλύφθηκε από τον Becquerel, η εμπορική εφαρμογή των φωτοβολταϊκών γεννητριών, άρχισε να γίνεται πραγματικότητα μόλις πριν από λίγα χρόνια. Αιτία ήταν το απαγορευτικό κόστος των φωτοβολταϊκών στοιχείων, το οποίο έκανε τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική περίπου 50 φορές ακριβότερη σε σχέση με τις γνωστές συμβατικές πηγές ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γινόταν πραγματικότητα μόνο σε διαστημικές εφαρμογές (κίνηση δορυφόρων) και χρησιμοποιούνταν μόνο από την NASA.

Με την πάροδο όμως του χρόνου και την εξέλιξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο άρχισε να γίνεται όλο και περισσότερο εφικτή οικονομικά. Χαρακτηριστικό είναι το σχήμα 4.1 στο οποίο φαίνεται η τιμή της kWh που παράγεται από ηλιακή ενέργεια κατά την πάροδο του χρόνου, καθώς και η πρόβλεψη αυτής μέχρι το 2020.



Σχήμα 4.1 Κόστος kWh σε eurocents

Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες, αποτελούνται από πολλούς φωτοβολταϊκούς συλλέκτες, συνδεδεμένους παράλληλα μεταξύ τους. Οι φωτοβολταϊκοί αυτοί συλλέκτες με τη σειρά τους αποτελούνται από φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά, τα οποία περιέχουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή κύτταρα.

Ο λόγος της ομαδοποίησης αυτής, είναι η πολύ μικρή ισχύς και η πολύ μικρή τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο του εμπορίου (διαστάσεων $1.2 \times 0.31 = 0.37 \text{m}^2$) με 35 φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά έχει ονομαστικά στοιχεία, για τη συμβατική ακτινοβολία 1kW/m^2 και θερμοκρασία 20°C , όταν λειτουργεί ώστε να παράγει τη μέγιστη ισχύ είναι [1] :

Τάση 17.3 V Ένταση 2.31 A Ισχύς 40W

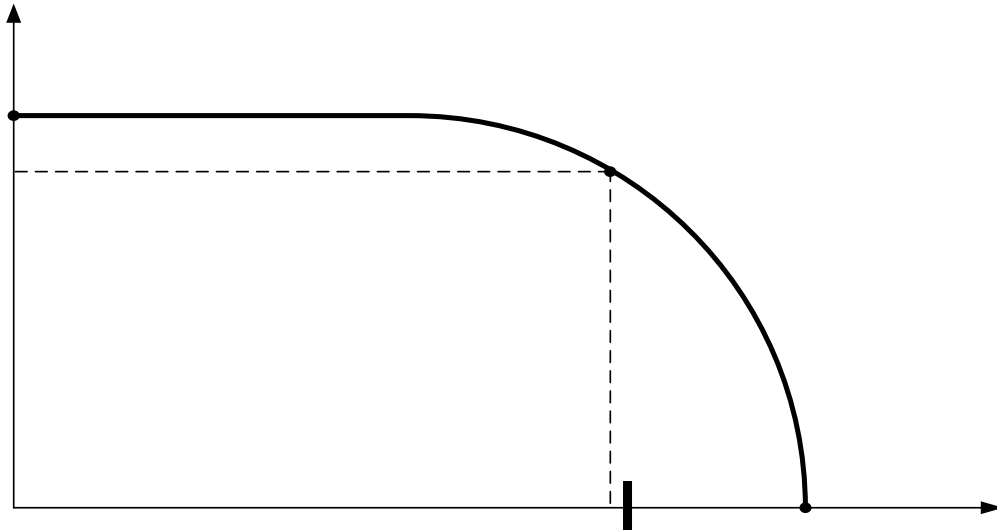
Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες των ημερών μας, λειτουργούν με βαθμό απόδοσης (ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το φωτοβολταϊκό προς την ισχύ της ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του) που κυμαίνεται συνήθως από 10 – 15%, με μέγιστο βαθμό απόδοσης που έχει επιτευχθεί ποτέ το 31% κάτω από εργαστηριακές συνθήκες (1988).

Τέλος, οι σύγχρονες φωτοβολταϊκές γεννήτριες μπορούν να χωριστούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες :

- ❖ Τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες στις οποίες η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται με τη βοήθεια κατόπτρων
- ❖ Τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες με κινητά πλαίσια, τα οποία παρακολουθούν την πορεία του ήλιου στον ουρανό, κατά τρόπο ώστε να δέχονται κάθετα την ηλιακή ακτινοβολία σε όλη τη διάρκεια της ημέρας
- ❖ Τις απλές φωτοβολταϊκές γεννήτριες, οι οποίες βρίσκονται σε σταθερό πλαίσιο

4.2. Φωτοβολταϊκά στοιχεία : I-V χαρακτηριστικές και παράμετροι

Στο σχήμα 4.2 της επόμενης σελίδας φαίνεται μία τυπική χαρακτηριστική καμπύλη τάσεως – εντάσεως ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, για δεδομένη θερμοκρασία και ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας :



Σχήμα 4.2 Τυπική $I - V$ καμπύλη ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

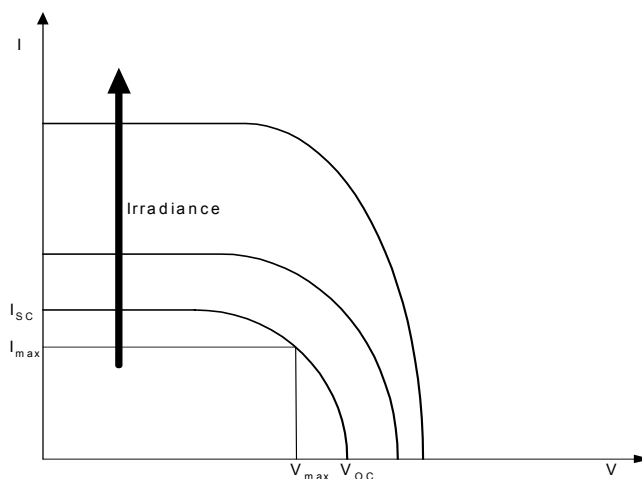
Στην παραπάνω καμπύλη, μπορούμε να διακρίνουμε τα εξής χαρακτηριστικά μεγέθη (σημεία) :

- ❖ I_{sc} , την ένταση (ρεύμα) βραχυκύκλωσης
- ❖ V_{oc} , την τάση ανοιτοκυκλώματος
- ❖ Το σημείο μέγιστης ισχύος (maximum power point)
- ❖ I_{max} , την ένταση μέγιστης ισχύος
- ❖ V_{max} , την τάση μέγιστης ισχύος

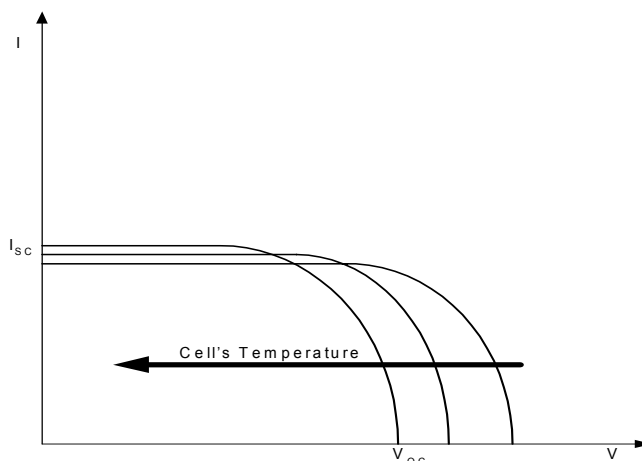
I_{sc}

I_{max}

Σημαντικά χαρακτηριστικά φαίνονται επίσης και στα δύο παρακάτω σχήματα, όπου φαίνεται η επίδραση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου :



Σχήμα 4.3 Επίδραση της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο



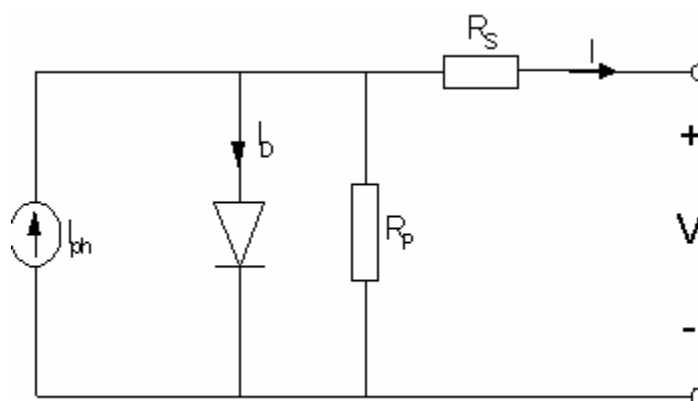
Σχήμα 4.4 Επίδραση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η τάση ανοιктоκυκλώματος είναι μία αύξουσα λογαριθμική συνάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ η ένταση βραχυκυκλώσεως είναι μία αύξουσα γραμμική συνάρτηση της τελευταίας. (Σχήμα 4.3)

Τέλος, όσον αφορά τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου, αυτή έχει σημαντική επίδραση μόνο στην τάση ανοιктоκυκλώσεως του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Η ένταση βραχυκυκλώσεως, παρουσιάζει πολύ μικρή μεταβολή σε σχέση με τη θερμοκρασία.

4.3. Μοντέλα φωτοβολταϊκών στοιχείων

Το πιο γνωστό και ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο που προσομοιώνει με αρκετή ακρίβεια τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου, είναι το μοντέλο που περιέχει μία δίοδο και απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 4.5 Μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το κυριότερο στοιχείο του παραπάνω κυκλώματος, είναι η ιδανική πηγή έντασης, έξοδος της οποίας είναι το φωτόρευμα I_{ph} , ρεύμα ανάλογο της ηλιακής ακτινοβολίας.

Το ρεύμα της διόδου I_D , δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$I_D = I_o * (e^{\frac{V_D}{m}} - 1) \quad (4.1)$$

όπου :

- ❖ I_o το ανάστροφο ρεύμα κόρου
- ❖ V_D η τάση στα άκρα της διόδου
- ❖ $m = \gamma KT/Q$, σταθερά
- ❖ γ ο συντελεστής ποιότητας της διόδου
- ❖ K η σταθερά του Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23}$ Joule/°K
- ❖ T η απόλυτη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού κυττάρου και
- ❖ Q το φορτίο του ηλεκτρονίου = $1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulombs

Η παράλληλη αντίσταση R_p εκφράζει τις απώλειες του φωτοβολταϊκού στοιχείου, ενώ η εν σειρά αντίσταση R_s εκφράζει τις πρόσθετες απώλειες του φωτοβολταϊκού στοιχείου, όταν στα άκρα του συνδεθεί κάποιο φορτίο.

Αναλύοντας το κύκλωμα του σχήματος 4.5 που αντιπροσωπεύει τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου, εξάγουμε τις παρακάτω εξισώσεις :

$$I_{ph} = I_D + I_p + I \quad (4.2)$$

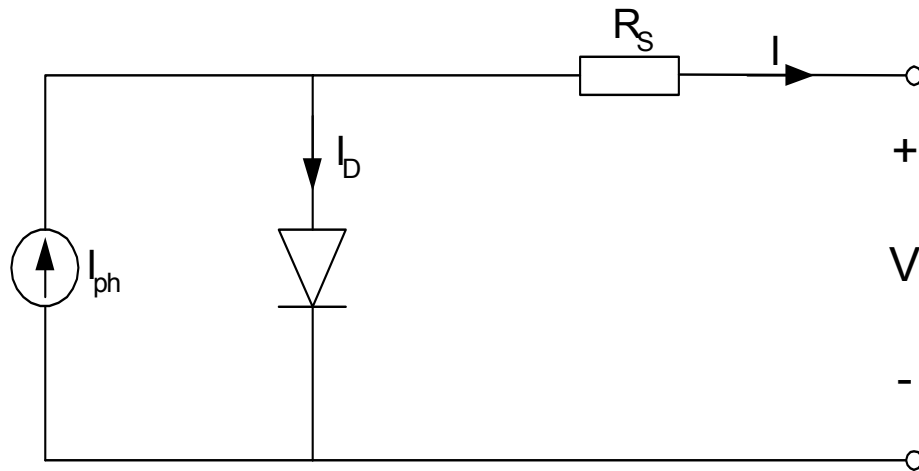
Η παραπάνω εξίσωση εφαρμόζοντας νόμο τάσεων Kirchoff και αντικαθιστώντας το ρεύμα της διόδου I_D από τη σχέση 4.1, γίνεται :

$$I_{ph} = I_D * (e^{\frac{V+R_s I}{m}} - 1) + \frac{V + IR_s}{R_p} + I \quad (4.3)$$

η οποία αποτελεί και τη σχέση $I - V$ του φωτοβολταϊκού.

Προφανώς, για την εύρεση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως αρκεί να τεθεί $V=0$, ενώ για την τιμή της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως, αρκεί να τεθεί $I=0$.

Ένα ακόμη χρησιμοποιούμενο μοντέλο για την προσομοίωση του φωτοβολταϊκού στοιχείου, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.6). Το μοντέλο αυτό προκύπτει από αυτό του σχήματος 4.5, εάν θεωρήσουμε ότι οι απώλειες του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι μηδενικές, δηλαδή ότι η παράλληλη αντίσταση R_p δεν υφίσταται. (απλοποιημένο μοντέλο με μία δίοδο)



Σχήμα 4.6 Απλοποιημένο μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου

Οι εξισώσεις για το μοντέλο αυτό, εξάγονται από αυτές του προηγούμενου, θεωρώντας την παράλληλη αντίσταση άπειρη. Συνεπώς, είναι :

$$I_{ph} = I_D + I \quad (4.4)$$

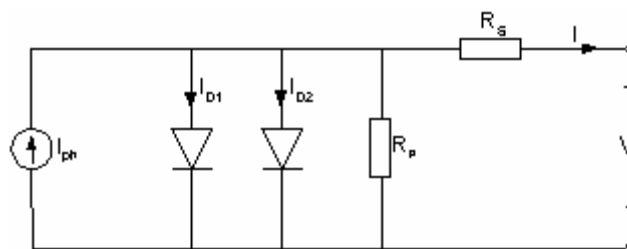
και

$$I_{ph} = I_D * \left(e^{\frac{V+R_s I}{m}} - 1 \right) + I \quad (4.5)$$

Είναι πολύ συνηθισμένο, να παίρνουμε το λογάριθμο της τελευταίας σχέσης και έτσι προκύπτει :

$$V = -IR_s + m \ln \left(\frac{I_{ph} - I + I_o}{I_o} \right) \quad (4.6)$$

Στο τέλος της παρούσας παραγράφου, αξίζει να αναφερθεί ότι πολύ συχνά χρησιμοποιείται και το μοντέλο δύο διόδων, το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 4.7 Μοντέλο δύο διόδων

4.4. Μοντέλο απλών φωτοβολταϊκών γεννητριών

Το μοντέλο της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, είναι το ίδιο με το μοντέλο του ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μόνο που οι παράμετροί του είναι προσαρμοσμένοι στο πλήθος των φωτοβολταϊκών στοιχείων της γεννήτριας. Πιο συγκεκριμένα, αυτό που καθορίζει τις παραμέτρους της γεννήτριας, είναι το πλήθος των παράλληλων και εν σειρά φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Εάν μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια έχει M_s φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά και M_p παράλληλα, τότε μπορούν να υπολογιστούν οι παράμετροι του μοντέλου της γεννήτριας, εάν είναι γνωστές οι παράμετροι του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Συνεπώς, εάν $I_{o,c}$ και $I_{ph,c}$ είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου και το φωτόρευμα ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου αντίστοιχα, τότε οι προσαρμοσμένες παράμετροι για το ανάστροφο ρεύμα κόρου I_o και του φωτορεύματος I_{ph} της φωτοβολταϊκής γεννήτριας θα είναι :

$$I_{ph} = M_p * I_{ph,c}$$

και (4.7)

$$I_o = M_p * I_{o,c}$$

Όμοια σκεπτόμενοι, εάν V_c και I_c είναι η τάση και η ένταση στους ακροδέκτες του φωτοβολταϊκού στοιχείου αντίστοιχα, τότε η αντίστοιχη τάση και ένταση στους ακροδέκτες της γεννήτριας θα είναι :

$$V = V_c * M_s$$

και (4.8)

$$I = I_c * M_p$$

Τέλος, η σχέση (4.6) μας δίνει με τη βοήθεια των δύο προηγούμενων σχέσεων τις τιμές της αντίστασης σειράς και της σταθεράς m της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, σε σχέση με αυτές του ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου :

$$R_s = \frac{M_s}{M_p} * R_{s,c}$$

και (4.9)

$$m = M_s * m_c$$

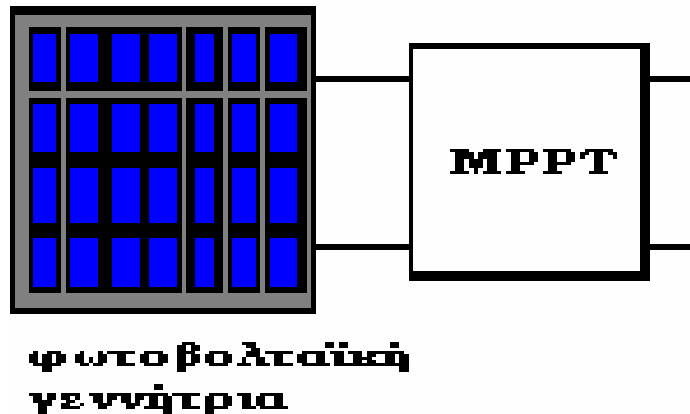
όπου $R_{s,c}$ και m_c είναι η αντίσταση σειράς και η σταθερά του φωτοβολταϊκού στοιχείου αντίστοιχα.

Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια παράγει ισχύ, που δεν είναι τίποτε άλλο παρά το γινόμενο τάσης επί έντασης. Άρα, από τη σχέση (4.6) μπορούμε να εξάγουμε την ισχύ της γεννήτριας πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της με την ένταση I:

$$\text{Ισχύς γεννήτριας : } P = V \cdot I = m \cdot I \cdot \ln \left(\frac{I_{ph} - I + I_o}{I_o} \right) - I^2 \cdot R_s \quad (4.10)$$

4.5. Περιγραφή ανεπτυχθέντος μοντέλου

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε κατά την παρούσα εργασία, είναι το μοντέλο της απλής φωτοβολταϊκής γεννήτριας που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο και δουλεύει συνεχώς στο σημείο μέγιστης ισχύος.



Σχήμα 4.8 Σχηματική αναπαράσταση μοντέλου Φ/Β γεννήτριας με MPPT

Οι παραδοχές για το μοντέλο αυτό είναι οι εξής :

- ❖ Όλα τα φωτοβολταϊκά κύτταρα της γεννήτριας είναι όμοια, δέχονται την ίδια ακτινοβολία και βρίσκονται κάτω από την ίδια θερμοκρασία
- ❖ Δεν υπάρχουν απώλειες στη φωτοβολταϊκή γεννήτρια, ούτε στο MPPT
- ❖ Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια δουλεύει συνεχώς στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος για ορισμένη τιμή ακτινοβολίας και θερμοκρασίας

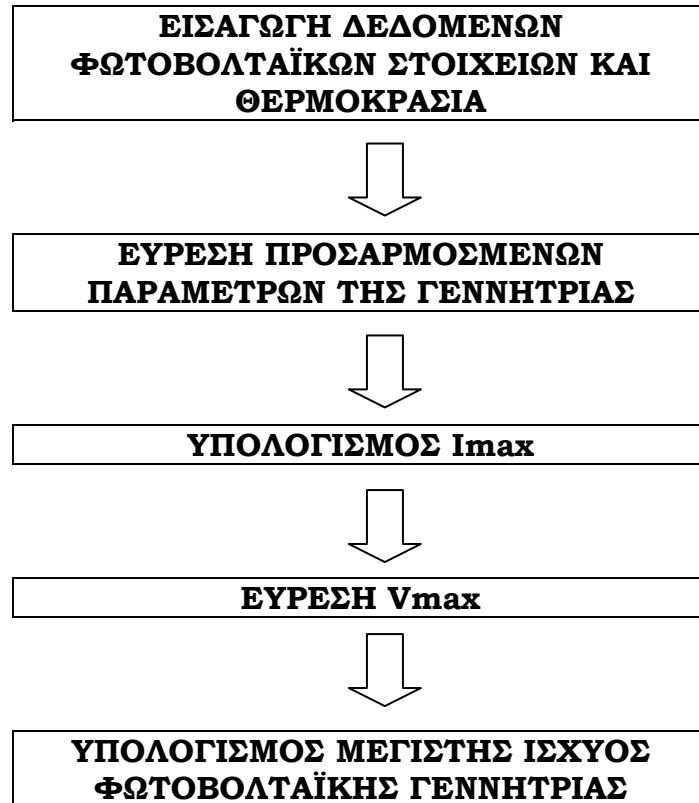
Στο σημείο μέγιστης ισχύος, προφανώς θα ισχύει :

$$\frac{d}{dI} P = 0 \quad (4.11)$$

και παραγωγίζοντας τη σχέση (4.10), καταλήγουμε στην παρακάτω εξίσωση :

$$m \cdot \ln \left(\frac{I_{ph} - I_{max} + I_o}{I_o} \right) = 2 \cdot I_{max} \cdot R_s + \frac{m \cdot I_{max}}{I_{ph} - I_{max} + I_o} \quad (4.12)$$

Από την παραπάνω εξίσωση, καθορίζεται η ένταση του ρεύματος όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια λειτουργεί παράγοντας τη μέγιστη ισχύ για μία συγκεκριμένη ακτινοβολία. Με δεδομένη την τιμή αυτή I_{max} , υπολογίζεται από τη σχέση (4.6) η τιμή της τάσης στους ακροδέκτες της γεννήτριας V_{max} . Έχοντας υπολογίσει τα δύο αυτά μεγέθη, υπολογίζεται και η μέγιστη ισχύς της φωτοβολταϊκής γεννήτριας.



Σχήμα 4.9 Μπλοκ διάγραμμα του μοντέλου

Από τα βήματα που φαίνονται στο σχήμα 4.9, ο υπολογισμός του I_{max} είναι το πιο δύσκολο βήμα. Για τον υπολογισμό αυτό χρειάζεται η λύση μίας μη αλγεβρικής εξίσωσης. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, ο υπολογισμός της έντασης του ρεύματος της φωτοβολταϊκής γεννήτριας σε συνθήκες μέγιστης ισχύος, γίνεται με τη μέθοδο της διχοτόμησης και με ακρίβεια 1mA.

4.6. Μέθοδος της διχοτόμησης

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την εύρεση ρίζας μίας συνεχούς συνάρτησης $f(x)$, μίας μεταβλητής μόνο, σε ένα διάστημα $[a, \beta]$ όπου ικανοποιεί την παρακάτω εξίσωση :

$$f(a) \cdot f(\beta) \leq 0 \quad (4.13)$$

Αρχικά θέτουμε :

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \alpha \\ \beta_0 &= \beta \\ x_0 &= (\alpha_0 + \beta_0) / 2 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Η ανισότητα (4.13) δείχνει ότι η f έχει μία ρίζα τουλάχιστον στο διάστημα $[\alpha, \beta]$, η οποία βρίσκεται σε ένα από τα δύο διαστήματα $[\alpha_0, x_0]$ και $[x_0, \beta_0]$. Εξετάζουμε τότε το γινόμενο $f(\alpha_0) \cdot f(x_0)$.

Εάν $f(\alpha_0) \cdot f(x_0) \leq 0$, τότε υπάρχει μία ρίζα στο διάστημα $[\alpha_0, x_0]$ το οποίο και διαλέγουμε θέτοντας :

$$\alpha_1 = x_0 \text{ και } \beta_1 = x_0 \quad (4.15)$$

Εάν $f(\alpha) \cdot f(x_0) > 0$, τότε το διάστημα $[x_0, \beta_0]$ περιέχει μία ρίζα και θέτουμε :

$$\alpha_1 = x_0 \text{ και } \beta_1 = \beta_0 \quad (4.16)$$

Έχοντας διαλέξει το διάστημα $[\alpha_1, \beta_1]$, το επόμενο σημείο είναι :

$$x_1 = (\alpha_1 + \beta_1) / 2 \quad (4.17)$$

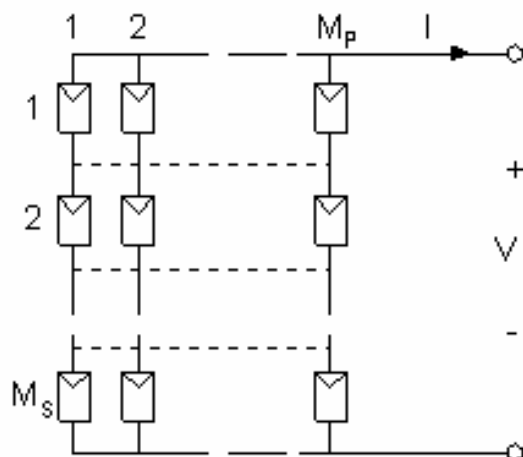
και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία στο νέο διάστημα $[\alpha_1, \beta_1]$, κ.ο.κ. Κατασκευάζουμε έτσι μία ακολουθία διαστημάτων $[\alpha_k, \beta_k]$ και μία ακολουθία σημείων x_k με :

$$\begin{aligned} x_k &= (\alpha_k + \beta_k) / 2 \\ &\text{και} \\ f(\alpha_k) \cdot f(\beta_k) &\leq 0 \end{aligned} \quad (4.18)$$

η οποία αποδεικνύεται ότι συγκλίνει σε μία ρίζα της εξίσωσης $f(x)=0$.

4.7. Προσομοίωση λειτουργίας φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Ας θεωρήσουμε μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια, όπως του σχήματος 4.10, που τα φωτοβολταϊκά της στοιχεία έχουν τα εξής χαρακτηριστικά :



Σχήμα 4.10 Εξαιαζόμενη φωτοβολταϊκή γεννήτρια

- ❖ $M_s=324$, αριθμός των σε σειρά φωτοβολταϊκών κυττάρων
- ❖ $M_p=18$, αριθμός των παράλληλα συνδεδεμένων κυττάρων
- ❖ $I_{ph,c}=0.756$ A για ακτινοβολία 1 sun
- ❖ $I_{o,c}=0.45$ mA
- ❖ $R_{s,c}=0.05$ Ω
- ❖ $m_c=0.0731$ (σε ονομαστική θερμοκρασία)

(Τα δεδομένα για την προσομοίωση αυτή έχουν ληφθεί από την [1])

Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται οι τιμές της τάσης και της έντασης της γεννήτριας, όταν αυτή λειτουργεί σε συνθήκες μέγιστης ισχύος, για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας, όπως προέκυψαν από το χρησιμοποιούμενο μοντέλο σε ονομαστική θερμοκρασία :

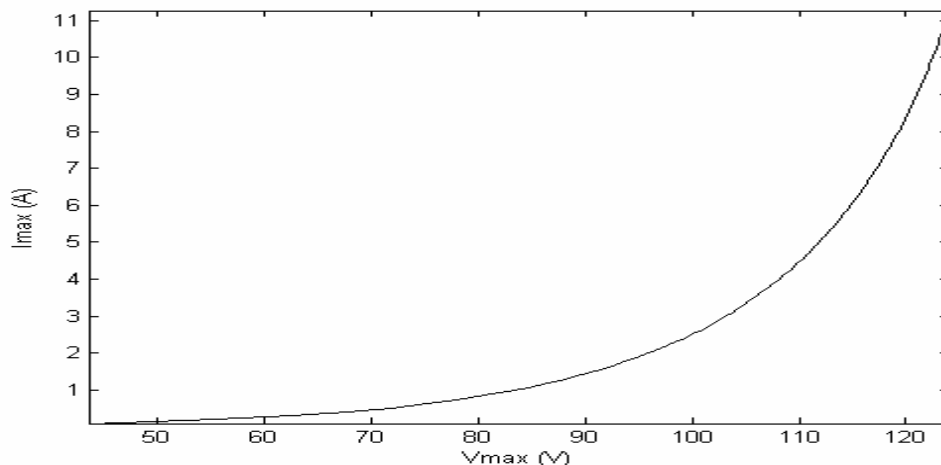
Ακτινοβολία (sun)	Ένταση ρεύματος I_{max} (A)	Τάση V_{max} (V)	Μέγιστη Ισχύς P_{max} (W)
0.01	0.0929	43.625	4.0527
0.02	0.19592	55.315	10.838
0.03	0.30083	62.671	18.853
0.04	0.40833	67.809	27.689
0.05	0.51633	71.93	37.139
0.06	0.62563	75.255	47.082
0.07	0.73545	78.093	57.433
0.08	0.84553	80.582	68.134
0.09	0.95586	82.793	79.139
0.1	1.0667	84.757	90.413
0.11	1.1779	86.532	101.93
0.12	1.2892	88.16	113.66
0.13	1.4013	89.62	125.59
0.14	1.5124	91.047	137.7
0.15	1.625	92.296	149.98
0.16	1.7371	93.493	162.41

0.17	1.8499	94.595	174.99
0.18	1.9619	95.672	187.7
0.19	2.075	96.645	200.53
0.2	2.1872	97.61	213.49
0.21	2.3004	98.485	226.55
0.22	2.4133	99.335	239.73
0.23	2.5258	100.17	252.99
0.24	2.6393	100.92	266.36
0.25	2.7523	101.66	279.81
0.26	2.8656	102.37	293.35
0.27	2.9783	103.07	306.96
0.28	3.0921	103.7	320.66
0.29	3.2052	104.34	334.43
0.3	3.3185	104.95	348.26
0.31	3.4325	105.51	362.17
0.32	3.5462	106.07	376.14
0.33	3.6596	106.62	390.17
0.34	3.7731	107.14	404.25
0.35	3.8868	107.65	418.4
0.36	4	108.15	432.6
0.37	4.114	108.61	446.85
0.38	4.2276	109.08	461.15
0.39	4.3413	109.53	475.5
0.4	4.4551	109.96	489.89
0.41	4.569	110.38	504.33
0.42	4.6824	110.8	518.81
0.43	4.7959	111.21	533.33
0.44	4.9102	111.58	547.9
0.45	5.0239	111.97	562.5
0.46	5.1376	112.34	577.14
0.47	5.2515	112.69	591.81
0.48	5.3655	113.04	606.52
0.49	5.4788	113.39	621.26
0.5	5.593	113.72	636.04
0.51	5.7064	114.05	650.84
0.52	5.8208	114.36	665.68
0.53	5.9343	114.68	680.54
0.54	6.048	114.99	695.43
0.55	6.1617	115.28	710.35
0.56	6.2754	115.58	725.29
0.57	6.3893	115.86	740.26
0.58	6.5032	116.14	755.26
0.59	6.6172	116.41	770.27
0.6	6.7312	116.67	785.31
0.61	6.8448	116.93	800.38
0.62	6.959	117.18	815.46
0.63	7.0727	117.43	830.56

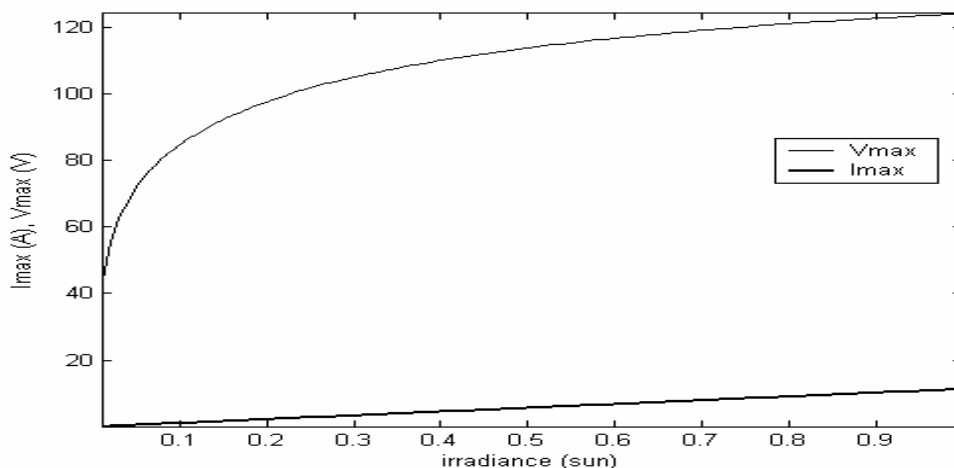
0.64	7.1864	117.68	845.69
0.65	7.3002	117.92	860.83
0.66	7.4141	118.15	875.99
0.67	7.5274	118.39	891.17
0.68	7.6414	118.61	906.36
0.69	7.7554	118.83	921.58
0.7	7.8688	119.05	936.8
0.71	7.9823	119.27	952.05
0.72	8.0965	119.47	967.31
0.73	8.21	119.68	982.58
0.74	8.3237	119.88	997.87
0.75	8.4373	120.08	1013.2
0.76	8.551	120.28	1028.5
0.77	8.6647	120.47	1043.8
0.78	8.7778	120.66	1059.1
0.79	8.8915	120.84	1074.5
0.8	9.0053	121.02	1089.9
0.81	9.1185	121.21	1105.2
0.82	9.2323	121.38	1120.6
0.83	9.3455	121.56	1136
0.84	9.4594	121.72	1151.4
0.85	9.5727	121.89	1166.8
0.86	9.6859	122.06	1182.2
0.87	9.7999	122.21	1197.6
0.88	9.9132	122.37	1213.1
0.89	10.027	122.53	1228.5
0.9	10.14	122.68	1244
0.91	10.253	122.83	1259.4
0.92	10.367	122.98	1274.9
0.93	10.48	123.13	1290.4
0.94	10.593	123.27	1305.8
0.95	10.707	123.41	1321.3
0.96	10.819	123.56	1336.8
0.97	10.933	123.69	1352.3
0.98	11.046	123.82	1367.8
0.99	11.159	123.96	1383.3
1	11.272	124.09	1398.8

Πίνακας 4.1 Υπολογιζόμενες τιμές από το μοντέλο

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, όταν αυτή δουλεύει σε συνθήκες μέγιστης ισχύος και η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνεται από 1 έως 100% (η θερμοκρασία είναι η ονομαστική).



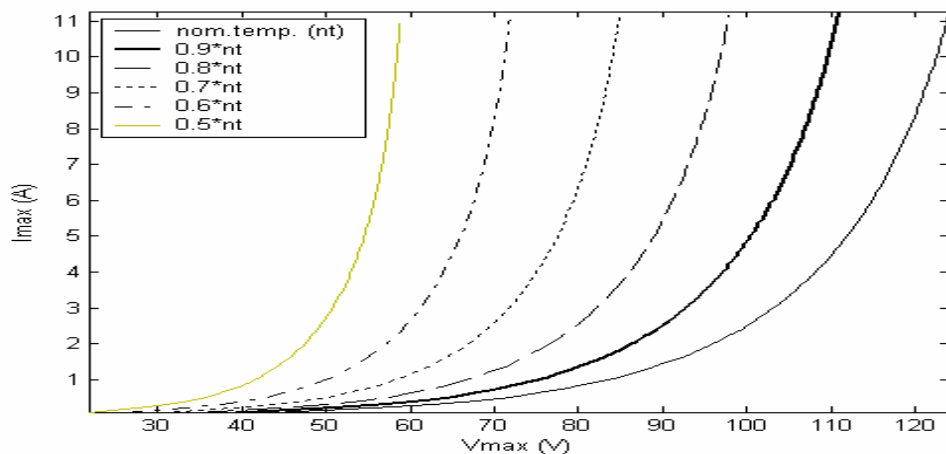
Σχήμα 4.11 $V - I$ χαρακτηριστική της φωτοβολταϊκής γεννήτριας για συνθήκες λειτουργίας σε μέγιστη ισχύ (ονομαστική θερμοκρασία)



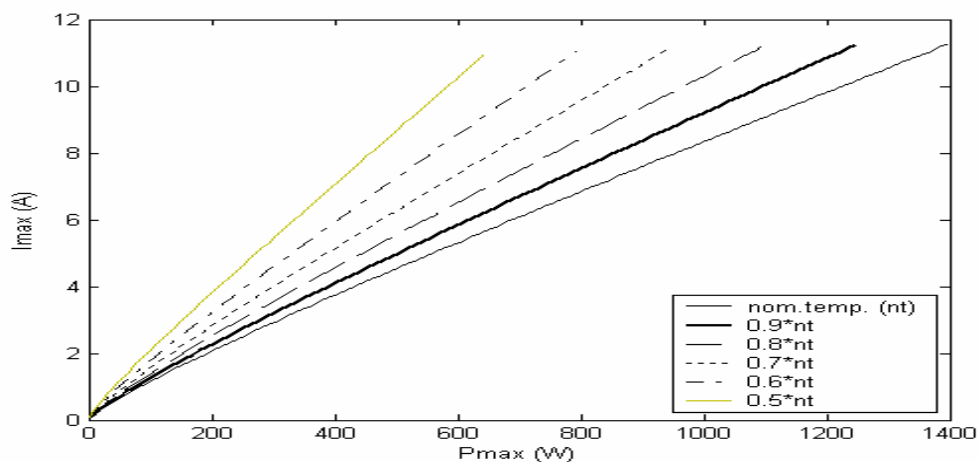
Σχήμα 4.12 Γραφική παράσταση της έντασης I_{max} και της τάσης V_{max} συναρτήσει της ακτινοβολίας

Μπορούμε να παρατηρήσουμε την εκθετική μορφή της $V - I$ καμπύλης, τη λογαριθμική και τη σχεδόν γραμμική μορφή των καμπυλών $V_{max} -$ ακτινοβολίας και $I_{max} -$ ακτινοβολίας αντίστοιχα.

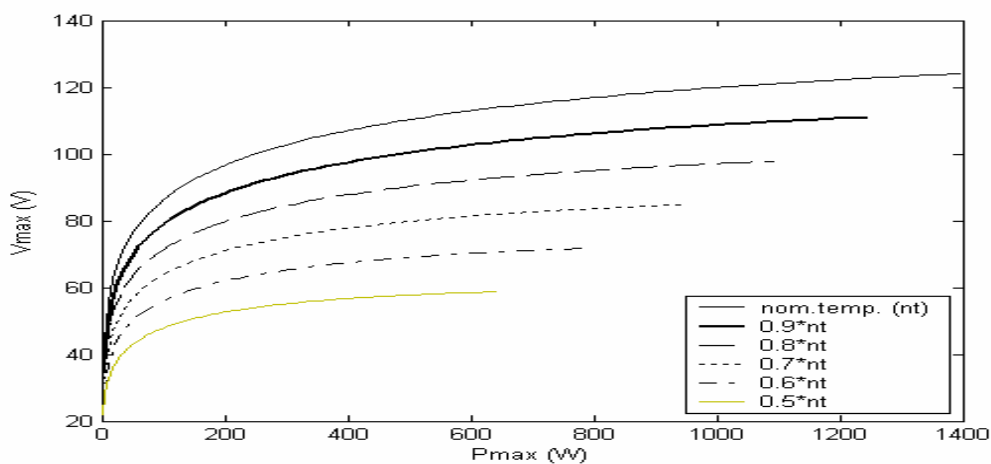
Ας θεωρήσουμε τώρα την επίδραση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων στα παραπάνω μεγέθη. Στα παρακάτω σχήματα, εμφανίζονται οι ίδιες γραφικές παραστάσεις για διαφορετικές θερμοκρασίες των φωτοβολταϊκών στοιχείων.



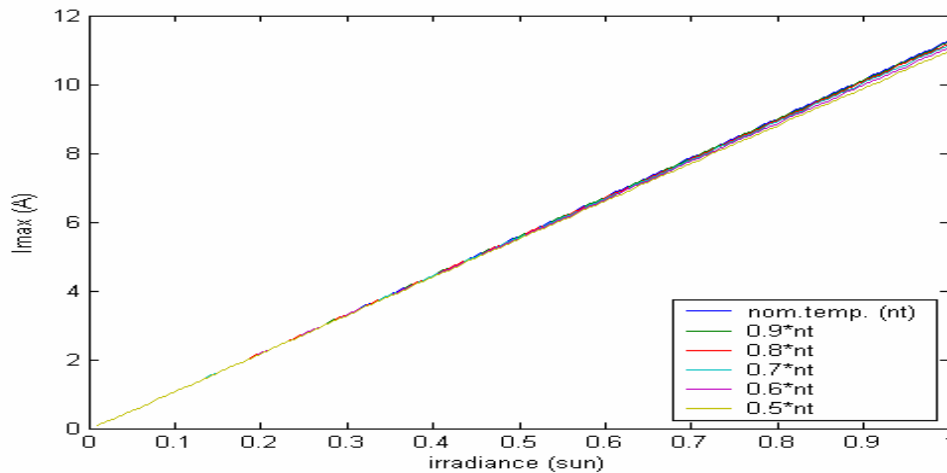
Σχήμα 4.13 Επίδραση της θερμοκρασίας στη $V - I$ χαρακτηριστική της φωτοβολταϊκής γεννήτριας για συνθήκες λειτουργίας σε μέγιστη ισχύ



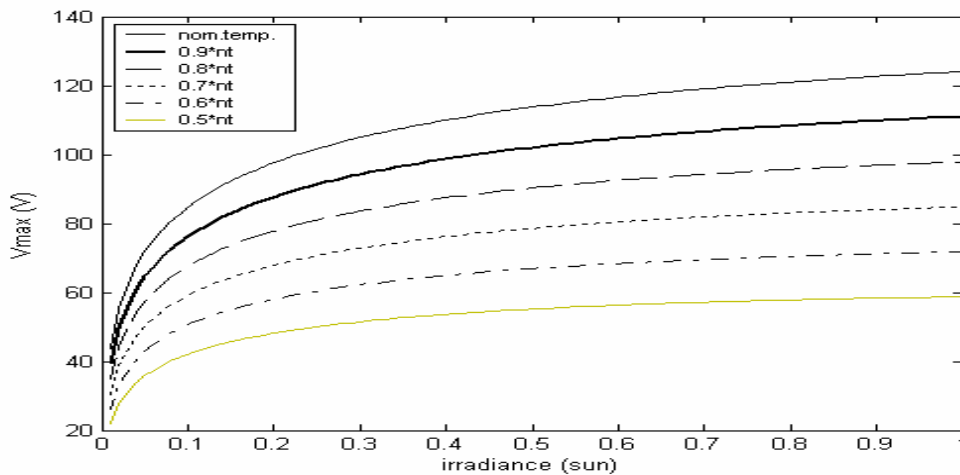
Σχήμα 4.14 Επίδραση της θερμοκρασίας στην $P_{max} - I_{max}$ χαρακτηριστική της φωτοβολταϊκής γεννήτριας για συνθήκες λειτουργίας σε μέγιστη ισχύ



Σχήμα 4.15 Επίδραση της θερμοκρασίας στην $P_{max} - V_{max}$ χαρακτηριστική της φωτοβολταϊκής γεννήτριας για συνθήκες λειτουργίας σε μέγιστη ισχύ



Σχήμα 4.16 I_{max} συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας της φωτοβολταϊκής γεννήτριας



Σχήμα 4.16 V_{max} συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας της φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Από όλα τα παραπάνω σχήματα, μπορούν να παρατηρηθούν τα εξής. Η $V - I$ χαρακτηριστική παραμένει μία συνάρτηση εκθετικής μορφής, το γράφημα της οποίας μετατοπίζεται προς τα αριστερά με τη μείωση της θερμοκρασίας, ενώ η μείωση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού ανόδου της, δηλαδή την αύξηση της κλίσης του γραφήματος.

Η επίδραση της θερμοκρασίας μικρή επίδραση φαίνεται να έχει στην ένταση του ρεύματος I_{max} . Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά από το σχήμα 4.16, από όπου παρατηρείται ότι η προαναφερθείσα ένταση του ρεύματος σχεδόν ταυτίζεται για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται σε υψηλές ακτινοβολίες, άνω των 0.9 sun.

Αντίθετα, σημαντική είναι η επίδραση της θερμοκρασίας στην τάση που εμφανίζεται στους ακροδέκτες της φωτοβολταϊκής γεννήτριας όταν αυτή λειτουργεί στη μέγιστη ισχύ της. Η τάση αυτή (V_{max}), παρουσιάζει σημαντική

αύξηση τόσο σε σχέση με τη θερμοκρασία, όσο και με την ηλιακή ακτινοβολία. Η τελευταία, φαίνεται να επιδρά αρνητικά πάνω στο ρυθμό του εξεταζόμενου μεγέθους, όπως μπορεί κανείς να καταλάβει από την κλίση της γραφικής παράστασης που εμφανίζεται στο σχήμα 4.16.

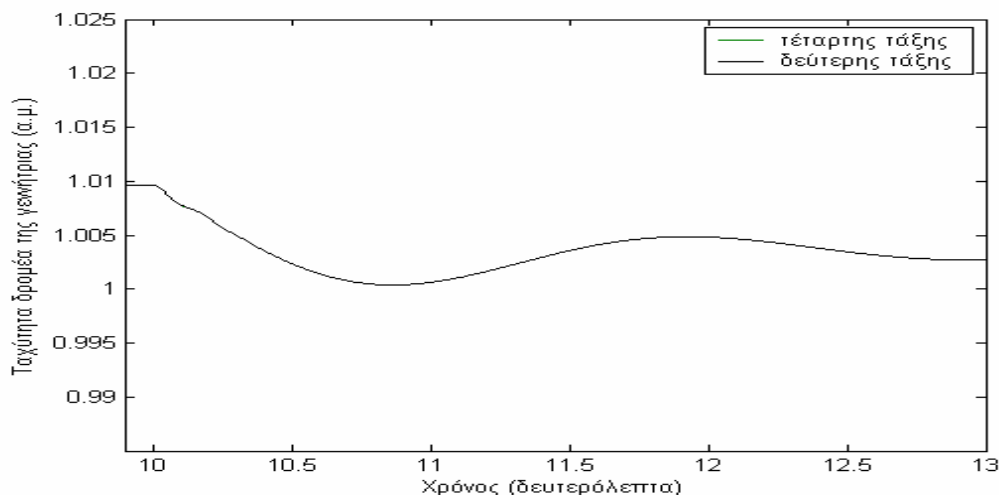
Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού, πρέπει να αναφερθεί ότι το MPPT, δεν είναι τίποτε άλλο από το σύστημα ελέγχου των παλμών εναύσεως των ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιεί ο αντιστροφέας (inverter), μέσω του οποίου συνδέονται οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες στο δίκτυο του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Κεφάλαιο 5**ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

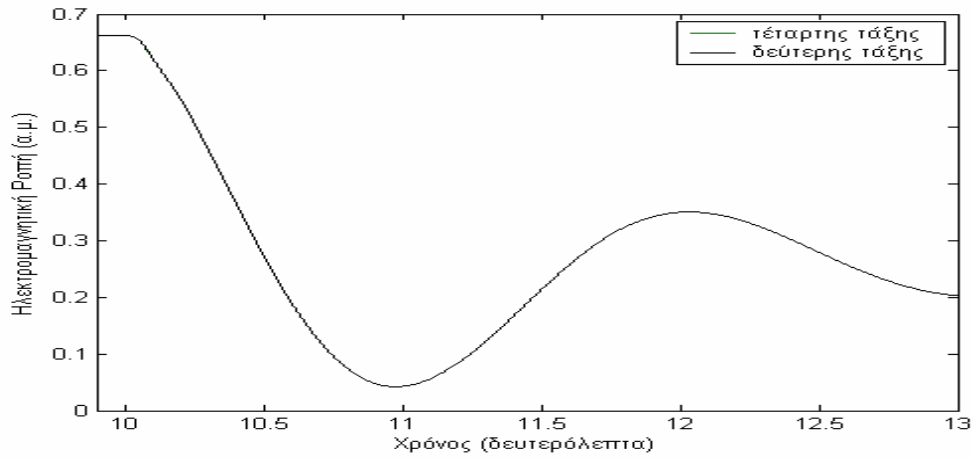
Από τις προσομοιώσεις που έλαβαν χώρα σε όλα τα προηγούμενα κεφάλαια, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα, τόσο για την ανεμογεννήτρια όσο και για τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια.

Πιο συγκεκριμένα, τα μη πλήρη μοντέλα της ανεμογεννήτριας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συγκεκριμένες περιπτώσεις και κάτω από ορισμένες συνθήκες. Το μοντέλο δεύτερης τάξης αποτυπώνει με πολύ καλή ακρίβεια τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας για μία δεδομένη χρονοσειρά ανέμου. Τα μεγέθη των $d - q$ συνιστωσών του ρεύματος, η ηλεκτρομαγνητική ροπή, η ισχύς και η ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας, ταυτίζονται με αυτά που προκύπτουν από τη χρήση του πλήρους μοντέλου, όταν δεν υπάρχει κάποια ηλεκτρική διαταραχή στους ακροδέκτες της ανεμογεννήτριας. Συνεπώς, η ακρίβειά του είναι πολύ ικανοποιητική για προσομοίωση μηχανικών μεταβολών.

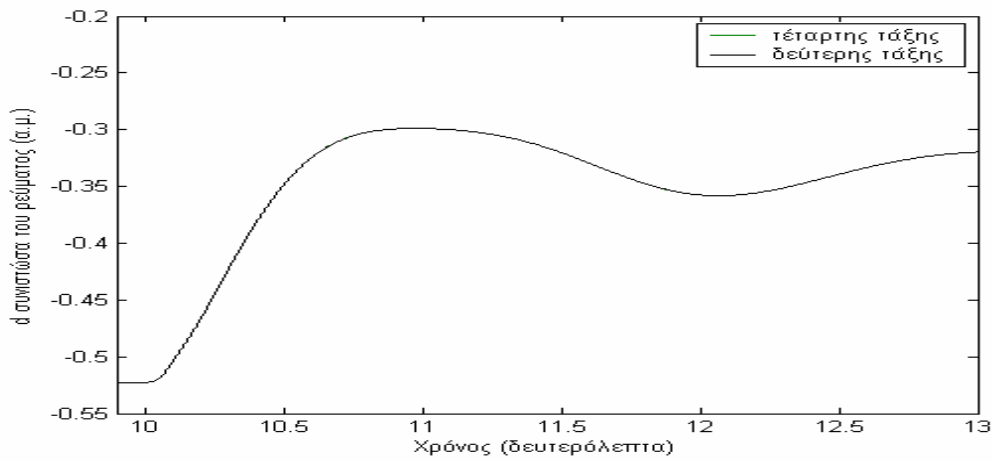
Ακόμη και σε μία μεγάλη διαταραχή μηχανικής φύσεως, όπως αυτή που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα, η συμπεριφορά του είναι εξαιρετική.



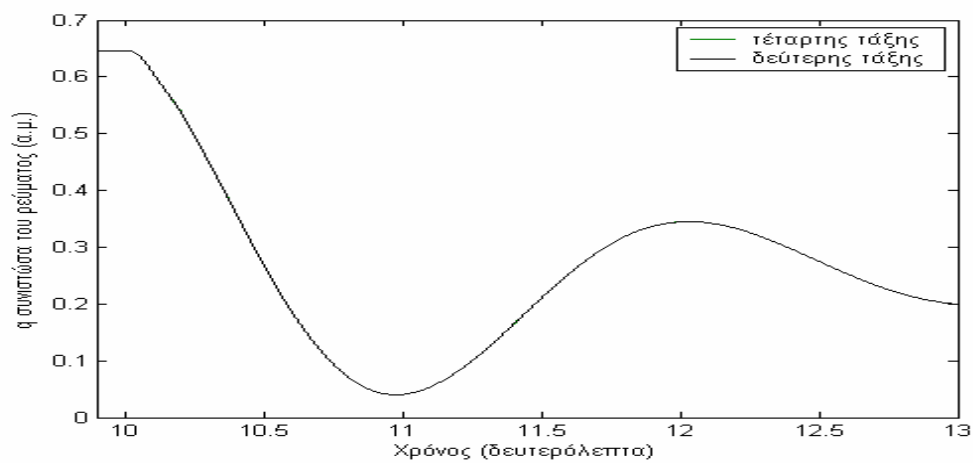
Σχήμα 5.1 Ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας για βηματική πτώση του ανέμου από 11 m/sec σε 8 m/sec



Σχήμα 5.2 Ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας για βηματική πτώση του ανέμου από 11 m/sec σε 8 m/sec



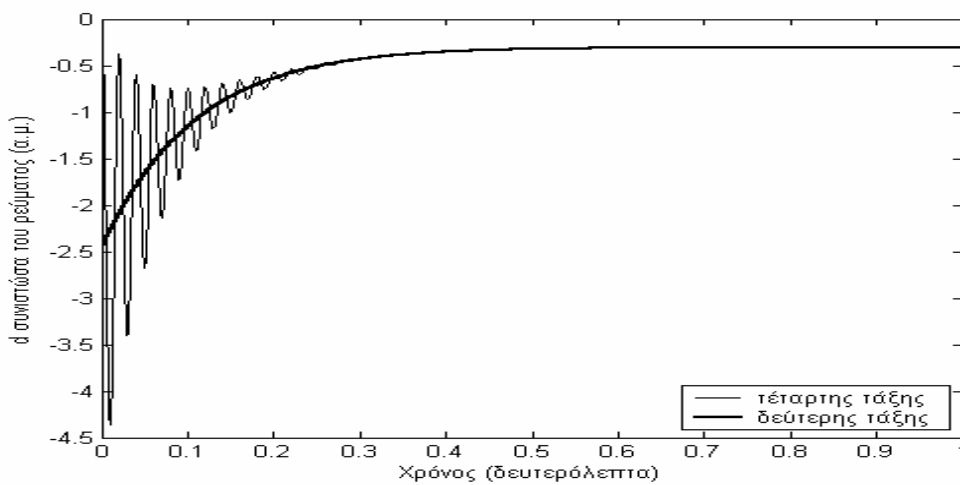
Σχήμα 5.3 d συνιστώσα του ρεύματος της γεννήτριας για βηματική πτώση του ανέμου από 11 m/sec σε 8 m/sec



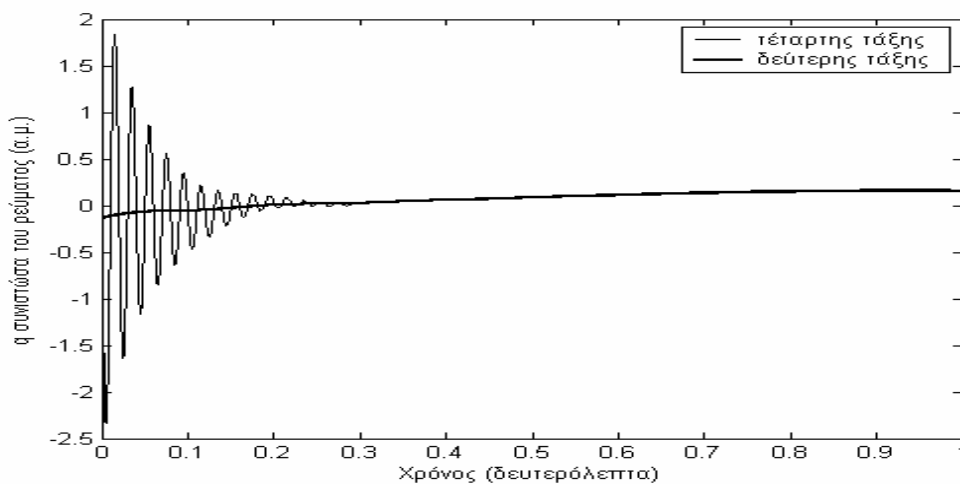
Σχήμα 5.4 q συνιστώσα του ρεύματος της γεννήτριας για βηματική πτώση του ανέμου από 11 m/sec σε 8 m/sec

Η παραπάνω ταύτιση των αποτελεσμάτων, είναι αποτέλεσμα των μεγάλων τιμών των αδρανειών της ανεμογεννήτριας. Οι τιμές αυτές είναι που κάνουν τη χρήση του μοντέλου δεύτερης τάξης να ενδείκνυται για την προσομοίωση της ανεμογεννήτριας σε καταστάσεις που δεν υπάρχουν διαταραχές ηλεκτρικής φύσης.

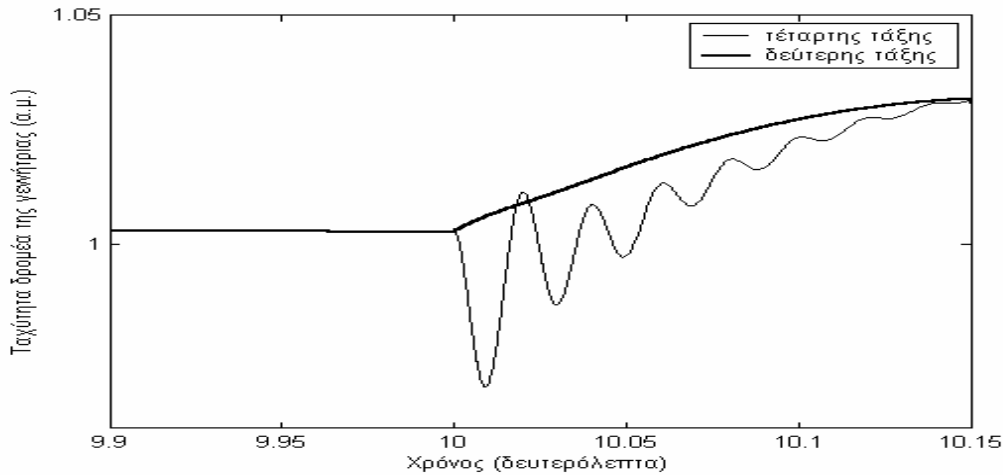
Από την άλλη μεριά, η συμπεριφορά του μεταβατικού μοντέλου παρουσιάζει σημαντικές διαφορές από αυτή του πλήρους τόσο κατά τη ζεύξη της ανεμογεννήτριας, όσο και κατά τη διάρκεια τριφασικού βραχυκυκλώματος στα άκρα της (ηλεκτρικές διαταραχές). Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί από τα σχήματα 2.9, 2.10, 2.11 και 2.12 του κεφαλαίου 2, αλλά αποτυπώνεται άριστα και από τα τρία παρακάτω σχήματα :



Σχήμα 5.3 d συνιστώσα του ρεύματος της γεννήτριας κατά τη ζεύξη της



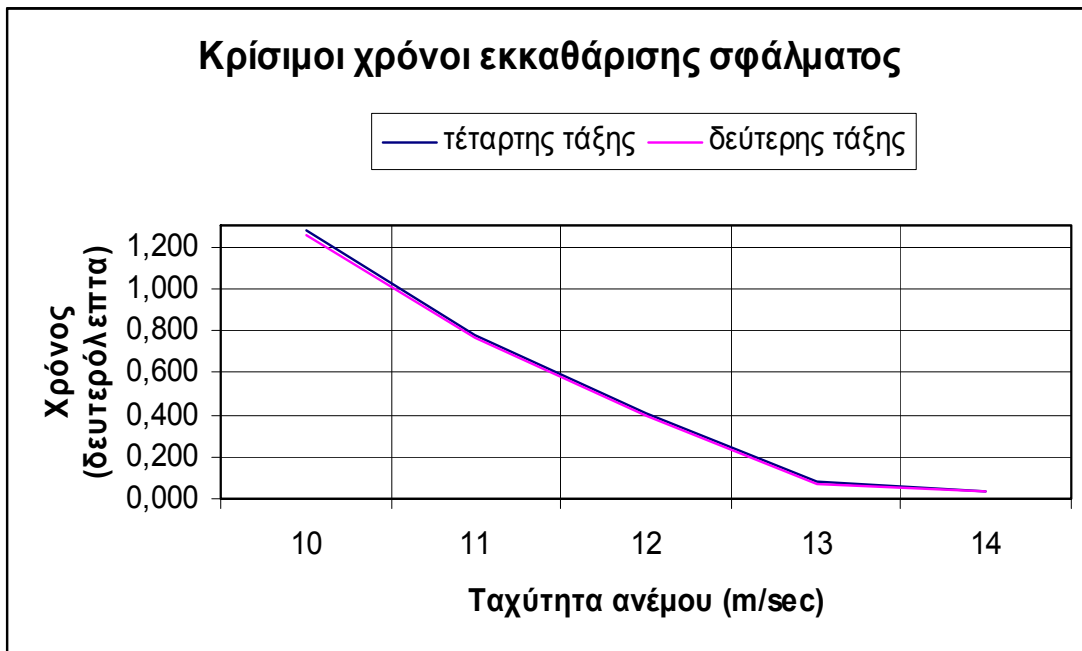
Σχήμα 5.4 q συνιστώσα του ρεύματος της γεννήτριας κατά τη ζεύξη της



Σχήμα 5.5 Ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας (α.μ.) κατά τη διάρκεια συμμετρικού τριφασικού βραχυκυκλώματος στους ακροδέκτες της για τυχαία κρονοσειρά ανέμου

Εκτός της έλλειψης των ηλεκτρικών ταλαντώσεων της βασικής κυκλικής συχνότητας, παρατηρούμε και μεγάλες διαφορές στις τιμές κορυφής (peak values) που υπολογίζονται από τα δύο μοντέλα.

Βασικής σημασίας είναι οι μελέτες δυναμικής ευστάθειας. Όταν χρησιμοποιείται το μεταβατικό μοντέλο (δεύτερης τάξης), οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης του σφάλματος είναι μικρότεροι από αυτούς που υπολογίζονται από το πλήρες μοντέλο. Χαρακτηριστικό είναι το κάτωθι γράφημα:



Σχήμα 5.6 Κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης τριφασικού σφάλματος σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι ναι μεν το μοντέλο δεύτερης τάξης υπολογίζει μικρότερους κρίσιμους χρόνους εκκαθάρισης του σφάλματος, αλλά οι χρόνοι αυτοί είναι πολύ κοντά στους πραγματικούς όσο η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει. Χαρακτηριστικά είναι τα σφάλματα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

<i>Ταχύτητα ανέμου (m/sec)</i>	<i>Υπολογιζόμενο σφάλμα (sec)</i>
10	0.018
11	0.013
12	0.011
13	0.008
14	0.004

Πίνακας 5.1 Υπολογιζόμενα σφάλματα στους κρίσιμους χρόνους εκκαθάρισης του σφάλματος

Συνεπώς, όταν γίνεται μία μελέτη δυναμικής ευστάθειας που περιέχει ανεμογεννήτριες και χρησιμοποιείται το μεταβατικό μοντέλο (δεύτερης τάξης), εάν ο άνεμος είναι χαμηλός τα αποτελέσματα είναι πιο απαισιόδοξα όσον αφορά τους κρίσιμους χρόνους εκκαθάρισης και της τάσης στο ζυγό που συνδέονται οι ανεμογεννήτριες, πράγμα που λειτουργεί θετικά όσον αφορά την ασφάλεια του δικτύου, ενώ εάν ο άνεμος είναι γενικότερα υψηλός τότε βρισκόμαστε πολύ κοντά στην πραγματικότητα.

Τα ίδια περίπου συμπεράσματα ισχύουν και για τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την αντιμετώπιση των ασυμμετριών. Βασική διαφορά είναι ότι τώρα οι ταλαντώσεις που παρατηρούνται με το πλήρες μοντέλο έχουν κυκλική συχνότητα διπλάσια της βασικής. Οι μέγιστες τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο δεύτερης τάξης είναι αρκετά κοντά σε αυτές που προκύπτουν από το πλήρες μοντέλο. Έτσι, εάν μας είναι απαραίτητη μόνο η γνώση της τιμής κορυφής του ρεύματος της θετικής ή της αρνητικής ακολουθίας και όχι η πλήρης κυματομορφή του ρεύματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το απλουστευμένο μοντέλο της δεύτερης τάξης. Ιδιαίτερα δε όταν η προς μελέτη ασυμμετρία είναι μικρή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το μοντέλο ακολουθιών μόνιμης κατάστασης.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, τα βασικά συμπεράσματα για τα μοντέλα των ανεμογεννητριών είναι τα εξής. Για τη συμμετρική κατάσταση λειτουργίας, ενδείκνυται η χρησιμοποίηση του μοντέλου της δεύτερης τάξης σε μεταβολές μηχανικής φύσης. Όταν πρόκειται όμως για μελέτες μηχανικών καταπονήσεων στο δρομέα της γεννήτριας, είτε στους διακόπτες που διαθέτει η γεννήτρια, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται το πλήρες μοντέλο. Επιτακτική είναι επίσης η χρήση του μοντέλου τέταρτης τάξης, όταν μελετάται η τήξη των ασφαλειών της γεννήτριας. Τέλος, μπορούμε να πούμε ότι το μεταβατικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μελέτες προστασίας των δικτύων διανομής όπου οι ηλεκτρονόμοι λειτουργούν λίγους κύκλους μετά, ιδιαίτερα δε όταν το προς μελέτη δίκτυο είναι ισχυρό χωρίς μεγάλη διείσδυση ανεμογεννητριών.

Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την αντιμετώπιση ασυμμετριών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μικρές ασυμμετρίες και όταν δεν είναι απαραίτητη η γνώση της πλήρους κυματομορφής του ρεύματος. Ιδιαίτερα δε ενδείκνυται η χρησιμοποίησή τους, όταν το μέγεθος των ανεμογεννητριών είναι πολύ μικρότερο από τις σύγχρονες μηχανές του θεωρούμενου δικτύου.

Παρατηρούμε δηλαδή, ότι η ταχύτητα των υπολογισμών των διαφόρων μεγεθών μπορεί να είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση των μειωμένων μοντέλων, αλλά οι απλοποιήσεις που εισάγουν λειτουργούν εις βάρος της ακρίβειάς τους. Η χρησιμοποίησή τους πρέπει να γίνεται κατά περίπτωση και να εξαρτάται από την ακρίβεια που ζητείται στον υπολογισμό των διαφόρων μεγεθών.

Για το μοντέλο της φωτοβολταϊκής γεννήτριας σε λειτουργία μέγιστης ισχύος, μπορούμε να συνοψίσουμε τα συμπεράσματα ως εξής. Η μεταβολή της ισχύος εξόδου της γεννήτριας, οφείλεται κυρίως στη μεταβολή της τάσης της V_{max} , σε σχέση με την ακτινοβολία. Αξίζει να τονιστεί ότι σε όλα τα γραφήματα του κεφαλαίου 4, η θερμοκρασία (και όλα τα ποσοστά της) μετριέται σε βαθμούς Kelvin. Εάν η θερμοκρασία μετρηθεί σε °C, τότε η μεταβολή της τάσης V_{max} , κυμαίνεται σε ένα πολύ περιορισμένο όριο.

Η ένταση του ρεύματος της φωτοβολταϊκής γεννήτριας I_{max} είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία. Ιδιαίτερα δε όταν μιλάμε για αλλαγές της θερμοκρασίας μετρούμενες σε °C, το εύρος της αλλαγής της έντασης του ρεύματος κυμαίνεται σε όρια της τάξης των mA.

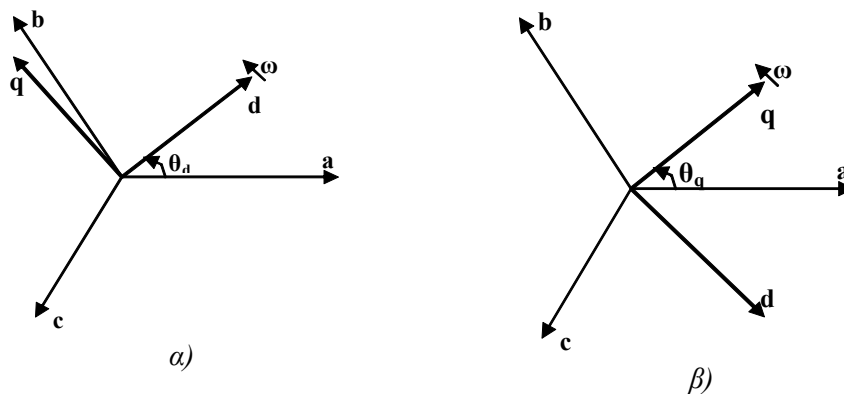
Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, μπορούμε να πούμε ότι όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος, έχει τη συμπεριφορά μίας εξαρτημένης πηγής ρεύματος, η ένταση της οποίας είναι συνάρτηση της ακτινοβολίας και μάλιστα γραμμική. Όταν μιλάμε για διασυνδεδεμένη λειτουργία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, η συνεισφορά της θερμοκρασίας (σε °C) μπορεί ακόμη και να αγνοηθεί σε ορισμένες περιπτώσεις χωρίς να εισάγονται σημαντικά σφάλματα.

Παράρτημα 1

Στο παράρτημα αυτό, περιγράφονται οι μετασχηματισμοί σε στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς και η χρησιμότητά τους, ενώ στη συνέχεια περιγράφεται το ανά μονάδα σύστημα για τις abc και $dq0$ ποσότητες.

Π1.1. Στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς

Η δυναμική συμπεριφορά των ασύγχρονων μηχανών περιγράφεται από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων εξαρτώμενων από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα η οποία μεταβάλλεται συνεχώς με το χρόνο π.χ. οι αλληλεπαγωγές μεταβάλλονται με τη σχετική θέση των τυλιγμάτων η οποία μεταβάλλεται με τον χρόνο. Πολύ συχνά είναι χρήσιμο να γίνεται αλλαγή μεταβλητών για τη μείωση της πολυπλοκότητας αυτών των διαφορικών εξισώσεων (επίτευξη σταθερών αλληλεπαγωγών με τον χρόνο). Ένας τέτοιος μετασχηματισμός ανάγει τις μεταβλητές της μηχανής σε ένα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Η χρήση αυτών των μετασχηματισμών ενδείκνυται κατά την προσομοίωση-ανάλυση συστημάτων ή π.χ. όταν προσομοιώνονται συστήματα έλεγχου, που γενικά αποτελούν πολύπλοκες διαδικασίες. Στα σχήματα Π1.1 α), β) δίνονται οι συμβάσεις γεννήτριας και κινητήρα για ένα $dq0$ μετασχηματισμό.



Σχήμα Π1.1 α) Σύμβαση γεννήτριας β) Σύμβαση κινητήρα

Η μέθοδος της αλλαγής μεταβλητών χρησιμοποιείται κυρίως στην ανάλυση των ac μηχανών για την εξάλειψη των χρονικά μεταβαλλόμενων επαγωγών, ωστόσο χρησιμοποιείται επίσης και στην ανάλυση άλλων στοιχείων σταθερών παραμέτρων ενός συστήματος ισχύος. Όλοι οι γνωστοί μετασχηματισμοί εμπεριέχονται στον μετασχηματισμό του αυθαίρετου πλαισίου αναφοράς. Για τις μεταβλητές των ασύγχρονων μηχανών χρησιμοποιείται συνήθως ο

μετασχηματισμός στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς ενώ για τις σύγχρονες μηχανές είναι σκόπιμο να γίνεται αναγωγή σε πλαίσιο αναφοράς προσαρμοσμένο στον δρομέα

Η μέθοδος της αλλαγής των 3-φασικών μεταβλητών στο αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς με σύμβαση γεννήτριας, μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\mathbf{X}_{dq0} = \mathbf{T}_{abc}^{dq0} \mathbf{X}_{abc} \quad (\text{Π1.1})$$

όπου :

$$\mathbf{X}_{dq0}^T = [X_d \quad X_q \quad X_0]$$

διάνυσμα μεταβλητών στο αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς

$$\mathbf{X}_{abc}^T = [X_a \quad X_b \quad X_c]$$

διάνυσμα μεταβλητών στο τριφασικό σύστημα

$$\mathbf{T}_{abc}^{dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \text{πίνακας μετασχηματισμού}$$

$$\theta = \int_0^t \omega(t)dt + \theta(0)$$

γωνία του αυθαίρετου πλαισίου αναφοράς με την φάση a

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός περιγράφεται από τον επόμενο πίνακα μετασχηματισμού:

$$\mathbf{T}_{abc}^{dq0^{-1}} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Π1.2})$$

Το διάνυσμα \mathbf{X} μπορεί να περιέχει τάσεις, ρεύματα, πεπλεγμένες ροές κ.τ.λ. Το πλαίσιο αναφοράς μπορεί να στρέφεται με οποιαδήποτε σταθερή ή μεταβλητή γωνιακή ταχύτητα ή μπορεί απλά να είναι ακίνητο. Η αυθαιρεσία του μετασχηματισμού προκύπτει από το γεγονός ότι η γωνιακή ταχύτητα του πλαισίου αναφοράς είναι απροσδιόριστη και μπορεί να επιλεγεί έτσι, ώστε το

προκύπτουν σύστημα εξισώσεων να είναι το δυνατόν απλούστερο και βολικότερο στην εφαρμογή του.

Παρότι η συμπεριφορά μιας συμμετρικής ασύγχρονης μηχανής μπορεί να περιγραφεί από οποιοδήποτε πλαίσιο αναφοράς, τρία από αυτά είναι τα συνηθέστερα. Συγκεκριμένα, αυτά είναι το σταθερό πλαίσιο αναφοράς, το πλαίσιο αναφοράς του δρομέα και το σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς. Γενικά οι συνθήκες λειτουργίας καθορίζουν ποιο πλαίσιο αναφοράς είναι το καταλληλότερο. Αν, για παράδειγμα, οι τάσεις του στάτη είναι ασύμμετρες ενώ οι τάσεις που εφαρμόζονται στο δρομέα είναι συμμετρικές ή μηδενικές, τότε θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το σταθερό πλαίσιο αναφοράς. Γενικά, το σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς χρησιμοποιείται για την ανάλυση συμμετρικών συνθηκών και της μεταβατικής και δυναμικής ευστάθειας μεγάλων συστημάτων ισχύος, με ενσωματωμένα τα δυναμικά χαρακτηριστικά των ασύγχρονων κινητήρων/γεννητριών.

Οποιοσδήποτε μετασχηματισμός θα πρέπει να ικανοποιεί το αναλλοίωτο της μεταφερόμενης ισχύος, δηλαδή η συνολική ισχύς εκφρασμένη σε $dq0$ μεταβλητές πρέπει να ισούται με τη συνολική ισχύ όπως υπολογίζεται από τις abc μεταβλητές, Η συνολική στιγμιαία ισχύς μπορεί να εκφραστεί μέσω των abc μεταβλητών ως εξής:

$$\mathbf{P}_{abc} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (\text{Π1.3})$$

και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (Π1.1) προκύπτει επίσης για την ισχύ:

$$\mathbf{P}_{qd0} = \mathbf{P}_{abc} = \frac{3}{2} (v_q i_q + v_d i_d + 2v_0 i_0) \quad (\text{Π1.4})$$

Ο συντελεστής $3/2$ που προκύπτει στην εξίσωση (Π1.4) οφείλεται στην επιλογή της σταθεράς που χρησιμοποιήθηκε κατά το μετασχηματισμό. Παρά το γεγονός ότι οι κυματομορφές των $dq0$ τάσεων, ρευμάτων, πεπλεγμένων ροών κ.λ.λ. εξαρτώνται από τη γωνιακή ταχύτητα του πλαισίου αναφοράς, η ισχύς είναι ανεξάρτητη του πλαισίου αναφοράς.

Π1.2. Ανά μονάδα σύστημα (p.u. system)

1) *abc - dq0 μεταβλητές*

Σε πολλές εφαρμογές είναι χρήσιμο οι παράμετροι και οι μεταβλητές της μηχανής να εκφράζονται σε ανά μονάδα τιμές. Επιλέγονται αρχικά η βάση ισχύος και η βάση τάσεως και οι υπόλοιπες παράμετροι και μεταβλητές

κανονικοποιούνται χρησιμοποιώντας αυτά τα βασικά μεγέθη. Η *RMS* τιμή της ονομαστικής φασικής ή πολικής τάσης επιλέγεται γενικά ως βάση της τάσης για τις *abc* μεταβλητές, ενώ η μέγιστη τιμή της επιλέγεται ως βάση τάσεως για τις μεταβλητές *dq0*. Εάν π.χ. $V_{B(abc)}$ είναι η *RMS* τιμή της φασικής τάσης και αποτελεί την βασική τάση για τις *abc* ποσότητες, για τη βασική τάση των *dq0* μεταβλητών θα ισχύει $V_{B(dq0)} = \sqrt{2} V_{B(abc)}$. Η βάση ισχύος δίνεται από τις επόμενες εξισώσεις:

$$S_B = 3V_{B(abc)} \cdot I_{B(abc)} \quad (\text{Π1.5})$$

$$S_B = \frac{3}{2} V_{B(dq0)} \cdot I_{B(dq0)} \quad (\text{Π1.6})$$

Η τιμή βάσης της ροπής της γεννήτριας ορίζεται ως ακολούθως:

$$T_B = \frac{S_B}{(2/P)\omega_b} \quad (\text{Π1.7})$$

ω_b	<i>η βασική συχνότητα της μηχανής.</i>
P	<i>ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας</i>

Αφού επιλεγούν η βασική τάση και ισχύς, η βασική τιμή του ρεύματος μπορεί να προκύψει χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες εξισώσεις. Η τιμή βάσης της αντίστασης δίνεται από τους επόμενους τύπους:

$$Z_B = \frac{V_{B(abc)}}{I_{B(abc)}} = \frac{3V_{B(abc)}^2}{S_B} \quad (\text{Π1.8})$$

$$Z_B = \frac{V_{B(dq0)}}{I_{B(dq0)}} = \left(\frac{3}{2}\right) \frac{V_{B(dq0)}^2}{S_B} \quad (\text{Π1.9})$$

2) **Ανά μονάδα σύστημα μηχανικού μέρους**

Στις παρακάτω σχέσεις ορίζονται οι τιμές βάσης της αδράνειας, του συντελεστή δυσκαμψίας και του συντελεστή απόσβεσης.

$$J_B = \frac{S_B}{0.5\omega_B^2} \quad \text{η τιμή βάσης της αδράνειας} \quad (\text{Π1.10})$$

$$C_B = \frac{T_B}{\omega_B} \quad \text{η τιμή βάσης του συντελεστή δυσκαμψίας} \quad (\text{Π1.11})$$

$$D_B = \frac{T_B}{\omega_B} \quad \text{η τιμή βάσης του συντελεστή απόσβεσης} \quad (\text{Π1.12})$$

Η αναγωγή στα βασικά μεγέθη της πλευράς χαμηλών στροφών γίνεται χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\frac{n^1}{n^2} = \frac{\omega_B^1}{\omega_B^2} = \frac{T_B^2}{T_B^1} = \sqrt{\frac{J_B^2}{J_B^1}} = \sqrt{\frac{C_B^2}{C_B^1}} = \sqrt{\frac{D_B^2}{D_B^1}} \quad (\text{Π1.13})$$

Οι εκθέτες ¹ και ² αναφέρονται στις πλευρές χαμηλών και υψηλών στροφών, αντίστοιχα.

Παράρτημα 2

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται πίνακες με τα υπάρχοντα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη χώρα μας (εκτός των αιολικών που παρουσιάστηκαν στην εισαγωγή), καθώς και τα περιθώρια ανάπτυξης αυτών.

ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΙΔΙΟΚΤΗΤΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΓΚ/ΝΗ ΙΣΧΥΣ (ΚWp)
ΚΥΘΝΟΣ	ΔΕΗ	100
ΑΡΚΟΙ	ΔΕΗ	37,5
ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΑ	ΔΕΗ	25
ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΑ	ΟΤΕ	20
ΓΑΥΔΟΣ	ΔΕΗ	20
ΑΓ. ΟΡΟΣ	Ι.Μ. ΣΙΜΩΝΟΣ ΠΕΤΡΑΣ	45
ΣΙΦΝΟΣ	ΔΕΗ	60
ΜΥΤΙΛΗΝΗ	ΔΕΗ	8
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	ΗΛΠΡΑ	6.5
ΠΑΡΟΣ	ΧΑΡΜΗ Α.Ε HOTEL	10
ΣΥΝΟΛΟ		332

Πίνακας Π2.1 Φωτοβολταϊκά (Πηγή : ΚΑΠΕ 2002)

ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΙΔΙΟΚΤΗΤΗΣ	ΕΓΚ/ΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)
ΑΓΓΙΣΤΡΟ, ΣΕΡΡΕΣ	ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΑΓΓΙΣΤΡΟΥ	0,6
ΒΕΡΜΙΟ ΙΙ	ΒΑΡΒΑΡΕΣΟΣ Α.Ε.	0,625
ΒΕΡΜΙΟ ΙV	ΤΕΧΤΙΛΕ Α.Ε.	0,5
ΧΡΥΣΟΥΠΟΛΗ, ΚΑΒΑΛΑ	ΔΗΜΟΣ ΞΑΝΘΗΣ	0,94
ΓΟΡΓΟΠΟΤΑΜΟΣ, ΦΘΟΙΩΤΙΔΑ	ΚΟΥΛΑΞΙΖΕΛΗ ΣΟΦΙΑ	0,155
ΣΕΡΡΕΣ	ΔΕΗ	0,7
ΑΓΙΑ, ΚΡΗΤΗ	ΔΕΗ	0,3
ΑΛΜΥΡΟΣ, ΒΟΛΟΣ	ΔΕΗ	0,3
ΛΟΥΤΡΑΚΙ ΑΡΙΔΑΙΑΣ, ΠΕΛΛΑ	ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΟΡΤΖΑΝΗΣ & ΣΙΑ	0,63

	Ο.Ε.	
ΒΟΡΕΙΝΟ ΑΛΜΩΠΙΑΣ, ΠΕΛΛΑ	ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ Α.Ε.	0,56
ΣΑΡΑΚΗΝΟΣ, ΜΑΓΝΗΣΙΑ	ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΜΕΙΖΟΝΟΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΒΟΛΟΥ	0,75
ΖΛΑΤΙΝΟ, ΠΕΛΛΑ	ΜΕΘΟΔΙΟΣ ΚΑΙ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Ο.Ε.	0,22
ΒΕΓΟΡΙΤΙΔΑ, ΠΕΛΛΑ	ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ Α.Ε.	0,15
ΒΕΓΟΡΙΤΙΔΑ, ΠΕΛΛΑ	ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ Α.Ε.	0,06
ΜΟΥΖΑΚΙΟ, ΚΑΡΔΙΤΣΑ	ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ Α.Ε.	0,6
ΚΑΤΣΑΝΟΧΩΡΙΑ, ΙΩΑΝΝΙΝΑ	ΚΟΙΝ/ΞΙΑ ΚΑΤΣΑΡΗΣ - ΚΡΙΚΩΝΗΣ	0,15
ΓΚΟΥΡΑ, ΙΩΑΝΝΙΝΑ	ΗΠΕΙΡΩΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Ε.	0,7
ΒΕΓΟΡΙΤΙΔΑ, ΠΕΛΛΑ	ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ Α.Ε.	0,5
ΑΡΙΔΑΙΑ, ΠΕΛΛΑ	ΑΡΑΜΠΑΤΖΗΣ	0,83
ΒΟΡΙΝΟ ΑΡΙΔΑΙΑΣ	ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ Α.Ε.	0,56
ΠΛΑΤΑΝΑΚΙ, ΗΛΕΙΑ	VASSERKRAFT S.A.	1,3
ΠΛΑΤΑΝΑΚΙ, ΗΛΕΙΑ	ΤΗΛΕΜΑΧΟΣ ΦΩΤΕΙΝΟΣ	1,3
ΓΚΟΥΡΑ, ΙΩΑΝΝΙΝΑ	ΛΑΚΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Ε.	0,99
ΣΥΝΟΛΟ		13,42

Πίνακας Π2.2 Μίνι υδροηλεκτρικά, μικρότερα του 1MW (Πηγή : ΚΑΠΕ 2002)

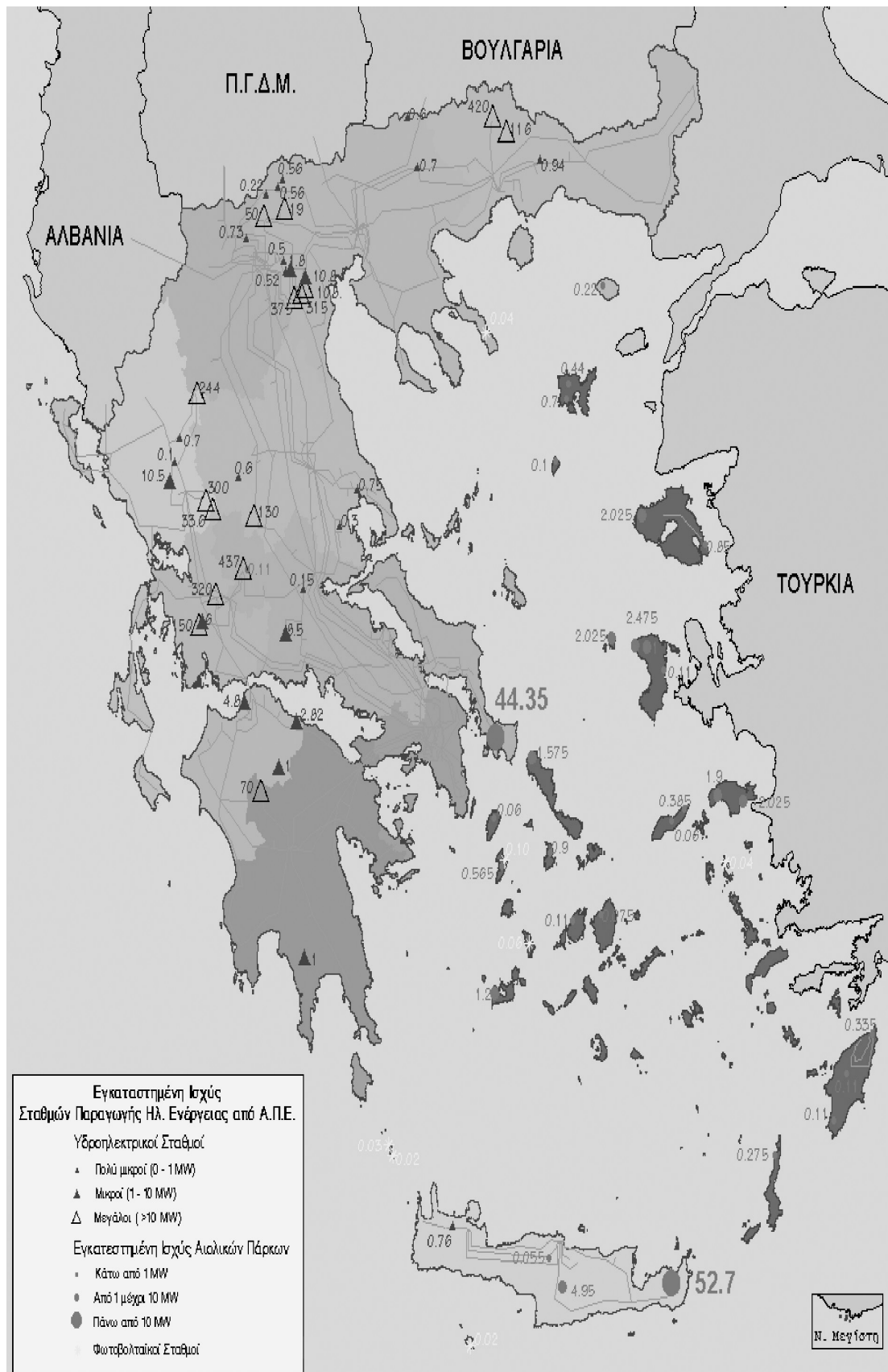
ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΙΔΙΟΚΤΗΤΗΣ	ΕΓΚ/ΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)
ΒΕΡΜΙΟ Ι (ΒΕΡΟΙΑ)	ΔΕΗ	1,8
ΓΚΙΩΝΑ, ΦΩΚΙΔΑ	ΔΕΗ	8,5
ΠΑΤΡΑ, ΓΛΑΥΚΟΣ	ΔΕΗ	4,8
ΣΤΡΑΤΟΣ ΙΙ, ΑΙΤ/ΝΙΑ	ΔΕΗ	6

ΤΣΙΒΛΟΣ, ΑΚΡΑΤΑ ΑΧΑΙΑ	ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΣΙΒΛΟΥ	2,82
ΑΓΙΑ ΜΑΡΙΝΑ, ΛΑΚΩΝΙΑ	ΥΔΡΟΒΑΤ Α.Ε.Β.Ε. ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	1
ΚΛΕΙΤΟΡΙΑ, ΑΧΑΙΑ	ΥΔΡΟΕΝΕΓΕΙΑΚΗ Α.Ε.	1
ΣΥΝΟΛΟ		25,9

Πίνακας Π2.3 Μικρά υδροηλεκτρικά, 1-10MW (Πηγή : ΚΑΠΕ 2002)

ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΙΔΙΟΚΤΗΤΗΣ	ΕΓΚ/ΝΗ ΙΣΧΥΣ (kW)
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ Ο.Τ.Α. ΜΕΙΖΟΝΟΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	240
ΗΡΑΚΛΕΙΟ, ΚΡΗΤΗ	ΔΕΥΑ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	193
ΧΑΝΙΑ, ΚΡΗΤΗ	ΔΕΥΑ ΧΑΝΙΩΝ	166
ΨΥΤΑΛΛΕΙΑ, ΑΤΤΙΚΗ	ΕΥΔΑΠ	7400
ΣΥΝΟΛΟ		8000

Πίνακας Π2.4 Βιοαέριο (Πηγή : ΚΑΠΕ 2000)



Σχήμα Π2.1 Χάρτης εγκατεστημένων ΑΠΕ του ελληνικού δικτύου (Πηγή : ΡΑΕ 2001)

ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ		Αιολικά	Μικρά Υδρικά	Γεωθερ μεία	Βιομάζα	Φ/Β	ΣΥΝΟΛΟ
ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ	ΙΣΧΥΣ (ΜW)	339,15	2,75	0	9,5	0	351,4
	ΓΩΗΘΟΣ	24	2	0	1	0	27
ΑΤΤΙΚΗΣ	ΙΣΧΥΣ (ΜW)	139,6	0,87	0	35,38	0	175,85
	ΓΩΗΘΟΣ	11	2	0	4	0	17
ΒΟΡΕΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ	ΙΣΧΥΣ (ΜW)	23,98	0	8	0	0,01	31,99
	ΓΩΗΘΟΣ	22	0	1	0	1	24
ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ	ΙΣΧΥΣ (ΜW)	141,2	64,14	0	0,9	0	206,24
	ΓΩΗΘΟΣ	6	32	0	1	0	39
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ	ΙΣΧΥΣ (ΜW)	0	29,04	0	0,37	0	29,41
	ΓΩΗΘΟΣ	0	14	0	1	0	15
ΗΠΕΙΡΟΥ	ΙΣΧΥΣ (ΜW)	87	109,24	0	16,09	0	212,33
	ΓΩΗΘΟΣ	3	32	0	2	0	37
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ	ΙΣΧΥΣ (ΜW)	90,95	40,45	0	2,07	0	133,47
	ΓΩΗΘΟΣ	5	22	0	2	0	29
ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ	ΙΣΧΥΣ (ΜW)	72,2	33,7	0	12,38	0,6	118,88
	ΓΩΗΘΟΣ	5	32	0	3	2	42
ΚΡΗΤΗΣ	ΙΣΧΥΣ (ΜW)	126,7	0,65	0	5,42	0,89	133,66
	ΓΩΗΘΟΣ	23	1	0	1	8	33
ΝΗΣΙΩΝ ΙΟΝΙΟΥ	ΙΣΧΥΣ (ΜW)	51,3	0	0	5,42	0	56,72
	ΓΩΗΘΟΣ	3	0	0	2	0	5
ΝΟΤΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ	ΙΣΧΥΣ (ΜW)	172,5	0	0	0,5	0	173
	ΓΩΗΘΟΣ	42	0	0	1	0	43
ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ	ΙΣΧΥΣ (ΜW)	477,4	17,56	0	19,54	0,5	515
	ΓΩΗΘΟΣ	29	9	0	4	2	44
ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ	ΙΣΧΥΣ (ΜW)	1324,1	65,98	0	0	0	1390,08
	ΓΩΗΘΟΣ	90	32	0	0	0	122
ΣΥΝΟΛΟ	ΙΣΧΥΣ (ΜW)	3046,1	364,38	8	107,57	2	3528,03
	ΓΩΗΘΟΣ	263	178	1	22	13	477

Πίνακας Π2.5 Αδειοδοτήσεις ανά περιφέρεια για έργα ΑΠΕ (Πηγή : ΡΑΕ 2003)

Την τελευταία εξίσωση από το σύστημα εξισώσεων (Π3.6) τη γράφουμε πρώτη γιατί είναι η απλούστερη και τη μετονομάζουμε από V_{an} σε V_{a0} . Σε μητρική μορφή οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να γραφτούν ως:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \\ \dots \\ V_{a(n-1)} \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & a & a^2 & \dots & a^{n-1} \\ 1 & a^2 & a^4 & \dots & a^{2(n-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & a^{n-1} & a^{2(n-1)} & \dots & a^{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (\text{Π3.7})$$

$$W = CV$$

Ο πίνακας C είναι ένας πίνακας τελεστών ή αλλιώς είναι ένας μετασχηματισμός μέσω του οποίου ένα σύστημα φασικών διανυσμάτων V, αναλύεται σε ένα καινούριο σύστημα φασικών διανυσμάτων τα οποία αποτελούν τις συμμετρικές συνιστώσες W. Ο παραπάνω μετασχηματισμός είναι μοναδικός αν και μόνο αν ο πίνακας C είναι αντιστρέψιμος. Εάν ο πίνακας C είναι αντιστρέψιμος θα υπάρχει πίνακας A, τέτοιος ώστε να ισχύει:

$$C^{-1} = A \quad (\text{Π3.8})$$

Ο πίνακας C, θα είναι αντιστρέψιμος αν και μόνο αν η ορίζουσά του είναι διαφορετική από το μηδέν. Για τον υπολογισμό της ορίζουσας του πίνακα, είναι πολύ χρήσιμο να παρατηρηθεί ότι ο πίνακας C είναι μία ειδική περίπτωση του πίνακα Vandermonde P, όπου ο πίνακας P ορίζεται ως :

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 & \dots & \mu_n \\ \mu_1^2 & \mu_2^2 & \mu_3^2 & \dots & \mu_n^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_1^{n-1} & \mu_2^{n-1} & \mu_3^{n-1} & \dots & \mu_n^{n-1} \end{bmatrix} \quad (\text{Π3.9})$$

Η ορίζουσα του παραπάνω πίνακα P, δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$\det P = \prod_{i>j} (\mu_i - \mu_j) = (\mu_2 - \mu_1) \dots (\mu_n - \mu_1) (\mu_3 - \mu_2) \dots (\mu_n - \mu_{n-1}) \quad (\text{Π3.10})$$

Συνεπώς, ο πίνακας P είναι αντιστρέψιμος αν και μόνο αν οι τιμές μ_i είναι διακριτές μεταξύ τους. Στην περίπτωση του πίνακα C, ισχύει ότι :

$$\mu_i = e^{j \frac{2\pi(i-1)}{n}} \quad (\text{Π3.11})$$

δηλαδή όλες οι τιμές είναι διακριτές μεταξύ τους, αφού είναι μιγαδικές ποσότητες με το ίδιο μέτρο 1 αλλά με διαφορά γωνίας $2\pi/n$ μεταξύ τους. Άρα

ο μετασχηματισμός της σχέσης (Π3.7) είναι πράγματι μοναδικός, ο αντίστροφος πίνακας του C υπάρχει και μπορούμε να γράψουμε:

$$V = C^{-1}W = AV \quad (\text{Π3.12})$$

Ο πίνακας $A=C^{-1}$ δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$A = C^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & a^{n-1} & a^{n-2} & \dots & a \\ 1 & a^{n-2} & a^{n-4} & \dots & a^2 \\ \dots & & & & \\ 1 & a & a^2 & \dots & a^{n-1} \end{bmatrix} \quad (\text{Π3.8})$$

Η θεωρία των συστημάτων συνιστωσών (συστήματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας) σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), αποτελεί μία εφαρμογή της παραπάνω θεωρίας όπου η τιμή του n γίνεται ίση με το τρία.

Παράρτημα 4

Στο παράρτημα αυτό δίνονται οι τιμές των μεγεθών για την εξεταζόμενη φωτοβολταϊκή γεννήτρια, όταν αυτή λειτουργεί στη μέγιστη ισχύ της, για τιμές θερμοκρασίας 90,80 και 70% της ονομαστικής (μετρούμενη σε βαθμούς Φαρενάιτ)

❖ Θερμοκρασία 90% της ονομαστικής

Ακτινοβολία (%)	Ένταση ρεύματος I _{max} (A)	Τάση V _{max} (V)	Μέγιστη Ισχύς P _{max} (W)
1	0.0929	39.254	3.6467
2	0.19592	49.766	9.7503
3	0.30083	56.377	16.96
4	0.40833	60.992	24.905
5	0.51633	64.691	33.401
6	0.62563	67.673	42.338
7	0.73451	70.306	51.641
8	0.84499	72.493	61.256
9	0.95526	74.475	71.143
10	1.0661	76.233	81.269
11	1.1772	77.821	91.609
12	1.2884	79.277	102.14
13	1.4005	80.582	112.85
14	1.5124	81.807	123.72
15	1.624	82.971	134.74
16	1.7361	84.039	145.9
17	1.8482	85.047	157.18
18	1.9607	85.981	168.58
19	2.0731	86.873	180.09
20	2.1858	87.706	191.71
21	2.2983	88.51	203.42
22	2.4111	89.266	215.23
23	2.5242	89.976	227.12
24	2.6369	90.673	239.1
25	2.7498	91.332	251.15
26	2.863	91.956	263.27
27	2.9756	92.577	275.47
28	3.0893	93.139	287.73
29	3.2023	93.702	300.06
30	3.3155	94.239	312.45
31	3.4289	94.752	324.89

32	3.5419	95.256	337.39
33	3.6557	95.725	349.94
34	3.7686	96.203	362.55
35	3.8821	96.648	375.2
36	3.9952	97.09	387.9
37	4.1091	97.5	400.64
38	4.2225	97.91	413.43
39	4.3361	98.304	426.25
40	4.4491	98.698	439.12
41	4.5629	99.065	452.02
42	4.6761	99.433	464.96
43	4.7894	99.789	477.93
44	4.9028	100.13	490.94
45	5.0164	100.47	503.98
46	5.13	100.79	517.05
47	5.2437	101.1	530.15
48	5.3567	101.42	543.28
49	5.4707	101.71	556.44
50	5.5838	102.01	569.62
51	5.6979	102.29	582.83
52	5.8112	102.57	596.06
53	5.9246	102.85	609.32
54	6.0381	103.11	622.6
55	6.1516	103.37	635.9
56	6.2652	103.62	649.22
57	6.3789	103.87	662.57
58	6.4916	104.12	675.93
59	6.6054	104.36	689.31
60	6.7192	104.58	702.71
61	6.8326	104.81	716.13
62	6.9461	105.03	729.56
63	7.0591	105.26	743.01
64	7.1726	105.47	756.48
65	7.2862	105.67	769.96
66	7.3993	105.88	783.45
67	7.513	106.08	796.96
68	7.6261	106.28	810.48
69	7.7393	106.47	824.02
70	7.8526	106.66	837.56
71	7.9658	106.85	851.12
72	8.0791	107.03	864.69
73	8.1924	107.2	878.27
74	8.3058	107.38	891.86
75	8.4186	107.55	905.46
76	8.532	107.72	919.07
77	8.6448	107.89	932.68
78	8.7583	108.05	946.31

79	8.8712	108.21	959.94
80	8.984	108.37	973.59
81	9.0976	108.52	987.24
82	9.2105	108.67	1000.9
83	9.3235	108.82	1014.6
84	9.4364	108.96	1028.2
85	9.5494	109.11	1041.9
86	9.6624	109.25	1055.6
87	9.7754	109.38	1069.3
88	9.8876	109.53	1083
89	10.001	109.66	1096.6
90	10.114	109.79	1110.3
91	10.227	109.91	1124
92	10.339	110.04	1137.8
93	10.452	110.17	1151.5
94	10.564	110.29	1165.2
95	10.678	110.41	1178.9
96	10.79	110.53	1192.6
97	10.902	110.65	1206.3
98	11.015	110.76	1220.1
99	11.128	110.87	1233.8
100	11.24	110.99	1247.5

❖ Θερμοκρασία 80% της ονομαστικής

Ακτινοβολία (%)	Ένταση ρεύματος I_{max} (A)	Τάση V_{max} (V)	Μέγιστη Ισχύς P_{max} (W)
1	0.0929	34.883	3.2406
2	0.19592	44.217	8.6631
3	0.30083	50.083	15.066
4	0.40833	54.174	22.121
5	0.51633	57.451	29.663
6	0.62483	60.169	37.595
7	0.73451	62.421	45.849
8	0.84446	64.395	54.378
9	0.95526	66.104	63.147
10	1.0654	67.699	72.125
11	1.1764	69.1	81.292
12	1.2876	70.384	90.628
13	1.3996	71.532	100.12
14	1.5105	72.655	109.75
15	1.623	73.635	119.51
16	1.735	74.573	129.39
17	1.847	75.459	139.37
18	1.9589	76.301	149.47
19	2.0712	77.084	159.65

20	2.1838	77.813	169.93
21	2.2962	78.518	180.29
22	2.4089	79.179	190.73
23	2.5212	79.824	201.25
24	2.6337	80.432	211.83
25	2.7465	81.007	222.49
26	2.8596	81.552	233.2
27	2.972	82.092	243.98
28	3.0856	82.581	254.81
29	3.1984	83.071	265.7
30	3.3115	83.537	276.63
31	3.4242	83.995	287.62
32	3.5371	84.433	298.65
33	3.6502	84.852	309.73
34	3.7635	85.253	320.85
35	3.8763	85.65	332.01
36	3.9893	86.032	343.2
37	4.1023	86.399	354.44
38	4.2156	86.752	365.71
39	4.3289	87.091	377.01
40	4.4418	87.431	388.35
41	4.5554	87.746	399.72
42	4.6684	88.063	411.11
43	4.7816	88.369	422.54
44	4.8948	88.664	433.99
45	5.0074	88.963	445.47
46	5.1208	89.238	456.97
47	5.2336	89.519	468.5
48	5.3472	89.777	480.05
49	5.4601	90.04	491.62
50	5.573	90.295	503.22
51	5.686	90.543	514.83
52	5.7991	90.783	526.46
53	5.9123	91.016	538.11
54	6.0255	91.242	549.78
55	6.1388	91.462	561.47
56	6.2512	91.689	573.17
57	6.3646	91.897	584.89
58	6.4772	92.112	596.62
59	6.5907	92.307	608.37
60	6.7033	92.511	620.13
61	6.8164	92.703	631.9
62	6.9296	92.89	643.69
63	7.0423	93.078	655.48
64	7.155	93.262	667.29
65	7.2684	93.434	679.11
66	7.3812	93.609	690.94

67	7.4935	93.786	702.78
68	7.6063	93.952	714.63
69	7.7192	94.113	726.48
70	7.8322	94.271	738.35
71	7.9446	94.432	750.22
72	8.0576	94.582	762.1
73	8.17	94.736	773.99
74	8.2824	94.886	785.88
75	8.3949	95.032	797.78
76	8.508	95.168	809.69
77	8.6205	95.308	821.6
78	8.733	95.444	833.52
79	8.8449	95.585	845.44
80	8.9574	95.715	857.36
81	9.07	95.842	869.29
82	9.1826	95.967	881.22
83	9.2945	96.096	893.16
84	9.4071	96.215	905.1
85	9.519	96.338	917.04
86	9.6316	96.452	928.98
87	9.7435	96.57	940.93
88	9.8562	96.678	952.88
89	9.9681	96.791	964.83
90	10.08	96.902	976.78
91	10.192	97.011	988.73
92	10.304	97.117	1000.7
93	10.417	97.214	1012.6
94	10.529	97.315	1024.6
95	10.64	97.422	1036.5
96	10.752	97.52	1048.5
97	10.864	97.615	1060.4
98	10.975	97.709	1072.4
99	11.087	97.8	1084.3
100	11.199	97.89	1096.3

❖ Θερμοκρασία 70% της ονομαστικής

Ακτινοβολία (%)	Ένταση ρεύματος I _{max} (A)	Τάση V _{max} (V)	Μέγιστη Ισχύς P _{max} (W)
1	0.0929	30.512	2.8346
2	0.19538	38.775	7.5758
3	0.30083	43.789	13.173
4	0.40833	47.356	19.337
5	0.51633	50.212	25.926
6	0.62483	52.577	32.852
7	0.73451	54.536	40.057

8	0.84392	56.286	47.501
9	0.95466	57.77	55.151
10	1.0647	59.154	62.982
11	1.1757	60.368	70.975
12	1.2868	61.479	79.113
13	1.3979	62.511	87.383
14	1.5096	63.443	95.773
15	1.6215	64.308	104.27
16	1.7329	65.137	112.87
17	1.8448	65.9	121.57
18	1.9571	66.605	130.35
19	2.0686	67.298	139.21
20	2.1812	67.924	148.15
21	2.2934	68.529	157.16
22	2.4052	69.116	166.24
23	2.5181	69.647	175.38
24	2.6305	70.167	184.58
25	2.7423	70.68	193.83
26	2.8552	71.144	203.13
27	2.9675	71.605	212.49
28	3.08	72.043	221.89
29	3.1926	72.459	231.33
30	3.3055	72.855	240.82
31	3.4186	73.232	250.35
32	3.5313	73.603	259.91
33	3.6436	73.969	269.51
34	3.7567	74.308	279.15
35	3.8693	74.643	288.82
36	3.9821	74.965	298.52
37	4.0943	75.285	308.24
38	4.2074	75.582	318
39	4.3199	75.878	327.78
40	4.4324	76.164	337.59
41	4.5451	76.438	347.42
42	4.6579	76.703	357.28
43	4.7708	76.958	367.16
44	4.8831	77.216	377.05
45	4.9962	77.454	386.97
46	5.1086	77.695	396.91
47	5.2211	77.928	406.86
48	5.3336	78.153	416.84
49	5.4462	78.371	426.82
50	5.5589	78.582	436.83
51	5.6716	78.787	446.85
52	5.7836	78.996	456.88
53	5.8964	79.188	466.93
54	6.0094	79.374	476.99

55	6.1214	79.566	487.06
56	6.2335	79.752	497.14
57	6.3466	79.922	507.23
58	6.4588	80.098	517.34
59	6.5711	80.269	527.45
60	6.6833	80.435	537.57
61	6.7956	80.596	547.7
62	6.9079	80.753	557.84
63	7.0203	80.906	567.99
64	7.1327	81.055	578.14
65	7.2446	81.205	588.3
66	7.357	81.346	598.46
67	7.469	81.489	608.63
68	7.5809	81.628	618.81
69	7.6929	81.763	628.99
70	7.8048	81.895	639.18
71	7.9168	82.024	649.37
72	8.0288	82.149	659.56
73	8.1409	82.271	669.76
74	8.2523	82.396	679.96
75	8.3644	82.512	690.16
76	8.4758	82.631	700.36
77	8.5879	82.741	710.57
78	8.6993	82.855	720.78
79	8.8108	82.965	730.99
80	8.9229	83.067	741.2
81	9.0343	83.173	751.41
82	9.1458	83.276	761.62
83	9.2572	83.376	771.83
84	9.3687	83.474	782.05
85	9.4801	83.57	792.26
86	9.5916	83.664	802.47
87	9.7023	83.761	812.68
88	9.8138	83.85	822.89
89	9.9252	83.937	833.09
90	10.036	84.028	843.3
91	10.147	84.111	853.5
92	10.258	84.198	863.7
93	10.369	84.277	873.9
94	10.48	84.36	884.1
95	10.591	84.441	894.29
96	10.702	84.515	904.49
97	10.813	84.592	914.67
98	10.923	84.668	924.86
99	11.034	84.743	935.04
100	11.144	84.815	945.22

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Μ. Π. Παπαδόπουλος, “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές”, Αθήνα, 1997
- [2]. P.C. Krause, “Analysis of Electric Machinery”, *McGraw-Hill*, 1986
- [3]. Chee-Mun Ong, “Dynamic Simulation of Electric Machinery using Matlab/Simulink”, *Prentice Hall PTR*, 1998
- [4]. P. Kundur, “Power System Stability and Control”, *McGraw-Hill*, 1994
- [5]. Σ. Α. Παπαθανασίου, “Συμβολή στην Ανάλυση Ανεμογεννητριών Μεταβλητών Στροφών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για την επιλογή του Ηλεκτρικού Σχήματος”, Διδακτορική Διατριβή, Φεβρουάριος 1997, Αθήνα
- [6]. Φ. Δ. Κανέλλος, “Συμβολή στην Προσομοίωση και Αναγνώριση Ανεμογεννητριών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για τη Δημιουργία Μειωμένης Τάξης Ισοδυνάμων Μοντέλων”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Οκτώβριος 2003
- [7]. V. Akhmatov, “Analysis of Dynamic Behavior of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power”, PhD Thesis, Technical University of Denmark, April 2003
- [8]. J.G. Slootweg, “Wind Power – Modeling and Impact on Power System Dynamics”, PhD Thesis, Delft, October 2003
- [9]. Β. Κ. Παπαδιάς, “Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας – Τόμος 2 Ασύμμετρες και Μεταβατικές Καταστάσεις”, Αθήνα 1993
- [10]. Β. Κ. Παπαδιάς, “Ταχεία μεταβατικά φαινόμενα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας”, *Παπασωτηρίου*, Αθήνα, 1997
- [11]. Π. Ν. Παρασκευόπουλος, “Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο”, *EMPI*, Αθήνα 1991
- [12]. M. R. Patel, “Wind and Solar Power Systems”, *CRC Press*, 1999
- [13]. P. M. Anderson, “Analysis of Faulted Power Systems”, *IEEE Press*, Power Systems Engineering Series, 1995
- [14]. P.M. Anderson, A.A. Fouad, “Power System Control and Stability”, *IEEE Press*, New York, 1993
- [15]. Slootweg, J. G. and Kling, W. L. 'Modelling and Analysing Impacts of Wind Power on Transient Stability of Power Systems', *Wind Engineering*. Vol. 26, no. 1, 2002, pp. 3-20
- [16]. National Renewable Laboratory (<http://www.nrel.gov/docs>)
- [17]. Danish Wind Industry Association (<http://www.windpower.org/en/core.htm>)
- [18]. Leithead W.E, Connor B., “Control of Variable Speed Wind Turbines with Induction Generator”, *Proc. of Control*, Warwic, March 1994
- [19]. T. Petru and T. Thiringer, “Modelling of Wind Turbines for Power System Studies”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.17, No.4, November 2002
- [20]. M. Papadopoulos, P. Malatestas, N. Hatziargyriou, “Simulation and analysis of small and medium size power systems containing wind

Βιβλιογραφία

- turbines”, *IEEE Trans on Power Systems*, vol. 6, pp. 1453 -1458 Nov. 1991
- [21]. “Power Quality Improvements of Wind Farms”, Fredericia, June 1998
- [22]. L.L. Freris, “Wind Energy Conversion Systems”, *Prentice Hall*, 1990
- [23]. S. Heier, “Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems”, *John Willey & Sons*, 1998
- [24]. Ertem S., Baghzouz, Y., “Simulation of induction machinery for power system studies”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 4, issue 1, pages 88-94, March 1989
- [25]. Papathanassiou S.A., Papadopoulos, M.P., “Dynamic behaviour of variable speed wind turbines under stochastic wind”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.: 14, issue: 4 , pages: 1617 - 1623, Dec. 1999
- [26]. W. Leonard, “Control of Electrical Drives”, Springer-Verlag, 1985
- [27]. F.D. Kanellos, N.D. Hatzargyriou, “Dynamic Analysis of three Voltage Source Power Converters supplying Squirrel Cage Induction Machines”, *International Conference on Power Systems Transients – IPST*, New Orleans, 2003
- [28]. European Wind Energy Conference, “Proceeding of the International Conference held at Dublin Castle”, Ireland, October 1997
- [29]. “Wind Energy for the Next Millenium”, Proceedings of the European Wind Energy Conference, Nice, France, 1-5 March 1999
- [30]. Α. Μπακόπουλος, Ι. Χρυσοβέργης, “Εισαγωγή στην Αριθμητική Ανάλυση”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1999
- [31]. Κ. Καγκράκης, “Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1987
- [32]. Cook G., Billman L. and Adcock R., “Photovoltaic Fundamental”, DOE/Solar Energy Research Institute Report No.DE910115001, February 1995
- [33]. Α. Μαχιάς, “Μαθήματα Ανανεώσιμων Μορφών Ενέργειας”, Εκδόσεις Συμεών
- [34]. Η. Η. Hwang et al. “Control of wind turbine generators connected to power systems”, Academic Press, Inc., 1978
- [35]. L. Freris, “Wind Enery Conversion Systems”, Prentice Hall, 1980