



Τ.Ε.Ι. Κρήτης
Τμήμα Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος



Επισκόπηση Συστημάτων Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Αιολικής Ενέργειας

ΓΕΩΡΓΙΑ ΓΕΝΕΤΖΑΚΗ
ΕΛΙΣΑΒΕΤ ΧΟΥΡΔΑΚΗ

Επιβλέπων Καθηγητής
Εμμανουήλ Καραπιδάκης

Χανιά
Ιούλιος 2007

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	3
1.1 Εισαγωγή	3
1.2 Κύρια ηλεκτρικά στοιχεία ανεμογεννητριών	3
1.3 Ενσωμάτωση στο δίκτυο	7
1.4 Παράμετροι ποιότητας της ισχύος	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ	10
2.1 Ηλεκτρικές Μηχανές Ανεμογεννητριών	10
2.2 Εισαγωγή στη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών	15
2.2.1 Γωνιακή ταχύτητα	15
2.2.2 Παραγωγή μαγνητικού πεδίου	15
2.2.3 Νόμος του Faraday	16
2.2.4 Δύναμη Laplace	17
2.2.5 Μετασχηματιστές	17
2.2.6 Βασικές Αρχές Μηχανών Εναλλασσόμενου Ρεύματος	18
2.3 Επαγωγικές γεννήτριες	19
2.3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο	19
2.3.3 Ανεμογεννήτριες με ασύγχρονες γεννήτριες	27
2.4 Σύγχρονες γεννήτριες	30
2.4.1 Θεωρητικό υπόβαθρο	30
2.4.2 Συμπεριφορά αιφνίδιας μεταβολής	33
2.4.3 Γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ	
ΟΔΗΓΗΣΗΣ (DIRECT DRIVE)	38
3.1 Κιβώτια ταχυτήτων	38
3.2 Λειτουργικά χαρακτηριστικά	40

3.2.1	Πυκνότητα ροπής	41
3.2.2	Κόστος / ροπή	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΤΑΘΕΡΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ		
ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ		43
4.1	Εισαγωγή	43
4.2	Άμεση σύζευξη - Σταθερά συστήματα ταχύτητας	44
4.3	Σύζευξη μέσω των μετατροπέων ισχύος	46
4.3.1	Εισαγωγή	46
4.3.1	Αναστροφείς	47
4.3.2	Αρχή λειτουργίας ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας	48
4.3.3	Διαμόρφωση της μεταβλητής ταχύτητας ανεμογεννήτριας	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ		57
5.1	Εισαγωγή	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		60

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες ολόκληρη η ανθρωπότητα δοκιμάζεται από τις συνέπειες των σαρωτικών αλλαγών που παρατηρούνται στο κλιματολογικό τοπίο του πλανήτη. Ταυτόχρονα, οι κυβερνήσεις του κόσμου εκδηλώνουν όλο και πιο έντονα το ενδιαφέρον τους για τη μείωση της εξάρτησής τους από τις συμβατικές πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είναι το πετρέλαιο. Τα γεγονότα αυτά καθιστούν πολύ πιο επιτακτική την εξεύρεση εναλλακτικών πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες θα είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Μία αξιόπιστη απάντηση στην αναζήτηση αυτή φαίνεται να είναι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), οι οποίες το τελευταίο διάστημα κερδίζουν συνεχώς έδαφος. Σχετικά με τη χρησιμοποίηση των ΑΠΕ ανακύπτει το ερώτημα του πόσο καλά θα μπορέσουν να αντικαταστήσουν τις συμβατικές πηγές ενέργειας, καθώς και του πόσο αποδοτική οικονομικά είναι η χρησιμοποίηση των ΑΠΕ.

Η παρούσα πτυχιακή ασχολείται με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών. Κύριος σκοπός είναι η περιγραφή της αρχής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την αιολική ενέργεια. Παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία που συνθέτουν τις ανεμογεννήτριες και παίρνουν μέρος στη μετατροπή της ενέργειας, με έμφαση στα ηλεκτρικά στοιχεία. Συζητείται η τρέχουσα τεχνολογική κατάσταση, ακολουθούμενη από το αντίστοιχο θεωρητικό υπόβαθρο. Γίνεται επίσης μια εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος (power electronics), έτσι ώστε να ερμηνευτούν οι μέθοδοι ολοκλήρωσης των δικτύων. Όλα τα παραπάνω θέματα σχετίζονται με την ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες, η οποία και θα εξετασθεί σε επόμενο κεφάλαιο της πτυχιακής. Τέλος, παρουσιάζονται αρκετά παραδείγματα από μετρήσεις και πρακτικές λειτουργίες ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων της ελληνικής επικράτειας.

ABSTRACT

During the last three decades, the humanity is being tested from the dramatic changes that took place in the planet environment. As a result, the governments of the world show an increasing interest on being independent from the traditional power sources, such as petrol. These facts make much more imperative the need for establishing alternative sources of power production, which should be environmental friendly. A reliable answer to this search seems to be the renewable energy sources (RES), which seem to be gaining ground recently. Regarding the use of RES, the question arises as to what extent they are able to replace the traditional power sources and how profitable would be their use.

This thesis deals with the electrical characteristics of wind turbines. The main target is to describe the principle of generating electrical energy from wind energy. The main components of the wind turbines that take part in this energy conversion are presented, with the emphasis given to the electrical ones. The current technological status is discussed followed by the theoretical background. An introduction to the power electronics is also done in order to explain the grid integration methods. All the above issues are related to the quality of power produced by wind turbines. A separate discussion is done for the estimation of power quality parameters of wind turbines. Finally several examples from on-site measurements are given focusing on the experience gained from the operation of wind turbines either in CRES wind farm or private ones.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

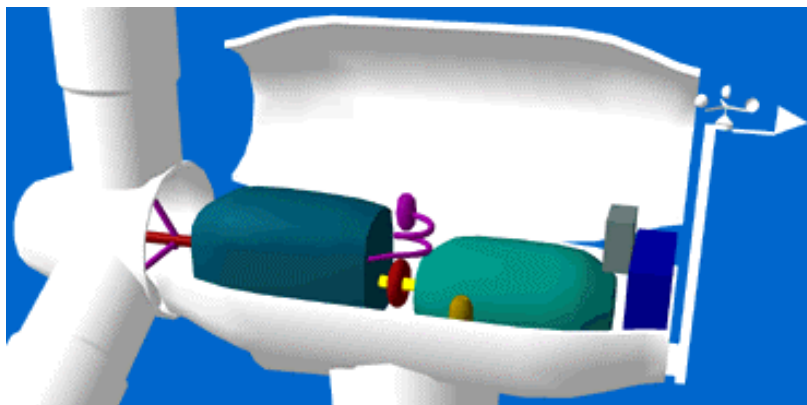
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα πτυχιακή ασχολείται με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών. Κύριος σκοπός είναι η περιγραφή της αρχής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την αιολική ενέργεια. Παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία που συνθέτουν τις ανεμογεννήτριες και παίρνουν μέρος στη μετατροπή της ενέργειας, με έμφαση στα ηλεκτρικά στοιχεία. Συζητείται η τρέχουσα τεχνολογική κατάσταση, ακολουθούμενη από το αντίστοιχο θεωρητικό υπόβαθρο. Γίνεται επίσης μια εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος (power electronics), έτσι ώστε να ερμηνευτούν οι μέθοδοι ολοκλήρωσης των δικτύων. Όλα τα παραπάνω θέματα σχετίζονται με την ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες, η οποία και θα εξετασθεί σε επόμενο κεφάλαιο της πτυχιακής. Τέλος, παρουσιάζονται αρκετά παραδείγματα από μετρήσεις και πρακτικές λειτουργίες ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων της ελληνικής επικράτειας.

1.2 ΚΥΡΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Πριν αναφερθούμε στο ηλεκτρικό τμήμα των ανεμογεννητριών, είναι απαραίτητο να μνημονεύσουμε εν συντομία τα κύρια μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα, τα οποία παίρνουν μέρος στη διαδικασία μετατροπής της αιολικής ενέργειας.



Εικόνα 1.1: Κύρια μέρη ενός οριζοντίου άξονα μιας ανεμογεννήτριας

Τα κύρια μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα, όπως απεικονίζονται στο σχήμα 1.1, είναι τα ακόλουθα:

- **Ανεμοκινητήρας (Α/Κ)**

Συνήθως έχει τρία πτερύγια, με τις βάσεις των πτερυγίων τοποθετημένες πάνω σε μία κατάλληλη κατασκευή φλάντζας (κολάρου), η οποία ονομάζεται κόμβος (ή κομβικό σημείο, hub). Η συνεχής γνώση της ταχύτητας του Α/Κ είναι πολύ σημαντική για

τον επακόλουθο έλεγχο της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, όπως θα περιγραφεί λεπτομερώς παρακάτω. Άλλα σημαντικά ποσοτικά στοιχεία για την εκτίμηση του αιολικού φορτίου της ανεμογεννήτριας μπορούν να μετρηθούν με τη χρήση οργάνου μέτρησης της έντασης της ταχύτητας του ανέμου τοποθετημένου στα περιστρεφόμενα πτερύγια. Οι μετρήσεις μεταφέρονται στο μη περιστρεφόμενο μέρος με τη χρήση συστημάτων τηλεμετρίας.



Εικόνα 1.2: Εγκατάσταση ανεμοκινητήρα A/K

- **Άτρακτος (Nacelle)**

Ο θάλαμος είναι το τμήμα στην κορυφή του πύργου, όπου βρίσκονται τοποθετημένα τα περισσότερα από τα μη περιστρεφόμενα μέρη των ανεμογεννητριών. Περιέχει όλον τον απαραίτητο εξοπλισμό για τη μετατροπή του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Γενικά, η άτρακτος της ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει το κιβώτιο ταχυτήτων (gearbox) για τη μετατροπή της ταχύτητας από χαμηλή (0-50rpm) σε υψηλή (1500 rpm για μια τετραπολική ηλεκτρογεννήτρια), την ηλεκτρογεννήτρια, το σύστημα φρένων και το σύστημα στροφής, καθώς και το κατάλληλα σχεδιασμένο μηχανικό σύστημα. Η γεννήτρια παράγει τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο μεταφέρεται με τη βοήθεια κατάλληλης καλωδίωσης. Η συνηθέστερη περίπτωση είναι η χρήση καλωδίων περισσότερων του ενός ανά φάση, έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται μικρότερων διαστάσεων καλωδιώσεις. Η τάση στα τερματικά της γεννήτριας είναι μικρότερη από 1 kV (πλευρά χαμηλής τάσης). Το σύστημα φρένου μπορεί να είναι αεροδυναμικό, μηχανικό (καλίμπρες, calipers) ή ηλεκτρικό, αναλόγως με τον τύπο της ανεμογεννήτριας. Ένα ανεμόμετρο και ένας ανεμοδείκτης τοποθετούνται εξωτερικά της άτρακτου για τη μέτρηση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου. Τέλος, στην άτρακτο περιλαμβάνεται το σύστημα ψύξης. Μια εικόνα της άτρακτου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εγκατάστασης της πάνω στον πύργο (πυλώνα) παρουσιάζονται στην ακόλουθη Εικόνα 1.3.



Εικόνα 1.3: Εγκατάσταση ατράκτων στο αιολικό πάρκο CRES

- **Πύργος**

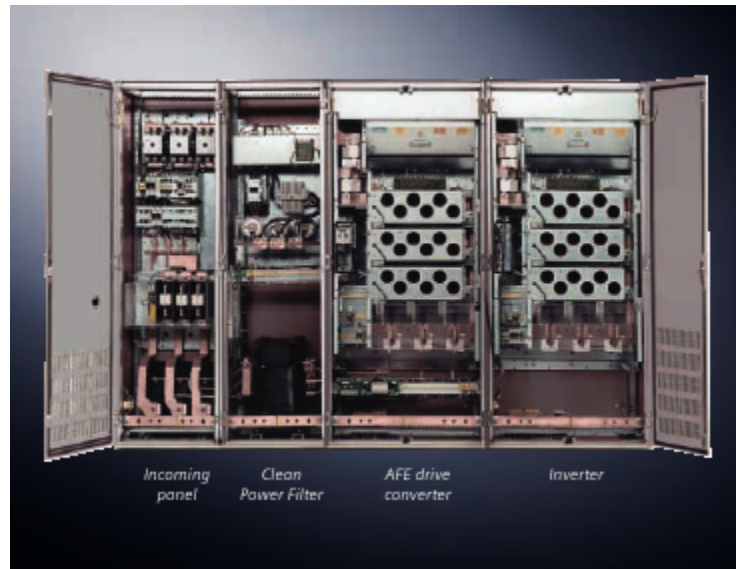
Το ύψος του πύργου στις περισσότερες ανεμογεννήτριες ποικίλει από τα 40 μέτρα (για ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 500 KW) μέχρι τα 85 μέτρα (για ανεμογεννήτριες 2 MW). Το κύριο υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πύργου είναι το ατσάλι και η διάμετρος της βάσης είναι μεγαλύτερη από 3 μέτρα. Στη διάταξη κάποιων ανεμογεννητριών η γεννήτρια είναι τοποθετημένη στη βάση του πύργου, αλλά αυτό δεν είναι σύνηθες, λόγω πρακτικών προβλημάτων, όπως είναι δονήσεις από συντονισμό κ.λ.π. Όσον αφορά στο μετατροπέα της ισχύος και στους απαραίτητους πυκνωτές, γενικώς τοποθετούνται στον πίνακα ελέγχου στη βάση του πύργου. Σε πρόσφατες διατάξεις ανεμογεννητριών, ο μετατροπέας της τάσης από χαμηλή σε υψηλή επίσης τοποθετείται στη βάση του πύργου, ώστε να μειωθούν οι απώλειες ισχύος από τη μεταφορά του ρεύματος AC χαμηλής τάσης σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Μια γενική άποψη της εγκατάστασης ενός πύργου μίας ανεμογεννήτριας παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.4.



Εικόνα 1.4: Εγκατάσταση πύργου

- **Σύστημα ελέγχου**

Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί όλες τις κρίσιμες παραμέτρους για την ομαλή λειτουργία των Α/Τ και δίνει τις ανάλογες εντολές στους μηχανισμούς ελέγχου. Στην επόμενη εικόνα 1.5 παρουσιάζεται μια γενική άποψη ενός πίνακα ελέγχου μιας ανεμογεννήτριας 500 KW. Τα στοιχεία που αποτελούν τον πίνακα ελέγχου θα συζητηθούν λεπτομερώς παρακάτω.



Εικόνα 1.5: Επισκόπηση του συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας 500 kW

- **Θεμελίωση**

Η διαδικασία θεμελίωσης τυπικών ανεμογεννητριών στο αιολικό πάρκο CRES στις εικόνες 1.6 και 1.7.



Εικόνα 1.6: Διαδικασία θεμελίωσης ανεμογεννητριών (στάδιο 1)



Εικόνα 1.7: Διαδικασία θεμελίωσης ανεμογεννητριών (στάδιο 2)

Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραπάνω πληροφορίες, μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τα βασικά στοιχεία που αποτελούν μια ανεμογεννήτρια, στα παρακάτω συστήματα:

- Το μηχανικό σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει τον ανεμοκινητήρα, το κιβώτιο ταχυτήτων και τη σειρά μηχανημάτων μηχανικής παραγωγής.
- Το ηλεκτρικό σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει την ηλεκτρογεννήτρια και τους μετατροπείς ισχύος.
- Το σύστημα ελέγχου που περιλαμβάνει τον απαραίτητο εξοπλισμό για τον έλεγχο της λειτουργίας και της ασφάλειας των ανεμογεννητριών.

Εάν συμπεριλάβουμε επίσης τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου, η παραγωγή ισχύος από τις ανεμογεννήτριες περιέχει συχνότητες σε ένα ευρύ φάσμα, οι οποίες επηρεάζονται από όλα αυτά τα μέρη. Για παράδειγμα, οι δονήσεις του άξονα χαμηλής ταχύτητας (low speed shaft) μπορεί να μεταφέρονται στο ρότορα της γεννήτριας, καταλήγοντας σε αρμονικές συχνότητες χαμηλής τιμής. Το ίδιο συμβαίνει και με την σκίαση των πύργων, όπως θα δούμε παρακάτω. Για το σωστό σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας, πρώτα πρέπει να κατανοηθεί και να σχεδιαστεί λεπτομερειακά η συμπεριφορά όλων αυτών των υποσυστημάτων. Η σωστή επιλογή γεννήτριας και παραμέτρων ελέγχου διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην αποτελεσματικότητα της ανεμογεννήτριας και στην ποιότητα της παραγόμενης ισχύος.

Οι κύριοι τύποι γεννητριών που χρησιμοποιούνται σήμερα στις ανεμογεννήτριες του εμπορίου είναι οι επαγωγικές (ασύγχρονες) και οι σύγχρονες. Οι γεννήτριες αυτές συνδέονται είτε απευθείας με το κυρίως δίκτυο, είτε μέσω ενός ηλεκτρικού μετατροπέα ισχύος για τον έλεγχο της τάσης και της συχνότητας.

1.3 ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

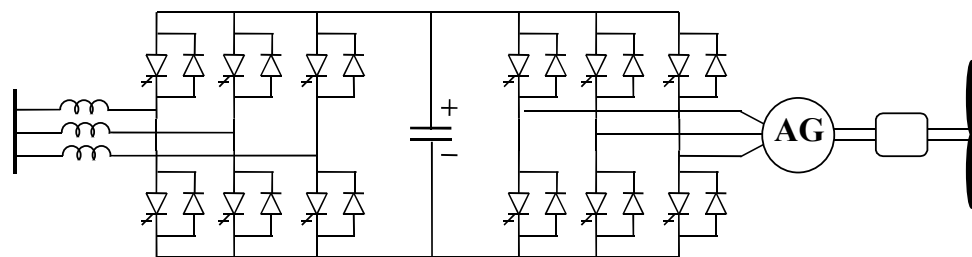
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια εισαγωγή στην ενσωμάτωση των ανεμογεννητριών στο ηλεκτρικό δίκτυο. Παρουσιάζονται δύο τρόποι σύζευξης. Η απευθείας σύζευξη και η σύζευξη μέσω μετατροπέα ισχύος.

- Απευθείας σύζευξη.

Στον πρώτο τρόπο είναι απαραίτητοι οι πυκνωτές για τον έλεγχο της αντιδρούσας ισχύος για τις επαγωγικές γεννήτριες. Η κατασκευή τέτοιων μηχανών είναι πολύ απλή. Η όλη καλωδίωση κατεβαίνει στον κύριο πίνακα στη βάση του πύργου. Στον πίνακα αυτόν βρίσκουμε τον κύριο διακόπτη της Α/Γ, τους πυκνωτές, καθώς και τον ελεγκτή των μηχανισμών κίνησης (ή κλίσης) ή στροφής. Τα καλώδια συνδέονται με την πλευρά χαμηλής τάσης του αντίστοιχου μετατροπέα, ο οποίος μπορεί να βρίσκεται εντός ή εκτός του πύργου. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της απευθείας σύζευξης είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής και η μικρότερη επίδραση αρμονικών.

- Έμμεση σύζευξη.

Ο δεύτερος τρόπος ενσωμάτωσης στο δίκτυο γίνεται μέσω ενός μετατροπέα ισχύος, όπως παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα 1.8.



Εικόνα 1.8: Μετατροπέας Ισχύος Ανεμογεννήτριας

Ο μετατροπέας ισχύος είναι ένας μετατροπέας AC/DC/AC με δύο όμοιους αντιστροφείς στην πλευρά του δικτύου και της γεννήτριας με ενδιάμεση χρήση φίλτρου (πυκνωτή). Το βασικό πλεονέκτημα της σύνθεσης αυτής είναι ότι η ταχύτητα και η τάση της γεννήτριας μπορούν να ελέγχονται, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη δυνατή δέσμευση ενέργειας. Επιπροσθέτως, ο συντελεστής ισχύος ($\cos\phi$) ελέγχεται με σκοπό την διατήρηση του πλεονεκτήματος της μονάδας (χωρίς κατανάλωση ή παραγωγή άεργου ισχύος). Ο μετατροπέας παρέχει ροή ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις (απαραίτητη για την εκκίνηση της Α/Γ και τον έλεγχο της άεργου ισχύος). Τα κύρια μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος και η πολυπλοκότητα.

Εκτός από τον τρόπο σύζευξης, η ενσωμάτωση των ανεμογεννητριών στο δίκτυο απαιτεί πρόσθετα στοιχεία, τα οποία πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό, όπως:

- Το δίκτυο διανομής: Γενικά δίκτυο τάσης Μέσης Τάσης (20 kV)
- Ο μετασχηματιστής (Χαμηλής / Μέσης Τάσης) για την ανύψωση της τάσης ως την τάση του δικτύου.
- Συσκευές προστασίας που εγκαθίστανται στην ανεμογεννήτρια, καθώς και στον κεντρικό διακόπτη του πάρκου και σε συγκεκριμένες αναχωρήσεις της γραμμής. Οι συσκευές αυτές προστατεύουν το πάρκο από μόνιμες ή περιοδικές βλάβες της γραμμής, πτώσεις τάσης, διακυμάνσεις της συχνότητας κ.λ.π.
- Κύκλωμα γείωσης για κάθε Α/Γ.
- Δωμάτιο κυρίου ελέγχου για την παρακολούθηση του αιολικού πάρκου.

Τέλος, θα πρέπει να γίνει μια πρώτη αναφορά στην επίδραση της λειτουργίας των ανεμογεννητριών στο δίκτυο. Οι επιδράσεις μπορούν να διακριθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Αργές διακυμάνσεις και «παίξιμο» της τάσης**

Προκαλούνται από τη φύση της ταχύτητας του ανέμου, η οποία παρουσιάζει διακυμάνσεις, την ένταση των αναταράξεων, τη σκίαση του πύργου, καθώς και τις ιδιοτιμές του μηχανικού συστήματος.

- **Αρμονικές τάσης και ρεύματος**

Εισαγωγή αρμονικών που προκαλούνται από τα ηλεκτρονικά ισχύος.

- **Περιστατικά αιφνίδιας μεταβολής της τάσης και του ρεύματος**

Εκκίνηση και σταμάτημα της ανεμογεννήτριας. Απρόβλεπτα γεγονότα, όπως ριπές ανέμου, βραχυκυκλώματα, κεραυνός κ.λ.π.

- **Ισορροπία άεργου ισχύος**

Η μεμονωμένη λειτουργία των ανεμογεννητριών με ασύγχρονες γεννήτριες και πυκνωτές μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα αυτοδιέγερσης που μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές υπερτάσεις και βλάβες. Η αντιστάθμιση της άεργου ισχύος πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη στο στάδιο του σχεδιασμού, ώστε να γίνουν οι αναλύσεις μεταβατικής κατάστασης.

1.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ο όρος «ποιότητα ισχύος» περιλαμβάνει όλων των ειδών τις διαταραχές που συμβαίνουν σε ένα σύστημα ισχύος κατά την κανονική λειτουργία του, καθώς και σε περιστατικά αιφνίδιων μεταβολών. Οι πιο σημαντικές από τις διαταραχές αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Διακυμάνσεις χαμηλής τάσης (ορίζοντα 10 min)
- Γρήγορες διακυμάνσεις τάσης (αιφνίδιες μεταβολές)
- Αρμονικά συστήματος
- Ασυμμετρίες τάσεις και ρεύματος
- Διακυμάνσεις συχνότητας (ιδιαίτερα σε αυτόνομα συστήματα)
- Αποκλίσεις ρεύματος και τάσεις κατά τη διάρκεια διαταραχών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

2.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

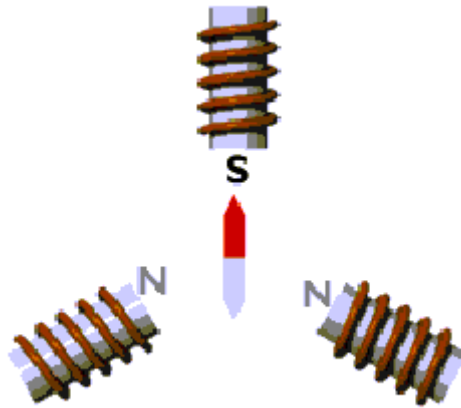
Η ηλεκτρική μηχανή της ανεμογεννήτριας μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ισχύ. Σε ανεμογεννήτριες πάνω από 150 kW, η τάση που παράγεται είναι συνήθως 690 V τριφασική εναλλασσόμενη (AC). Το ρεύμα στέλνεται στη συνέχεια μέσω ενός μετασχηματιστή (δίπλα στην ανεμογεννήτρια ή μέσα στον πύργο) για να αυξήσει την τάση στα επίπεδα της μέσης τάσης (συνήθως 20 kV), αναλόγως με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο.

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να σχεδιαστούν είτε με σύγχρονες, είτε με ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές και με απευθείας ή έμμεση σύνδεση με το δίκτυο. Απευθείας σύνδεση με το δίκτυο σημαίνει ότι η γεννήτρια συνδέεται απευθείας με το δίκτυο εναλλασσομένου ρεύματος (συνήθως τριφασικό). Ενώ, έμμεση σύνδεση σημαίνει ότι το ρεύμα από την ανεμογεννήτρια περνάει μέσα από μια σειρά ηλεκτρικών συσκευών, οι οποίες ρυθμίζουν το ρεύμα, έτσι ώστε να ταιριάζει με αυτό του δικτύου.

Ανεμογεννήτριες με σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές

Οι ανεμογεννήτριες, που συνήθως χρησιμοποιούν σύγχρονες μηχανές, χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνήτες στο ρότορα, οι οποίοι τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα από το ηλεκτρικό δίκτυο. Εφόσον το δίκτυο παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα, πρέπει να μετατρέψουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές, πριν διατρέξει το ελικοειδές πηνίο γύρω από τους ηλεκτρομαγνήτες στο ρότορα. Οι ηλεκτρομαγνήτες του ρότορα συνδέονται στον άξονα της γεννήτριας με τη χρήση ψηκτρών (brushes) και δακτυλιδιών επαφής των ψηκτρών.

Κάθε ηλεκτρομαγνήτης από τους τρεις φάσεις του στάτη της ηλεκτρικής μηχανής εναλλάσσεται ανάμεσα στην παραγωγή ενός Βόρειου πόλου και ενός Νότιου πόλου προς την πλευρά του κέντρου. Η μαγνητική ροή αντιστοιχεί ακριβώς στη ηλεκτρική ροή της τάσης κάθε φάσης. Όταν η τάση μίας φάσης είναι στο ανώτερο σημείο της, στις δύο άλλες φάσεις η τάση κατευθύνεται στην αντίθετη κατεύθυνση (μισή τιμή της τάσης). Εφόσον ο συγχρονισμός της τάσης στους τρεις πόλους είναι το 1/3 ενός κύκλου ξεχωριστά, το μαγνητικό πεδίο θα κάνει μία συνολική περιστροφή ανά κύκλο. Ο ρότορας θα ακολουθήσει ακριβώς το μαγνητικό πεδίο και θα κάνει μία περιστροφή ανά κύκλο. Συνεπώς, σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο συχνότητας 50 Hz, ο ρότορας πραγματοποιεί 50 περιστροφές ανά δευτερόλεπτο, δηλαδή $50 * 60 = 3000$ στροφές ανά λεπτό (rpm).



Εικόνα 2.1: Αρχή λειτουργίας σύγχρονης μηχανής

Στην προηγούμενη εικόνα 2.1 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας μιας σύγχρονης μηχανής με μόνιμο μαγνήτη. Η ηλεκτρική μηχανή ονομάζεται σύγχρονη, καθώς ο ρότορας περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα, η οποία είναι σύγχρονη με το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Αν ο μόνιμος μαγνήτης αντικατασταθεί από ένα πηνίο, το οποίο τροφοδοτείται με ρεύμα dc, τότε πρόκειται για μία κοινή σύγχρονη ηλεκτρική μηχανή. Η εγκατάσταση των τριών σταθερών ηλεκτρομαγνητών ονομάζεται στάτης της γεννήτριας, επειδή το τμήμα αυτό της μηχανής παραμένει σταθερό (δε μετακινείται). Ενώ, ο μαγνήτης (ή το πηνίο) στον άξονα της γεννήτριας ονομάζεται ρότορας, προφανώς επειδή περιστρέφεται.

Αναγκάζοντας το μαγνήτη να κινηθεί περιστροφικά (αντί να αφήσουμε το ρεύμα του δικτύου να τον κινήσει), επιτυγχάνουμε λειτουργία γεννήτριας, στέλνοντας εναλλασσόμενο ρεύμα πίσω στο δίκτυο. Όσο περισσότερη δύναμη (ροπή) εφαρμόζεται, τόσο μεγαλύτερη τάση επάγεται, ενώ η γεννήτρια θα συνεχίσει να λειτουργεί στην ίδια ταχύτητα, όπως της υπαγορεύει η συχνότητα του ηλεκτρικού πεδίου. Αποσυνδέοντας την ανεμογεννήτρια από το δίκτυο είναι δυνατή η δημιουργία ενός αυτόνομου και ανεξάρτητου τριφασικού ηλεκτρικού δικτύου. Όμως, η αποσύνδεση της ανεμογεννήτριας από ένα κεντρικό δίκτυο, προϋποθέτει την διατήρηση των στροφών της σε μια σταθερή ταχύτητα περιστροφής, έτσι ώστε να παράγετε εναλλασσόμενο ρεύμα με σταθερής συχνότητας. Συνεπώς, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια έμμεση σύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο, μέσω μετατροπέα.

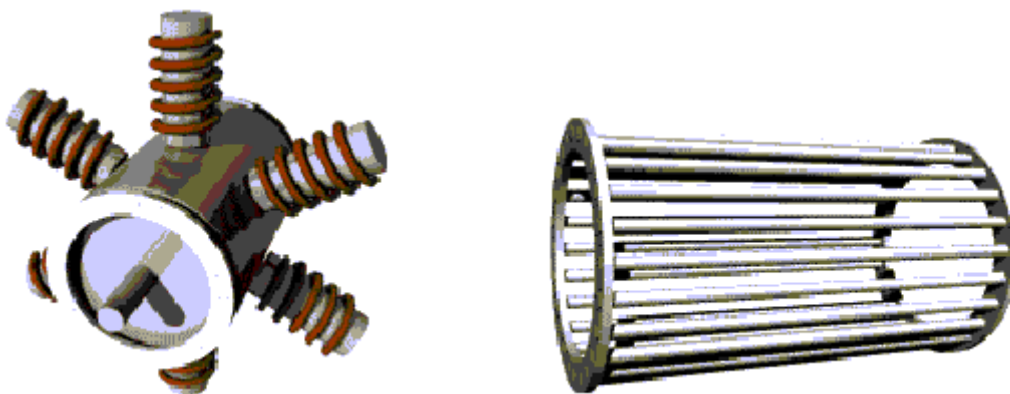
Ανεμογεννήτριες με ασύγχρονες γεννήτριες

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες στον κόσμο χρησιμοποιούν, για την παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος, ασύγχρονες γεννήτριες τριών φάσεων, οι οποίες ονομάζονται και επαγωγικές γεννήτριες. Ο τύπος αυτός της γεννήτριας χρησιμοποιείται ευρέως εκτός της βιομηχανίας των ανεμογεννητριών και των μικρών υδροηλεκτρικών μονάδων, αλλά ούτως ή άλλως υπάρχει πολλή εμπειρία σχετικά με τη χρήση του.

Ο συγκεκριμένος τύπος γεννήτριας σχεδιάστηκε αρχικά ως ηλεκτρική μηχανή κατανάλωσης ισχύος (κινητήρας). Σήμερα, το 1/3 της παγκόσμιας κατανάλωσης

ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για τη λειτουργία επαγωγικών μηχανών σε μηχανολογικό εξοπλισμό εργοστασίων, αντλίες, ανεμιστήρες, συμπιεστές, ανελκυστήρες και άλλες εφαρμογές, όπου απαιτείται μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ροπή. Ένας λόγος επιλογής αυτού του τύπου της γεννήτριας είναι η μεγάλη αξιοπιστία της και το σχετικά χαμηλό της κόστος.

Η ασύγχρονη γεννήτρια έχει επίσης μερικές μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες είναι χρήσιμες για τις ανεμογεννήτριες. Ο ρότορας αποτελείται από έναν αριθμό χάλκινων ή αλουμινένιων ράβδων, οι οποίοι συνδέονται ηλεκτρικά με αλουμινένιους ακραίους δακτυλίους (end rings). Ο ρότορας είναι τοποθετημένος στη μέση του στάτη, ο οποίος συνδέεται απευθείας με τις τρεις φάσεις του ηλεκτρικού δικτύου.



Εικόνα 2.2: Ασύγχρονη Γεννήτρια

Όταν το ρεύμα αρχίζει να ρέει, η μηχανή θα περιστρέφεται με ταχύτητα λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη. Αν κοιτάξουμε τις ράβδους του ρότορα από πάνω (εικόνα στα δεξιά), έχουμε ένα μαγνητικό πεδίο που κινείται ανάλογα με το ρότορα. Αυτό επάγει ένα πολύ ισχυρό ρεύμα στις ράβδους του ρότορα, οι οποίες προβάλλουν πολύ μικρή αντίσταση στο ρεύμα, αφού βραχυκυκλώνονται από τους ακραίους δακτυλίους (end rings). Τότε, ο ρότορας αναπτύσσει τους δικούς του μαγνητικούς πόλους, οι οποίοι με τη σειρά τους έλκονται από την ηλεκτρομαγνητική ισχύ του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη.

Αν η ταχύτητα του ρότορα ισούται με τη σύγχρονη ταχύτητα της γεννήτριας, π.χ. 1.500 περιστροφές ανά λεπτό, εφόσον το μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται ακριβώς με την ίδια ταχύτητα του ρότορα, δεν παρατηρούνται φαινόμενα επαγωγής στο ρότορα και δε θα αλληλεπιδράσει με το στάτη. Αν η ταχύτητα του ρότορα είναι πάνω από τα 1.500 rpm, ο ρότορας κινείται γρηγορότερα από το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη, που σημαίνει ότι για άλλη μια φορά ο στάτης επάγει ένα ισχυρό ρεύμα στο ρότορα.

Η ταχύτητα της ασύγχρονης γεννήτριας θα μεταβάλλεται με την ροπή που εφαρμόζεται σε αυτήν. Πρακτικά, η διαφορά στην ταχύτητα περιστροφής στο

μέγιστο της ισχύος και στο κενό φορτίο είναι πολύ μικρή, περίπου 1%. Αυτή η ποσοστιαία διαφορά της σύγχρονης ταχύτητας ονομάζεται ολίσθηση της γεννήτριας. Έτσι, μια τετραπολική γεννήτρια χωρίς φορτίο, θα λειτουργεί στις 1.500 rpm, αν είναι συνδεδεμένη με δίκτυο ρεύματος 50 Hz. Αν η γεννήτρια παράγει στη μέγιστη ισχύ της, θα λειτουργεί στις 1.515 rpm. Πολύ χρήσιμη μηχανική ιδιότητα αποτελεί το γεγονός ότι η γεννήτρια θα αυξήσει ή θα μειώσει ελαφρώς την ταχύτητά της, με την μεταβολή της ροπής. Αυτό σημαίνει ότι θα υπάρχει λιγότερη φθορά και καταπόνηση στο κιβώτιο ταχυτήτων (μικρότερη μέγιστη ροπή). Αυτός είναι ένας από τους πιο σημαντικούς λόγους για να χρησιμοποιηθεί μια ασύγχρονη γεννήτρια αντί μιας σύγχρονης σε μια ανεμογεννήτρια, η οποία συνδέεται απευθείας με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Πριν λειτουργήσει μια ασύγχρονη γεννήτρια χρειάζεται ροής ηλεκτρικού ρεύματος (από το δίκτυο) για να μαγνητιστεί ο στάτης. Σε ένα αυτόνομο και ανεξάρτητο ηλεκτρικό σύστημα, μια ασύγχρονη γεννήτρια είναι δυνατό να τεθεί σε λειτουργία με την βοήθεια πυκνωτών, οι οποίοι θα παρέχουν το απαραίτητο ρεύμα μαγνήτισης. Γενικότερα, γίνεται χρήση μπαταρίας, ηλεκτρονικών ισχύος ή μικρής γεννήτριας πετρελαίου για να εκκίνηση.

Οι παραγωγοί των ηλεκτρικών κινητήρων για πολλά χρόνια αντιμετώπιζαν το πρόβλημα ότι οι κινητήρες τους μπορούσαν να λειτουργήσουν σε συγκεκριμένες, σχεδόν αμετάβλητες ταχύτητες, οι οποίες καθορίζονται από τον αριθμό των πόλων της μηχανής. Η ολίσθηση του κινητήρα (ή της γεννήτριας) σε μια ασύγχρονη (επαγωγική) μηχανή είναι συνήθως πολύ μικρή για λόγους αποδοτικότητας, έτσι η ταχύτητα περιστροφής διαφοροποιείται γύρω στο 1% μεταξύ κενού φορτίου και πλήρες φορτίο. Η ολίσθηση πάντως είναι συνάρτηση της αντίστασης (μετρούμενης σε Ohm) στις στρόφες του ρότορα της γεννήτριας. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση, τόσο μεγαλύτερη είναι η ολίσθηση, οπότε ένας τρόπος να μεταβάλλουμε την ολίσθηση είναι να μεταβάλλουμε την αντίσταση στο ρότορα. Με τον τρόπο αυτόν μπορούμε να αυξήσουμε την ολίσθηση της γεννήτριας π.χ. κατά 10%. Στους κινητήρες αυτό συνήθως γίνεται με έναν ελικοειδή ρότορα (wound rotor), δηλαδή έναν ρότορα με περιελίξεις από χάλκινους αγωγούς, με σύνδεση κατά αστέρα. Εν συνεχεία, συνδέονται με εξωτερικές μεταβλητές επαγωγικές αντιδράσεις (πηνία), συν ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου για τη λειτουργία των αντιστάσεων. Η σύνδεση συνήθως γίνεται με ψήκτρες και δακτυλίους (slip rings), κάτι το οποίο αποτελεί ξεκάθαρο μειονέκτημα σε σχέση με τον σχεδιασμό βραχυκυκλωμένου κλωβού, καθώς εισάγει εξαρτήματα, τα οποία φθείρονται, και συνεπώς απαιτούν επιπλέον συντήρηση.

Μια ενδιαφέρουσα παραλλαγή της γεννήτριας επαγωγής μεταβλητής ολίσθησης (variable slip induction generator) αποφεύγει το πρόβλημα της εισαγωγής δακτυλίων, ψηκτρών, εξωτερικών αντιστάσεων και συντήρησης συνολικά. Στηρίζοντας τις εξωτερικές αντιστάσεις στον ίδιο το ρότορα και στηρίζοντας το ηλεκτρονικό σύστημα παρακολούθησης επίσης στο ρότορα, συνεχίζει να υπάρχει το πρόβλημα του τρόπου μετάδοσης της ποσότητας της ολίσθησης (slip) που χρειαζόμαστε στο ρότορα. Η μετάδοση αυτή μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας

μετάδοση οπτικών ινών και στέλνοντας το σήμα στα ηλεκτρονικά του ρότορα κάθε φορά που αυτό περνάει μέσα από μια σταθερή οπτική ίνα.

Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Σε αιολικές εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας, οι ασύγχρονες γεννήτριες ή οι γεννήτριες επαγωγής είναι λιγότερο αποδοτικές από τις σύγχρονες γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, για τους παρακάτω λόγους:

- Η λειτουργία της απόσβεσης του πλάτους ταλάντωσης (damping action) καταλήγει σε μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας στο ρότορα, απ' ό,τι με τις σύγχρονες γεννήτριες. Τότε, είναι αναγκαίο να κανονιστεί η απομάκρυνση της θερμότητας που καταναλώνεται στο ρότορα. Η ψύξη επιτυγχάνεται με τη χρήση ανεμιστήρων ψύξης.
- Όλη η απαραίτητη άεργος ισχύς (reactive power) για την ενεργοποίηση των μαγνητικών κυκλωμάτων πρέπει να παρασχεθεί από το δίκτυο (ή από τοπικούς πυκνωτές). Αν χρησιμοποιηθούν τοπικοί πυκνωτές, τότε υπάρχει κίνδυνος υπερδιέγερσης, όταν χαθεί η σύνδεση με το δίκτυο.
- Δεν υπάρχει απευθείας έλεγχος πάνω στην τελική τάση ή στη ροή της άεργου ισχύος.
- Αντιμετωπίζουν προβλήματα αστάθειας της τάσης, το οποίο αν και δεν αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα σε αιολική παραγωγή μικρής κλίμακας, είναι ορατό σε μεγάλα αιολικά πάρκα.

Αντίθετα, τα βασικά πλεονεκτήματα των γεννητριών επαγωγής είναι η απλή κατασκευή, το χαμηλό κόστος και ο απλός τρόπος σύνδεσης, καθώς δεν υπάρχει ανάγκη μονάδων συγχρονισμού.

Από την άλλη πλευρά, οι σύγχρονες γεννήτριες έχουν το βασικό πλεονέκτημα του ελέγχου της άεργου ισχύος μέσω της διέγερσης του κυκλώματος και είναι κατάλληλες για ανεξάρτητη λειτουργία σε περίπτωση που οι συσκευές αυτόματου ελέγχου της ταχύτητας διατηρούν τη συχνότητα εντός αποδεκτών ορίων. Το πιο σημαντικό μειονέκτημα των σύγχρονων γεννητριών είναι η στρεπτική κόπωση (torsional fatigue) εξαιτίας της δυσκολίας μεταβολής της ταχύτητας του ρότορα. Όμως, με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος στις τελευταίες και πιο σύγχρονες τεχνολογικά ανεμογεννήτριες, το μειονέκτημα αυτό αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά. Όσον αφορά, τις σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμους μαγνήτες δε χρησιμοποιούνται ευρύτερα, καθώς πρώτον οι εν λόγω μαγνήτες τείνουν να απομαγνητιστούν λειτουργώντας μέσα στα ισχυρά μαγνητικά πεδία της γεννήτριας, και δεύτερον είναι κατασκευασμένοι από γεωμέταλλα, π.χ. Νεοδύμιο, υψηλού κόστους.

2.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

2.2.1 ΓΩΝΙΑΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ

Η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα μιας ηλεκτρικής μηχανής δίνεται από την εξίσωση:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.1)$$

όπου $d\theta$ είναι η ολίσθηση της γωνίας του ρότορα κατά τη διάρκεια μιας μικρής χρονικής περιόδου dt . Γενικά, η γωνιακή ταχύτητα εκφράζεται σε rad/sec. Αν η ταχύτητα εκφράζεται σε Hz, τότε ονομάζεται συχνότητα και δίνεται από την εξίσωση:

$$f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} \quad (2.2)$$

2.2.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Η ύπαρξη ενός μαγνητικού πεδίου είναι ο βασικός μηχανισμός για την ηλεκτρομηχανική μετατροπή στους κινητήρες, τις γεννήτριες και τους μετασχηματιστές. Οι τέσσερις (4) αρχές για το πώς το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο συμβάλλει στη διαδικασία αυτή είναι οι ακόλουθες:

- Ένας αγωγός ρεύματος παράγει γύρω του μαγνητικό πεδίο
- Ένα μαγνητικό πεδίο που μεταβάλλεται με το χρόνο, μέσα σε ένα πηνίο, επάγει τάση στα άκρα του
- Σε έναν αγωγό ρεύματος που βρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο επάγεται μια ισχύς
- Στα άκρα ενός αγωγού που κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο επάγεται μια τάση.

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται γύρω από έναν αγωγό με ρεύμα I , δίνεται από την εξίσωση:

$$\oint H \cdot dl = I \quad (2.3)$$

Σε ένα μαγνητικό κύκλωμα η ΗΕΔ δίνεται από την εξίσωση:

$$F = N \cdot I \quad (2.4)$$

και ισούται με το ισοδύναμο μέγεθος του ρεύματος στο μαγνητικό πυρήνα, όπου N είναι ο αριθμός των τυλιγμάτων του πηνίου που καλύπτει το πυρήνα.

Η μαγνητική ροή ϕ συσχετίζεται με τη ΗΕΔ με την εξίσωση:

$$F = \phi \cdot R \quad (2.5)$$

όπου:

- F , η ηλεκτρεγερτική δύναμη ενός κυκλώματος
 Φ , η αντίστοιχη μαγνητική ροή
 R , η μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος

Η μαγνητική αντίσταση είναι μαγνητικό ανάλογο της ηλεκτρικής αντίστασης και αντιπροσωπεύει την αντίδραση του μαγνητικού πυρήνα στην επαγωγή της μαγνητικής ροής.

2.2.3 ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ FARADAY

Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, αν η μαγνητική ροή ϕ περάσει μέσα από μια στροφή ενός πηνίου, τότε επάγεται μια τάση (e_{ind}) στα άκρα του, η οποία είναι ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής:

$$e_{ind} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.6)$$

Αν ένα πηνίο αποτελείται από N στροφές και η ίδια μαγνητική ροή ϕ περνάει μέσα από καθένα στροφή, τότε το επαγόμενο ρεύμα δίνεται από:

$$e_{ind} = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.7)$$

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η πολικότητα της τάσης παράγει μια ροή ρεύματος και συνεπώς ένα μαγνητικό πεδίο που αντιτίθεται στην αρχική μεταβολή της ροής.

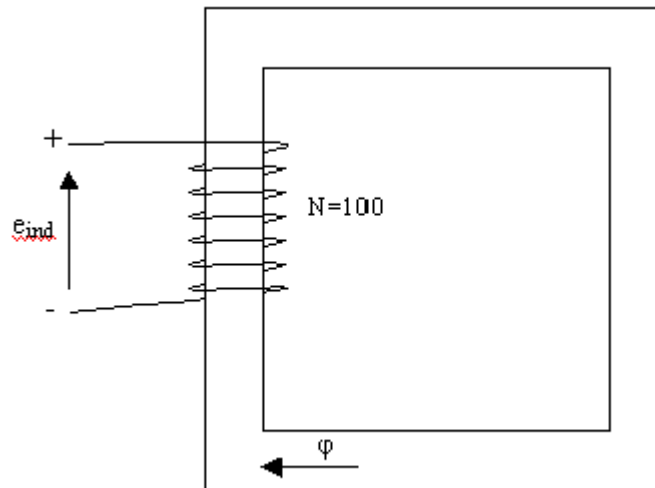
Παράδειγμα:

Αν η μαγνητική ροή που περνάει μέσα από το σιδερένιο καλώδιο της εικόνας 2.3, δίνεται από τη σχέση:

$$\phi = 0.05 \cdot \sin 314 \cdot t \quad \text{Wb}$$

και το πηνίο αποτελείται από 100 στροφές, για τον προαναφερθέντα λόγο, η επαγόμενη τάση έχει την πολικότητα του σχήματος και η τιμή της είναι:

$$e_{ind} = N \cdot \frac{d\phi}{dt} = 100 \cdot \frac{d}{dt} (0.05 \cdot \sin(314t)) = 1570 \cdot \cos(314 \cdot t)$$



Εικόνα 2.3: Σιδερένιο καλώδιο με πηνίο στη μία πλευρά

2.2.4 ΔΥΝΑΜΗ LAPLACE

Η επαγόμενη δύναμη σε έναν αγωγό ρεύματος σε ένα μαγνητικό πεδίο δίνεται από την εξίσωση:

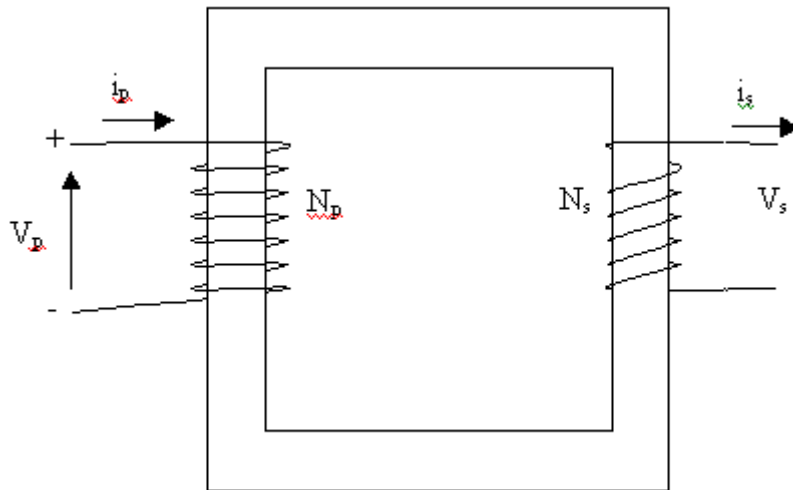
$$F = i \cdot (l \times B) \quad (2.8)$$

όπου I , το ρεύμα του αγωγού
 l , το διάνυσμα μήκους του αγωγού (conductor length vector)
 B , το διάνυσμα πυκνότητας της ροής (flux density vector)

Το φαινόμενο αυτό είναι ο βασικός μηχανισμός για την παραγωγή ροπής στις ηλεκτρικές μηχανές.

2.2.5 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

Καθώς δεν είναι πρακτικά εφικτή η χρήση γεννητριών για την παραγωγή υψηλών τάσεων (μέχρι πολλά KV), για τη διαδικασία αυτή είναι αναγκαία η χρήση μετασχηματιστών (transformer), εικόνα 2.4. Ο μετασχηματιστής είναι μια συσκευή που αποτελείται από δύο ή περισσότερα πηνία περιελιγμένα γύρω από έναν κοινό πυρήνα σιδήρου. Το πρώτο από τα δύο πηνία συνδέεται με τάση εξόδου της γεννήτριας, ενώ το δεύτερο συνδέεται με το φορτίο ή το δίκτυο. Το πρώτο ονομάζεται πρωτεύον τύλιγμα (primary winding) και το δεύτερο ονομάζεται δευτερεύον (secondary winding).



Εικόνα 2.4: Διάγραμμα ενός ιδανικού μετασχηματιστή

Η εξίσωση που συνδέει την τάση του πρωτεύοντος και την επαγόμενη τάση του δευτερεύοντος είναι η ακόλουθη:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (2.9)$$

όπου a είναι ο λόγος των στροφών του μετασχηματιστή.

Αντίστοιχα, η σχέση μεταξύ πρωτογενούς και δευτερογενούς ρεύματος στο μετασχηματιστή δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$N_p i_p = N_s i_s$$

2.2.6 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Οι βασικές κατηγορίες των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος είναι οι μηχανές επαγωγής και οι σύγχρονες μηχανές. Στις σύγχρονες μηχανές το ρεύμα διέγερσης παράγεται από ανεξάρτητες πηγές συνεχούς ρεύματος (dc), ενώ στις ασύγχρονες μηχανές επάγεται από το στάτη. Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του ρότορα κάθε μηχανής επάγει τριφασικά ac ρεύματα στο τύλιγμα του στάτη. Από την άλλη πλευρά, εάν το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτείται από τριφασικά ρεύματα, παράγεται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο διάκενο των μηχανών που αντιδρά με το πεδίο του ρότορα και παράγει ροπή. Συνεπώς, η βασική αρχή όλων των AC ηλεκτρικών μηχανών είναι η ακόλουθη:

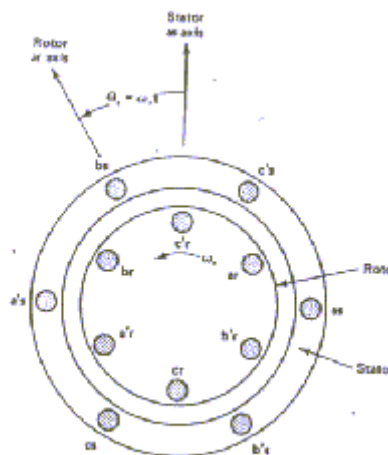
Αν το τύλιγμα (περιέλιξη) μιας μηχανής τροφοδοτείται με σύστημα τριφασικού ρεύματος AC με το ίδιο πλάτος και διαφορά φάσης 120°, παράγεται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σταθερού πλάτους. Η αντίδραση αυτού του μαγνητικού πεδίου με το αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο του ρότορα παράγει την αποδιδόμενη ροπή της μηχανής.

Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιαστεί το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο των επαγωγικών και των σύγχρονων γεννητριών.

2.3 ΕΠΑΓΩΓΙΚΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

2.3.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Οι περιελίξεις του στάτη τροφοδοτούνται με συμμετρική τριφασική τάση ac, που επάγει ρεύμα στις βραχυκυκλωμένες περιελίξεις του ρότορα μέσω επαγωγής.



Εικόνα 2.5: Εξιδανικευμένη τριφασική μηχανή επαγωγής δύο πόλων

Παραβλέποντας την επίδραση των αρμονικών λόγω της μη ιδανικής κατανομής των τυλιγμάτων και λόγω της μη ημιτονοειδούς τάσης και των κυμάτων του ρεύματος, μπορεί να θεωρηθεί ότι ο στάτης εγκαθιστά ένα χωρικά κατανομημένο κύμα πυκνότητας ημιτονοειδούς ροής στο διάκενο που στρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα, η οποία δίνεται από:

$$N_s = \frac{120 f_s}{P} \quad (2.10)$$

όπου N_s είναι η ταχύτητα σε στροφές ανά λεπτό, f_s η συχνότητα του στάτη σε Hz και P ο αριθμός των πόλων.

Αν ο ρότορας είναι αρχικά σταθερός, οι αγωγοί θα υποβληθούν σε ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, επάγοντας ως αποτέλεσμα ρεύμα ίδιας συχνότητας στο ρότορα. Η αντίδραση ανάμεσα στην μαγνητικό πεδίο του διακένου και στην ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) του ρότορα, παράγει ροπή στη μηχανή. Στη σύγχρονη ταχύτητα της μηχανής, ο ρότορας δεν μπορεί να έχει επαγωγή και έτσι δεν μπορεί να παραχθεί ροπή. Σε οποιαδήποτε άλλη ταχύτητα N_r , η διαφορά ταχύτητας $N_s - N_r$ δημιουργεί ολίσθηση (slip), η οποία ορίζεται ανά μονάδα ως:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.11)$$

όπου ω_s είναι η γωνιακή ταχύτητα του στάτη, ω_r η ηλεκτρική ταχύτητα του ρότορα σε γωνιακή συχνότητα.

Η μαγνητική ροή διακένου που κινείται με γωνιακή απόκλιση ω_{sl} ως προς το ρότορα επάγει ανάλογη τάση γωνιακής απόκλισης στο ρότορα, η οποία με τη σειρά της παράγει ρεύμα γωνιακής απόκλισης στο βραχυκυκλωμένο ρότορα. Εφόσον ο ρότορας κινείται με ταχύτητα ω_r και το ρεύμα μεταβάλλεται με ταχύτητα ω_{sl} ως προς το ρότορα, η ΗΕΔ του ρότορα κινείται με την ίδια ταχύτητα που έχει η μαγνητική ροή διακένου.

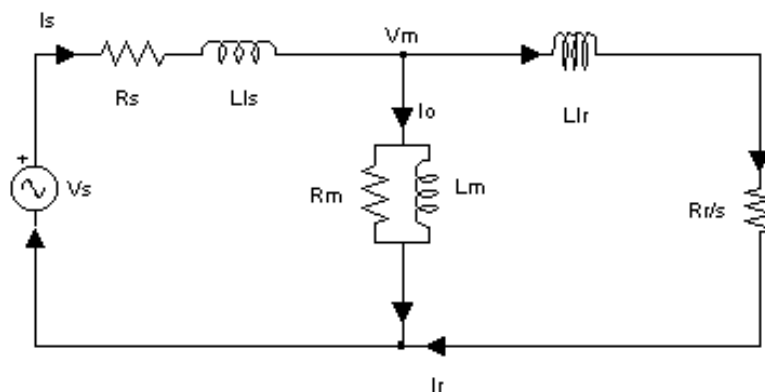
Η επαγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή στη μηχανή επαγωγής δίνεται τελικά από την ακόλουθη εξίσωση:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{P}{2} \right) \cdot |\hat{\psi}_m| \cdot |\hat{I}_r| \cdot \sin \delta \quad (2.12)$$

όπου P είναι ο αριθμός των πόλων, $|\hat{\psi}_m|$ είναι η μέγιστη τιμή της ροής διακένου ανά πόλο, $|\hat{I}_r|$ η μέγιστη τιμή του ρεύματος του ρότορα και $\delta=90+\theta_r$, όπου θ_r είναι ο παράγοντας ισχύος του ρότορα (γωνία ανάμεσα στην τάση του ρότορα και το κύμα του ρεύματος).

Ανάλυση ισοδύναμου κυκλώματος

Η αναπαράσταση του ισοδύναμου κυκλώματος της γεννήτριας επαγωγής παρουσιάζεται στην εικόνα 2.6 και είναι πολύ σημαντική για την ανάλυση της συμπεριφοράς της γεννήτριας σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

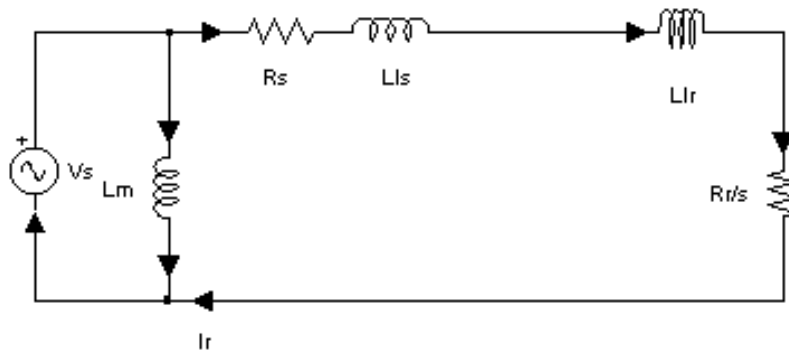


Εικόνα 2.6: Ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση ασύγχρονης μηχανής

Η τάση του στάτη V_s διαφέρει από την ΗΕΔ διακένου V_m ως προς την πτώση τάσης στην αντίσταση R_s και την επαγωγική αντίδραση L_{ls} . Το ρεύμα διέγερσης I_0

αποτελείται από δύο συνιστώσες: μία συνιστώσα απώλειων πυρήνα $I_c=V_m/R_m$ και συνιστώσα του ρεύματος μαγνητίσεως $I_m=V_m/\omega_s L_m$, όπου R_m είναι η ισοδύναμη αντίσταση για την απώλεια διέγερσης και L_m η αντίδραση μαγνητίσεως. Αντίστοιχα, το ρεύμα του στάτη I_s αποτελείται από την συνιστώσα διέγερσης I_0 και το επαγόμενο ρεύμα του ρότορα I_r .

Στην σύγχρονη ταχύτητα ($s=0$) το ρεύμα του ρότορα είναι μηδενικό ($I_r=0$) και στην ηλεκτρική μηχανή ρέει μόνο ρεύμα διέγερσης I_0 . Ενώ, σε μια υπο-σύγχρονη ταχύτητα ($0<s<1$) και με μια μικρή τιμή του s , το ρεύμα του ρότορα I_r επηρεάζεται πρωτίστως από το R_r/s ($R_r/s \gg \omega_s L_{lr}$).



Εικόνα 2.7: Προσεγγιστικό ισοδύναμο κύκλωμα μιας μηχανής επαγωγής

Το ισοδύναμο κύκλωμα της εικόνας 2.6 μπορεί να απλοποιηθεί σε αυτό της εικόνας 2.7, όπου η αντίσταση απωλειών πυρήνα R_m έχει εξαιρεθεί, ενώ η αντίδραση μαγνήτισης L_m έχει μεταφερθεί στην εισαγωγή.

Το ρεύμα του ρότορα I_r μπορεί να λυθεί ως εξής:

$$I_r = \frac{V_s}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + \omega_s^2 (L_{ls} + L_{lr})^2}} \quad (2.13)$$

Η ηλεκτρική ισχύς κατά μήκος του διακένου δίνεται από:

$$P_g = 3 \cdot I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s} \quad (2.14)$$

Η απώλεια χαλκού του ρότορα:

$$P_{lr} = 3 \cdot I_r^2 \cdot R_r = s \cdot P_g \quad (2.15)$$

Ισχύς εξόδου:

$$P_0 = P_g - P_{lr} = 3 \cdot I_r^2 \cdot R_r \cdot \frac{1-s}{s} = (1-s) \cdot P_g \quad (2.16)$$

Εφόσον η ισχύς της εξόδου είναι αποτέλεσμα της εφαρμοζόμενης ροπής T_e και της ταχύτητας, η ροπή της μηχανής δίνεται από:

$$T_e = \frac{P_0}{\omega_m} = \frac{3}{\omega_m} \cdot I_r^2 \cdot R_r \cdot \frac{1-s}{s} = 3 \cdot \left(\frac{P}{2}\right) \cdot I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s \cdot \omega_s} \quad (2.17)$$

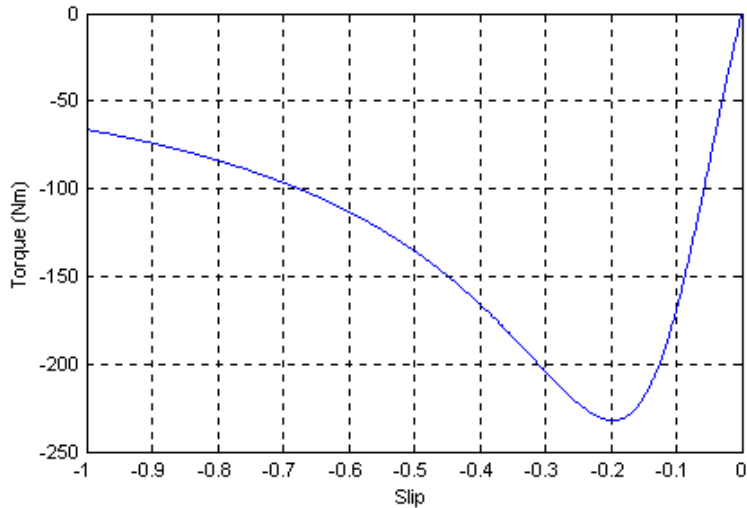
όπου $\omega_m = (2/P) \omega_s$ είναι η μηχανική γωνιακή ταχύτητα του ρότορα (rad/s).

Αντικαθιστώντας την εξίσωση 2.13 στη 2.17 έχουμε:

$$T_e = 3 \cdot \left(\frac{P}{2}\right) \cdot \left(\frac{R_r}{s \cdot \omega_s}\right) \cdot \frac{V_s^2}{(R_s + R_r/s)^2 + \omega_s^2 \cdot (L_{ls} + L_{lr})^2} \quad (2.18)$$

Καμπύλη ροπής - ταχύτητας

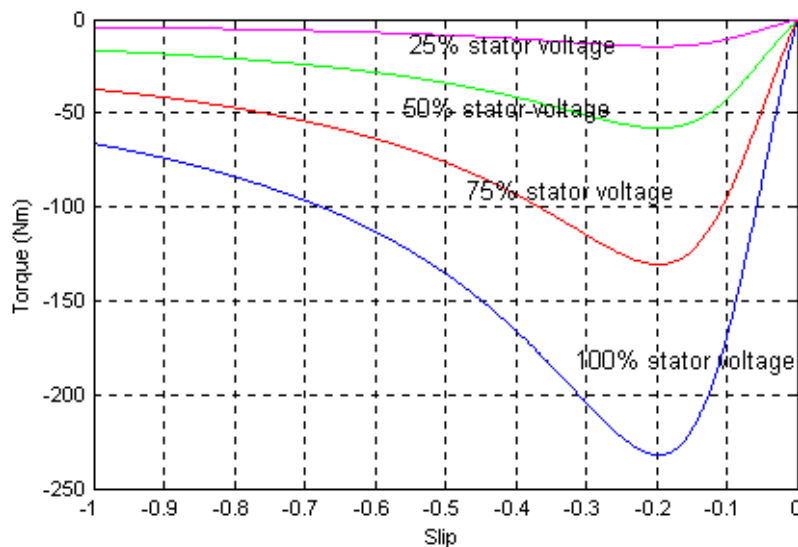
Αν η τροφοδότηση τάσης και η συχνότητα είναι σταθερές, η ροπή T_e μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση της ολίσθησης (slip) από την εξίσωση 2.18. Στη λειτουργία της γεννήτριας ο ρότορας κινείται με υπέρ-σύγχρονη ταχύτητα προς την ίδια κατεύθυνση με την ροή διακένου, έτσι ώστε η ολίσθηση να γίνεται αρνητική, δημιουργώντας αρνητική ροπή. Η αρνητική ολίσθηση αντιστοιχεί σε αρνητική ισοδύναμη αντίσταση R_r/s (Εικόνα 2.7). Η θετική αντίσταση R_r/s καταναλώνει ενέργεια κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, αλλά η αρνητική R_r/s παράγει ενέργεια και τη στέλνει πίσω στην πηγή. Επομένως, η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια επαγωγής. Συνεπώς στις ανεμογεννήτριες, ο άξονας της γεννήτριας περιστρέφεται με υπέρ-σύγχρονη ταχύτητα ωθούμενη από τον άνεμο και έτσι στέλνει ενέργεια στο δίκτυο.



Εικόνα 2.8: Καμπύλη ροπής - ταχύτητας σε σταθερή τάση και συχνότητα

Λειτουργία μεταβλητής τάσης

Μια απλή και οικονομική μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας μίας ασύγχρονης μηχανής είναι να μεταβάλλουμε την τάση του στάτη υπό σταθερή συχνότητα. Με τη μέθοδο αυτή για τον έλεγχο της ταχύτητας, η ροπή ανά μονάδα ρεύματος του στάτη που αναπτύσσεται είναι ανάλογη της μεταβολής της τάσης του στάτη. Επομένως, για μια ροπή σταθερού φορτίου το ρεύμα του στάτη αυξάνεται και η ταχύτητα μειώνεται, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη απώλεια χαλκού και την πρόκληση σοβαρού προβλήματος θέρμανσης της μηχανής.

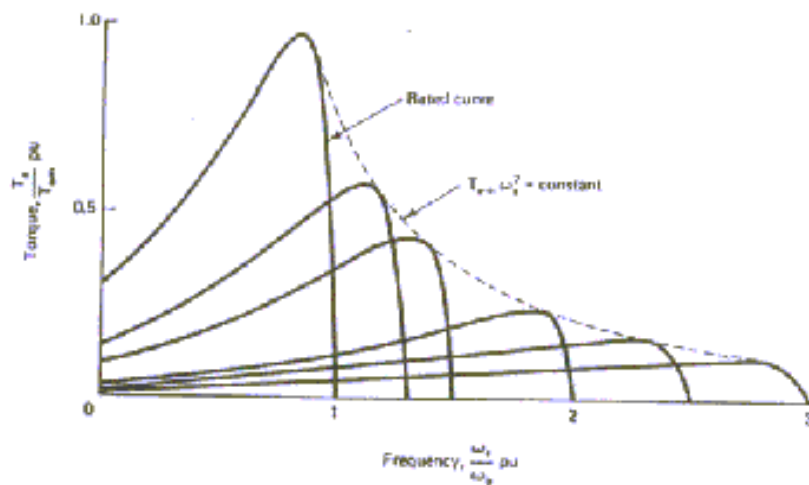


Εικόνα 2.9: Καμπύλη ροπής - ταχύτητας με μεταβλητή τάση στάτη

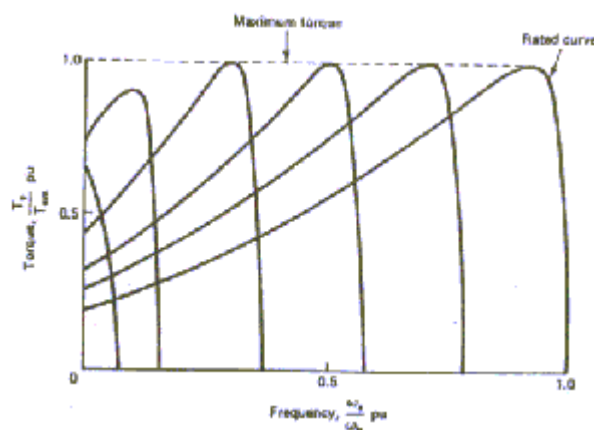
Λειτουργία μεταβλητής συχνότητας

Αν η συχνότητα του στάτη αυξάνεται πέρα από την ονομαστική τιμή, οι καμπύλες ροπής - ταχύτητας που προέρχονται από την εξίσωση (2.18) μπορούν να παρασταθούν γραφικά όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα 2.10. Η ροή διακένου και

το ρεύμα του στάτη μειώνονται καθώς αυξάνεται η συχνότητα και αναλόγως μειώνεται η μέγιστη ροπή που αναπτύσσεται. Από την άλλη πλευρά, αν γίνει μια προσπάθεια μείωσης της συχνότητας τροφοδότησης στην εκτιμηθείσα τάση, η ροή διακένου φτάνει σε κορεσμό, προκαλώντας υπερβολικό ρεύμα στάτη. Επομένως, η περιοχή κάτω από τη γωνιακή ταχύτητα βάσης ω_b πρέπει να συνοδεύεται από την ανάλογη μείωση της τάσης του στάτη, έτσι ώστε να διατηρείται σταθερή η ροή διακένου. Η εικόνα 2.11 δείχνει το διάγραμμα καμπυλών ροπής - ταχύτητας, όπου ο λόγος V_s/ω_e διατηρείται σταθερός. Η μέγιστη ροπή παραμένει σχεδόν ισχύουσα εκτός στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων, όπου η ροή διακένου μειώνεται από την πτώση της σύνθετης αντίστασης του στάτη. Στην περιοχή αυτή η πτώση του στάτη πρέπει να αντισταθμιστεί από μια πρόσθετη ενίσχυση της τάσης, έτσι ώστε να παράγει μέγιστη ροπή.



Εικόνα 2.10: Καμπύλες ροπής - ταχύτητας σε μεταβλητή συχνότητα

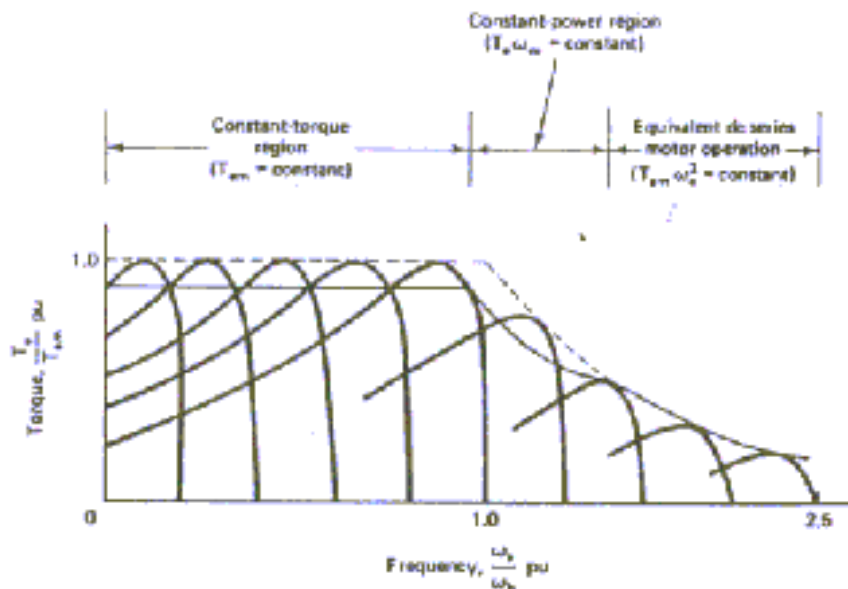


Εικόνα 2.11: Καμπύλες ροπής - ταχύτητας σε σταθερά volts/hertz

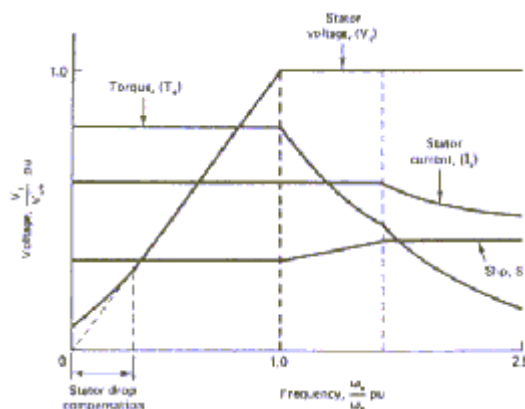
Παρά τη χαμηλή αρχική ροπή για λειτουργία σε ονομαστική συχνότητα, η μηχανή μπορεί πάντα να ξεκινήσει με μέγιστη ροπή. Η συντριπτική πλειοψηφία των βιομηχανικών κινητήρων ac ρυθμιζόμενης ταχύτητας λειτουργούν με μεταβλητή τάση, μεταβλητή συχνότητα τροφοδότησης. Οι διαφορετικές περιοχές των καμπυλών ροπής - ταχύτητας ενός κλασικού κινητήρα με μεταβλητή τάση, μεταβλητή συχνότητα τροφοδότησης φαίνονται στην Εικόνα 2.12 και η ανάλογη σχέση τάσης -

συχνότητας φαίνεται στην Εικόνα 2.13. Η τελευταία εικόνα δείχνει επίσης τη ροπή, το ρεύμα του στάτη και την ολίσθηση ως συνάρτηση της συχνότητας. Στην περιοχή σταθερής ροπής, η μέγιστη διαθέσιμη ροπή φαίνεται κάπως μικρότερη από τη ροπή διακοπής (break-down torque) λόγω της περιορισμένης δυναμικότητας του αντιστροφέα.

Στο δεξί άκρο της περιοχής σταθερής ροπής, η τάση του στάτη φτάνει την ονομαστική τιμή και στη συνέχεια η μηχανή μπαίνει στην περιοχή σταθερής ισχύος. Στην περιοχή αυτή η ροή διακένου μειώνεται, αλλά το ρεύμα του στάτη διατηρείται σταθερό μέσω της αύξησης της ολίσθησης. Στο άκρο της περιοχής σταθερής ισχύος, φτάνεται η ροπή διακοπής (breakdown torque) T_{em} και τότε η ταχύτητα της μηχανής μπορεί να αυξηθεί περισσότερο μέσω αύξησης της συχνότητας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.10, με τη μείωση του ρεύματος του στάτη. Οποιοδήποτε σημείο λειτουργίας κάτω από τη μέγιστη ροπή μπορεί να επιτευχθεί με τον έλεγχο της τάσης και / ή της συχνότητας.



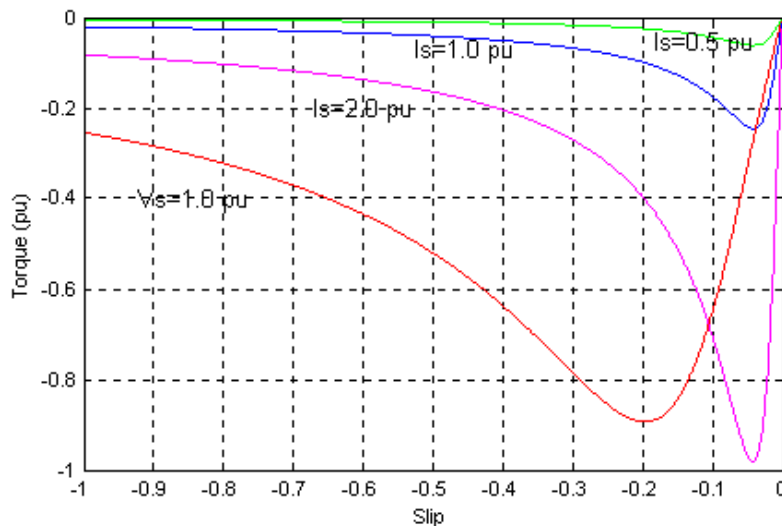
Εικόνα 2.12: Καμπύλες ροπής - ταχύτητας μεταβλητής τάσης & μεταβλητής συχνότητας



Εικόνα 2.13: Σχέση τάσης - συχνότητας επαγωγικής μηχανής

Στάτης Μεταβλητού Ρεύματος

Αντί για τον έλεγχο της τάσης του στάτη, το ρεύμα του στάτη μπορεί να ελέγχεται απευθείας για τον έλεγχο της αναπτυσσόμενης ροπής. Με τον έλεγχο του ρεύματος, το χαρακτηριστικό της ροπής εξαρτάται από τη σχετική κατανομή του ρεύματος μαγνήτισης και του ρεύματος του ρότορα για μια καθορισμένη ποσότητα ρεύματος στάτη. Οι καμπύλες ροπής - ταχύτητας σε διαφορετικά ρεύματα στάτη αλλά σε καθορισμένη συχνότητα φαίνονται στην Εικόνα 2.14. Αν, για παράδειγμα, η μηχανή λειτουργεί σε ονομαστικό ρεύμα ($I_s=1.0$ pu), η αρχική ροπή θα είναι πολύ χαμηλή συγκρινόμενη με αυτήν μιας μηχανής που τροφοδοτείται με τάση σε $V_s=1.0$ pu. Ο λόγος είναι ότι ο ροή διακένου θα είναι πολύ χαμηλή εξαιτίας της επίδρασης του βραχυκυκλώματος του ρότορα. Καθώς η ταχύτητα μειώνεται (δηλαδή η ολίσθηση αυξάνεται), η τάση του στάτη αυξάνεται και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ροπής. Σε περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη ο κορεσμός της μηχανής, η αναπτυσσόμενη ροπή θα είναι περιορισμένη, όπως συμβαίνει σε κλασικές μηχανές. Αυτή η κατάσταση λειτουργίας επιτυγχάνεται με τη χρήση κινητήρων τροφοδοτούμενων με ρεύμα (current-fed drives).



Εικόνα 2.14: Καμπύλες ροπής - ταχύτητας με μεταβλητό ρεύμα στάτη

Αρμονικές επιδράσεις

Σε κινητήρες ρυθμιζόμενης ταχύτητας, οι μηχανές τροφοδοτούνται από μετατροπείς, οι οποίοι περιέχουν αρμονικές στην έξοδο. Οι αρμονικές έχουν τις παρακάτω επιβλαβείς επιδράσεις:

- Θέρμανση
- Διακύμανση ροπής

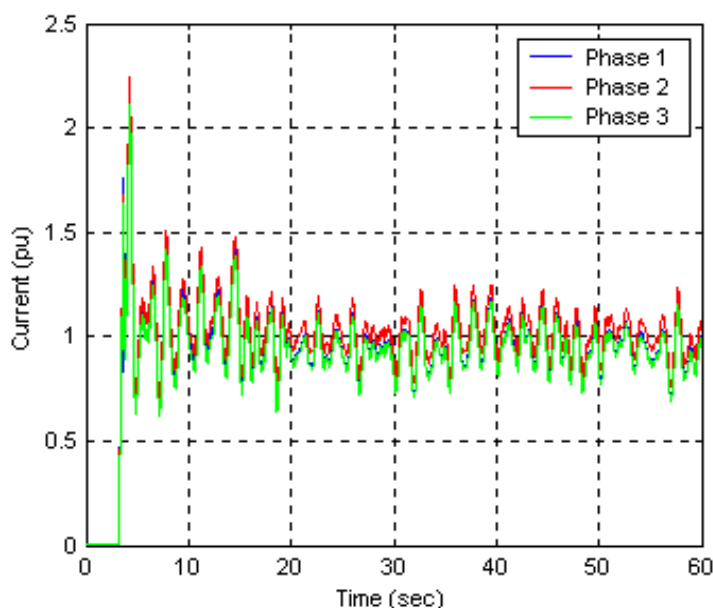
Η παρουσία μετατροπέα ισχύος καταλήγει στην ύπαρξη μονών αρμονικών (3^η, 5^η, 7^η) στο ρεύμα και 6^ηs αρμονικής στη ροπή. Με την ρύθμιση των σύγχρονων μετατροπέων, η διακύμανση της συχνότητας των αρμονικών μπορεί να επεκταθεί μέχρι τα 9kHz.

2.3.3 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΕ ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Οι γεννήτριες επαγωγής συνήθως χρησιμοποιούνται στις επονομαζόμενες ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας. Η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα είναι λίγο πάνω από αυτήν των σύγχρονων, δηλαδή στην κλίμακα των 1500 r.p.m. (4 πόλοι), 1000 r.p.m. (6 πόλοι) κ.λ.π. για σύνδεση σε δίκτυο 50 Hz. Για εμπορικούς λόγους είναι σύνηθες να χρησιμοποιείται τάση εξόδου ίση με 690 V (χαμηλή τάση).

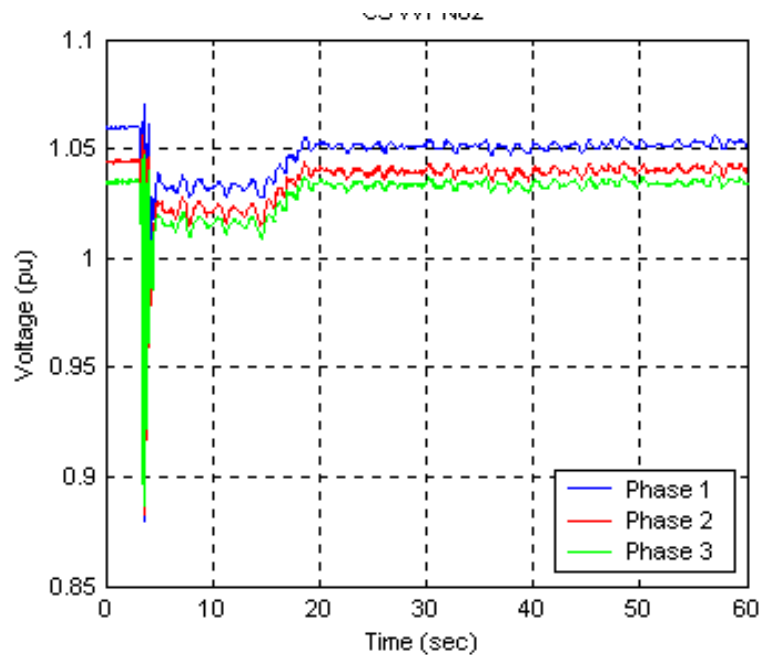
Ο σχεδιαστής της ανεμογεννήτριας συχνά επιζητά υψηλή ολίσθηση (slip) στην ονομαστική ισχύ έξοδο, καθώς αυτό αυξάνει την απόσβεση του πλάτους ταλάντωσης στο άξονα της ανεμογεννήτριας, αλλά εις βάρος των απωλειών του ρότορα. Στις εικόνες 2.15 και 2.17 παρουσιάζεται η συμπεριφορά μιας ανεμογεννήτριας εφοδιασμένης με γεννήτρια επαγωγής, κατά τη διαδικασία της εκκίνησης.

Στην Εικόνα 2.15 το ρεύμα του στάτη της γεννήτριας επαγωγής μετράται σε κάθε φάση. Οι τιμές δίδονται σε αναλογία με το ονομαστικό ρεύμα της μηχανής (ανά μονάδα). Η Εικόνα δείχνει μια τυπική συμπεριφορά μιας γεννήτριας επαγωγής κατά την εκκίνηση. Αμέσως μετά της αρχικής μεταβατικής κατάστασης, το ρεύμα φτάνει σε υψηλές τιμές (μέχρι 2 φορές το ονομαστικό ή περισσότερο). Το ρεύμα εκκίνησης αποσβένεται πολύ γρήγορα και φτάνει την τιμή της μόνιμης λειτουργίας μέσα σε λιγότερο από 10 δευτερόλεπτα. Οι διακυμάνσεις που εμφανίζονται στη συνέχεια είναι αποτέλεσμα των διακυμάνσεων του ανέμου.



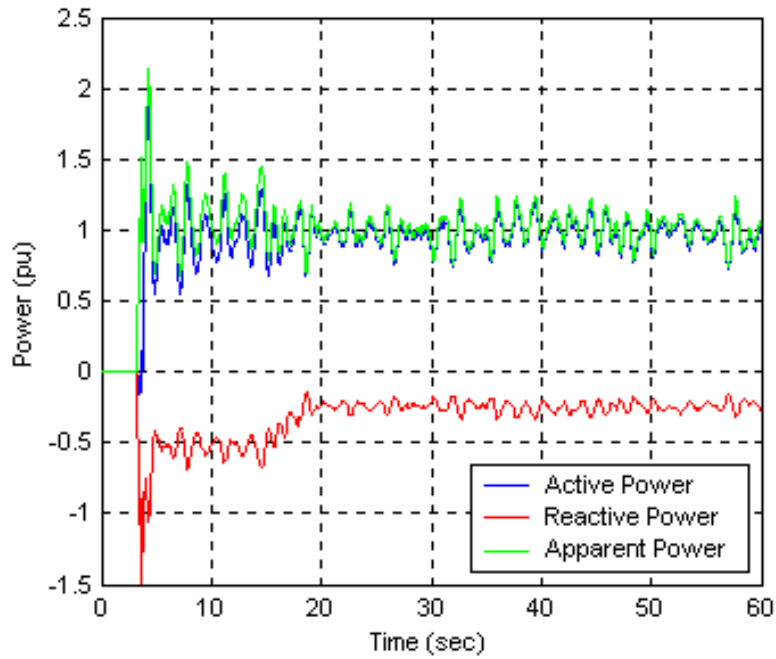
Εικόνα 2.15: Μεταβολή των ρευμάτων της ανεμογεννήτριας κατά την εκκίνηση

Στην Εικόνα 2.16 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τάσεις ανά φάση. Μια πτώση της τάσης, μετά τη εκκίνηση, προκαλείται λόγω του παραπάνω ρεύματος και επίσης αποσβένεται σε λίγα δευτερόλεπτα. Η ασυμμετρία μεταξύ των τριών φάσεων οφείλεται σε μη συμμετρικά φορτία δικτύου ανά φάση.



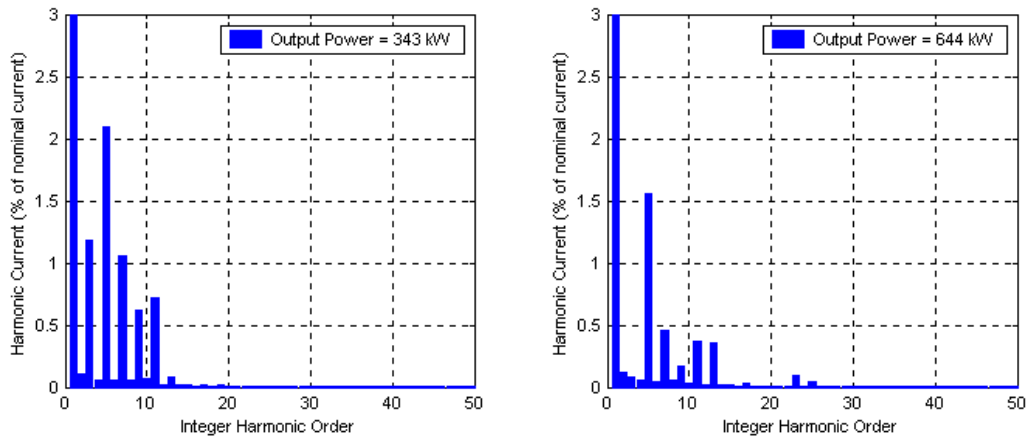
Εικόνα 2.16: Μεταβολή τάσεων ανεμογεννήτριας σταθερής ταχύτητας κατά την εκκίνηση

Στην Εικόνα 2.17, η ενεργός, η άεργος και φαινόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας μετρώνται κατά τη λειτουργία εκκίνησης. Η ισχύς θεωρείται ως θετική από την ανεμογεννήτρια στο δίκτυο. Οι αρνητικές τιμές της άεργου ισχύος ερμηνεύονται, αν ληφθεί υπόψη η θεωρία των μηχανών επαγωγής. Όπως ήδη αναφέρθηκε, για τη διέγερση μιας μηχανής επαγωγής, ο στάτης πρέπει να τροφοδοτείται με τριφασική τάση. Δεν μπορεί να επιτευχθεί διέγερση χωρίς σύνδεση της ανεμογεννήτρια με το κεντρικό δίκτυο. Έτσι, η γεννήτρια επαγωγής χρειάζεται ένα συγκεκριμένο ποσό άεργου ισχύος από το δίκτυο, ώστε να λειτουργήσει, και η ροή της άεργου ισχύος είναι από το δίκτυο στην ανεμογεννήτρια, με αποτέλεσμα να είναι πάντοτε αρνητική σε ανεμογεννήτριες με γεννήτριες επαγωγής.



Εικόνα 2.17: Ισχύς ανεμογεννήτριας σταθερής ταχύτητας κατά την εκκίνηση

Τέλος, στην Εικόνα 2.18 υπολογίζονται οι αρμονικές του ρεύματος δύο τυπικών ανεμογεννητριών με γεννήτριες επαγωγής.



Εικόνα 2.18: Πλάτος αρμονικών μίας φάσης ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας

2.4 ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

2.4.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Οι σύγχρονες μηχανές είναι συγκρίσιμες των μηχανών επαγωγής στα συστήματα ρυθμιζόμενης ταχύτητας (adjustable-speed drive systems). Οι δύο κατηγορίες μηχανών είναι ανάλογες από πολλές απόψεις και μεγάλο μέρος της ανάλυσης των προηγούμενων παραγράφων ισχύει και για τις σύγχρονες μηχανές.

Μια σύγχρονη μηχανή, όπως δείχνει η ονομασία, πρέπει να περιστρέφεται σε σύγχρονη ταχύτητα. Τα τυλίγματα του στάτη μίας σύγχρονης μηχανής είναι πανομοιότυπο με αυτό της μηχανής επαγωγής, αλλά αντίθετα ο ρότορας έχει ένα τύλιγμα που τροφοδοτείται από συνεχές ρεύμα για να παράγει ροή στο ρότορα. Εκτός από το βασικό τύλιγμα μαγνήτισης, ο ρότορας συνήθως περιλαμβάνει τυλίγματα απόσβεσης πλάτους ταλάντωσης, τα οποία λειτουργούν όπως οι βραχυκυκλωμένες ράβδοι σε μια μηχανή επαγωγής.

Ο μηχανισμός παραγωγής ροπής σε μια σύγχρονη μηχανή είναι ο ίδιος μιας μηχανής επαγωγής, συνεπώς οι προηγούμενες συζητήσεις σχετικά με την παραγωγή ροπής ισχύουν εδώ. Εφόσον ο ρότορας κινείται πάντα με σύγχρονη ταχύτητα σε σταθερή κατάσταση (δηλαδή η ολισθήση είναι μηδενική) δεν υπάρχει επαγωγή στο ρότορα και συνεπώς η ΗΕΔ του ρότορα τροφοδοτείται αποκλειστικά από το βασικό τύλιγμα διέγερσης.

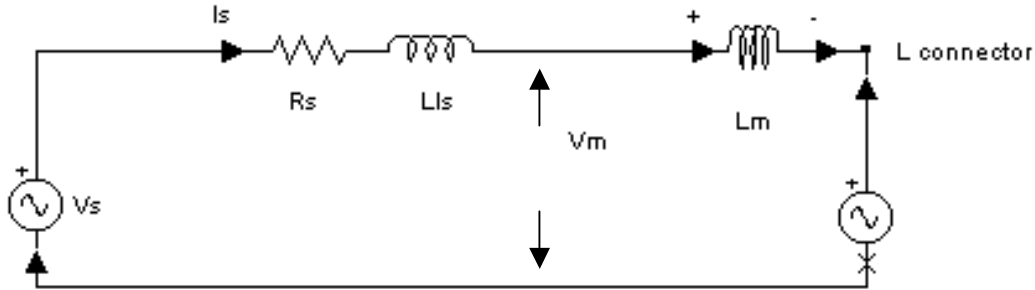
Ισοδύναμο κύκλωμα

Ένα απλό ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμης κατάστασης λειτουργίας ανά φάση για μια σύγχρονη μηχανή μπορεί να δημιουργηθεί από τις ίδιες φυσικές θεωρήσεις, όπως γίνεται με αυτά των κινητήρων επαγωγής. Ο ρότορας τροφοδοτείται από ένα ρεύμα πεδίου I_f λόγω της τάσης τροφοδότησης V_f .

Το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μιας σύγχρονης μηχανής δίνεται στην Εικόνα 2.19. Η τάση V_f ορίζεται ως διέγερση και είναι ευθέως ανάλογη του ρεύματος πεδίου I_f . Το άθροισμα της απώλειας επαγωγικής αντίδρασης $\omega_e L_{ls}$ και της επαγωγικής αντίδρασης μαγνήτισης $\omega_e L_m$ είναι γνωστό ως σύγχρονη επαγωγική αντίδραση (δηλαδή, $X_s = \omega_e L_s = \omega_e L_{ls} + \omega_e L_m$) και η συνολική σύνθετη αντίσταση $Z_s = R_s + jX_s$ είναι γνωστή ως σύγχρονη σύνθετη αντίσταση.

Αντίθετα με τις μηχανές επαγωγής, μια σύγχρονη μηχανή μπορεί να λειτουργήσει σε οποιονδήποτε επιθυμητό συντελεστή ισχύος (power factor). Ο συντελεστής ισχύος μπορεί να ελεγχθεί από το μέγεθος της διέγερσης πεδίου (field excitation). Σε μια δεδομένη συχνότητα ω_e , η τάση V_m τείνει να ισορροπήσει την τάση τροφοδοσίας V_s και επομένως η ροή διακένου ή το αντίστοιχο μαγνητικό ρεύμα τείνει να είναι σταθερό. Το μαγνητικό ρεύμα αποτελείται από τη συνιστώσα πεδίου I_f και την άεργο συνιστώσα του ρεύματος του στάτη I_s . Αν η μηχανή υπερδιεγερθεί, η περίσσεια της άεργου συνιστώσας του ρεύματος μπορεί να τροφοδοτηθεί στην έξοδο. Από την άλλη

πλευρά, αν η μηχανή είναι υποδιεγερμένη, παίρνει ρεύμα από το στάτη, για να συμπληρώσει τη διέγερση. Η γωνία δ ανάμεσα στη τάση V_s και στη τάση V_f είναι γενικώς γνωστή ως γωνία ισχύος της σύγχρονης μηχανής και είναι αρνητική στην κατάσταση κινητήρα, αλλά θετική στην κατάσταση γεννήτριας.



Εικόνα 2.19: Ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση για μια σύγχρονη μηχανή

Χαρακτηριστικά ροπής

Αν, για λόγους απλοποίησης, αγνοήσουμε την αντίσταση του στάτη R_s , προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{V}_s \angle 0^\circ - \bar{V}_f \angle -\delta}{jX_s} = \frac{\bar{V}_s}{X_s} \angle -90^\circ - \frac{\bar{V}_f}{X_s} \angle -(\delta + 90^\circ) \quad (2.19)$$

ή

$$I_s \cdot \cos \phi = \frac{V_s}{X_s} \cos(-90^\circ) - \frac{V_f}{X_s} \cos(-\delta - 90^\circ) = -\frac{V_f}{X_s} \cos(\delta + 90^\circ) \quad (2.20)$$

Η εισαγωγή ισχύος στη μηχανή είναι:

$$P_{in} = 3 \cdot V_s \cdot I_s \cdot \cos \phi \quad (2.21)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση 2.20 στη 2.21 έχουμε:

$$P_{in} = \frac{3 \cdot V_s \cdot V_f}{X_s} \cdot \sin \delta \quad (2.22)$$

Αν αγνοήσουμε τις απώλειες, η ισχύς P_{in} μεταφέρεται στον άξονα (shaft):

$$P_{in} = \frac{2}{P} \cdot \omega_e \cdot T_e \quad (2.23)$$

Οι εξισώσεις 2.22 και 2.23 δίνουν:

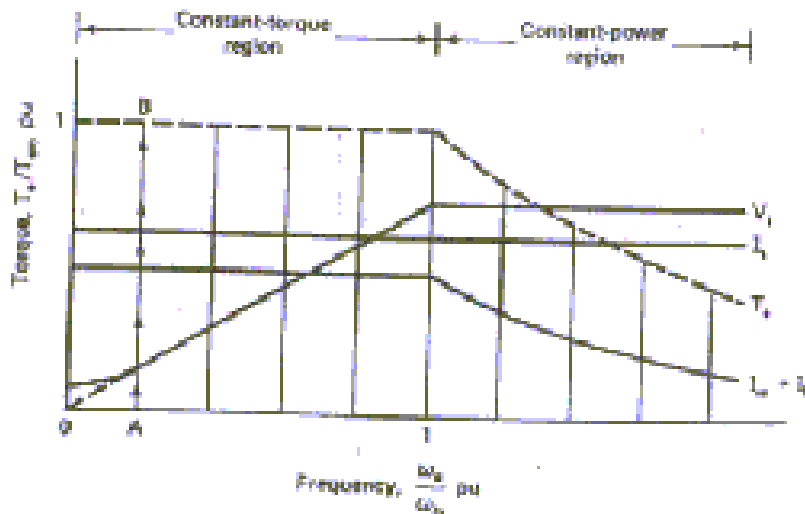
$$T_e = 3 \cdot \left(\frac{P}{2} \right) \cdot \frac{V_s}{\omega_e} \cdot \frac{V_f}{X_s} \sin \delta \quad (2.24)$$

Η εξίσωση 2.24 δίνει την χαρακτηριστική γωνίας ροπής - ισχύος της μηχανής.

Σε καθορισμένη συχνότητα και τάση τροφοδότησης, η καμπύλη ροπής είναι ανάλογη του ρεύματος διέγερσης πεδίου. Αυτό συμβαίνει επίσης αν η τάση τροφοδότησης σε αναλογία συχνότητας (supply voltage to frequency ratio) παραμένει αμετάβλητη.

Λειτουργία μεταβλητής συχνότητας

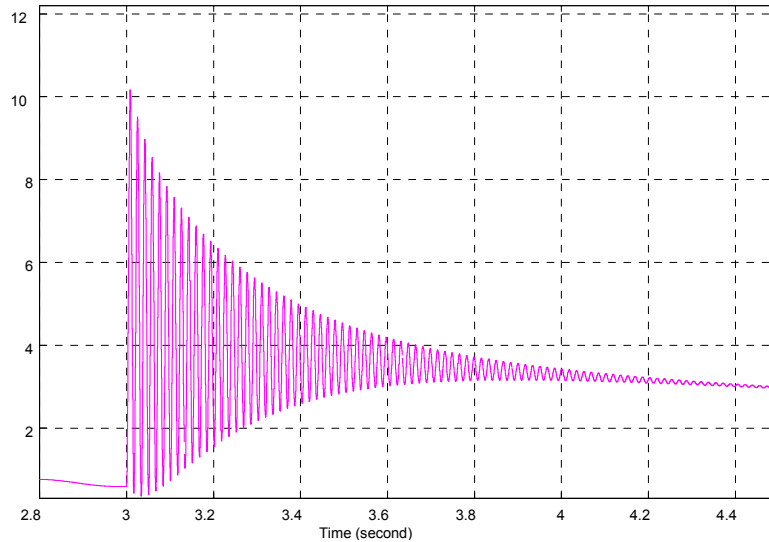
Η μηχανή έχει δύο περιοχές λειτουργίας: μια περιοχή σταθερής ροπής και μια περιοχή σταθερής ισχύος. Στην περιοχή σταθερής ροπής, η αναλογία V_s/ω_e διατηρείται σταθερή, όπως και στον κινητήρα επαγωγής, γεγονός που καθιστά το ρεύμα μαγνήτισης σταθερό. Ας θεωρήσουμε ένα σημείο Α στην περιοχή σταθερής ροπής και ας υποθέσουμε ότι η συχνότητα παραμένει σταθερή. Από την εξίσωση 2.24, η εξίσωση μπορεί να αυξηθεί σε μια κατακόρυφη γραμμή μέσω της αύξησης του ρεύματος του στάτη I_s μέχρι να επιτευχθεί η μέγιστη ροπή στο σημείο Β. Με μια αύξηση της ροπής, η γωνία δ θα αυξηθεί. Αν η συχνότητα καθοριστεί με μια μεγαλύτερη τιμή, η τάση θα αυξηθεί αναλόγως, έτσι ώστε να φτάσει την ίδια μέγιστη ροπή, ενώ το ρεύμα I_s παραμένει το ίδιο όπως πριν. Η αναλογία τάση προς συχνότητα έχει γραμμική σχέση, εξαιρουμένων των χαμηλών συχνοτήτων, όπου απαιτείται μια πρόσθετη ενίσχυση τάσης ως αντιστάθμιση της πτώσης στον στάτη. Στο δεξί άκρο της περιοχής σταθερής ροπής επιτυγχάνεται η πλήρης τροφοδότηση τάσης και η μηχανή μπαίνει στην περιοχή σταθερής ισχύος. Η ροπή μειώνεται, γιατί για το ίδιο ρεύμα στάτη I_s , το ρεύμα μειώνεται με ρυθμό V_s/ω_e . Καθώς αυξάνεται η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_e , μειώνεται η ροπή, έτσι ώστε η ισχύς εξόδου να παραμένει σταθερή. Το ρεύμα πεδίου I_f μπορεί να ρυθμιστεί στο σημείο λειτουργίας, ώστε να διατηρηθεί ο επιθυμητός συντελεστής ισχύος στην έξοδο της μηχανής.



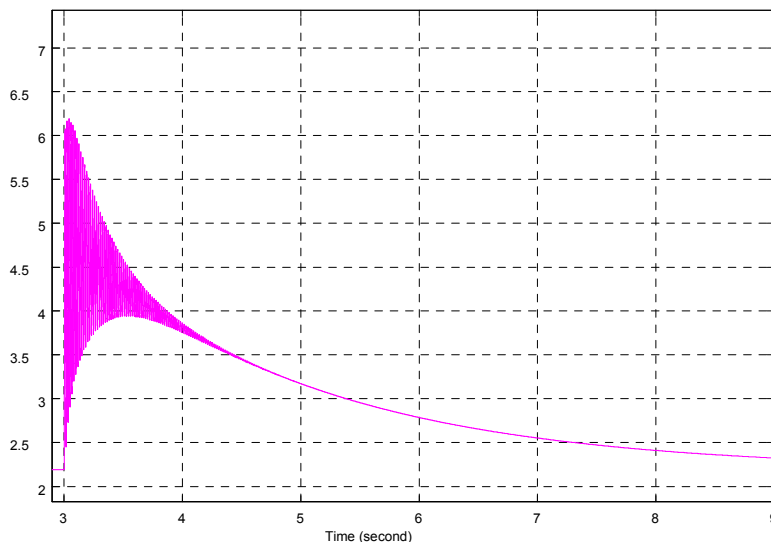
Εικόνα 2.20. Καμπύλες ροπής - συχνότητας σύγχρονης μηχανής ($\cos\phi=1$).

2.4.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΙΦΝΙΔΙΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ

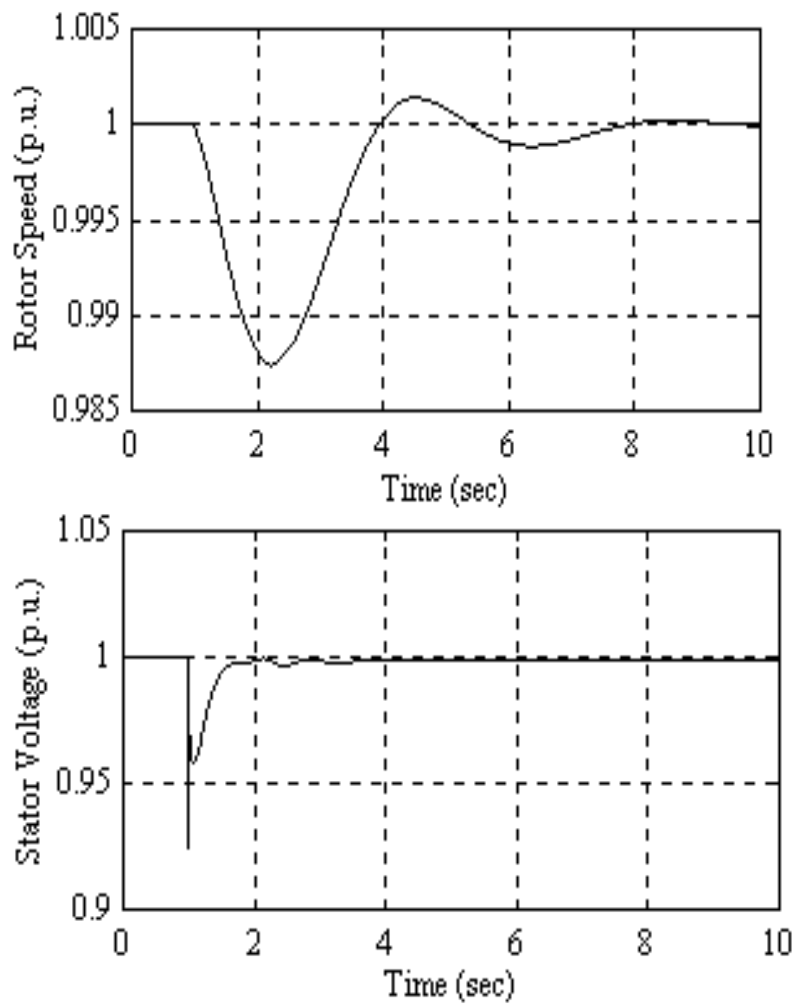
Ένα από τα πιο κοινά μεταβατικά φαινόμενα σε συστήματα ισχύος είναι το βραχυκύκλωμα (short-circuit) μεταξύ φάσης και γείωσης (ground) ή μεταξύ φάσεων (τριφασικό βραχυκύκλωμα).

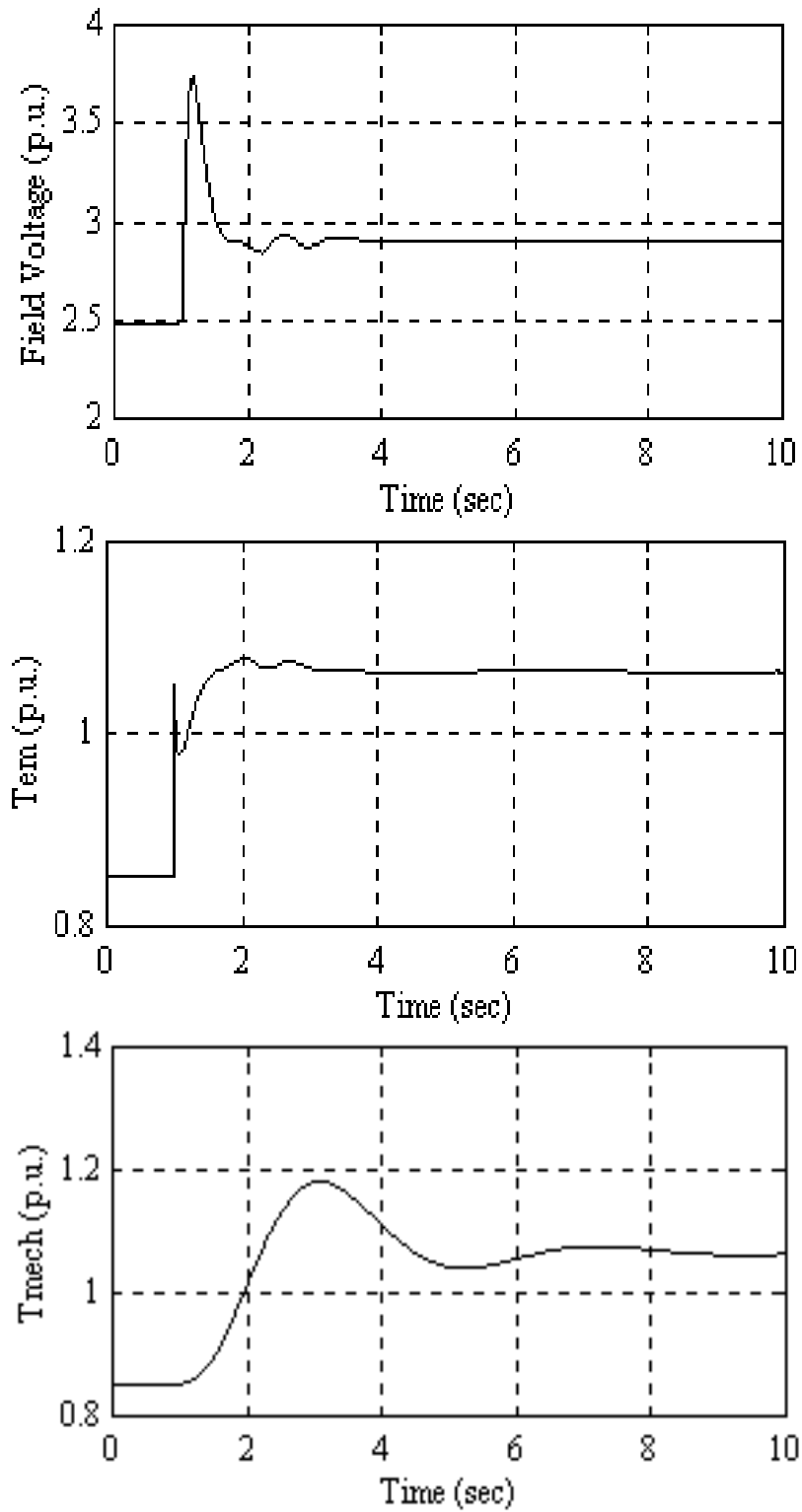


Εικόνα 2.21: Βραχυκύκλωμα ρεύματος στάτη.

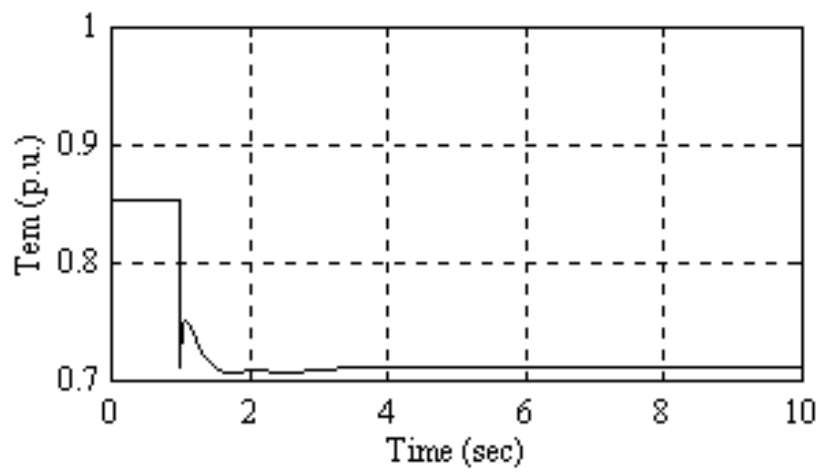
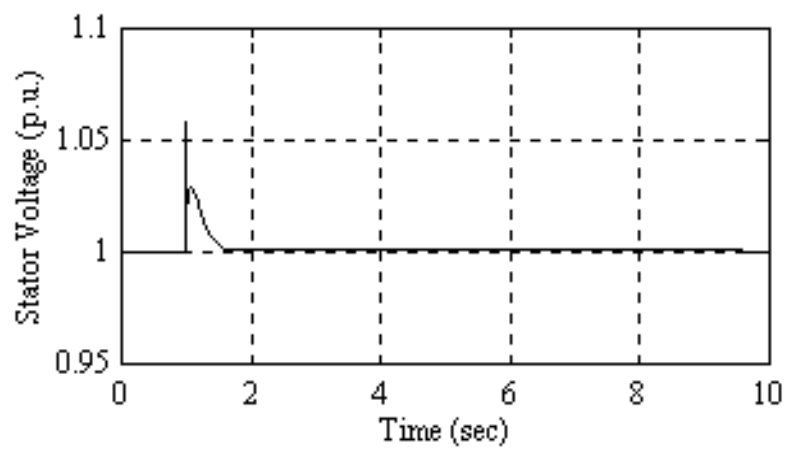
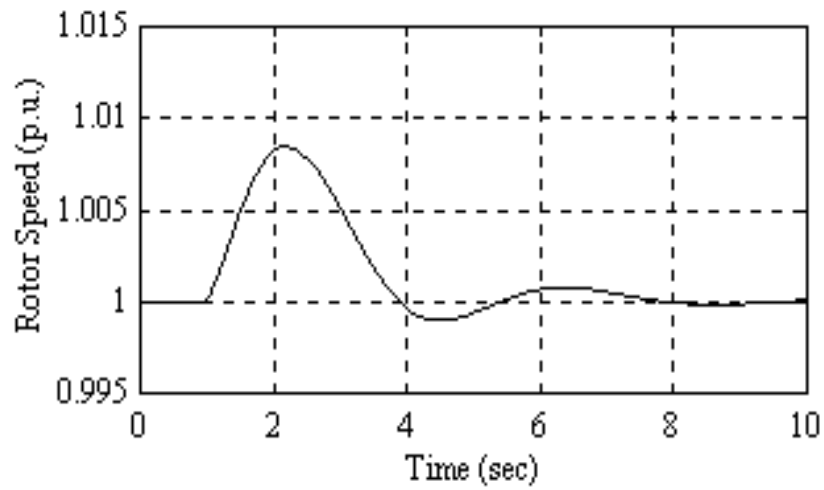


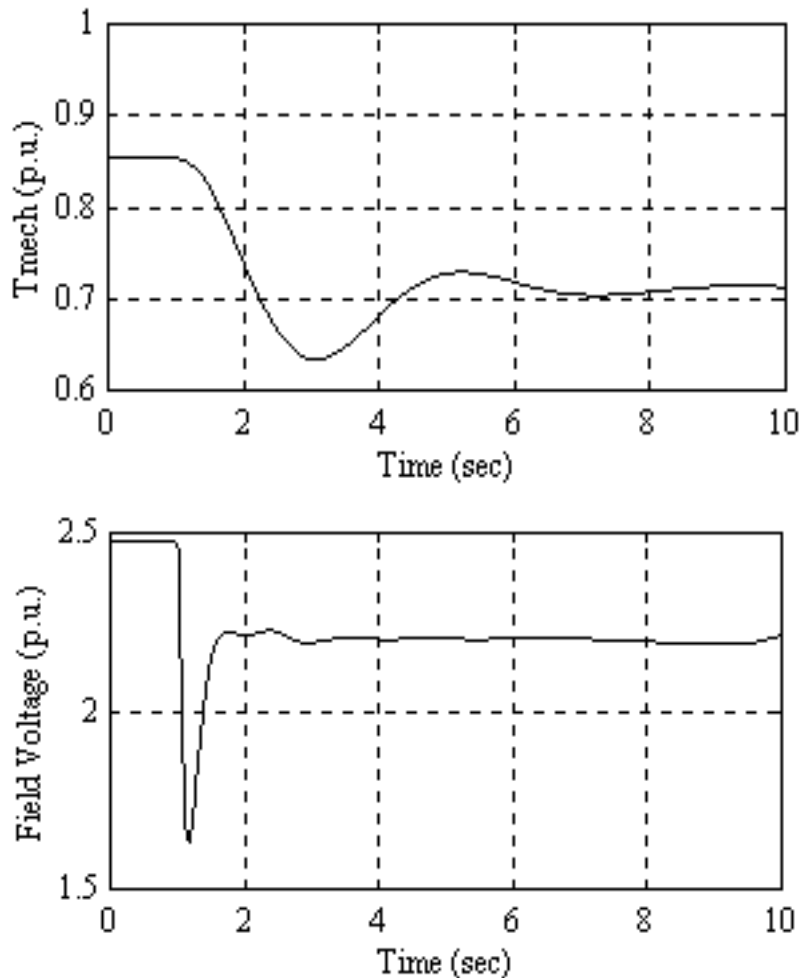
Εικόνα 2.22: Βραχυκύκλωμα ρεύματος πεδίου.





Εικόνα 2.23: Συμπεριφορά σύγχρονης γεννήτριας κατά τη διάρκεια αύξησης φόρτωσης





Εικόνα 2.24: Συμπεριφορά σύγχρονης γεννήτριας κατά τη διάρκεια μείωσης φορτίου

2.4.3 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ

Σήμερα οι μόνιμοι μαγνήτες χρησιμοποιούνται ευρέως για την αντικατάσταση του τυλίγματος διέγερσης στις σύγχρονες μηχανές, κυρίως λόγω της μείωσης της τιμής του μαγνήτη και τη βελτίωση των χαρακτηριστικών των μαγνητικών υλικών. Η ανάπτυξη των μόνιμων μαγνητών είναι πολύ μεγάλη και οι ερευνητές μπορούν να επιλέξουν το καλύτερο υλικό για τις συνθήκες περιβάλλοντος των εφαρμογών. Το παραδοσιακό υλικό είναι ο μαγνήτης σιδηρίτη (Fe), ενώ άλλα υλικά, όπως το Νεοδύμιο, χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα.

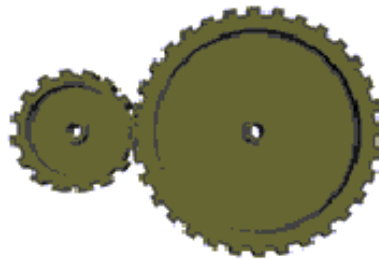
Η διέγερση του μόνιμου μαγνήτη επιτρέπει τη χρήση μικρότερου πολικού βήματος (pole pitch) από ό,τι στις συμβατικές γεννήτριες, έτσι αυτές οι μηχανές μπορούν να σχεδιαστούν για να περιστρέφονται σε εκτιμηθείσα ταχύτητα από 20 έως 200 στροφές ανά λεπτό, κάτι που εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας. Για το λόγο αυτόν, δεδομένης της εξέλιξης των ηλεκτρονικών ισχύος, οι γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη συνδέονται απευθείας με τον ανεμοκινητήρα (χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ (DIRECT DRIVE)

3.1 ΚΙΒΩΤΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Η ισχύς από την περιστροφή του ρότορα της ανεμογεννήτριας μεταφέρεται στη γεννήτρια μέσω της αλληλουχίας ισχύος (power train), δηλαδή μέσω του κυρίου άξονα, του κιβωτίου ταχυτήτων και του άξονα υψηλής ταχύτητας.



Εικόνα 3.1: Κιβώτιο ταχυτήτων μιας ανεμογεννήτριας

Ο λόγος που χρησιμοποιούμε κιβώτιο ταχυτήτων είναι ότι αν χρησιμοποιούσαμε μια συνηθισμένη γεννήτρια απευθείας συνδεδεμένη με τριφασικό δίκτυο 50 Hz AC (εναλλασσόμενο ρεύμα) με δύο, τέσσερις ή έξι πόλους, θα έπρεπε να έχουμε μια εξαιρετικά μεγάλης ταχύτητας τουρμπίνα με αριθμό στροφών ανά λεπτό (rpm) ανάμεσα στο 1.000 και το 3.000. Μια άλλη πιθανότητα είναι η δημιουργία μιας αργοκίνητης γεννήτριας AC με πολλούς πόλους. Αλλά εάν θέλατε να συνδέσετε τη γεννήτρια απευθείας στο δίκτυο, θα καταλήγατε με μια γεννήτρια 200 πόλων (δηλαδή 300 μαγνητών) για να φτάσετε σε μια λογική ταχύτητα περιστροφής των 30 rpm. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι η μάζα (mass) του ρότορα της γεννήτριας πρέπει να είναι περίπου ανάλογη του ποσού της ροπής (λεπτό, ή ισχύς στροφής) που έχει να αντιμετωπίσει. Έτσι, μια γεννήτρια απευθείας καθοδήγησης θα είναι οπωσδήποτε πολύ βαριά (και ακριβή).

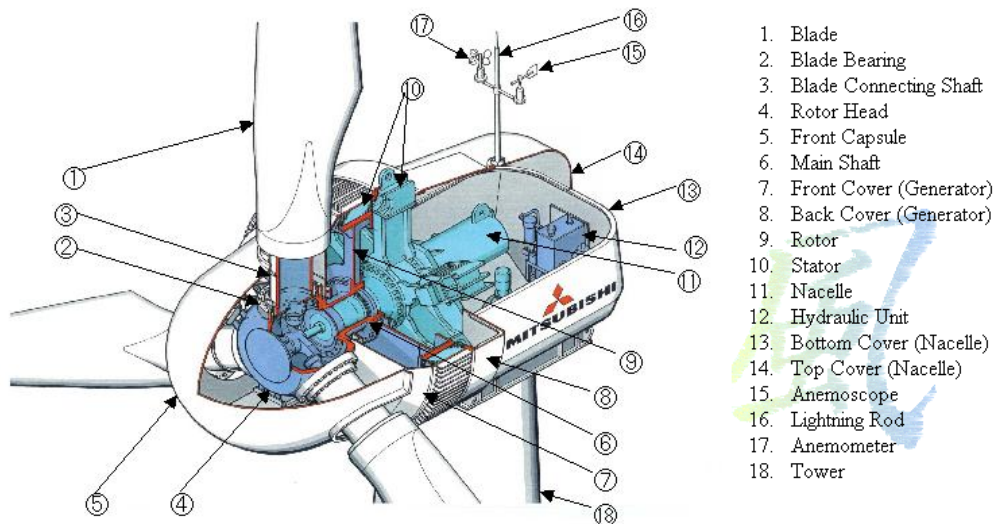
Η πρακτική λύση, η οποία χρησιμοποιείται στην αντίθετη κατεύθυνση σε πολλά βιομηχανικά μηχανήματα, και συνδέει με τις μηχανές αυτοκινήτων, είναι η χρήση ενός κιβωτίου ταχυτήτων. Με ένα κιβώτιο ταχυτήτων μετατρέπει κανείς από αργή περιστροφή, μεγάλη ισχύ ροπής, η οποία λαμβάνεται από το ρότορα της ανεμογεννήτριας, σε υψηλή ταχύτητα, χαμηλή ισχύ ροπής, που χρησιμοποιείται για τη γεννήτρια. Το κιβώτιο ταχυτήτων μιας ανεμογεννήτριας δεν «αλλάζει ταχύτητες». Συνήθως έχει μια μοναδική αναλογία ταχυτήτων ανάμεσα στην περιστροφή του ρότορα και της γεννήτριας. Για μια μηχανή 600 ή 750 kW, η τυπική αναλογία ταχυτήτων είναι περίπου 1 προς 50.

3.1.1 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΧΩΡΙΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ (GEARLESS)

Η βιομηχανία των ανεμογεννητριών παρουσιάζει αυξημένη ζήτηση για αρχές παραγωγής αξιόπιστες και αποτελεσματικές, ειδικά για τα συστήματα απευθείας καθοδήγησης με μεταβλητή ταχύτητα.

Πρόσφατα, τα κιβώτια ταχυτήτων τράβηξαν την προσοχή, λόγω αποτυχιών σε πολλές ανεμογεννήτριες. Αυτό, μαζί με τη σημαντική αντοχή, τη συντήρηση και τη χαμηλή μερική αποδοτικότητα φορτίου (low partial load efficiency) των κιβωτίων ταχυτήτων απαιτούν συστήματα απευθείας καθοδήγησης (direct drive systems). Η λύση της απευθείας καθοδήγησης εξαλείφει τη συντήρηση, που σχετίζεται με το κιβώτιο ταχυτήτων, και είναι δυνατόν να αυξήσει την αξιοπιστία του συστήματος (η λύση της απευθείας καθοδήγησης). Το σύστημα απευθείας καθοδήγησης επίσης παρέχει ένα σύστημα ταχυτήτων πλήρως μεταβλητό. Παρά το γεγονός ότι από τη χρήση του συστήματος απευθείας καθοδήγησης, η πλειοψηφία των ανεμογεννητριών που πωλούνται σήμερα περιλαμβάνουν ακόμα κιβώτιο ταχυτήτων. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο υψηλό κόστος των υπαρχόντων συστημάτων απευθείας καθοδήγησης. Ένα σύστημα απευθείας καθοδήγησης που χρησιμοποιούν σύγχρονη μηχανή ελικοειδούς ρότορα είναι ουσιαστικά πιο ακριβό από το σύστημα ταχυτήτων.

Αν αναλυθεί το κόστος της ανεμογεννήτριας απευθείας καθοδήγησης, φαίνεται ότι η γεννήτρια αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό μέρος του κόστους της ανεμογεννήτριας. Για παράδειγμα, μια σύγχρονη γεννήτρια ελικοειδούς ρότορα εκτιμηθείσας ισχύος 1.5 MW αντιπροσωπεύει το 36% του συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας. Όμως, υπάρχει δυνατότητα για διαφορετικές διαμορφώσεις της μηχανής, οι οποίες θα καταλήξουν σε μικρότερο κόστος της γεννήτριας. Μια ενδιαφέρουσα κατεύθυνση είναι η αντικατάσταση των ελικοειδών του ρότορα στη σύγχρονη γεννήτρια από μόνιμους μαγνήτες. Η μάζα της γεννήτριας (mass) μόνιμων μαγνητών ακτινωτής ροής (radial-flux) μπορεί να είναι 2 φορές μικρότερη από αυτήν μιας σύγχρονης γεννήτριας ελικοειδούς ρότορα με ίδια διάμετρο. Τα κόστη μειώνονται επίσης ουσιαστικά.



Εικόνα 3.2: Δομή ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων

	Variable speed gearless wind turbine	Typical wind turbine
Generator type	Permanent Magnet Synchronous Generator	Induction Generator
Scale equal	Variable	Height equal to 2x equal
System efficiency		
Power fluctuation		

Εικόνα 3.3: Σύγκριση ανάμεσα σε Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας και μία τυπική ανεμογεννήτρια

3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η ιδέα της απευθείας καθοδήγησης με γεννήτριες αργής περιστροφής δεν είναι καινούργια: έχουν χρησιμοποιηθεί σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς από την αρχή αυτού του αιώνα. Όμως, ο σχεδιασμός των γεννητριών απευθείας καθοδήγησης για τις ανεμογεννήτριες έχει συγκεκριμένα προβλήματα, που σχετίζονται με την εφαρμογή τους στις ανεμογεννήτριες. Για παράδειγμα, σε έναν υδροηλεκτρικό σταθμό, το βάρος μιας τέτοιας γεννήτριας δεν είναι τόσο σημαντικό, ενώ στην ανεμογεννήτρια είναι κρίσιμο. Αυτή τη στιγμή υπάρχει μια διευρυνόμενη αγορά ανεμογεννητριών απευθείας καθοδήγησης. Παρ’ όλα αυτά, η έρευνα πάνω στα συστήματα απευθείας καθοδήγησης πρέπει σε γενικές γραμμές να επικεντρωθεί στα παρακάτω ζητήματα:

- Επειδή το βάρος είναι πολύ σημαντικός παράγοντας, αυτή τη στιγμή δεν είναι ξεκάθαρο ποιος τύπος μηχανής είναι ο πιο κατάλληλος (σύγχρονη, μόνιμου μαγνήτη, μεταβλητής αντίστασης κ.λ.π.).
- Η επιλογή του μετατροπέα ισχύος για τη σύνδεση με το δίκτυο επηρεάζει την αποτελεσματικότητα και το μέγεθος της γεννήτριας.
- Οι μηχανές μόνιμου μαγνήτη φαίνονται ελκυστικές εξαιτίας της αυξημένης αποτελεσματικότητας και της πυκνότητας ροπής. Σημαντικά θέματα σχεδιασμού μιας τέτοιας γεννήτριας είναι:

- α) Η επιλογή του τύπου του μαγνήτη,
- β) Πώς και πότε να μαγνητιστούν οι μαγνήτες
- γ) Η πρόληψη απομαγνητισμού σε συνθήκες λειτουργίας και βλάβης.

Τέλος, τα κύρια κριτήρια για το σχεδιασμό της δομής της γεννήτριας για το σύστημα απευθείας καθοδήγησης είναι:

- Πυκνότητα ροής (kNm/m³)
- Κόστος / ροπή (€/kNm)

3.2.1 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΟΠΗΣ

Σήμερα, οι γεννήτριες με άμεση κίνηση έχουν μεγάλες διαμέτρους, εξ' αιτίας της μεταφοράς και των προβλημάτων εγκατάστασης. Επίσης, το περίβλημα της ανεμογεννήτριας πρέπει να σχεδιαστεί από την αρχή. Οι γεννήτριες με άμεση κίνηση μπορούν να δημιουργηθούν με τις χαμηλότερες διαμέτρους. Εντούτοις, αυτό αυξάνει το μήκος τους ουσιαστικά στις δυνάμεις πάνω από 1 MW. Η πυκνότητα ισχύος γίνεται ένα πολύ σημαντικό κριτήριο.

Είναι δυνατό να αυξηθεί η πυκνότητα ισχύος μιας δεδομένης μηχανής, μόνο με την αύξηση της περιστροφικής ταχύτητάς της. Επομένως, δεν είναι δυνατό να συγκριθούν οι μηχανές που έχουν διαφορετικές περιστροφικές ταχύτητες, με τη χρησιμοποίηση της πυκνότητας ισχύος. Η πυκνότητα ροής επιλέγεται, επειδή είναι ανεξάρτητη από την επιλογή οποιασδήποτε περιστροφικής ταχύτητας. Ορίζεται ως:

$$T_d = \frac{T}{\left(\frac{\pi \cdot d_o^2}{4}\right) \cdot L_a} \quad (3.1)$$

όπου T είναι η ονομαστική ροπή της μηχανής σε kNm, T_d είναι η πυκνότητα ροής σε kNm/m³, d_o είναι η εξωτερική διάμετρος του στάτη και L_a είναι το αξονικό μήκος της μηχανής (ενεργό μήκος που προκαλεί τυλιγμάτα μόνο στο τέλος των στατών).

3.2.2 ΚΟΣΤΟΣ/ΡΟΠΗ

Το κόστος των γεννητριών είναι κρίσιμο για την αποδοχή της άμεσης κίνησης στην αγορά. Για μια δεδομένη δύναμη, η τοπολογία που επιλέγεται πρέπει να ελαχιστοποιήσει το κόστος του ενεργού υλικού. Η παραγωγή περισσότερης ροπής απαιτεί το πρόσθετο πάχος των μαγνητών, πρόσθετο υλικό διεύθυνσης, και πρόσθετο σίδηρο, τα οποία οδηγούν σε αύξηση του κόστους. Μια εκτίμηση του κόστους μπορεί να γίνει από τρεις υποθέσεις:

- Μόνο το ενεργό υλικό υπολογίζεται στις δαπάνες. Το κόστος παραγωγής και οι δαπάνες για το ανενεργό υλικό δεν συμπεριλαμβάνονται.
- Οι μαγνήτες σιδήρου, χαλκού και σιδηρίτη έχουν συγκεκριμένο κόστος: 6€/kg
- Οι μαγνήτες σπάνιας γης έχουν συγκεκριμένες δαπάνες: 40€/kg.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΤΑΘΕΡΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Γενικά, υπάρχουν δύο αρχές διασύνδεσης των ανεμογεννητριών. Η άμεση σύνδεση στο δίκτυο και η έμμεση σύνδεση μέσω μετατροπέων ισχύος. Η άμεση σύνδεση είναι παλαιά και πολύ απλή, με το ρότορα να γυρίζει με σταθερή ταχύτητα. Η γεννήτρια σε αυτή την περίπτωση είναι μια απλή μηχανή επαγωγής εναλλασσόμενου ρεύματος, με ρότορα βραχυκυκλωμένου κλωβού, συνδεδεμένη άμεσα (ή μέσω του μετασχηματιστή), στο δίκτυο. Ο τρόπος λειτουργίας της γεννήτριας αρχίζει όταν η ταχύτητα του ρότορα είναι υψηλότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα.

Το πλεονέκτημα μίας τέτοιας κατασκευής είναι ότι είναι πολύ απλή. Το ηλεκτρονικό μέρος είναι μόνο ένα κύκλωμα θυρίστορ αποκαλούμενο μαλακός-εκκινήτης (soft starter), ο οποίος χρησιμοποιείται για τη μείωση του ρεύματος εκκίνησης κατά τη διάρκεια έναρξης της διαδικασίας. Η ανεμογεννήτρια μπορεί να παράγει ισχύ, μόνο εάν ο αέρας είναι αρκετά ισχυρός και η ταχύτητα του ρότορα είναι υψηλότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα.

Ο έλεγχος της παραχθείσας ισχύος, οφείλεται μόνο στο μηχανικό έλεγχο των πτερυγώσεων. Όταν ο αέρας είναι ισχυρότερος από την δεδομένη τιμή (περίπου 12m/s), ο έλεγχος θα οδηγήσει τα πτερύγια του ρότορα σε θέση που μόνο ένα μέρος της ενέργειας του αέρα "πιάνεται".

Συνεπώς, ο μηχανικός έλεγχος είναι αργός, με τις συνθήκες υπερφόρτωσης να είναι πολύ συχνές και μεγάλες, με αποτέλεσμα να παράγεται μηχανική πίεση και δονήσεις στον πύργο. Για τις μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες, 1.5 MW ή περισσότερο, με τη διάμετρο του ρότορα άνω των 70m, το κόστος για ισχυρότερους πύργους είναι πολύ υψηλό, συγκρίνοντας με τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.

Το πλεονέκτημα της έμμεσης σύνδεσης, είναι ότι είναι δυνατό να λειτουργήσει η ανεμογεννήτρια με μεταβλητή ταχύτητα. Το αρχικό πλεονέκτημα είναι ότι η ριπή του αέρα μπορεί να επιτραπεί για να καταστήσει τη στροφή του ρότορα γρηγορότερη, κατά συνέπεια αποθηκεύοντας μέρος της υπερβολικής ενέργειας σαν περιστροφική ενέργεια έως ότου τελειώσει η ριπή του ανέμου. Προφανώς, αυτό απαιτεί μια ευφυή στρατηγική έλεγχου, δεδομένου ότι πρέπει να είμαστε σε θέση να διαφοροποιήσουμε μεταξύ της ριπής του ανέμου και της ταχύτητας υψηλότερου αέρα γενικά. Κατά συνέπεια είναι δυνατό να μειωθεί η μέγιστη ροπή (μειώνοντας την ένδυση στο κιβώτιο ταχυτήτων και τη γεννήτρια), και μπορούμε επίσης να μειώσουμε τα φορτία των πτερυγίων, πύργων και στροφών.

Το δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι με τα ηλεκτρονικά ισχύος μπορεί να ελεγχθεί η άεργος ισχύς, ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος στο ηλεκτρικό

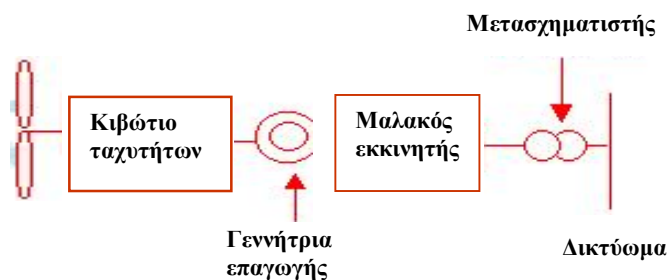
δίκτυο. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο, ιδιαίτερα εάν μία ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε ένα αδύνατο ηλεκτρικό δίκτυο. Θεωρητικά, η μεταβλητή ταχύτητα μπορεί επίσης να δώσει ένα μικρό πλεονέκτημα από την άποψη της ετήσιας παραγωγής, δεδομένου ότι είναι δυνατό να λειτουργήσει η μηχανή με μια βέλτιστη περιστροφική ταχύτητα, ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα. Από οικονομική άποψη το πλεονέκτημα αυτό είναι τόσο μικρό και δεν αξίζει να αναφερθεί.

Το βασικό μειονέκτημα της έμμεσης σύνδεσης δικτύου ήταν αρχικά το υψηλό κόστος. Η ανεμογεννήτρια χρειάζεται διορθωτή και δύο αναστροφείς, ένας για να ελέγξει το ρεύμα των στατών, και ο άλλος για να παράγει το ρεύμα εξόδου. Προς το παρόν, φαίνεται ότι το κόστος των ηλεκτρονικών ισχύος μειώνεται, με τάση να ξεπεραστεί από τα κέρδη στην οικοδόμηση των ελαφρύτερων στροβίλων. Επίσης τα ποσοστά διαθεσιμότητας λόγω αποτυχιών των ηλεκτρονικών ισχύος, φαίνονται να είναι σχεδόν ίδια σε σύγκριση με τις συμβατικές μηχανές.

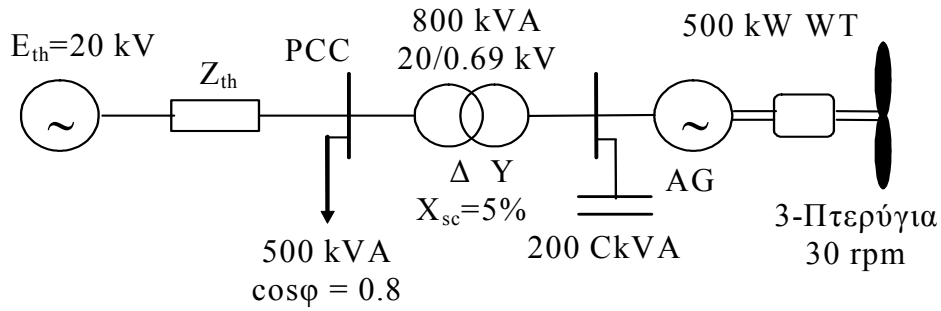
Άλλα μειονεκτήματα είναι η ενέργεια που χάνεται στη διαδικασία μετατροπής από εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές ρεύμα και ξανά εναλλασσόμενο, και το γεγονός ότι τα ηλεκτρονικά ισχύος μπορούν να εισάγουν ανεπιθύμητες αρμονικές στο εναλλασσόμενο ρεύμα εξόδου στο δίκτυο, μειώνοντας κατά συνέπεια την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος. Το πρόβλημα των αρμονικών (πολλαπλασία της συχνότητας εξόδου - 50Hz) προκύπτει, επειδή η διαδικασία φιλτραρίσματος του ρεύματος εξόδου δεν είναι τέλεια.

4.2 ΑΜΕΣΗ ΣΥΖΕΥΞΗ - ΣΤΑΘΕΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Οι βασικές αρχές της λειτουργίας περιγράφονται στο κεφάλαιο 2 όπου η λειτουργία της επαγωγής και των σύγχρονων γεννητριών έχει αναλυθεί. Ένα σχηματικό διάγραμμα μιας τέτοιας σύζευξης παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1.



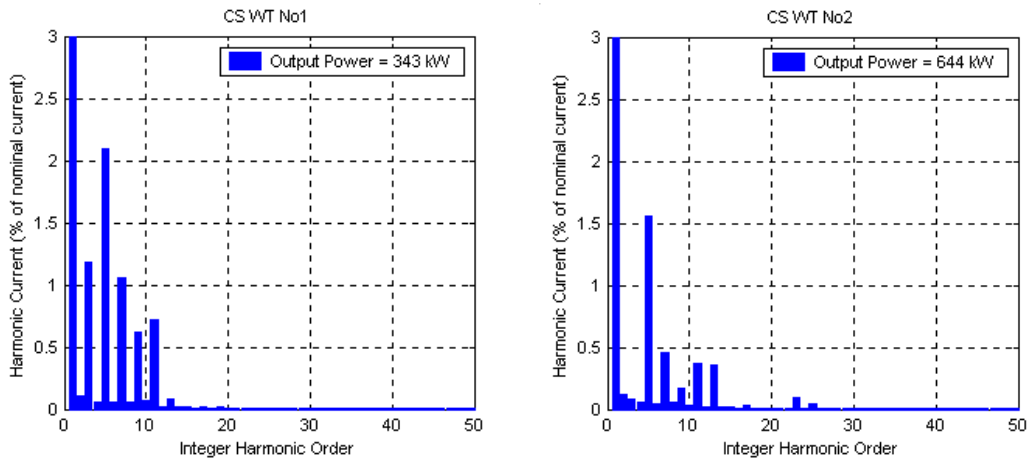
Σχήμα 4.1: Σχηματικό διάγραμμα ενός σταθερού συστήματος ταχύτητας



Σχήμα 4.2: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός σταθερού συστήματος ταχύτητας

Ο μαλακός εκκινητής είναι μια διάταξη θυρίστορ για την αποβολή των ρευμάτων πλεονάσματος κατά τη διάρκεια των διαδικασιών του ξεκινήματος. Οι τρεις φάσεις της γεννήτριας, συνδέονται άμεσα με την πλευρά χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή. Με αυτήν την μέθοδο συζεύξης το αρμονικό περιεχόμενο των ρευμάτων είναι χαμηλό και περιέχει τις συχνότητες αρμονικών κυρίως μέχρι την 5^η τάξη.

Στο σχήμα 4.3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων για δύο ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας, στο αιολικό πάρκο του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ).

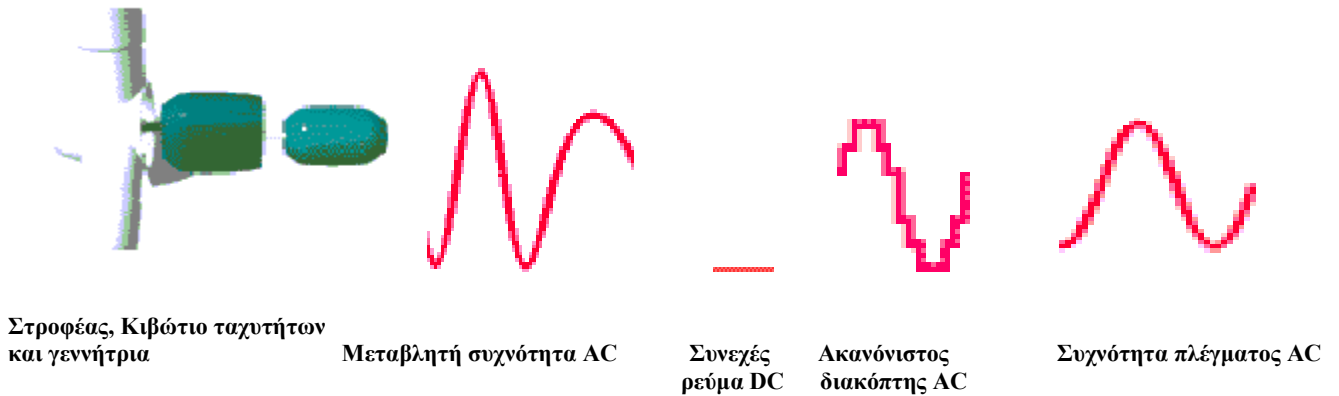


Σχήμα 4.3: Φάση-1 αρμονικό εύρος ακέραιων αριθμών για σταθερή ταχύτητα.

4.3 ΣΥΖΕΥΞΗ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΣ

4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έννοια της έμμεσης σύζευξης είναι σχηματικά διευκρινισμένη στο σχήμα 4.4



Σχήμα 4.4: Σύζευξη Ανεμογεννητριών μέσω Μετατροπέα Ισχύος

Με την έμμεση σύνδεση δικτύου, η ανεμογεννήτρια λειτουργεί από μόνη της, διαχωρίζοντας τις χαμηλές συχνότητες εναλλασσόμενου ρεύματος του δικτύου, όπως διευκρινίζεται στο γράφημα. Αυτό το δικτύωμα ελέγχεται ηλεκτρονικά (χρησιμοποιώντας αναστροφέα), έτσι ώστε η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος στο στάτη της γεννήτριας να μπορεί να μεταβληθεί. Κατ' αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να λειτουργήσει ο ανεμοκινητήρας με τη μεταβλητή περιστροφική ταχύτητα και κατά συνέπεια θα παράγει το εναλλασσόμενο ρεύμα ακριβώς στη μεταβλητή συχνότητα που εφαρμόζεται στο στάτη. Η γεννήτρια μπορεί να είναι είτε μια σύγχρονη γεννήτρια είτε μια ασύγχρονη γεννήτρια, και ο ανεμοκινητήρας μπορεί να έχει ένα κιβώτιο ταχυτήτων, όπως στην εικόνα ανωτέρω, ή να λειτουργήσει χωρίς ένα κιβώτιο ταχυτήτων εάν η γεννήτρια έχει πολλούς πόλους, όπως έχει ήδη εξηγηθεί.

Το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο δεν μπορεί να χειριστεί το ρεύμα εναλλασσόμενου ρεύματος με μια μεταβλητή συχνότητα. Επομένως αρχίζουμε με την αποκατάσταση του, με άλλα λόγια, το μετατρέπουμε σε συνεχές ρεύμα, DC. Η μετατροπή από το μεταβλητό εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας στο συνεχές ρεύμα μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας θυρίστορ ή τις μεγάλες κρυσταλλολυχνίες ισχύος (τρανζίστορ). Μετατρέπουμε έπειτα το (κυμαινόμενο) άμεσο ρεύμα σε εναλλασσόμενο ρεύμα (χρησιμοποιώντας αναστροφέα) με ακριβώς την ίδια συχνότητα με το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτή η μετατροπή στο εναλλασσόμενο ρεύμα στον αναστροφέα μπορεί επίσης να γίνει χρησιμοποιώντας είτε θυρίστορ είτε τις κρυσταλλολυχνίες. Τα θυρίστορ ή οι κρυσταλλολυχνίες ισχύος είναι μεγάλοι διακόπτες ημιαγωγών που λειτουργούν χωρίς μηχανικά μέρη. Το είδος εναλλασσόμενου ρεύματος που παίρνει από έναν αναστροφέα φαίνεται αρκετά περίεργο εκ πρώτης όψεως - τίποτα δεν ακολουθεί την ομαλή ημιτονοειδή καμπύλη που γνωρίζουμε κατά τη μελέτη του εναλλασσόμενου ρεύματος. Αντ' αυτού, παίρνουμε μια σειρά ξαφνικών αλμάτων

στην τάση και στο ρεύμα, όπως είδαμε στο παραπάνω σχήμα. Τα ορθογώνια διαμορφωμένα κύματα μπορούν να λειανθούν, εντούτοις, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες αυτεπαγωγές και τους πυκνωτές, σε έναν αποκαλούμενο μηχανισμό φίλτρων εναλλασσόμενου ρεύματος. Η κάπως οδοντωτή εμφάνιση της τάσης δεν εξαφανίζεται εντελώς, εντούτοις, με συνέπεια την εκπομπή των αρμονικών ρευμάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο.

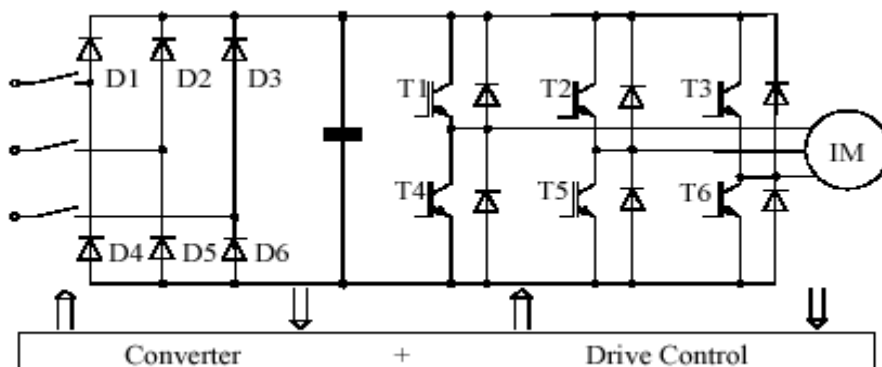
4.3.1 ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΙΣ

Η κατηγορία μετατροπέων που μετατρέπει τη συνεχή ισχύ σε ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος ορίζεται ως αναστροφείς, και γενικά υπάρχουν δύο τύποι αναστροφέων:

- αναστροφείς πηγής τάσης
- αναστροφείς συγκεκριμένης πηγής.

Ένας αναστροφέας πηγής τάσης, χαρακτηρίζεται από έναν δύοκαμπτο ανεφοδιασμό συνεχούς τάσης στην εισαγωγή όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5, όπου η τράπεζα πυκνωτών στη συνεχή πλευρά εξασφαλίζει τη σταθερή τάση. Στον αναστροφέα πηγής τάσης, οι συσκευές ημιαγωγών ισχύος παραμένουν πάντα προς τα εμπρός προκατειλημμένες λόγω της τάσης συνεχούς ανεφοδιασμού, και επομένως κάποιος τύπος αναγκασμένης μετατροπής είναι υποχρεωτικός όταν χρησιμοποιούμε θυρίστορ. Εναλλακτικά, η μόνη μετατροπή είναι δυνατή κατά τη χρησιμοποίηση GTOs, κρυσταλλολυχνιών ισχύος, IGBTs κ.λπ....

Η βασική κίνηση με τον αναστροφέα πηγής τάσης και squirrel cage induction machine μπορεί να διαιρεθεί στο μετατροπέα ισχύος, που αποτελείται από το δευτερεύοντα αναστροφέα μηχανών, στο πυκνωτή συνεχών λεωφορείων, στο δευτερεύον διορθωτή διόδων κεντρικών αγωγών και στον έλεγχο για το μετατροπέα και την κίνηση ισχύος.

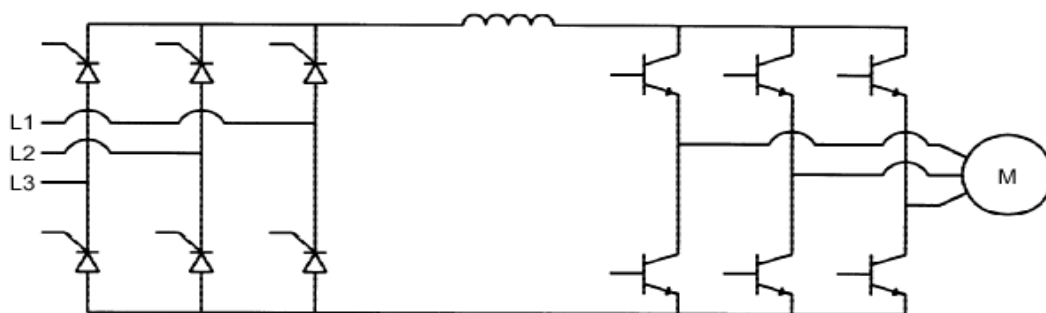


Σχήμα 4.5: Μεταβλητή κίνηση εναλλασσόμενου ρεύματος ταχύτητας με τη μηχανή επαγωγής και τον αναστροφέα πηγής τάσης

Οι μορφές κυμάτων τάσης παραγωγής αναστροφέων, καθορίζονται από το σχέδιο διαμόρφωσης και μετατροπής κυκλωμάτων, αλλά δεν επηρεάζονται από την θέση

των φορτίων. Η γραμμή της τάσης κυμάτωσης, έχει ένα χαρακτηριστικό με την παρουσία περιέργων αρμονικών.

Ένας τρέχων αναστροφέας πηγής επιθυμεί να δει μια δύσκαμπτη συνεχή τρέχουσα πηγή στην εισαγωγή, η οποία είναι σε αντίθεση με τη δύσκαμπτη πηγή τάσης επιθυμητή σε έναν αναστροφή πηγής τάσης. Μια μεταβλητή πηγή τάσης μπορεί να μετατραπεί σε μια μεταβλητή τρέχουσα πηγή με τη σύνδεση μιας αυτεπαγωγής σε σειρά, και έχει τον έλεγχο της τάσης μέσα σε έναν τρέχοντα βρόχο ελέγχου. Με μια δύσκαμπτη τρέχουσα πηγή, τα κύματα ρευμάτων παραγωγής δεν επηρεάζονται από το φορτίο. Ένα γενικό κύκλωμα ισχύος για έναν τρέχοντα αναστροφή πηγής, που παρέχεται από έναν ελεγχόμενο διορθωτή που εκτελεί σε φάσεις, παρουσιάζεται στο σχήμα 4.6.



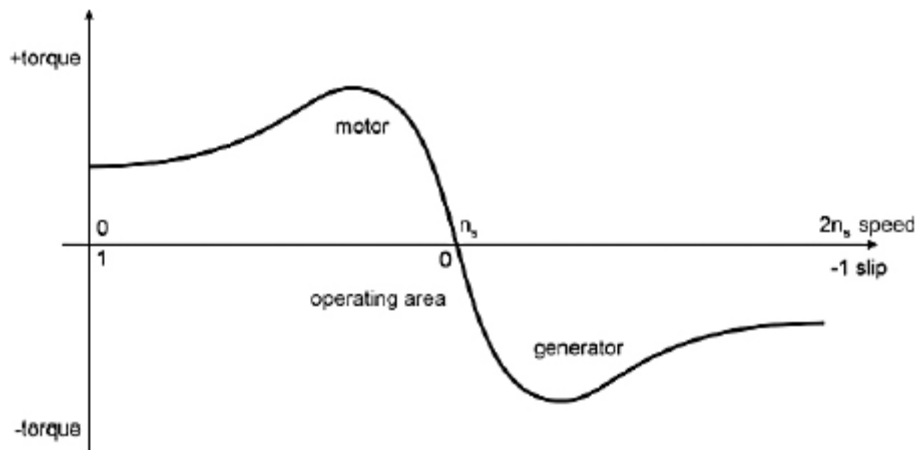
Σχήμα 4.6: Τρέχων αναστροφέας πηγής με έναν ελεγχόμενο εκτελούμενο σε φάσεις, διορθωτή γεφυρών

Τροφοδοσία ρεύματος εναντίον τροφοδοσίας τάσης μετατροπέων

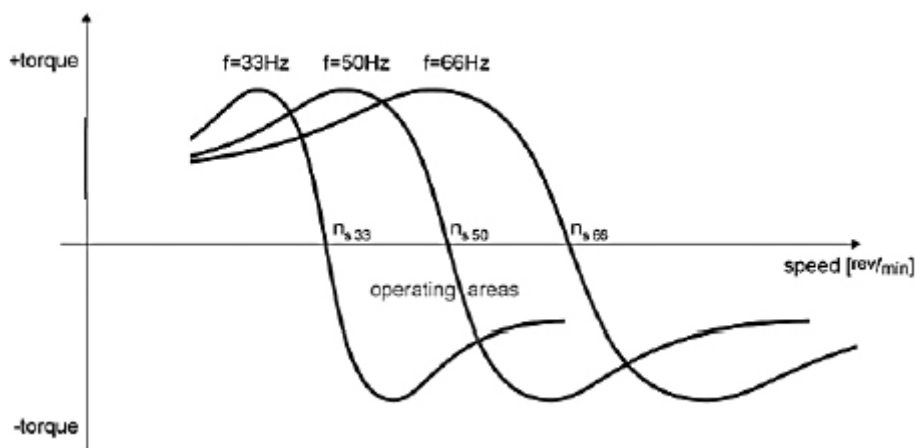
- Ο τρέχων αναστροφέας πηγής έχει την έμφυτη ικανότητα λειτουργίας και στα τέσσερα τεταρτημόρια και δεν απαιτεί κανένα πρόσθετο τμήμα κυκλωμάτων ισχύος. Από την άλλη πλευρά, η τροφοδοσία τάσης μετατροπέων, απαιτεί ένα γραμμικό εναλλασσόμενο αναστροφή συνδεδεμένο αντίστροφα παράλληλα με το διορθωτή για την αναγέννηση.
- Ένας τρέχων αναστροφέας πηγής είναι πιο τραχύς και αξιόπιστος. Ένα στιγμιαίο βραχυκύκλωμα στο φορτίο και ένα λάθος έναυσης στα θυρίστορ είναι αποδεκτό.
- Οι τρέχοντες αναστροφείς πηγής έχουν μια αργόστροφη δυναμική απόδοση έναντι των αναστροφέων πηγής τάσης. Αφ' ετέρου, τα προβλήματα σταθερότητας είναι ελάχιστα στους αναστροφείς πηγής τάσης, και συχνά τα συστήματα κίνησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον ανοικτό βρόχο. Ο έλεγχος των συστημάτων κίνησης θα συζητηθεί αργότερα.
- Η επιτυχής λειτουργία των τρεχόντων αναστροφέων πηγής, απαιτεί ότι ένα ελάχιστο φορτίο πρέπει πάντα να παραμένει συνδεδεμένο.

4.3.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Το σχήμα 4.7 παρουσιάζει τη ροπή εναντίον των χαρακτηριστικών ταχύτητας για μια σταθερή συχνότητα ανεφοδιασμού τάσης. Εάν η συχνότητα ανεφοδιασμού είναι χαμηλότερη, ή υψηλότερη, θα παρουσιάσουμε την οικογένεια των χαρακτηριστικών, στο σχήμα 4.8. Μπορούμε να δούμε ότι ο τρόπος λειτουργίας των γεννητριών είναι δυνατόν να επιτύχει με τις διαφορετικές ταχύτητες στροφέων, εάν αλλάξει η συχνότητα ανεφοδιασμού. Με τις προόδους στα τμήματα ηλεκτρονικών ισχύων, τέτοιες σύνθετες λύσεις έγιναν πραγματικότητα, με αποδοτικό κόστος, εκμετάλλευση και αξιοπιστία.



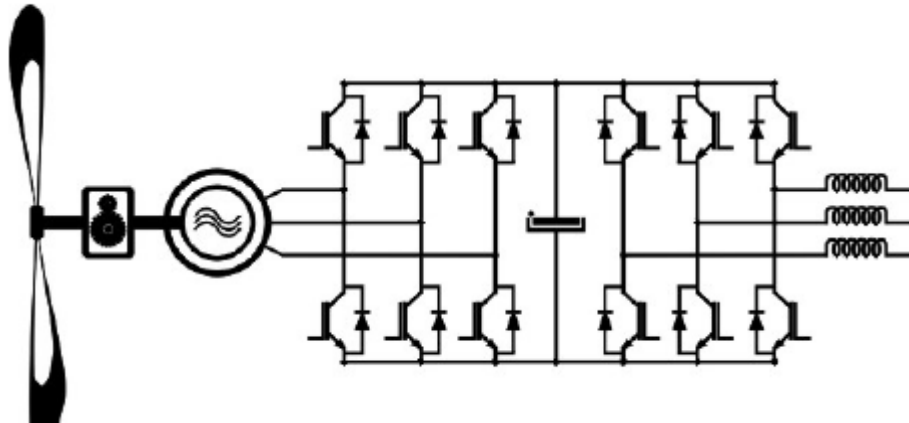
Σχήμα 4.7: Ροπή εναντίον ταχύτητας, (ολίσθηση)



Σχήμα 4.8: Ροπή εναντίον της ταχύτητας με την πλήρη γραμμή δευτερεύοντα μετατροπέα και το δευτερεύοντα μετατροπέα γεννητριών

Για τις μεταβλητές ανεμογεννήτριες ταχύτητας, αρκετά ηλεκτρονικά κυκλώματα ισχύος είναι σε χρήση, με επαγωγή ή σύγχρονη μηχανή, που χρησιμοποιείται ως γεννήτρια. Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα κυκλώματα είναι:

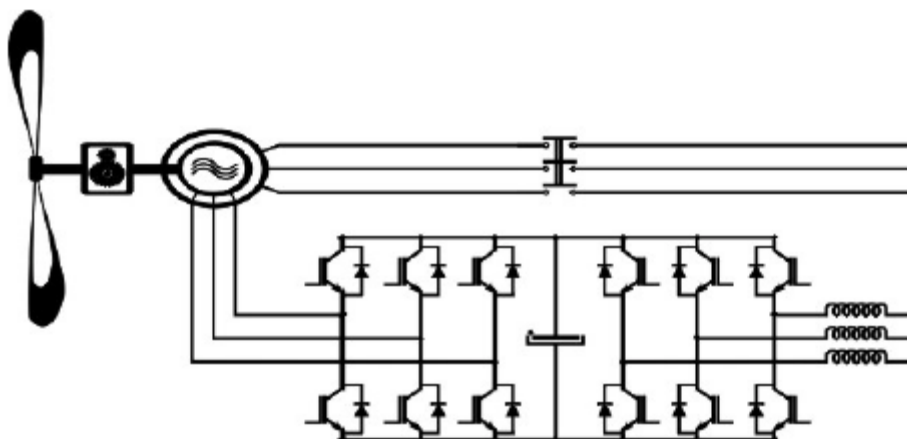
Απλή επαγωγή, μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού



Σχήμα 4.9: 4-Q επαγωγικής κίνησης εναλλασσόμενου ρεύματος μηχανή / γεννήτρια με τον πλήρη γραμμικό δευτερεύοντα μετατροπέα και το δευτερεύοντα αναστροφέα μηχανών, και οι δύο για την πλήρη παραγόμενη ισχύ.

Απλή επαγωγή, μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού

Αντί της σπατάλης της ισχύς ολίσθησης στην αντίσταση κυκλωμάτων στροφών, μπορεί να μετατραπεί σε 50Hz ac και να παρασχεθεί στη γραμμή όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10. Το σύστημα κίνησης είναι όχι μόνο αποδοτικό, αλλά η εκτίμηση ισχύς των μετατροπέων είναι χαμηλή επειδή πρέπει να χειριστεί μόνο τη ισχύ ολίσθησης. Αυτή η εκτίμηση ισχύος γίνεται χαμηλότερη για μια περιορισμένη σειρά ταχύτητας κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα. Τα πρόσθετα πλεονεκτήματα είναι ότι το κύκλωμα ελέγχου είναι απλό, η μέγιστη ισχύ είναι 120-130% της ισχύος γεννητριών, και ο αντιδραστικός έλεγχος ισχύος.

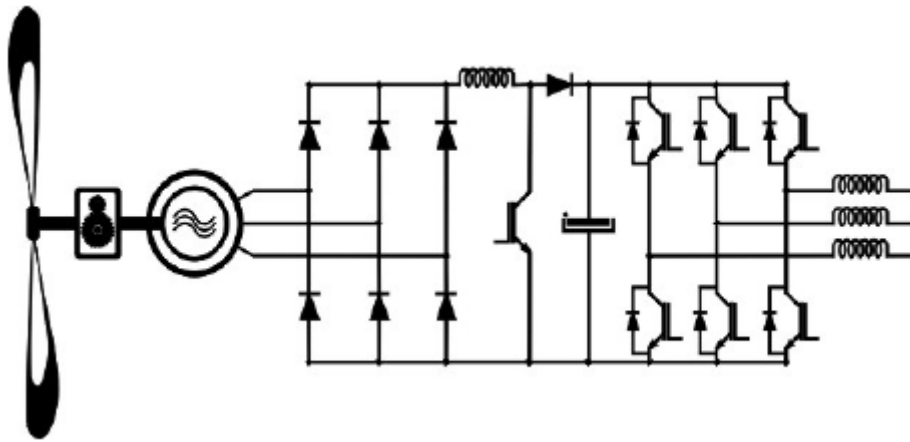


Σχήμα 4.10: Έλεγχος ταχύτητας από την αποκατάσταση ολίσθησης

Σύγχρονη γεννήτρια

Όταν η σύγχρονη γεννήτρια είναι σε χρήση, δεν υπάρχει καμία ανάγκη για τον αναστροφέα από την πλευρά γεννητριών · ο απλός διορθωτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Η σύγχρονη γεννήτρια έχει χωριστή διέγερση και καμία αντιδραστική παροχή ηλεκτρικού ρεύματος δεν απαιτείται. Αυτό είναι το κύριο

μειονέκτημα των μεταβλητών σχεδίων ταχύτητας μηχανών επαγωγής. Αφ' ετέρου, αυτό το σχέδιο προκαλεί υψηλές αρμονικές τρέχουσες και αρμονικές ροπές και δεν επιτρέπει τη ροή ισχύος και στις δύο κατευθύνσεις.

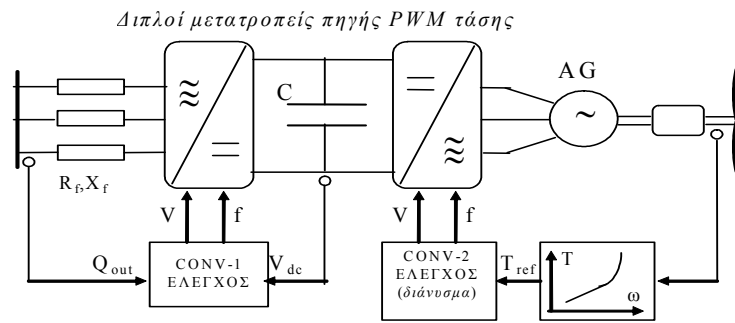


Σχήμα 4.11: Σύγχρονη μηχανή / γεννήτρια με μετατροπή ισχύος

4.3.3 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Μια περίπτωση μελέτης 500 kW, με τρία πτερύγια στο στροφέα, διαμέτρου $D=38\text{m}$ εξετάζεται, συνδεδεμένη με έναν άπειρο ζυγό, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12. Ο άξονας του στροφέα συνδέεται με τον άξονα της γεννήτριας μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων, αναλογίας 1:47. Η δυναμική της πλήρης ανεμογεννήτριας, διαμορφώνεται μέσω των προσεγγίσεων ακτίνων για όλα τα τμήματα μηχανών (πτερύγια, σειρές κίνησης και πύργος) Όλες οι δυναμικές συζεύξεις μεταξύ του πύργου και των σειρών κίνησης, όπως και οι συζεύξεις μεταξύ σειρών κίνησης και πτερυγίων στροφέων συμπεριλαμβάνονται ρητά. Έτσι οι διενεργηθείσες προσομοιώσεις, μπορούν να θεωρηθούν ως καλές προσεγγίσεις της πραγματικότητας. Η διακοπή της ανάλυσης συχνοτήτων, από το πλήρες δυναμικό σύστημα της ανεμογεννήτριας, έδωσε μια ροπή αξόνων φυσικής συχνότητας 1.1 Hz, που αντιστοιχεί σε μια αξία δύο φορές η μέγιστη περιστροφική συχνότητα του ρότορα.

Το ηλεκτρικό μέρος της ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει μια γεννήτρια επαγωγής, συνδεδεμένη με το δίκτυο μέσω AC/DC/AC μετατροπέα ηλεκτρονικής ισχύος (βλ. σχήμα 4.12), προκειμένου να επιτευχθεί μια μεταβλητή λειτουργία ταχύτητας.



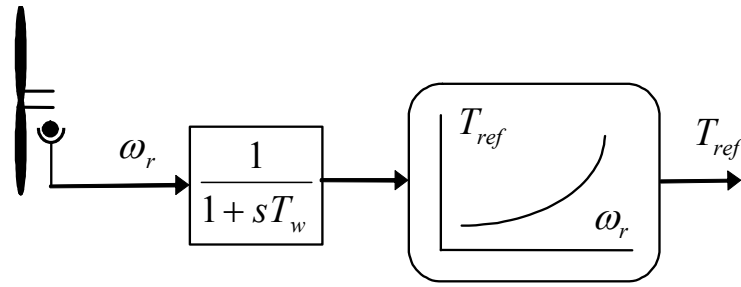
Σχήμα 4.12: AC/DC/AC μετατροπέας διεπαφής για μεταβλητή λειτουργία της ταχύτητας της ανεμογεννήτριας

Ο AC/DC/AC μετατροπέας περιλαμβάνει έναν διπλό PWM μετατροπέα πηγής τάσης ροής. Ο δευτερεύων μετατροπέας της γεννήτριας είναι διανυσματικά ελεγχόμενος, η ροπή αναφοράς εισόδου καθορίζεται από το χαρακτηριστικό ροπής - ταχύτητας του σχήματος 4.14, όπως θα εξηγηθεί. Το πλευρικό δίκτυο συστήματος ελέγχου των μετατροπέων ρυθμίζει τη συνεχή τάση στην τιμή αναφοράς του και ελέγχει την αντιδραστική δύναμη παραγωγής της ανεμογεννήτριας σε μια καθορισμένη τιμή, σε αυτήν την μελέτη που θεωρείται μηδέν (συντονισμός του παράγοντα ισχύος).

Η στρατηγική μεταβλητής ταχύτητας

Αντίθετα από τις συμβατικές σταθερές ανεμογεννήτριες ταχύτητας, όπου η ταχύτητα των στροφών καθορίζεται ουσιαστικά λόγω της άμεσης σύνδεσης της ηλεκτρικής γεννήτριας στο δίκτυο, στην περίπτωση των μεταβλητών ανεμογεννητριών ταχύτητας η ταχύτητά τους ποικίλλει μέσα σε ένα σχετικά ευρύ φάσμα, ανάλογα με τις συνθήκες του αέρα. Η στρατηγική που εφαρμόζεται στο σύστημα ελέγχου αναφέρεται ως *στρατηγική ελέγχου ροπής*. Μέχρι μια ορισμένη περιστροφική ταχύτητα, που είναι κοντά στην ονομαστική τιμή, η ροπή στόχων καθορίζεται για να δώσει έναν μέγιστο συντελεστή ισχύος. Καθώς η ονομαστική περιστροφική ταχύτητα προσεγγίζεται, η ροπή στόχων ποικίλλει ώστε να επιτευχθεί μια ομαλή μετάβαση στη μέγιστη ροπή. Το πλήρες σύνολο εξισώσεων για τη γεννήτρια έχει εφαρμοστεί σε μια ρουτίνα, η οποία ενσωματώθηκε έπειτα σε ένα αεροελαστικό πρότυπο χρόνων - περιοχών. Το μηχανικό και ηλεκτρικό σύνολο των εξισώσεων για την κίνηση σειρών λύνεται αμφίδρομα κάθε φορά.

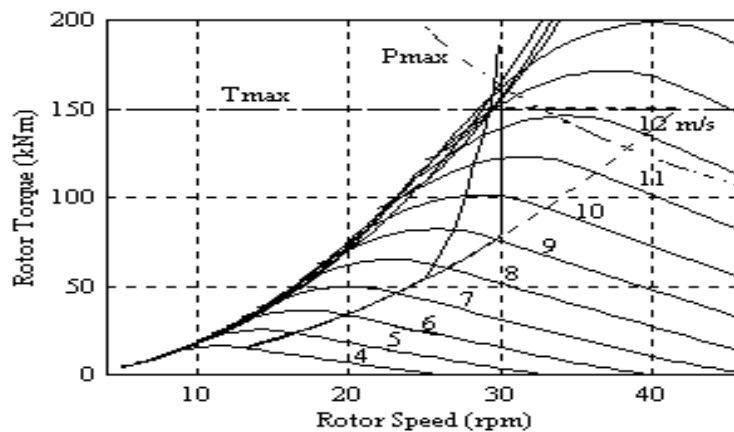
Σύμφωνα με αυτό, η ταχύτητα στροφών της μηχανής μετρείται και η ροπή αναφοράς εισαγωγής του ελεγκτή υπολογίζεται από ένα χαρακτηριστικό ελέγχου ροπή-ταχύτητας, όπως διευκρινίζεται στο σχήμα 4.14.



Σχήμα 4.13: Προσδιορισμός ροπής αναφοράς

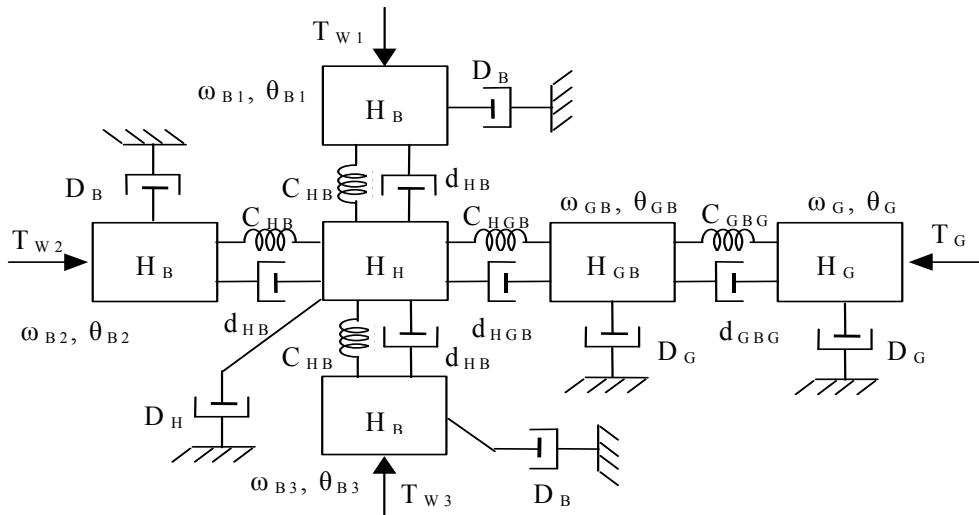
Το χαρακτηριστικό ελέγχου επιλέγεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το μέγιστο ενεργειακό κέρδος να επιτυγχάνεται με τις χαμηλές ταχύτητες αέρα (βέλτιστη λειτουργία C_p), ενώ σε υψηλότερους ανέμους ο έλεγχος των στροφών της περρωτής, περιορίζει τη ροπή κάτω από την αξία σχεδίου.

Στο σχήμα 4.14, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ροπή - ταχύτητα για τις διάφορες ταχύτητες αέρα, λαμβάνοντας υπόψη τη στατική καμπύλη $C_p(\lambda)$ του στροφέα. Για τη σταθερή λειτουργία ταχύτητας, η ταχύτητα στροφέων καθορίζεται ουσιαστικά σε 30 στροφές/λεπτό (rpm). Για τη μεταβλητή λειτουργία ταχύτητας, ο επιθυμητός έλεγχος σταθερής θέσης, χαρακτηριστικό του στροφέα, στο επίπεδο ροπής - ταχύτητας παρουσιάζεται επίσης.



Σχήμα 4.14: Αεροδυναμική ροπή στροφέων εναντίον της ταχύτητας στροφέων, με την ταχύτητα του αέρα ως παράμετρο.

Το απότομο μέρος του χαρακτηριστικού ελέγχου επιλέχτηκε προκειμένου να διατηρηθούν η ροπή και η δύναμη της γεννήτριας μέσα στα μέγιστα όρια, και για να αποφευχθούν οι ακραίες κλίσεις, δεδομένου ότι αυτό θα καθιστούσε ολόκληρο το σύστημα δύσκαμπτο και θα αύξανε τη μεταβλητότητα ροπής και τα φορτία σειρών κίνησης. Επιλέγοντας έναν πιο απότομο, το σύστημα θα ήταν πιο δύσκαμπτο, πιο κοντά σε μια σταθερή μηχανή ταχύτητας, αλλά η ενεργειακή αποδοτικότητα θα μπορούσε να αυξηθεί ελαφρώς.

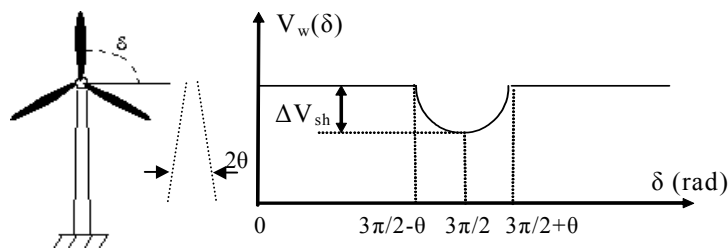


Σχήμα 4.15: 6-μαζικό μηχανικό ισοδύναμο σειρών κίνησης.

Τα χαρακτηριστικά ροπής των σειρών κίνησης, διαμορφώνονται από τη συσσωρευμένη αδράνεια ισοδύναμη του σχήματος 4.15. H_B είναι η αδράνεια των περυγίων, τα οποία θεωρούνται ελαστικά για να συνδεθούν με την πλήμνη, προκειμένου να αποτελέσει πλαγίως τον τρόπο κίνησης των στροφών. H_G , H_{GB} and H_H είναι οι αδράνεις που αντιστοιχούν στη γεννήτρια, στο κιβώτιο ταχυτήτων και στην πλήμνη (συμπεριλαμβανομένων των φρένων δίσκων, των σχετικών μερών των χαμηλών και υψηλών αξόνων ταχύτητας κ.λ.π.), που συνδέονται με κάθε ένα μέσω των ελαστικωτήτων C_{HGB} και C_{GBG} .

Για τη γεννήτρια γίνεται χρήση του μοντέλου προσομοίωσης 4^{ου} βαθμού, ενώ οι μετατροπείς στην περίπτωση της μεταβλητής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας, μιμούνται χρησιμοποιώντας τα θεμελιώδη τμήματα συχνότητας των τάσεων και των ρευμάτων. Τα συστήματα ελέγχου και των δύο μετατροπέων, που παρουσιάζονται σχηματικά στο σχήμα 4.12, διαμορφώνονται λεπτομερώς.

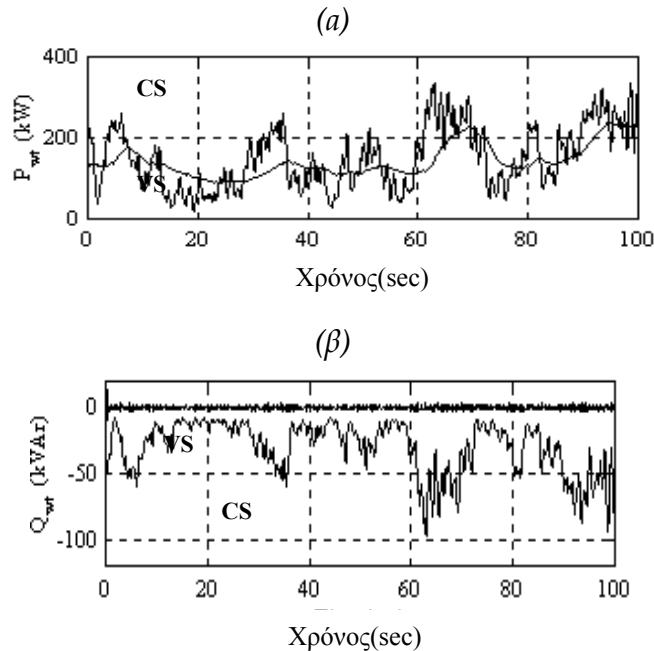
Προκειμένου να αποτελέσει αεροδυναμικούς παλμούς ροπής, μια απλουστευμένη αντιπροσώπευση της επίδρασης σκιών των πύργων ενσωματώνεται στο πρότυπο της ανεμογεννήτριας, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.16. Η ουρά του αέρα διαμορφώνεται από τον ευρέως χρησιμοποιημένο εκθετικό νόμο.



Σχήμα 4.16: Αντιπροσώπευση σκιών πύργων.

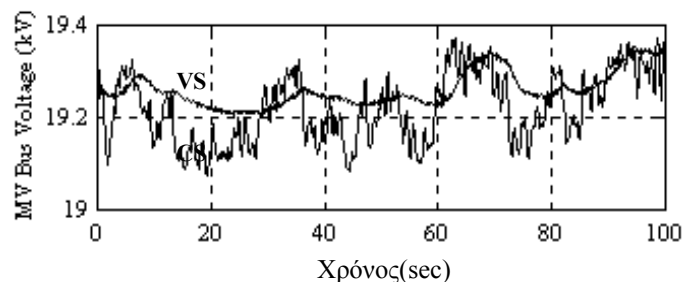
Η χρονική απόκριση πεδίου της ανεμογεννήτριας (για τη σταθερή και τη μεταβλητή λειτουργία ταχύτητας) παρουσιάζεται για τη χαρακτηριστική χρονική σειρά

ταχύτητας αέρα. Οι μέσες ταχύτητες του αέρα είναι 7 m/s και 15 m/s. Η ανοχή βραχυκυκλώματος του δικτύου στο PCC είναι 10 MVA (20 φορές η εκτιμώμενη δύναμη της ανεμογεννήτριας) και η αντίδραση Z_{th} αναλογίας R/X υπολογίζεται ίση με 1.0.



Σχήμα 4.17: Ενεργός και άεργος ισχύ ανεμογεννήτριας (α) 7 m/s και (β) 15 m/s μέση τιμή

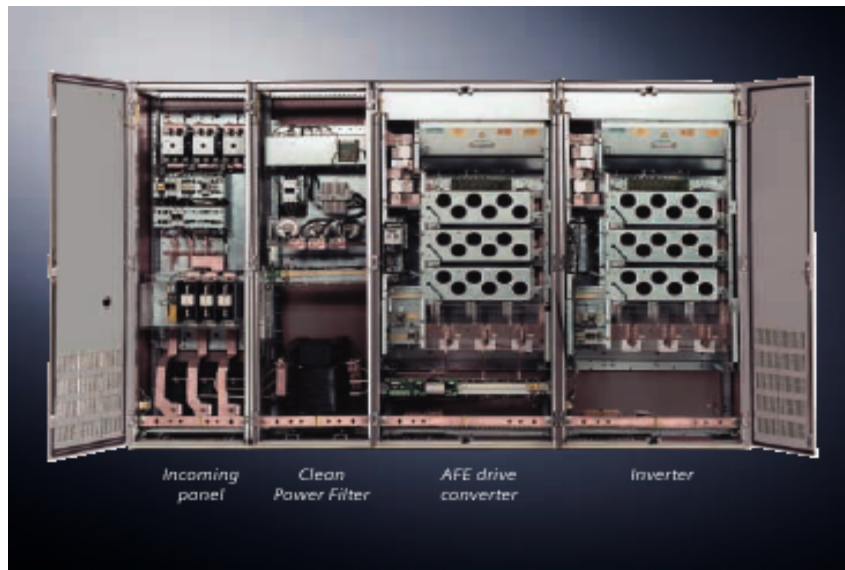
Στο σχήμα 4.17 οι ενεργές και αντιδραστικές δυνάμεις παραγωγής ανεμογεννητριών παρουσιάζονται για τα πρώτα 100 sec των δύο χρονικών σειρών ταχύτητας αέρα, για τη σταθερή (CS) και μεταβλητή ταχύτητα (VS) λειτουργίας. Η ανεμογεννήτρια με σταθερή ταχύτητα λειτουργίας, περιλαμβάνει τον πυκνωτή αντιστάθμισης 200 CkVA του σχήματος 4.2, ενώ στην ανεμογεννήτρια με μεταβλητή ταχύτητα λειτουργίας, η αντιδραστική αναφορά ισχύος παραγωγής τίθεται στο μηδέν (μην απαιτώντας καμία τράπεζα πυκνωτών αντιστάθμισης).



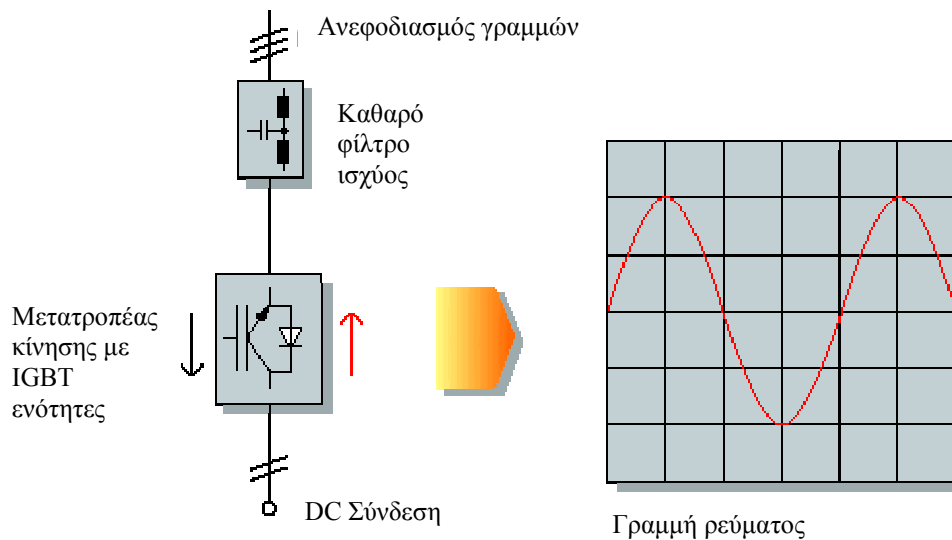
Σχήμα 4.18: 20 kV η τάση ζυγού (από γραμμή σε γραμμή η τιμή του rms) για ταχύτητα ανέμου 7 m/s σε χρονική σειρά.

Οι προκύπτουσες αλλαγές από τα 20 kV της τάσης ζυγού (από γραμμή σε γραμμή η τιμή του rms) παρουσιάζονται στο σχήμα 4.18, για ταχύτητα αέρα 7 m/s σε χρονική σειρά.. Η επίδραση της πολύ μειωμένης μεταβλητότητας της ισχύος παραγωγής

ανεμογεννητριών με μεταβλητή ταχύτητα λειτουργίας είναι σαφής, προκαλώντας πολύ μικρότερες διακυμάνσεις τάσης.



Σχήμα 4.19: Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος 500kW, μιας μεταβλητής ταχύτητας ανεμογεννήτριας στο αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ



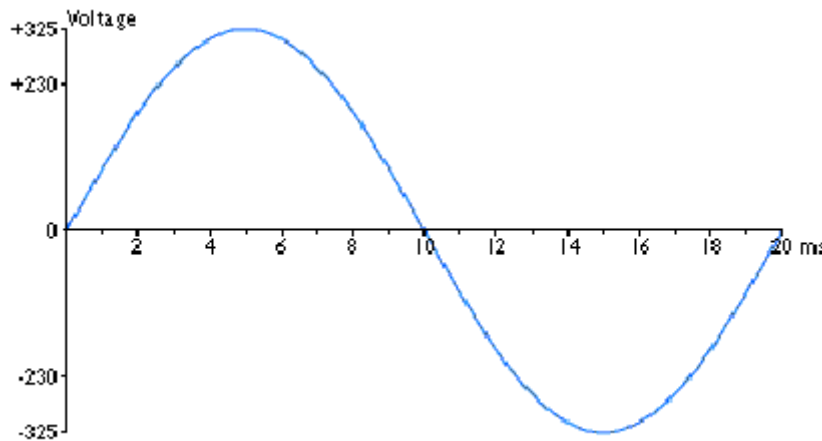
Σχήμα 4.20: Ενεργός αναστροφέας μπροστινών άκρων για 500kW μεταβλητής ταχύτητας ανεμογεννήτριας στο αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο όρος "ποιότητα ισχύος" αναφέρεται στη σταθερότητα της τάσης, στη σταθερότητα της συχνότητας, και στην απουσία διάφορων μορφών ηλεκτρικού θορύβου (π.χ. τρεμούλιασμα ή αρμονική διαστρέβλωση) στο ηλεκτρικό δίκτυο. Μιλώντας πιο γενικά, οι επιχειρήσεις παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος και ενέργειας (όπως η ΔΕΗ) και κυρίως οι πελάτες τους επιθυμούν εναλλασσόμενο ρεύμα βέλτιστης ημιτονοειδούς μορφής, όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Κυματοειδής τάση

Οι περισσότεροι ηλεκτρονικοί ελεγκτές των ανεμογεννητριών, είναι προγραμματισμένοι να αφήνουν τον ανεμοκινητήρα να λειτουργήσει χωρίς σύνδεση με το δίκτυο για χαμηλές ταχύτητες ανέμου. (Εάν ήταν σε σύνδεση με το δίκτυο, στην περίπτωση χαμηλών ταχυτήτων ανέμου, θα λειτουργούσε στην πραγματικότητα ως κινητήρας). Μόλις ο άνεμος γίνει αρκετά ισχυρός για να κινήσει το ρότορα του ανεμοκινητήρα με την επιθυμητή ταχύτητα, η γεννήτρια συνδέεται με το ηλεκτρικό δίκτυο. Διαφορετικά, θα υπήρχε μόνο η μηχανική αντίσταση στο κιβώτιο ταχυτήτων και στη γεννήτρια, για να αποτρέψει το ρότορα από την επιτάχυνση, και τελικά θα επιτάχυνε υπερβολικά. (Υπάρχουν διάφορες συσκευές ασφαλείας, συμπεριλαμβανομένων των φρένων, σε περίπτωση που η σωστή διαδικασία έναρξης αποτύχει).

Εάν γυρίζαμε μια μεγάλη ανεμογεννήτρια στο δίκτυο με έναν κανονικό διακόπτη, οι γειτονικοί ζυγοί θα αντιμετώπιζαν έντονες βυθίσεις τάσης (λόγω του ρεύματος που απαιτείται για να μαγνητίσει τη γεννήτρια), ακολουθούμενες από μια αιχμή ισχύος, λόγω του πολύ μεγάλου ρεύματος των γεννητριών στο δίκτυο. Μια ακόμη δυσάρεστη παρενέργεια χρησιμοποίησης ενός "σκληρού" διακόπτη, θα ήταν να τεθεί πολλή

πρόσθετη ένδυση στο κιβώτιο ταχυτήτων, δεδομένου ότι η απότομη σύνδεση της γεννήτριας θα λειτουργούσε σαν να λειτουργούσε ξαφνικά το μηχανικό φρένο του ανεμοκινητήρα.



Σχήμα 5.2: Φωτογραφίες ένωσης των θυρίστορ

Για να αποτραπεί αυτή η κατάσταση, οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες έχουν μαλακή εκκίνηση, δηλαδή συνδέονται και αποσυνδέονται βαθμιαία στο δίκτυο χρησιμοποιώντας θυρίστορ, ένας τύπος συνεχών διακοπών ημιαγωγών, οι οποίοι μπορούν να ελέγχονται ηλεκτρονικά, όπως στους σύγχρονους αυξομειωτές έντασης φωτισμού, όπου ρυθμίζετε συνεχώς η τάση. Τα θυρίστορ καταναλώνουν από 1% έως 2% τοις εκατό της ενέργειας που τα διαρρέει. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι επομένως εξοπλισμένες με έναν αποκαλούμενο διακόπτη παράκαμψης, ένα μηχανικό διακόπτη, ο οποίος ενεργοποιείται μετά την μαλακή εκκίνηση της γεννήτριας, με αποτέλεσμα το ποσό της καταναλωμένης ενέργειας να ελαχιστοποιείται.

Εάν μια ανεμογεννήτρια συνδέεται με ένα αδύνατο ηλεκτρικό δίκτυο, (δηλαδή, παρεκκλίνει πολύ από το ηλεκτρικό δίκτυο, με μια χαμηλή δυνατότητα μεταφοράς ισχύος), μπορούν να υπάρξουν σημαντικά προβλήματα στην μορφή της παρεχόμενης ισχύος. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να είναι απαραίτητο να ενισχυθεί το δίκτυο, προκειμένου να δεχθεί ηλεκτρική ισχύ από την ανεμογεννήτρια.

Το τρεμούλιασμα είναι μια έκφραση εφαρμοσμένης μηχανικής για τις βραχύβιες μεταβολές της τάσης στο ηλεκτρικό δίκτυο, το οποίο μπορεί να αναγκάσει τους λαμπτήρες να τρεμοσβήνουν. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να είναι σχετικό εάν μια ανεμογεννήτρια συνδέεται με ένα αδύνατο δίκτυο, δεδομένου ότι οι βραχύβιες μεταβολές του ανέμου θα προκαλέσουν μεταβολές στην παραγωγή ισχύος. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ώστε να εξεταστεί το ζήτημα αυτό στο σχέδιο του ανεμοκινητήρα και της γεννήτριας τόσο μηχανικά όσο και ηλεκτρικά, ενώ σημαντική είναι και η συνεισφορά των ηλεκτρονικών ισχύος.

Η απομονωμένη λειτουργία είναι μια κατάσταση που μπορεί να εμφανιστεί όταν ένα τμήμα του ηλεκτρικού δικτύου αποσυνδεθεί από το κύριο ηλεκτρικό δίκτυο, όπως παραδείγματος χάριν συμβαίνει στην περίπτωση τυχαίας ή προκαλούμενης λειτουργίας ενός ηλεκτρικού διακόπτη στο δίκτυο (π.χ. λόγω αστραπής,

βραχυκυκλώματος ή τυχαίας επαφής μεταξύ δύο σημείων που έχουν μια πιθανή διαφορά σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα στο δίκτυο).

Εάν οι ανεμογεννήτριες βρεθούν να λειτουργούν στο απομονωμένο μέρος του δικτύου, τότε είναι πολύ πιθανό ότι τα δύο χωριστά δίκτυα δεν θα είναι σε φάση μετά από λίγο, με αποτέλεσμα μόλις αποκατασταθεί η διασύνδεση στο κύριο δίκτυο, να προκαλούνται σημαντικά μεταβατικά φαινόμενα τόσο προς το δίκτυο όσο και προς την ανεμογεννήτρια. Θα προκαλούσε επίσης μια μεγάλη απελευθέρωση ενέργειας στο μηχανικό μέρος της ανεμογεννήτριας (στους άξονες, στο κιβώτιο ταχυτήτων και στο ρότορα της ανεμογεννήτριας), όπως την απότομη-σκληρή διασύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο.

Ο ηλεκτρονικός ελεγκτής της ανεμογεννήτριας, επομένως, θα πρέπει συνεχώς να ελέγχει την τάση και τη συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος στο δίκτυο. Σε περίπτωση που η τάση ή η συχνότητα του τοπικού δικτύου μετατοπίζεται έξω από ορισμένα προκαθορισμένα όρια και μέσα σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα (π.χ. ενός δευτερολέπτου), ο ανεμοκινητήρας και ειδικότερα η γεννήτρια θα αποσυνδεθεί αυτόματα από το δίκτυο, και αμέσως παύει να λειτουργεί, με την ενεργοποίηση των αεροδυναμικών φρένων, όπως έχει εξηγηθεί προηγούμενα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Dr. Sokratis Tetzarakis, "Wind Energy, Electrical Energy Conversion", CRES, 2005
- [2] Β.Κ.Παπαδιάς, Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Τόμος I & II, ΕΜΠ, Αθήνα, 1992.
- [3] N.D.Hatziargyriou, Ed., Special Issue, Wind Eng., 23(2), 1999.
- [4] Γ.Κονταξής, Ν.Χατζηαργυρίου, Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας, ΕΜΠ, Αθήνα, 1999.
- [5] P.Kundur, Power System Stability and Control. McCraw-Hill, New York, 1994.
- [6] M.Papadopoulos, P.Malatestas, G.Peponis, N.Bilios, S.Ikonomides, "European wind power integration study, wind farms -grid interface and system stability," Athens.
- [7] Justus C. G. Wind Energy Statistics for large arrays of Wind Turbines (New England and Central U.S. regions) G.I.T. Atlanta, August 1976.
- [8] J.G.Keller 'A Methodology for Power Quality Measurements for Wind Turbines and Remote Communities, Wind Engineering Vol.18 No.2 87