



Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ – Σ.Τ.ΕΦ.

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ
ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.»

ΤΩΝ ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΦΟΙΤΗΤΩΝ

Μπαραδάκη Δημήτριο και Κιουτάγχαλη Γεώργιο

Επιβλέπων

Δρ. Π. Καραισάς

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής υλοποιήθηκε με την υποστήριξη των οικογενειών μας στις οποίες θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμότερες ευχαριστίες μας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει σκοπό να παρουσιάσει με σαφήνεια τον τρόπο λειτουργίας των σύγχρονων μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, διάφορες πειραματικές διατάξεις, τον τρόπο παραλληλισμού καθώς και εφαρμογές σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των μηχανών και αναλύονται η αρχή και ο τρόπος λειτουργίας τους σε θεωρητική προσέγγιση.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παραθέεται η μέθοδος παραλληλισμού με καταγραφή φωτογραφικού υλικού για περισσότερη κατανόηση ως προς την πειραματική διάταξη που εκτελέστηκε.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζουμε την εναρμόνιση των σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αναλύουμε τον τρόπο λειτουργίας τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

- 1.1 ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ
- 1.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
- 1.3 ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ
- 1.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ
- 1.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ
- 1.6 ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ
- 1.7 ΤΡΟΠΟΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ
- 1.8 ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ Ε.Ρ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

- 2.1 ΠΑΡΑΛΛΗΛΙΣΜΟ ΔΥΟ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ Ε.Ρ (ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ)
- 2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ
- 2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΙΣΜΟΥ
- 2.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΠΟΥ ΘΑ ΧΡΕΙΑΣΤΕΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ
- 2.5 ΒΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΛΛΗΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ
ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

- 3.1 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ
- 3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
- 3.3 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΡΟΣ (ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΙΣΧΥΣ)
- 3.4 ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ ΕΙΣΟΔΟΥ
- 3.5 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ
- 3.6 ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΣΤΗ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

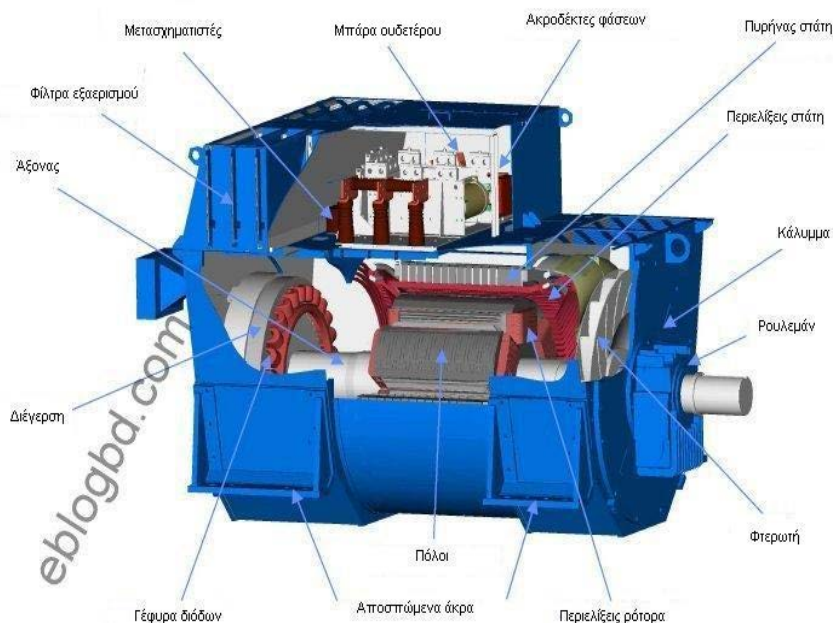
Παράγραφος 1.1

Εισαγωγή στις σύγχρονες γεννήτριες

Οι σύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος ή εναλλακτήρες είναι συσκευές οι οποίες βασίζονται πάνω στους νόμους της ηλεκτροφυσικής και ιδιαίτερα του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Είναι κατασκευασμένες και αποτελούνται από το σταθερό μέρος που ονομάζεται στάτης και το κινητό μέρος το οποίο ονομάζεται δρομέας. Για την δημιουργία του μαγνητικού πεδίου υπάρχουν μαγνητικοί πόλοι, οι οποίοι μπορεί να βρίσκονται τόσο στον στάτη όσο και στον δρομέα ανάλογα με τον τύπο του εναλλακτήρα. Επίσης, υπάρχει το επαγωγικό τύμπανο στο οποίο τοποθετείται το τύλιγμα από το οποίο θα πάρουμε την ηλεκτρεγερτική δύναμη, την τάση και το εναλλασσόμενο ρεύμα. Ανάλογα με την θέση των πόλων το επαγωγικό τύλιγμα βρίσκεται ή στον δρομέα (για εναλλακτήρες με εξωτερικούς πόλους) ή στον στάτη (εναλλακτήρες με εσωτερικούς πόλους).

ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

ΚΥΡΙΑ ΤΜΗΜΑΤΑ



Σχήμα 1.1.1. Κύρια τμήματα σύγχρονης γεννήτριας

Εναλλακτήρες με εξωτερικούς πόλους

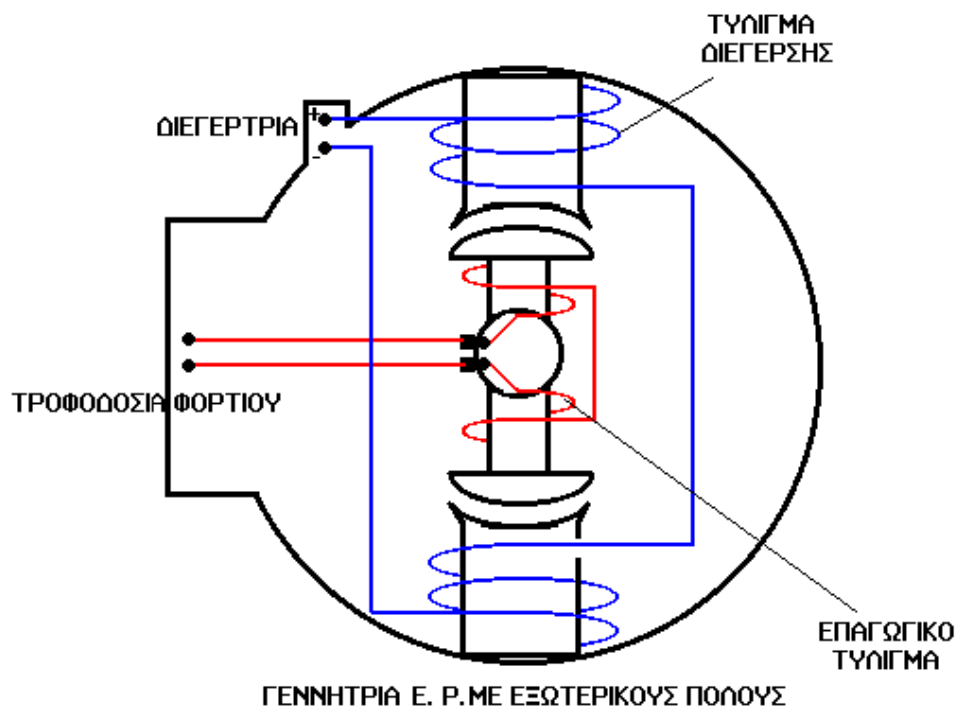
Σε αυτόν τον τύπο εναλλακτήρα ο στάτης στηρίζει την μηχανή και δημιουργεί κατάλληλη και καθορισμένη μαγνητική ροή.

Αποτελείται από:

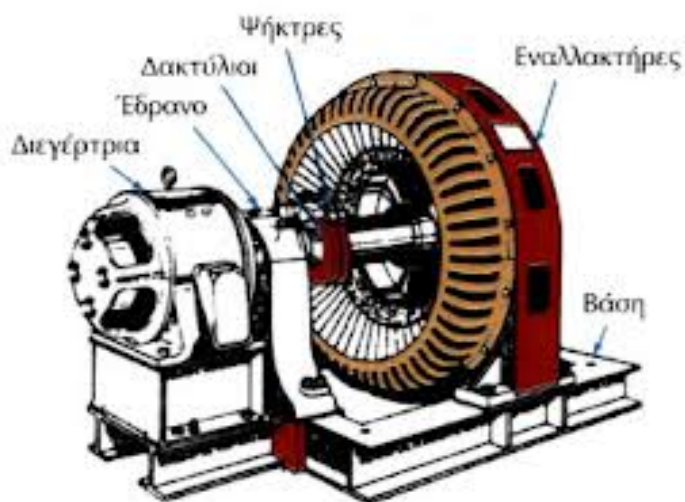
- 1) Το ζύγωμα, στο οποίο τοποθετούνται οι μαγνητικοί πόλοι και το τύλιγμα διέγερσης.
- 2) Τα καλύμματα.
- 3) Τον ψηκτροφορέα και τις ψήκτρες.
- 4) Το κιβώτιο ακροδεκτών και την βάση.

Ο δρομέας των εναλλακτών με εξωτερικούς πόλους έχει σκοπό να δημιουργεί τάση και ρεύμα από επαγωγή στο τύλιγμα που τοποθετείται σε αυτόν και περιλαμβάνει:

- 1) Τον άξονα, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από ατσάλι και στηρίζεται στα έδρανα.
- 2) Το επαγωγικό τύμπανο, το οποίο είναι κατασκευασμένο από κυκλικά σιδηροελάσματα τα οποία σχηματίζουν ένα πυρήνα με αυλάκια μέσα στα οποία τοποθετείται το τύλιγμα, που θα μας δώσει το εναλλασσόμενο ρεύμα.
- 3) Δύο ή τρία δακτυλίδια από ορείχαλκο μονωμένα και μεταξύ τους και ως προς τον άξονα και στερεωμένα σε αυτόν, στα οποία συνδέονται τα άκρα του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου.
- 4) Έναν ανεμιστήρα, ο οποίος στερεώνεται στον άξονα στην αντίθετη πλευρά των δακτυλιδιών και ψύχει τα τυλίγματα των μικρών εναλλακτών.



Σχήμα 1.1.2. Σύγχρονη γεννήτρια με εξωτερικούς πόλους



Σχήμα 1.1.3. Μέρη σύγχρονης γεννήτριας με εξωτερικούς πόλους

Εναλλακτικές με εσωτερικούς πόλους

Σε αυτόν τον τύπο εναλλακτήρα ο στάτης περιέχει το επαγωγικό τύμπανο με το τύλιγμα του και ο δρομέας τους μαγνητικούς πόλους.

Ο στάτης των εναλλακτήρων με εσωτερικούς πόλους αποτελείται από:

- 1) Το ζύγωμα με το εξωτερικό του κέλυφος
- 2) Το επαγωγικό τύμπανο με τον πυρήνα και το τύλιγμα
- 3) Τον ψηκτροφορέα με τις ψήκτρες.
- 4) Τα καλύμματα και το κιβώτιο ακροδεκτών.

Ο πυρήνας του επαγωγικού τυμπάνου κατασκευάζεται από πολλά κυκλικά σιδηροελάσματα με εγκοπές που έχουν επιφανειακή μόνωση από ειδικό βερνίκι και όλα μαζί σχηματίζουν παράλληλα αυλάκια μέσα στα οποία τοποθετείται το τύλιγμα. Το τύλιγμα αποτελείται από πολλές ομάδες περιελίξεων που συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας συγκροτήματα ομάδων τα οποία τοποθετούνται στον πυρήνα του τυμπάνου σε μία ή δύο στρώσεις.

Από το τύλιγμα του εναλλακτήρα μένουν ελεύθερα τα άκρα του που συνδέονται στους ακροδέκτες. Ο ψηκτροφορέας, ο οποίος στερεώνεται στο ζύγωμα, έχει τις ψήκτρες τοποθετημένες σε κατάλληλες υποδοχές, με τις οποίες τροφοδοτούμε με συνεχές ρεύμα το τύλιγμα διέγερσης.

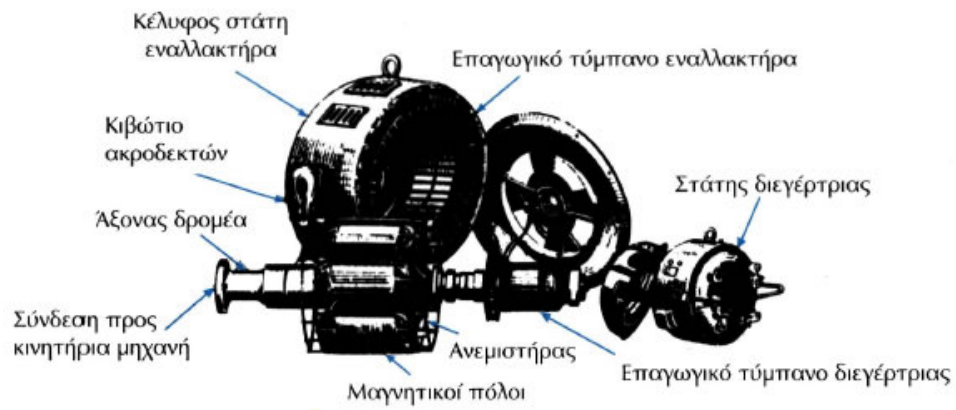
Ο δρομέας των εναλλακτήρων με εσωτερικούς πόλους, που έχει σαν βασικό σκοπό να περιστρέφει τους πόλους, ώστε να δημιουργεί περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, αποτελείται από:

- 1) Τον άξονα, που στηρίζεται στα έδρανα ώστε να μπορεί να περιστραφεί.
- 2) Τους μαγνητικούς πόλους με τα πέδιλα, τον πυρήνα και το τύλιγμα διέγερσης.
- 3) Τα δαχτυλίδια στα οποία καταλήγει το συνεχές ρεύμα από τη διεγέρτρια.
- 4) Τον ανεμιστήρα για την ψύξη των τυλιγμάτων.

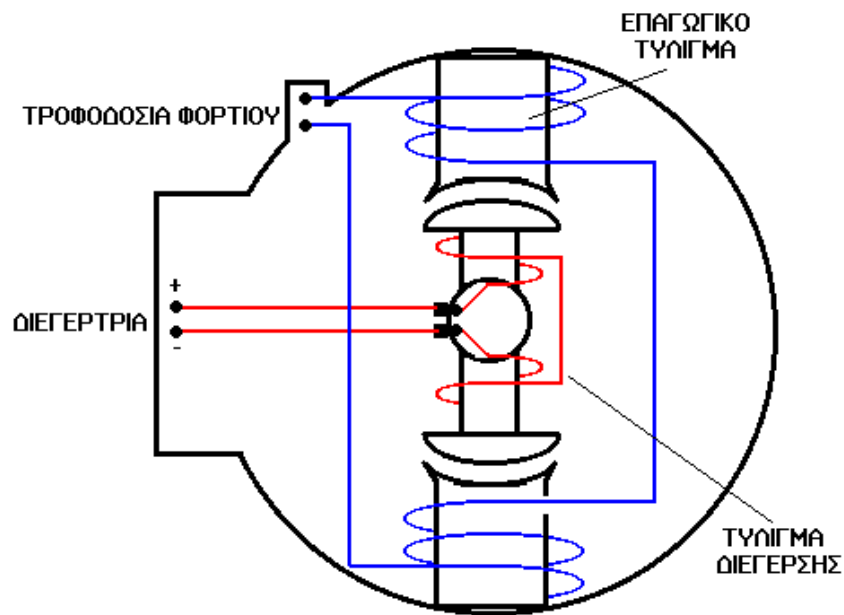
Η διεγέρτρια συνδέεται συνήθως απευθείας στον άξονα του εναλλακτήρα από τον οποίο και παίρνει κίνηση οπότε παράγει συνεχές ρεύμα με το οποίο τροφοδοτούμε τα τυλίγματα των πόλων.

Οι μαγνητικοί πόλοι στερεώνονται ακτινικά στον άξονα και καθένας τους αποτελείται από τον πυρήνα που καταλήγει στο πέδιλο και το τύλιγμα που τυλίγεται γύρω από αυτόν και τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα από την διεγέρτρια.

Τα τυλίγματα των πόλων συνδέονται μεταξύ τους συνήθως σε σειρά έτσι ώστε να σχηματίζονται διαδοχικά βόρειος και νότιος πόλος και τα δύο άκρα που μένουν ελεύθερα να καταλήγουν στα δύο δαχτυλίδια. Στο παρακάτω σχήμα αναλύουμε τα μέρη μιας γεννήτριας με εσωτερικούς πόλους.



Σχήμα 1.1.4. Μέρη σύγχρονης γεννήτριας με εσωτερικούς πόλους



ΓΕΝΗΤΡΙΑ Ε. Ρ. ΜΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΠΟΛΟΥΣ

Σχήμα 1.1.5. Σύγχρονη γεννήτρια με εσωτερικούς πόλους

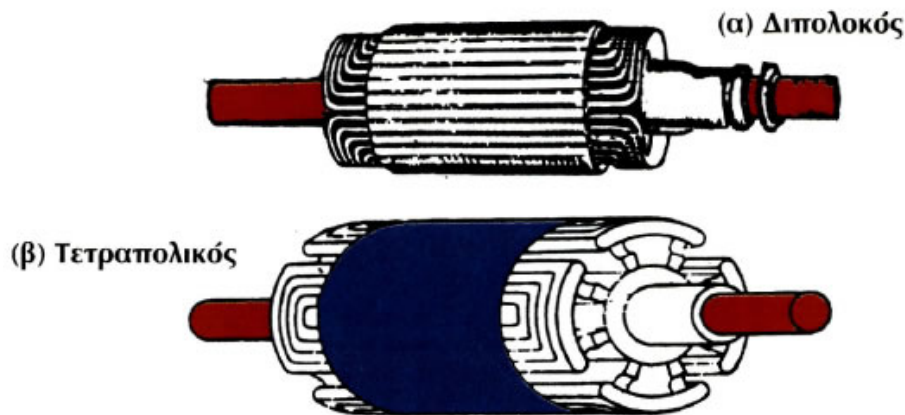
Στροβιλοεναλλακτήρες

Οι στροβιλοεναλλακτήρες είναι εναλλακτήρες με περιστρεφόμενους πόλους, διαφέρουν όμως από τους κοινούς στα εξής σημεία:

1. Στην κατασκευή του δρομέα, καθώς δεν υπάρχουν προεξέχοντες μαγνητικοί πόλοι με σιδηροπυρήνα και τύλιγμα. Όπως στους κοινούς εναλλακτήρες με εσωτερικούς πόλους. Ο δρομέας των στροβιλοεναλλακτών έχει την ειδική μορφή, η οποία φαίνεται στα σχήματα 1.1. α-β

Δηλαδή, ο δρομέας αποτελείται από ένα χαλύβδινο κυλινδρικό τύμπανο, το οποίο φέρει αυλάκια παράλληλα προς τον άξονα. Στα αυλάκια αυτά τοποθετείται το τύλιγμα διέγερσης, το οποίο σχηματίζει τους πόλους. Το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται με Σ.Ρ μέσω των δακτυλίων από τη διεγέρτρια.

2. Στην ειδική διαμόρφωση, η οποία συνήθως δίνεται στο κέλυφος του στάτη, ώστε να εξασφαλιστεί η ψύξη της μηχανής. Η ψύξη επιτυγχάνεται με τους εξής τρόπους:
 - α) Με τον περιβάλλοντα ατμοσφαιρικό αέρα
 - β) Με κλειστό κύκλωμα ατμοσφαιρικού αέρα
 - γ) Με κλειστό κύκλωμα υδρογόνου



Σχήμα 1.1.6. Δρομείς στροβιλοεναλλακτών

Παράγραφος 1.2

Αρχή λειτουργίας σύγχρονων γεννητριών:

Η αρχή λειτουργίας των σύγχρονων γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος (εναλλακτών) στηρίζεται στο φαινόμενο που παρατηρείται σε έναν αγωγίμο βρόγχο (επαγωγικό τύλιγμα) που περιστρέφεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Με την βοήθεια ενός παλμογράφου ή βολτόμετρου βλέπουμε ότι αναπτύσσεται Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (ΗΕΔ) από επαγωγή στα άκρα του τυλίγματος που περιστρέφεται, η οποία ΗΕΔ είναι ημιτονοειδούς μορφής και καταλήγει στα δαχτυλίδια οπότε με τις ψήκτρες οδηγείται στην έξοδο. Το επαγωγικό τύλιγμα αποτελείται από τρία όμοια και ανεξάρτητα μονοφασικά τυλίγματα που διαφέρουν κατά 120° μεταξύ τους και τα οποία αποτελούν τις 3 φάσεις του εναλλακτήρα. Το προκύπτον Η/Μ πεδίο είναι στρεφόμενο στο χώρο με ταχύτητα που ισούται με την ηλεκτρική συχνότητα των ρευμάτων. Προφανώς για να διατηρείται η περιστροφική κίνηση πρέπει τα δύο πεδία να κινούνται με την ίδια ταχύτητα, δηλαδή η ηλεκτρική συχνότητα να ταυτίζεται με την μηχανική ταχύτητα περιστροφής (σύγχρονη ταχύτητα) και να είναι ανάλογη με τον αριθμό των πόλων. Η ονομασία σύγχρονη γεννήτρια προέρχεται από το γεγονός ότι ο δρομέας περιστρέφεται συγχρόνως με το στρεφόμενο πεδίο του στάτη. Η σχέση μεταξύ συχνότητας και ταχύτητας περιστροφής είναι:

$$f = \frac{P \cdot n}{120}$$

Σχέση 1.2.1

Όπου:

f = ηλεκτρική συχνότητα (Hz)

P = αριθμός πόλων

n = ταχύτητα περιστροφής (rad /s)

Ανάλογα με την θέση που έχουν τοποθετηθεί οι μαγνητικοί πόλοι στις σύγχρονες μηχανές υπάρχουν δύο βασικοί τύποι εναλλακτών:

Με σταθερούς μαγνητικούς πόλους που είναι εξωτερικοί στον στάτη αναπτύσσεται ΗΕΔ από επαγωγή. Στο περιστρεφόμενο τριφασικό επαγωγικό τύλιγμα, με τέσσερα ή έξι δαχτυλίδια και αντίστοιχες ψήκτρες, το οποίο έχει σταθερό μαγνητικό πεδίο, οδηγεί στην έξοδο την ΗΕΔ. Οι εναλλακτήρες με σταθερούς μαγνητικούς πόλους παρέχουν τάση έως 6 KV αλλά παρουσιάζουν μεγάλες απώλειες (ισχύος, τάσης, τριβών) και απαιτούν συνεχή συντήρηση.

Με περιστρεφόμενους μαγνητικούς πόλους που είναι εσωτερικοί στον δρομέα οι οποίοι έχουν κίνηση μαγνητικού πεδίου σε αγωγούς δηλαδή περιστρεφόμενος ο μαγνήτης διέρχεται από τα 3 τυλίγματα του στάτη και αφού εναλλάσσεται δημιουργεί συνεχώς μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή (Φ) στα τυλίγματα αυτά και έχει ως

αποτέλεσμα σύμφωνα με τον νόμο του Faraday σε κάθε τύλιγμα να αναπτύσσεται μια εναλλασσόμενη ΗΕΔ με αποτέλεσμα να ισχύει ο τύπος:

$$E = K \cdot \Phi \cdot n$$

Σχέση 1.2.2

Όπου:

E = τάση από ΗΕΔ (V)

K = σταθερά της μηχανής

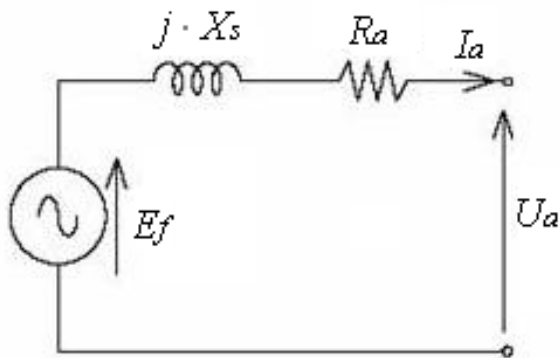
Φ = μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή (Weber)

n = ταχύτητα περιστροφής (rad / s)

Παράγραφος 1.3

Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα:

Στο παρακάτω σχήμα παρατίθενται το μονοφασικό ισοδύναμο κυκλώματα μίας σύγχρονης γεννήτριας . Το ισοδύναμο κύκλωμα συνίσταται σε μία μη ιδανική πηγή τάσης που με τη σειρά της αποτελείται από μία ιδανική πηγή τάσης σε σειρά με μία σύνθετη αντίσταση (με ωμικό και επαγωγικό μέρος).



Σχήμα 1.3.1. Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικής γεννήτριας

E_f : Η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) της σύγχρονης γεννήτριας

U_a : Η τάση ακροδεκτών της σύγχρονης γεννήτριας

R_a : Η ωμική αντίσταση τυλίγματος τυμπάνου της σύγχρονης γεννήτριας

X_s : Η επαγωγική αντίδραση τυλίγματος τυμπάνου της σύγχρονης γεννήτριας

I_a : Το εξερχόμενο ρεύμα φάσης τυμπάνου της σύγχρονης γεννήτριας

Παράγραφος 1.4

Χαρακτηριστικές λειτουργίες σύγχρονης γεννήτριας:

Η αρχή λειτουργίας των σύγχρονων τριφασικών γεννητριών αναλύθηκε στο ανάλογο κεφάλαιο. Η γεννήτρια θα πρέπει να πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις πριν συνδεθεί φορτίο σε αυτήν:

- 1) Πρέπει να λειτουργεί στην σύγχρονη ταχύτητα, ώστε να καθοριστεί η συχνότητα, δεδομένου ότι οι πόλοι είναι σταθεροί για μία συγκεκριμένη μηχανή.
- 2) Να υπάρχει πεδίο διέγερσης και να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα.
- 3) Να υπάρχει κατάλληλη τάση εξόδου, η οποία μπορεί να ρυθμιστεί μέσω της διέγερσης.

Σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης μια παράσταση των εξισώσεων της μηχανής είναι αυτή που προκύπτει αν μεταφερθούμε στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας.

Επομένως σε μιγαδική μορφή η σχέση γίνεται:

$$U_a = E_f - R_a \cdot I_a - j \cdot X_s \cdot I_a$$

Σχέση 1.4.1

Όπου $X_s = \omega \cdot L_s$

Σύμφωνα με την **σχέση 1.4.1** το ρεύμα τυμπάνου δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$I_a = \frac{E_f - U_a}{R_a + j \cdot X_s}$$

Σχέση 1.4.2

Η παραπάνω εξίσωση (**Σχέση 1.4.2**) απεικονίζεται στα παρακάτω διανυσματικά διαγράμματα για τις περιπτώσεις λειτουργίας με επαγωγικό φορτίο, με χωρητικό φορτίο και με ωμικό φορτίο.

Παρατηρούμε, ωστόσο, ότι η τάση εξόδου επηρεάζεται παρόλο που το πεδίο διέγερσης παραμένει σταθερό. Ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται η τάση εξόδου εξαρτάται από το είδος του φορτίου, δηλαδή από τον συντελεστή ισχύος.

Η παραπάνω εξίσωση απεικονίζεται στα παρακάτω διανυσματικά διαγράμματα για

τις περιπτώσεις λειτουργίας με επαγωγικό φορτίο, με χωρητικό φορτίο και με ωμικό φορτίο. Σε ωμικά και επαγωγικά φορτία θα προκαλέσουν μείωση της παραγόμενης τάσης της τάξεως του 15-50% σε σχέση με την τάση χωρίς φορτίο, ενώ στην περίπτωση των χωρητικών φορτίων τείνει να αυξηθεί η τάση σε σχέση με την εν κενώ λειτουργία.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την τάση είναι

α) η πτώση τάσης στην αντίσταση του οπλισμού

β) η αντίδραση οπλισμού (επαγωγική αντίδραση)

γ) η πτώση τάσης της άεργης αντίστασης του οπλισμού λόγω αυτεπαγωγής L_a του τυλίγματος οπλισμού, η οποία είναι σημαντική.

Αυτή ονομάζεται αντίσταση X_s και υπολογίζεται:

$$X_s = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_a \quad (\Omega)$$

Σχέση 1.4.3

Όπου:

L_a = τύλιγμα αυτεπαγωγής οπλισμού ανά φάση (H)

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ =γωνιακή συχνότητα (rad/s)

Η άεργη αντίσταση παρέχει επιπλέον πτώση τάσης η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψιν. Όπως θα δούμε και στην συνέχεια η διακύμανση στη ροή λόγω αυτού του φαινομένου αντιμετωπίζεται ως πτώση τάσης.

Στο **σχήμα 1.4.1** βλέπουμε τις χαρακτηριστικές μίας τυπικής γεννήτριας για διαφορετικά φορτία με σταθερό ρεύμα διέγερσης.

Η ρύθμιση τάσης μία γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος ορίζεται ως η αύξηση τάσης όταν το φορτίο από πλήρες μειώνεται σε μηδενικό, με την ταχύτητα και το ρεύμα πεδίου να παραμένουν σταθερά. Εκφράζεται ως ποσοστό της τάσεως του πλήρους φορτίου.

$$\text{Ρύθμιση τάσης} = \frac{U_{\chi\phi} - U_{\pi\phi}}{U_{\pi\phi}} \cdot 100$$

Σχέση 1.4.4

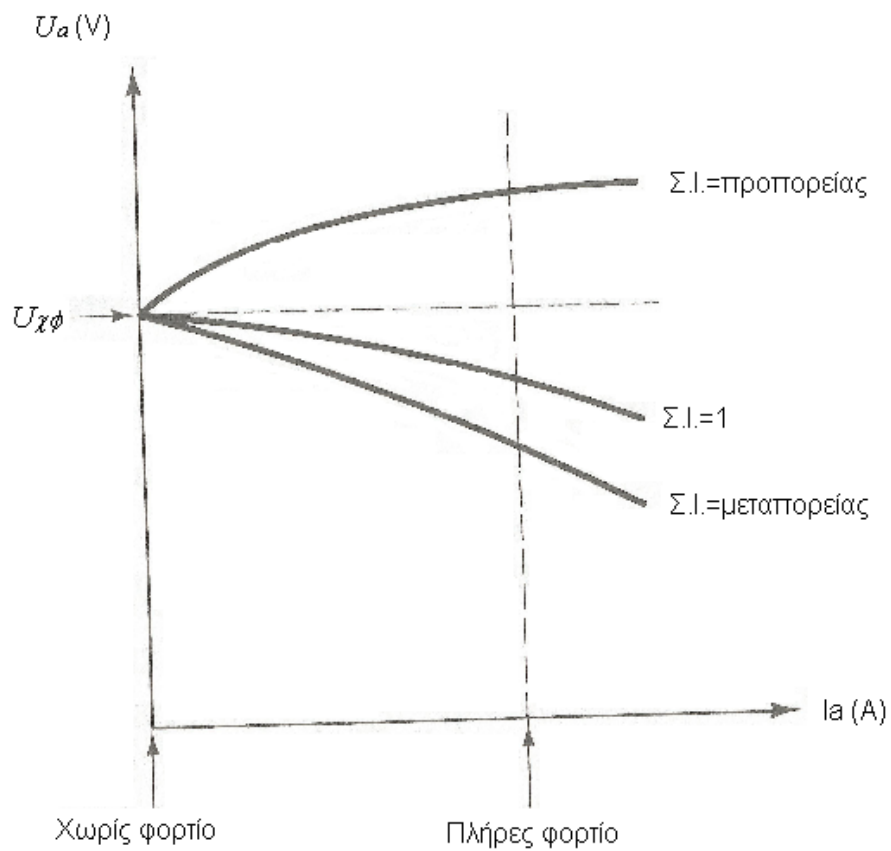
Όπου:

$U_{\chi\phi}$ = τάση χωρίς φορτίο (V)

$U_{\pi\phi}$ = τάση σε πλήρες φορτίο (V)

Μία σημαντική παρατήρηση είναι πως η αφαίρεση στην παραπάνω εξίσωση γίνεται αλγεβρικά και όχι διανυσματικά.

Στο **σχήμα 1.4.1** φαίνεται ότι η ρύθμιση επί τοις εκατό διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τον συντελεστή ισχύος του κάθε φορτίου. Για συντελεστή ισχύος προπορείας (leading) μπορεί να γίνει και αρνητική, το οποίο δείχνει ότι η τάση στους ακροδέκτες αυξάνεται κατά την φόρτωση.



Σχήμα 1.4.1. Χαρακτηριστικές γεννήτριας με διαφορετικά φορτία

Όταν σε μία γεννήτρια τοποθετείται ένα φορτίο, για παράδειγμα ένας τριφασικός κινητήρας, ένα ρεύμα θα περάσει μέσα από το τύλιγμα οπλισμού της γεννήτριας. Το τύλιγμα του οπλισμού έχει μία αντίσταση R_a (Ω ανά φάση) με αποτέλεσμα την εμφάνιση πτώσης τάσης στον οπλισμό:

$$U_a = I_a \cdot R_a \text{ (V/φάση)}$$

Σχέση 1.4.5

Όπου:

I_a = ρεύμα ανά φάση (A)

R_a = αντίσταση τυλίγματος (Ω ανά φάση)

Δεδομένου ότι οι τρεις φάσεις είναι συμμετρικές, η τιμή της πτώσης τάσης θα είναι η ίδια και στις τρεις φάσεις, με την προϋπόθεση ότι όλες οι φάσεις έχουν την ίδια συμπεριφορά. Οι υπολογισμοί γίνονται ανά φάση.

Εκτός από την παραπάνω πτώση τάσης υπάρχει και άλλη μία πτώση τάσης λόγω αυτεπαγωγής που εμφανίζεται στα τυλίγματα του οπλισμού:

$$U_a = I_a \cdot X_a \text{ (V/φάση)}$$

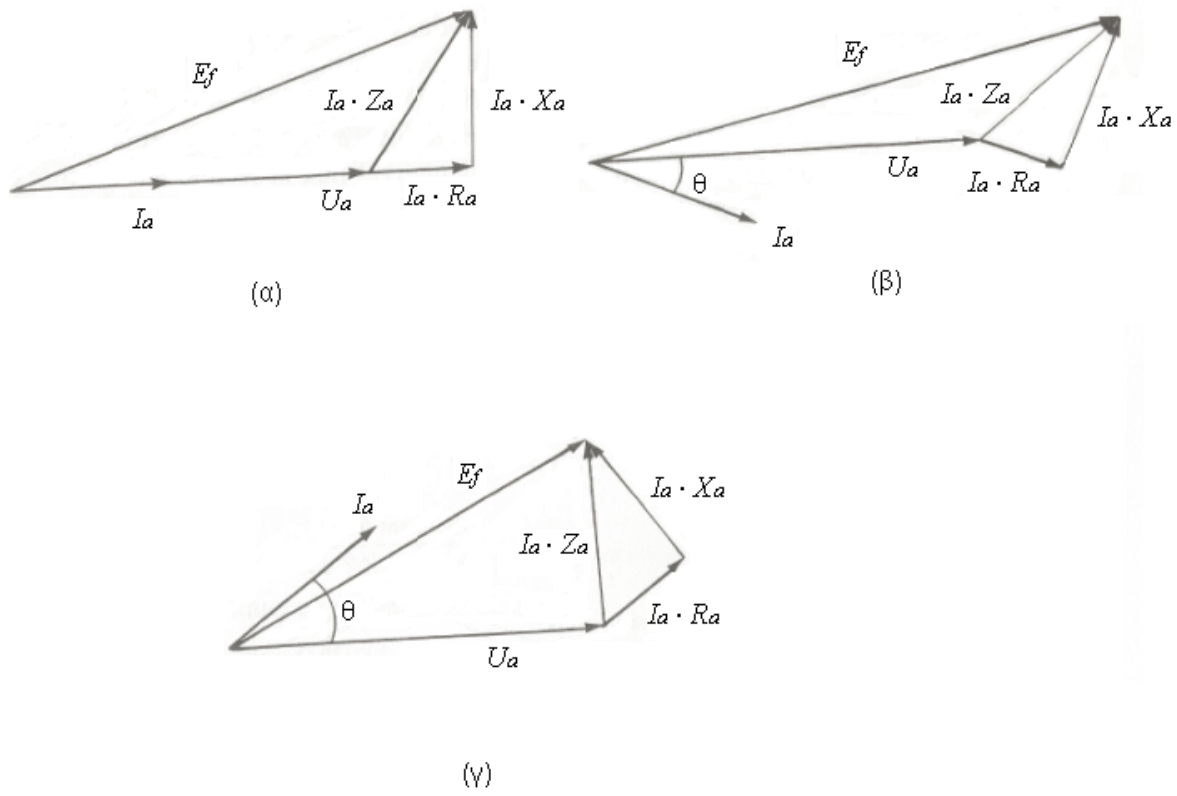
Σχέση 1.4.6

Όπου:

I_a = ρεύμα ανά φάση (A)

X_a = αντίσταση τυλίγματος οπλισμού (Ω)

Γνωρίζοντας τα παραπάνω μεγέθη της πτώσης τάσεως δεν αρκεί για να προσδιορίσουμε την παραγόμενη τάση. Οι τάσεις πρέπει να προστεθούν διανυσματικά στην τάση των ακροδεκτών. Είναι, λοιπόν, σημαντικό να γνωρίζουμε τον συντελεστή ισχύος για το υπολογισμό του ρεύματος φορτίου. Το **σχήμα 1.4.2** δείχνει ότι η E_f εξαρτάται άμεσα από τον συντελεστή ισχύος ($\cos\phi$). Για συντελεστή ισχύος ίσο με 1 (**Σχήμα 1.4.2 α**), όπως και συντελεστή ισχύος μεταπορείας (lagging) (**Σχήμα 1.4.2 β**), η E_f είναι μεγαλύτερη από την U_a . Για συντελεστή ισχύος προπορείας (leading) η U_a είναι μεγαλύτερη από την E_f (**Σχήμα 1.4.2 γ**). Όμως για κάθε $\cos\phi$ η E_f προπορεύεται της U_a .



Σχήμα 1.4.2. Διαγράμματα E_f σε σχέση με το συντελεστή ισχύος ($\cos\phi$)

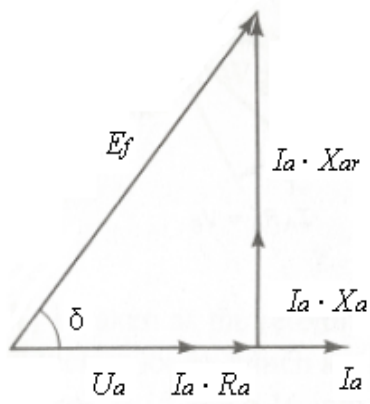
Το **σχήμα 1.4.3** δείχνει τρία διαγράμματα φάσης για διαφορετικά φορτία. Για το ωμικό φορτίο η E_f είναι μεγαλύτερη από την U_a . Βέβαια στο επαγωγικό φορτίο η E_f είναι συγκριτικά μεγαλύτερη από την U_a , σε σχέση με το ωμικό φορτίο, και συμπεραίνουμε ότι είναι η πιο ζημιογόνα λύση απ' όλες. Για χωρητικό φορτίο, η U_a είναι μεγαλύτερη από την E_f και φυσικά είναι η πιο συμφέρουσα λύση. Σε περίπτωση που αφαιρεθεί το φορτίο, η παραγόμενη τάση E_f που εμφανίζεται στους ακροδέκτες της γεννήτριας είναι μικρότερη από όταν βρισκόταν υπό πλήρες φορτίο. Από το **σχήμα 1.4.3** είναι πασιφανές ότι η πτώση τάσης $I_a \cdot X_{ar}$ και $I_a \cdot X_a$ είναι συμφασικές και αυτό συνεπάγεται ότι η αντίδραση του σπλισμού παράγει μία επίδραση παρόμοια με την αύξηση της άεργου στο κύκλωμα του σπλισμού. Το άθροισμα των πτώσεων τάσης U_{ar} και $I_a \cdot X_a$ μας δίνει την συνολική πτώση τάσης που παράγεται από το πεδίο του σπλισμού:

$$I_a \cdot (X_a + X_{ar}) = I_a \cdot X_s$$

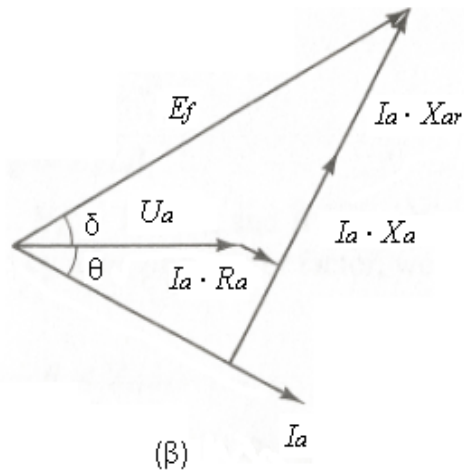
Σχέση 1.4.7

Όπου: $X_s = (X_a + X_{ar})$

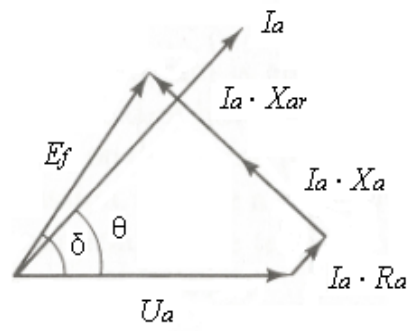
Αυτή η πτώση τάσης ονομάζεται πτώση τάσης σύγχρονης επαγωγικής άεργης αντίστασης και η X_s ονομάζεται σύγχρονη αντίσταση. Η τιμή του X_s καθορίζεται από κάποιες δοκιμές οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω. Πρέπει να επισημανθεί μία ενδιαφέρουσα παρατήρηση σχετικά με το **σχήμα 1.4.3**. Η γωνία δ μεταξύ των E_f και U_a ονομάζεται γωνία ισχύος ή γωνία ροπής της μηχανής. Διαφέρει ανάλογα με το φορτίο και μετράει την ισχύ που μεταφέρεται μέσω του διακένου αέρα της μηχανής. Να σημειωθεί, ότι στο **σχήμα 1.4.2** οι γωνίες ισχύος είναι μηδέν επειδή τα καθαρά επαγωγικά και καθαρά χωρητικά φορτία δεν καταναλώνουν ενέργεια.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 1.4.3. Διαγράμματα φάσης για διαφορετικά φορτία

Παράγραφος 1.5

Προσδιορισμός παραμέτρων μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος:

Σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα μιας σύγχρονης γεννήτριας, οι παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία της είναι η σχέση ρεύματος διέγερσης-τάσης, η σύγχρονη αντίδραση και η αντίσταση του τυλίγματος οπλισμού. Η σύγχρονη αντίδραση εξαρτάται από το βαθμό του μαγνητικού κορεσμού και παίρνει διαφορετικές τιμές για διαφορετικά φορτία και ρεύματα πεδίου. Η τιμή της σύγχρονης αντίδρασης, που δίνεται από τον κατασκευαστή για υπολογισμούς της ρύθμισης τάσης και την ανάλυση ονομαστικών συνθηκών, βασίζεται στο ρεύμα πεδίου, που παρέχει ονομαστική τάση ανοιχτού κυκλώματος και το σχετικό ρεύμα βραχυκύκλωσης. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε μία διαδικασία που αναφέρεται στον υπολογισμό του μέτρου της επαγωγικής αντίδρασης του τυμπάνου. Σε εκείνες τις περιπτώσεις, όπου οι παράμετροι σύγχρονης μηχανής δεν δίνονται από τον κατασκευαστή, μπορεί να προσεγγιστούν από την δοκιμή DC, την δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος και την δοκιμή βραχυκύκλωσης.

Δοκιμή DC

Ο σκοπός της δοκιμής αυτής είναι να υπολογίσουμε την R_a και αυτό θα επιτευχθεί αν συνδέσουμε οποιουδήποτε 2 ακροδέκτες του στάτη σε μία πηγή συνεχούς ρεύματος με χαμηλό μέτρο τάσης. Ο ροοστάτης ρυθμίζεται ώστε να παρέχει αναγνώσιμες τιμές ρεύματος και τάσης, οπότε η αντίσταση μεταξύ των 2 ακροδεκτών του στάτη υπολογίζεται από τον νόμο του Ohm. Άρα ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$R_{dc} = \frac{U_{dc}}{I_{dc}}$$

Σχέση 1.5.1

$$\text{Για αστέρα: } R_y = \frac{R_{dc}}{2}$$

Σχέση 1.5.2

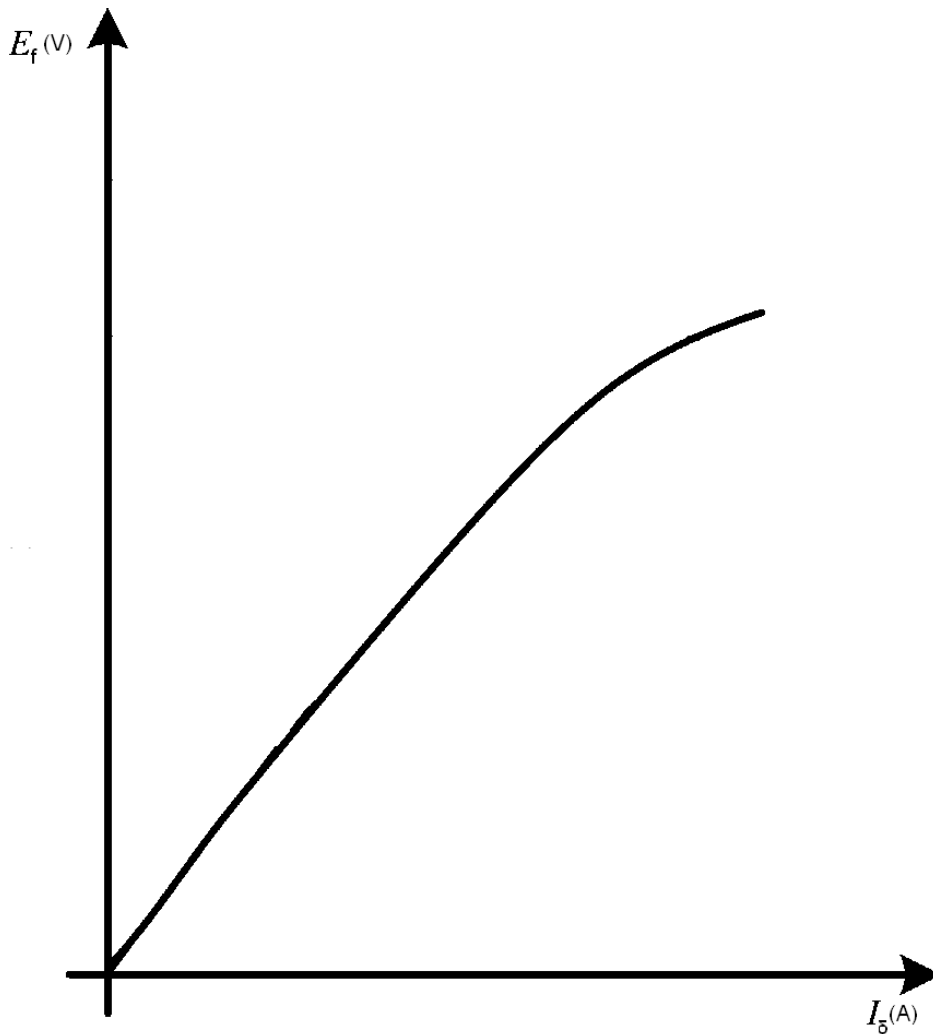
$$\text{Για τρίγωνο: } R_{\delta} = 1,5 \cdot R_{dc}$$

Σχέση 1.5.3

Για να ληφθεί υπόψη το επιδερμικό φαινόμενο, οι τιμές της αντίστασης που υπολογίζονται από τις παραπάνω εξισώσεις (**Σχέσεις 1.5.2/1.5.3**) αστέρα και τριγώνου πρέπει να πολλαπλασιαστούν με έναν συντελεστή επιδερμικού φαινομένου. Μολονότι η τιμή του διαφέρει από μηχανή σε μηχανή, ένας συντελεστής 1,2 αποτελεί μία καλή προσέγγιση.

Συνεπώς: $R_a = 1,2 \cdot R_y$ ή $R_a = 1,2 \cdot R_{\delta}$

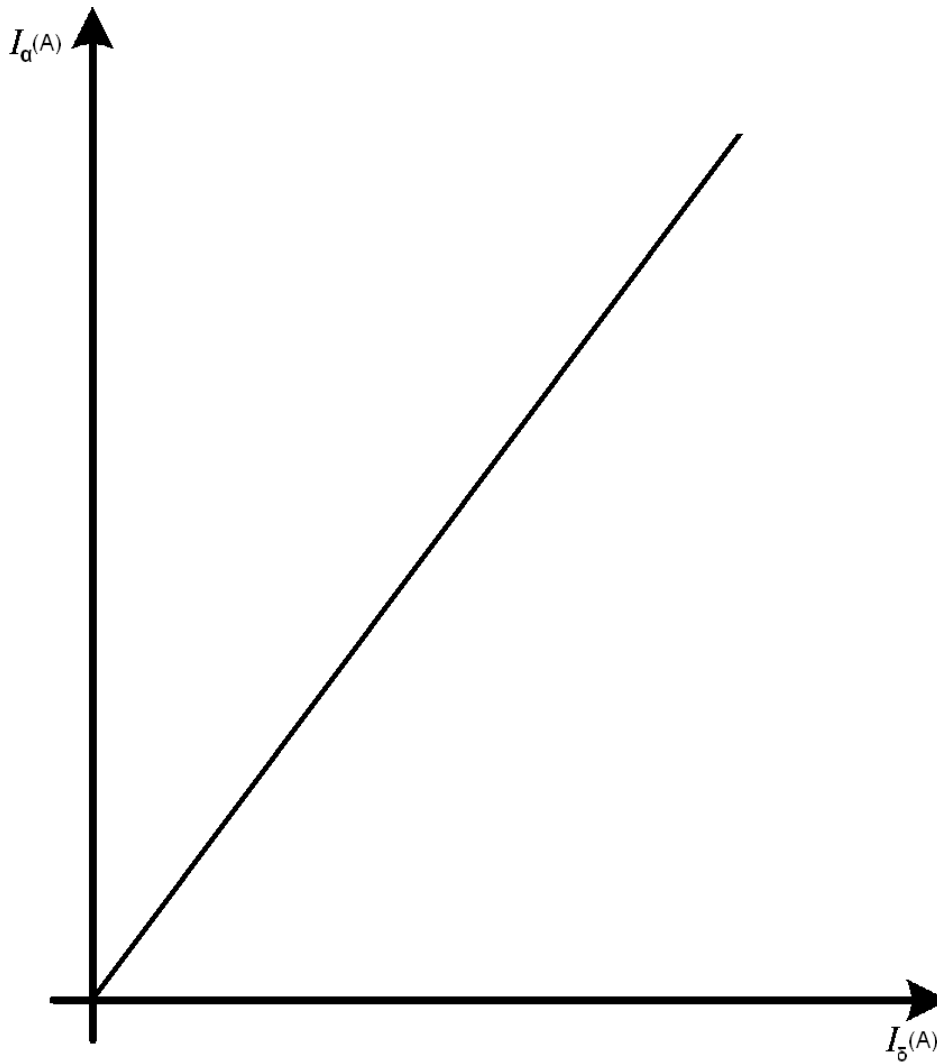
Ως μέθοδο παραγωγής κινητικής ενέργειας έχουμε έναν κινητήρα, τον οποίο εκκινούμε για να περιστρέφει την τριφασική γεννήτρια και ρυθμίζουμε την ταχύτητα του στην ονομαστική της γεννήτριας. Σε κενή λειτουργία παρατηρούμε στο βολτόμετρο ότι μας δείχνει μια μικρή τάση που αναπτύσσεται από επαγωγή στο τριφασικό επαγωγικό τύλιγμα του στάτη. Αυτό συμβαίνει λόγω του παραμένουτος μαγνητισμού στον σιδηροπυρήνα των περιστρεφόμενων μαγνητικών πόλων. Τροφοδοτούμε το τύλιγμα διέγερσης από την πηγή συνεχούς ρεύματος και ρυθμίζουμε την αντίσταση διέγερσης άρα και το ρεύμα διέγερσης ώστε η ΗΕΔ εξόδου του εναλλακτήρα να φτάσει την ονομαστική τιμή με αποτέλεσμα να προκύπτει η καμπύλη $E-I$ (Σχήμα 1.5.1), δηλαδή η χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος.



Σχήμα 1.5.1. Χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος

Σε λειτουργία βραχυκύκλωσης των ακροδεκτών εξόδου του εναλλακτήρα αυξάνουμε το ρεύμα διέγερσης από 0 μέχρι την τιμή για την οποία το φασικό ρεύμα στο

επαγωγικό τύλιγμα έως ότου αυτό πάρει την ονομαστική τιμή του με αποτέλεσμα να προκύπτει η χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης (Σχήμα 1.5.2):



Σχήμα 1.5.2. Χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης

Από τη χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης (Σχήμα 1.5.2) προκύπτει η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης για συγκεκριμένο ρεύμα διέγερσης.

Έχοντας βρει με τις παραπάνω μεθόδους για συγκεκριμένο ρεύμα διέγερσης την φασική ΗΕΔ E_f και το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_a , χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο για $U_a = 0$:

$$U_a = E_f - R_a \cdot I_a - j \cdot X_s \cdot I_a \Rightarrow$$

$$R_a + j \cdot X_s = \frac{E_f}{I_a}$$

Η σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας είναι $Z = R_a + j \cdot X_s$

Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης είναι $Z = \sqrt{(R_a^2 + X_s^2)}$

$$\text{Άρα } X_s = \sqrt{\left(\frac{E_f}{I_a}\right)^2 - R_a^2}$$

Λόγος βραχυκύκλωσης:

Ο λόγος βραχυκύκλωσης μίας σύγχρονης γεννήτριας είναι ο λόγος του ρεύματος πεδίου που απαιτείται για ονομαστική τάση εν κενώ προς το ρεύμα πεδίου για ονομαστικό ρεύμα με τους ακροδέκτες του επαγωγικού τυλίγματος βραχυκυκλωμένους.

$$SCR = \frac{I_{foc}}{I_{fsc}}$$

Ο λόγος βραχυκύκλωσης μπορεί επίσης να υπολογιστεί από το αντίστροφο της ανά μονάδας σύγχρονης αντίδρασης $SCR = \frac{1}{X_{pu}}$

Ο λόγος βραχυκύκλωσης αποτελεί ένα μέτρο ευαισθησίας της μηχανής σε μεταβολές κατά την φόρτιση της. Μία μηχανή με υψηλό λόγο βραχυκύκλωσης έχει μεγαλύτερο όγκο και βάρος και κοστίζει περισσότερο, αλλά έχει μικρότερη ρύθμιση τάσης από της μηχανές με μικρότερους λόγους βραχυκύκλωσης. Οι μηχανές με μικρότερους λόγους βραχυκύκλωσης έχουν μεγαλύτερη σύγχρονη αντίδραση και για αυτό απαιτούν ένα σύστημα ρύθμισης τάσης που παρέχει γρήγορες και μεγάλες μεταβολές στο ρεύμα πεδίου για μικρές μεταβολές στο φορτίο.

Παράγραφος 1.6

Αυτόνομη λειτουργία σύγχρονης γεννήτριας:

Θα εξετάσουμε την συμπεριφορά μιας σύγχρονης γεννήτριας που λειτουργεί αυτόνομα και τροφοδοτεί κάποιο φορτίο. Η συμπεριφορά της γεννήτριας υπό φορτίο ποικίλλει ανάλογα με το συντελεστή ισχύος του φορτίου και με το αν η γεννήτρια λειτουργεί μόνη της ή παράλληλα με άλλες σύγχρονες γεννήτριες. Για την κατανόηση των χαρακτηριστικών αυτόνομης λειτουργίας μίας γεννήτριας πρέπει να την εξετάσουμε όταν αυτή βρίσκεται υπό φορτίο. Καθ' όλη αυτή την ενότητα, οι έννοιες θα απεικονιστούν με χρήση διανυσματικών διαγραμμάτων αγνοώντας την επίδραση της R_a . Επίσης, η ταχύτητα της γεννήτριας θα θεωρηθεί σταθερή, καθώς και όλα τα χαρακτηριστικά της εξόδου που απορρέουν από την υπόθεση της σταθερής ταχύτητας. Επιπροσθέτως, η μαγνητική ροή της διέγερσης στη γεννήτρια θεωρείται σταθερή. Σε περίπτωση που μεταβάλλεται κάποιο από τα παραπάνω χαρακτηριστικά θα αναφερθεί αμέσως. Ο εναλλακτήρας έχει σταθερή την ταχύτητα του, τη μαγνητική ροή του πεδίου του δρομέα και αμετάβλητα στοιχεία διέγερσης δηλαδή σταθερό πλάτος επαγόμενης τάσης. Συνεπώς, μελετούμε τη μεταβολή της τάσης εξόδου κατά την αύξηση του ρεύματος του φορτίου σε διάφορες περιπτώσεις.

Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται σε ωμικό φορτίο όπου παρατηρείται μικρή μείωση της U_a ως προς την E_f .

Η επόμενη περίπτωση αναφέρεται σε επαγωγικό φορτίο όπου παρατηρείται σημαντική μείωση της U_a ως προς την E_f .

Τελευταία περίπτωση αναφέρεται σε χωρητικό φορτίο, όπου παρατηρείται ελάχιστη μείωση ή και αύξηση της U_a ως προς την E_f .

Επειδή επιθυμούμε η γεννήτρια να παράγει σταθερή τάση στην έξοδό της, ανεξάρτητα από το συνδεδεμένο φορτίο, αυτό μπορεί να εξασφαλιστεί διορθώνοντας κάθε φορά την τιμή της τάσης, μέσω του ρεύματος διέγερσης.

Η αύξηση στο φορτίο μίας γεννήτριας μεταφράζεται ως αύξηση της πραγματικής ή της άεργου ισχύος η οποία προέρχεται από την γεννήτρια. Μια τέτοια αύξηση του φορτίου αυξάνει το ρεύμα φορτίου που προέρχεται από την γεννήτρια. Επειδή η αντίσταση του πεδίου δεν έχει υποστεί αλλαγές, το ρεύμα του πεδίου είναι σταθερό, ως εκ τούτου η μαγνητική ροή Φ είναι σταθερή. Δεδομένου ότι η ταχύτητα περιστροφής είναι σταθερή, το μέγεθος της εσωτερικής τάσης είναι σταθερό.

($E_f = K \cdot \Phi \cdot \omega$ =σταθερό).

Εφόσον η E_f είναι σταθερή για να μάθουμε τι μεταβάλλεται αλλάζοντας το φορτίο δημιουργούμε διανυσματικά διαγράμματα τα οποία δείχνουν την αύξηση στο φορτίο, διατηρώντας τους περιορισμούς της γεννήτριας.

Εξετάζοντας μία γεννήτρια, η οποία λειτουργεί με συντελεστή ισχύος μεταπορείας (lagging), διαπιστώνουμε ότι εάν αυξήσουμε το φορτίο στον ίδιο συντελεστή ισχύος,

τότε το I_a αυξάνεται αλλά η γωνία θ μεταξύ I_a και U_a παραμένει ίδια. Δηλαδή, η τάση αντίδρασης οπλισμού (επαγωγική) $j \cdot X_s \cdot I_a$ έχει μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με πριν αλλά έχει ίδια γωνία. Δεδομένου ότι $E_f = U_a + j \cdot X_s \cdot I_a$

Η $j \cdot X_s \cdot I_a$ πρέπει να εκτείνεται μεταξύ της U_a και της E_f σε γωνία 0° . Όπου, η E_f πρέπει να έχει το ίδιο μέτρο όπως πριν από την αύξηση του φορτίου. Αποτυπώνοντας τα παραπάνω σε ένα διανυσματικό διάγραμμα, υπάρχει μόνο ένα σημείο στο οποίο η τάση αντίδρασης οπλισμού είναι παράλληλη στην αρχική, ενώ αυξάνεται σε μέγεθος. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο (Σχήμα 1.6.1 α).

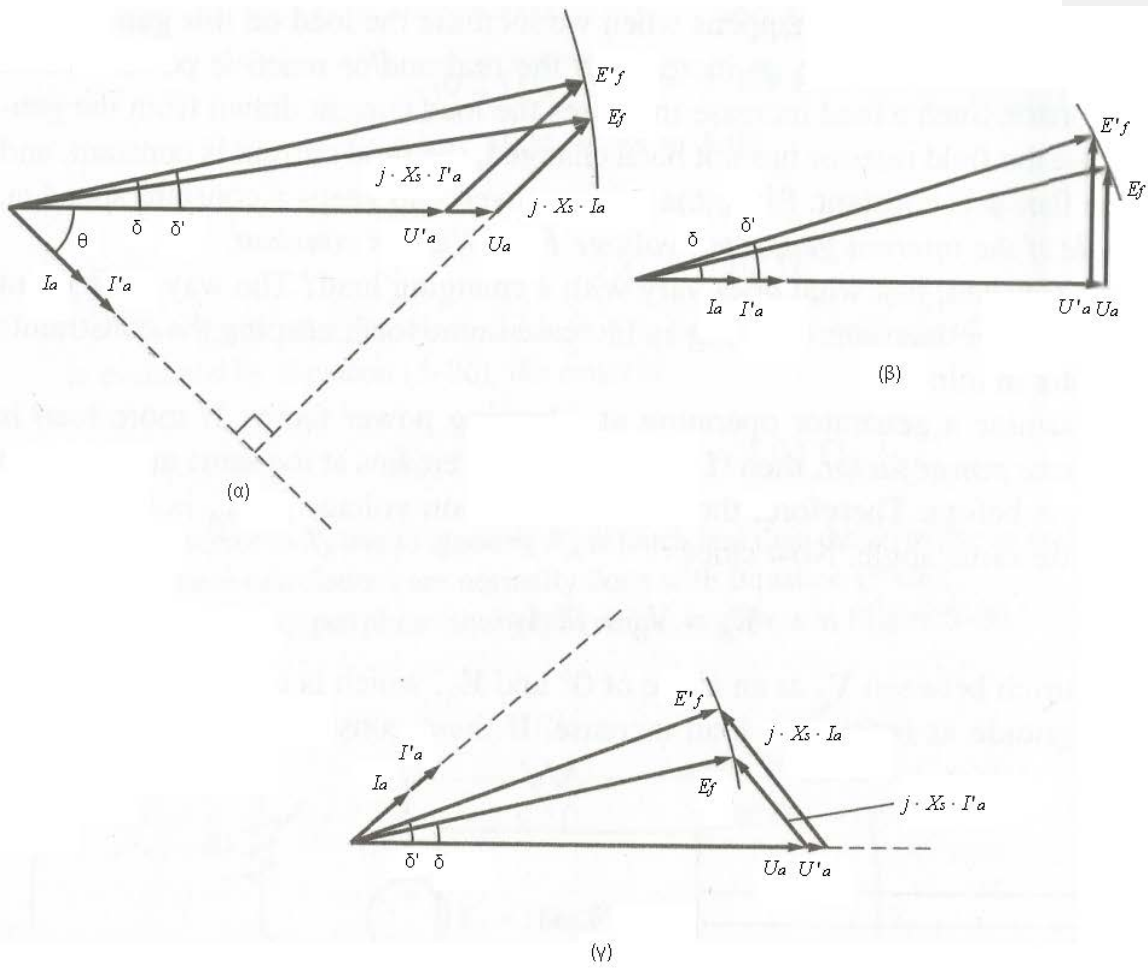
Λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς που θέσαμε, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το φορτίο η τάση U_a μειώνεται απότομα.

Θεωρώντας ότι η γεννήτρια λειτουργεί με συντελεστή ισχύος 1, αυξάνοντας το φορτίο και κρατώντας σταθερό τον συντελεστή ισχύος παρατηρούμε μία μικρή μείωση στην U_a (Σχήμα 1.6.1 β).

Στην περίπτωση, όπου η γεννήτρια λειτουργεί με συντελεστή ισχύος προπορείας (leading), αν αυξήσουμε το φορτίο στον ίδιο συντελεστή ισχύος η τάση αντίδρασης του οπλισμού βρίσκεται εκτός της προηγούμενης τιμής της με αποτέλεσμα η U_a να αυξάνεται (Σχήμα 1.6.1 γ). Δηλαδή, σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούμε μία αύξηση στην τάση εξόδου.

Τα συμπεράσματα από την συμπεριφορά της γεννήτριας που προκύπτουν είναι:

- 1) Εάν αυξήσουμε τα επαγωγικά φορτία σε μία γεννήτρια, η τάση εξόδου θα μειωθεί σημαντικά.
- 2) Εάν αυξήσουμε τα ωμικά φορτία σε μία γεννήτρια, η τάση εξόδου θα μειωθεί ελάχιστα.
- 3) Εάν αυξήσουμε τα χωρητικά φορτία σε μία γεννήτρια, η τάση εξόδου θα αυξηθεί.



Σχήμα 1.6.1. Διαγράμματα για την σχέση φορτίου - συντελεστή ισχύος

Παράγραφος 1.7

Τρόποι διέγερσης των σύγχρονων γεννητριών:

Το τύλιγμα διεγέρσεως της σύγχρονης γεννήτριας πρέπει να τροφοδοτηθεί με συνεχές ρεύμα. Στις περισσότερες περιπτώσεις ως πηγή τάσης χρησιμοποιείται ειδική γεννήτρια συνεχούς ρεύματος ονομαζόμενη διεγέρτρια. Αυτή συνδέεται αμέσως με την σύγχρονη γεννήτρια είτε στον άξονα αυτής είτε με ιμάντα. Μία δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί τον λεγόμενο μετατροπέα διεγέρσεως επειδή δεν είναι δυνατή η κατασκευή μηχανών συνεχούς ρεύματος αντιστοίχου ισχύος και αριθμού στροφών ανά λεπτό. Αυτοί χρησιμοποιούνται όπου υφίστανται πολύ χαμηλός αριθμός rpm οπότε η διεγέρτρια συνεχούς ρεύματος λαμβάνει πολύ μεγάλες διαστάσεις. Ο μετατροπέας διεγέρσεως αποτελείται από κινητήρα επαγωγής συζευγμένο μηχανικά με γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, η οποία τροφοδοτεί το συνεχές ρεύμα για την διέγερση. Ως πηγή τάσεως για την κίνηση του κινητήρα επαγωγής του μετατροπέα διεγέρσεως χρησιμεύει η σύγχρονη μηχανή ή το δίκτυο εξυπηρέτησης του σταθμού παραγωγής. Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται ίδια τριφασική γεννήτρια, η οποία συνδέεται απευθείας με την σύγχρονη μηχανή και ονομάζεται αξονική γεννήτρια. Αυτή αποτελεί την πλέον δαπανηρή αλλά και την πλέον ασφαλή λύση. Τα τελευταία χρόνια η ισχύς διέγερσης αποκτάται μέσω ελεγχόμενων ή μη ελεγχόμενων ανορθωτών. Στην περίπτωση αυτή ως πηγή εναλλασσομένου ρεύματος λαμβάνεται το δίκτυο ή η αξονική γεννήτρια. Εφόσον οι ανορθωτικές διατάξεις βρίσκονται στον δρομέα, το σύστημα διέγερσης είναι χωρίς δακτυλίους. Ανάλογα με την προέλευση της χρησιμοποιούμενης πηγής της ισχύος διέγερσης τα συστήματα αυτά διακρίνονται ως εξής:

- 1) Αυτοδιέγερση συμβαίνει όταν το ρεύμα διέγερσης προέρχεται από την ίδια την γεννήτρια ή το δίκτυο το οποίο τροφοδοτεί.
- 2) Ίδια διέγερση έχουμε όταν η γεννήτρια διεγείρεται από ιδιαίτερη μηχανή η οποία ζευγνύετε μηχανικά με αυτή.
- 3) Ξένη διέγερση έχουμε όταν η γεννήτρια διεγείρεται από ανεξάρτητη πηγή.

Η διέγερση των σύγχρονων γεννητριών πρέπει να ρυθμίζεται συνεχώς με συστήματα ελέγχου ώστε να κρατείται μέσα σε όρια το επίπεδο τάσεως ή ισολογισμός της άεργου ισχύος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο τροφοδοτεί η γεννήτρια.

Παραθέτουμε μερικά συστήματα διέγερσης:

1) Σύστημα διέγερσης με αυτοδιεγερόμενη διεγέρτρια.

Το σύστημα αυτό αποτελείται από αυτοδιεγερόμενη διεγέρτρια συνεχούς ρεύματος και ηλεκτρομηχανικό ρυθμιστή R σκοπός του οποίου είναι να τοποθετεί ή να αφαιρεί αντίσταση στο σύστημα διέγερσης της διεγέρτριας με αποτέλεσμα τον έλεγχο του ρεύματος διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας. Ο ρυθμιστής ενεργοποιείται από σήμα της τάσεως που παράγεται από την γεννήτρια μέσω αρνητικής ανατροφοδότησης. Από την δυναμική συμπεριφορά της μηχανής συνεχούς ρεύματος προκύπτει ότι το σύστημα αυτό έχει πολύ βραδεία απόκριση.

2) Σύστημα διέγερσης με διεγέρτρια διεγερόμενη από βοηθητική γεννήτρια.

Το σύστημα αυτό αποτελείται από κύρια διεγέρτρια συνεχούς ρεύματος και άλλη βοηθητική διεγέρτρια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, η οποία παρέχει την διέγερση της διεγέρτριας και η οποία είναι συνήθως συζευγμένη στον άξονα με την κύρια διεγέρτρια. Η βοηθητική διεγέρτρια, η οποία είναι αυτοδιεγερόμενη σχηματίζει μία πηγή κατά προσέγγιση σταθερής τάσεως. Ο ηλεκτρομηχανικός ρυθμιστής επεμβαίνει στο κύκλωμα διέγερσης της κύριας διεγέρτριας. Με το σύστημα αυτό επιτυγχάνονται ταχύτερες αποκρίσεις.

3) Σύστημα διεγέρσεως με Amplidyne.

Σε ποιο σύγχρονα συστήματα διέγερσης ο ηλεκτρομηχανικός ρυθμιστής αντικαθίσταται από ηλεκτρονικά στοιχεία επειδή η σύγκριση της επιθυμητής τιμής και της υπάρχουσας τιμής εκτελείται σε πολύ χαμηλό επίπεδο ισχύος, είναι αναγκαία η ενίσχυση του σήματος εξόδου στο επίπεδο της ισχύος της διεγέρσεως. Η ενίσχυση λαμβάνει χώρα σε διάφορες βαθμίδες έχοντας μία προενίσχυση η οποία δέχεται το σήμα εξόδου και επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρονικού ή μαγνητικού ενισχυτή. Το σύστημα αυτό αποτελείται από κύρια διεγέρτρια η οποία διεγείρεται από Amplidyne. Το τύλιγμα ελέγχου τροφοδοτείται από ένα προενισχυτή Π. Αν οι απαιτήσεις ενίσχυσης είναι μικρές τότε το Amplidyne μπορεί να αντικατασταθεί από απλή στρεφόμενη μηχανή συνεχούς ρεύματος. Τέλος, αν η στρεφόμενη μηχανή μπορεί να αποφευχθεί χρησιμοποιείται στην θέση του Amplidyne μαγνητικός ενισχυτής, σε αυτή την περίπτωση ο προενισχυτής είναι επίσης μαγνητικός ενισχυτής.

4) Σύστημα διέγερσης με ελεγχόμενους ανορθωτές.

Η χρήση της μηχανής συνεχούς ρεύματος ως κύριας διεγέρτριας παρουσιάζει και ευπαθή σημεία όπως ο συλλέκτης και οι δακτύλιοι ολίσθησης. Ένας τρόπος αποφυγής της μηχανής συνεχούς ρεύματος αποτελεί το σύστημα διέγερσης με ελεγχόμενους ανορθωτές οι οποίοι τροφοδοτούν απευθείας το τύλιγμα διέγερσης της σύγχρονης μηχανής. Ως πηγή τάσης χρησιμεύει είτε το δίκτυο, είτε αξονική γεννήτρια, η οποία είναι πολυφασική σύγχρονη μηχανή πεπλατυσμένης μορφής. Η διέγερση της κρατείται σταθερή. Επίσης, η αξονική γεννήτρια μπορεί να είναι μηχανή μαγνητικής αντίστασεως. Ο έλεγχος της διεγέρσεως της σύγχρονης μηχανής επιτυγχάνεται με παρέμβαση στις εσχάρες των ανορθωτών. Η απόκριση του συστήματος αυτού είναι ταχύτατη. Μια εναλλακτική μορφή του συστήματος αυτού

λαμβάνεται όταν χρησιμοποιηθούν μη ελεγχόμενοι ανορθωτές οπότε ο έλεγχος της διέγερσης επιτυγχάνεται μέσω της διέγερσης της αξονικής γεννήτριας. Αυτή έχει τους πόλους στον στάτη ενώ ο δρομέας με το τύλιγμα τυμπάνου συναρμολογείται μετά των ανορθωτών πάνω στον άξονα της σύγχρονης μηχανής.

5) Η αυτοδιεγερόμενη σύγχρονη μηχανή

Το ρεύμα διέγερσης περιορίζεται μόνο από την αντίσταση του κυκλώματος διέγερσης, είναι δηλαδή ανάλογο της τάσεως ακροδεκτών της μηχανής. Υπό κενό φορτίο προσδιορίζεται το σημείο λειτουργίας της μηχανής ως τομή των χαρακτηριστικών κενού φορτίου της μηχανής και του κυκλώματος διέγερσης. Ο μηχανισμός αυτοδιέγερσης, μέχρι το σημείο λειτουργίας είναι αυτός όπως και στην γεννήτρια συνεχούς ρεύματος με παράλληλη διέγερση, εκκινεί από την τάση του παραμένουτος μαγνητισμού για να καταλήξει στο σημείο λειτουργίας. Υπό φορτίο όμως λόγω της αντίδρασης τυμπάνου η τάση ακροδεκτών επηρεάζεται ισχυρά από το φορτίο εφόσον το ρεύμα διέγερσης παραμένει σταθερό. Έτσι με ωμικό ή ωμικοεπαγωγικό φορτίο υφίστανται χαρακτηριστικές ρεύματος τάσεως με ισχυρή πτώση οπότε η γεννήτρια καθίστανται πρακτικώς άχρηστη. Γι' αυτό η διάταξη αυτή πρέπει να αντισταθμιστεί έτσι ώστε το ρεύμα διέγερσης που προκύπτει να είναι τέτοιο ώστε η τάση ακροδεκτών να παραμένει σταθερή ανεξάρτητα του είδους και του μεγέθους του φορτίου. Η αντισταθμίση επιτυγχάνεται με κατάλληλη ανατροφοδότηση σημάτων τόσο από την τάση ακροδεκτών όσο και από το ρεύμα του φορτίου.

Παράγραφος 1.8

Παράλληλη λειτουργία γεννητριών:

Οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν εύκολα να λειτουργήσουν παράλληλα. Βασικοί λόγοι που επιβάλλουν την παράλληλη λειτουργία είναι η συνεχής και αξιόπιστη εξυπηρέτηση των καταναλωτών, η οικονομία στις επενδύσεις, το χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και η αυξημένη ηλεκτρική ευστάθεια του δικτύου.

Για να παραλληλίσουμε 2 σύγχρονες γεννήτριες πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες:

- 1) Οι εναλλακτικές να είναι του ίδιου είδους.
- 2) Τα πλάτη των πολικών τάσεων στα άκρα των γεννητριών να είναι ίδια.
- 3) Οι συχνότητες των γεννητριών να είναι ίδιες.
- 4) Η διαδοχή των φάσεων να είναι η ίδια.
- 5) Να μην υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ των αντιστοίχων τάσεων.

Θεωρούμε 2 όμοιες τριφασικές γεννήτριες που λειτουργούν παράλληλα και τροφοδοτούν ένα συμμετρικό τριφασικό φορτίο. Η αντίσταση τυμπάνου των 2 γεννητριών αμελείται. Το φορτίο μπορεί πραγματικά να συνδεθεί κατ αστέρα ή τρίγωνο ή μπορεί να είναι συνδυασμός φορτίων συνδεδεμένων κατά αστέρα ή κατά τρίγωνο. Όμοια, οι γεννήτριες μπορούν να είναι συνδεδεμένες κατά τρίγωνο και να παρίστανται από έναν ισοδύναμο αστέρα. Η τάση ακροδεκτών είναι αυτή και για τις 2 γεννήτριες ανεξάρτητα από την διανομή των φορτίων ενεργού και άεργου ισχύος μεταξύ των γεννητριών. Επιπλέον, το διανυσματικό άθροισμα των ρευμάτων των 2 μηχανών πρέπει να είναι ίσο με το ρεύμα του φορτίου. Έτσι: $I_1 + I_2 = I_\lambda$ όπου I_1, I_2 τα ρεύματα των 2 γεννητριών και I_λ το ρεύμα του φορτίου ανά φάση. Όταν οι 2 γεννήτριες παρέχουν ίσες ενεργούς και άεργους ισχύς τότε $I_1 = I_2 = \frac{I_\lambda}{2}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

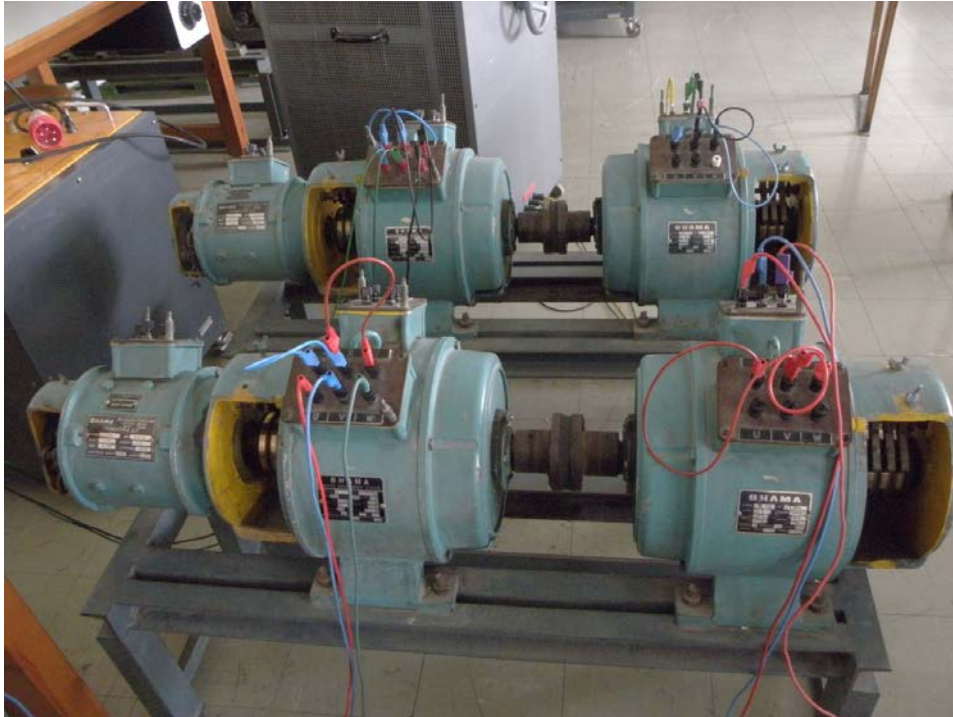
Παράγραφος 2.1

Παραλληλισμός 2 γεννητριών εναλλασσομένου ρεύματος



Σχήμα 2.1.1

Παραλληλισμός δύο γεννητριών οι οποίες περιστρέφονται με χρήση δύο κινητήρων και η διέγερση τους τροφοδοτείται με χρήση συνεχούς τάσης.



Σχήμα 2.1.2. Παραλληλισμός δύο γεννητριών



Σχήμα 2.1.3. Παραλληλισμός δύο γεννητριών μαζί με όλη τη διάταξη



Σχήμα 2.1.4. Παραλληλισμός δύο γεννητριών

Παράγραφος 2.2

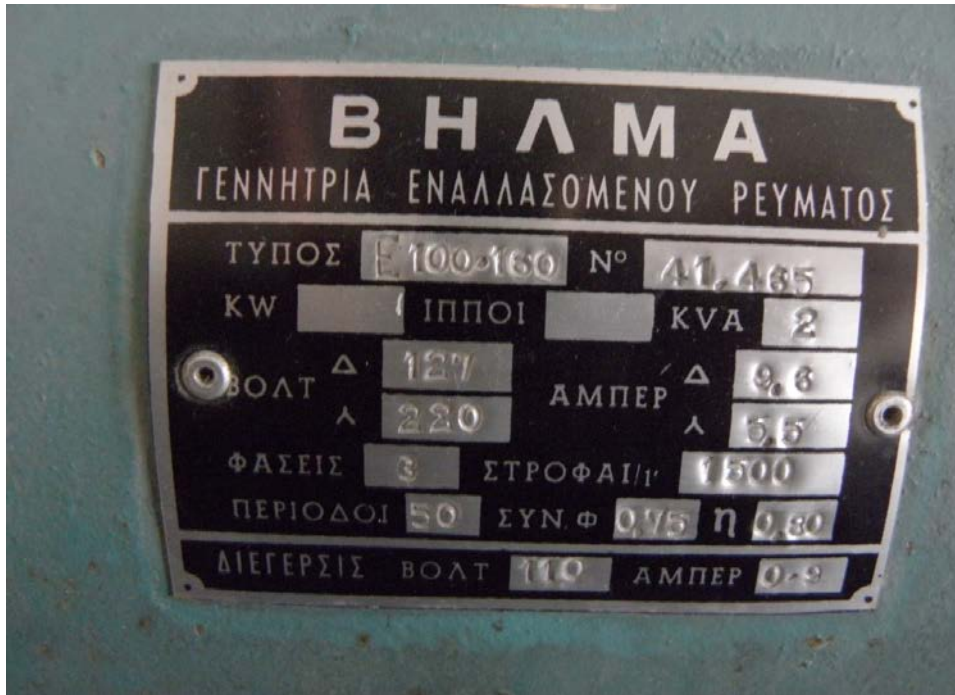
Περιγραφή των γεννητριών

Φάσεις	Στροφές (rpm)	Συχνότητα (Hz)	Συνημίτονο (cosφ)	Απόδοση (η)		Τάση (V)	Ρεύμα (A)
3	1500	50	0,75	0,8	Τρίγωνο	127	9,6
					Αστέρας	220	5,5

Τα παραπάνω στοιχεία ισχύουν και για τις δύο γεννήτριες εφόσον οι γεννήτριες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ίδιου τύπου, ίδιας κατασκευής καθώς και της ίδιας εταιρίας.



Σχήμα 2.2.1. Χαρακτηριστικά γεννήτριας εναλλασσομένου ρεύματος



Σχήμα 2.2.2. Χαρακτηριστικά γεννήτριας εναλλασσομένου ρεύματος

Παράγραφος 2.3

Περιγραφή διαδικασίας παραλληλισμού

Δύο γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος για να λειτουργούν παράλληλα πρέπει όχι μόνο να έχουν την ίδια ταχύτητα αλλά και την ίδια φάση. Εάν οι ουδέτεροι είναι συνδεδεμένοι και η τάση μεταξύ των 2 ακροδεκτών των δύο γεννητριών μετρηθεί ισχύουν τα παρακάτω:

1) Σε περίπτωση που η διαφορά φάσης στους 2 ακροδέκτες είναι 0° (δηλαδή συμφασικές) η τάση μεταξύ των ακροδεκτών είναι 0V.

2) Σε περίπτωση που η διαφορά φάσης είναι 180° η τάση μεταξύ των ακροδεκτών είναι το άθροισμα των τάσεων των 2 γεννητριών. Αφού η τάση εξόδου της κάθε γεννήτριας είναι ίδια, η τάση θα είναι 2 φορές η ονομαστική. Οι γεννήτριες μπορούν να συνδεθούν μόνο όταν η τάση μεταξύ των ακροδεκτών είναι 0V.

Για να επιτευχθεί ο παραλληλισμός χρειαζόμαστε 2 λαμπτήρες ανά φάση συνδεδεμένοι σε σειρά με τους ακροδέκτες των 2 γεννητριών και με χρήση ενός ασφαλειοδιακόπτη.

Εάν οι γεννήτριες έχουν διαφορά φάσης 180° τότε η τάση στα άκρα των λαμπτήρων θα είναι η διπλάσια της ονομαστικής και οι λαμπτήρες θα ακτινοβολούν πλήρως. Αν η διαφορά φάσης είναι 0° τότε δεν θα υπάρχει τάση στα άκρα τους και άρα οι λαμπτήρες δεν θα ακτινοβολούν. Σε περίπτωση που οι κινητήρες οι οποίοι κινούν τις γεννήτριες έχουν διαφορετική ταχύτητα οι λαμπτήρες θα τρεμοπαίζουν λόγω της εναλλαγής των φάσεων.

Στην συνέχεια εκκινούμε την δεύτερη γεννήτρια. Οι λαμπτήρες ή θα τρεμοπαίζουν ή θα αναβοσβήνουν με αργό ρυθμό. Σε περίπτωση που η ταχύτητα η οποία δίνεται στις γεννήτριες είναι διαφορετική κάνουμε έλεγχο της ταχύτητας, έτσι ώστε να μειώσουμε το αναβόσβημα των λαμπτήρων. Μόλις οι ταχύτητες αρχίσουν να γίνονται ίσες οι λαμπτήρες θα παραμείνουν σβηστοί για κάποιο χρονικό διάστημα, στην συνέχεια θα ανάβουν με αργό ρυθμό μέχρι να ακτινοβολήσουν πλήρως, ακολουθούμενη από ελάττωση η φωτεινότητα με αργό ρυθμό έως ότου την σβέση τους. Κάνουμε έλεγχο της ταχύτητας επιδιώκοντας οι λαμπτήρες να παραμείνουν σβηστοί για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Θα κλείσουμε τον ασφαλειοδιακόπτη μόλις η τάση μεταξύ των γεννητριών είναι η ελάχιστη. Δεδομένου ότι οι λαμπτήρες θα σβήσουν πριν η τάση να μηδενιστεί θα πρέπει να μετρήσουμε τον χρόνο μεταξύ 2 καταστάσεων, στις οποίες οι λαμπτήρες ακτινοβολούν πλήρως έτσι ώστε να κλείσουμε τον διακόπτη ενδιάμεσα της εναλλαγής. Μόλις ο διακόπτης κλείσει ο παραλληλισμός έχει ολοκληρωθεί. Αν σταματήσουμε την κίνηση σε μία γεννήτρια όταν έχει τις ονομαστικές στροφές της και οι γεννήτριες έχουν πολύ μικρή διαφορά φάσης, θα εξαναγκαστούν σε μηδενική διαφορά φάσης καθώς θα τις διαρρεύσει ένα υψηλό ρεύμα. Σε περίπτωση παραμονής σε αυτή την κατάσταση το αποτέλεσμα θα είναι η γεννήτρια να συμπεριφέρεται ως κινητήρας. Αν τώρα εφαρμόσουμε αυτή την μέθοδο και υπάρχει μεγάλη διαφορά φάσης θα οδηγηθούμε σε καταστροφή των γεννητριών, διότι έχουμε βραχυκύκλωμα το οποίο διπλασιάζει την τάση. Μόλις οι γεννήτριες παραλληλιστούν το φορτίο που θα υποβαστάζει η κάθε μία θα ελέγχεται από έναν ρυθμιστή. Η γεννήτρια με τις μεγαλύτερες ονομαστικές στροφές θα αποδεχτεί το υψηλότερο φορτίο.

Στις πραγματικές εγκαταστάσεις για να διευκολυνθούν οι χειρισμοί χρησιμοποιούνται ορισμένα όργανα με τα οποία εξασφαλίζουμε με ταχύτερο τρόπο τις συνθήκες

συγχρονισμού. Τα όργανα αυτά ονομάζονται συγχρονοσκόπια. Το συγχρονοσκόπιο δείχνει την στιγμιαία γωνία φασικής μετατόπισης (γωνία σφάλματος) μεταξύ 2 κυματομορφών τάσης. Εάν οι κυματομορφές τάσης έχουν διαφορετικές συχνότητες, η γωνία μεταξύ των 2 κυμάτων που ονομάζεται γωνία σφάλματος θα αλλάζει συνεχώς με αποτέλεσμα την περιστροφή του δείκτη του οργάνου. Όταν συνδεθεί σωστά, το συγχρονοσκόπιο δείχνει την ηλεκτρική ταχύτητα της εισερχόμενης μηχανής σε σχέση με εκείνη του ζυγού. Εάν το συγχρονοσκόπιο γυρίσει προς την κατεύθυνση με την ένδειξη “SLOW”, η νέα μηχανή θα έχει χαμηλότερη συχνότητα από εκείνη του ζυγού. Σ’ αυτή την περίπτωση η συχνότητα γυρίσει προς την κατεύθυνση “FAST” η εισερχόμενη μηχανή έχει υψηλότερη συχνότητα από αυτή του ζυγού. Εάν η συχνότητα της εισερχόμενης μηχανής είναι ίση με την συχνότητα του ζυγού ο δείκτης δεν θα γυρίσει, οπότε η θέση του δείκτη θα δείχνει την γωνία σφάλματος. Εάν συμβεί αυτό η κινητήρια μηχανή της εισερχόμενης μηχανής θα πρέπει να αυξήσει την ταχύτητα της με ρυθμιστή ταχύτητας. Η εισερχόμενη μηχανή θα πρέπει να παραλληλιστεί την στιγμή που ο δείκτης συγχρονοσκοπίου φτάνει στην μη μηδενική θέση ενώ γυρνά αργά προς την κατεύθυνση “FAST”. Αφού παραλληλιστεί, ο δείκτης συγχρονοσκοπίου δεν θα γυρίζει πια, αλλά θα παραμένει στην μηδενική θέση. Όμως λόγω της μικρής καθυστέρησης που οφείλεται στο χρόνο ανθρώπινης αντίδρασης και στο χρόνο για το κλείσιμο του αποζεύκτη, καλό είναι να ξεκινά η διαδικασία για το κλείσιμο αποζεύκτη μία ή δύο μοίρες πριν ο δείκτης συγχρονοσκοπίου φτάσει στην μηδενική θέση. Το κλείσιμο του αποζεύκτη, όταν η γωνία σφάλματος είναι μεγαλύτερη από 10^0 , θα προκαλέσει ένα υψηλό μεταβατικό ρεύμα συγχρονισμού μεταξύ της εισερχόμενης γεννήτριας και του ζυγού, το οποίο με την σειρά του θα προκαλέσει αυτόματη ενεργοποίηση του αποζεύκτη της γεννήτριας. Εάν ο ζυγός είναι ήδη υπερφορτισμένος και ο αποζεύκτης κλείσει, όταν η γωνία σφάλματος είναι κοντά στις 180^0 μπορεί να συμβεί black out σε ολόκληρο το σύστημα. Ακόμα, το μεταβατικό ρεύμα που σχετίζεται με μία ακραία εκτός φάσης προσπάθεια συγχρονισμού προκαλεί υπερβολικές ροπές ταλάντωσης τόσο στα τυλίγματα στάτη όσο και στα τυλίγματα δρομέα που μπορούν να προκαλέσουν άμεση καταστροφή.

Παράγραφος 2.4

Περιγραφή εργαστηριακού εξοπλισμού που θα χρησιμοποιήθηκε

κατά την εργαστηριακή άσκηση



Σχήμα 2.4.1. Γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος



Σχήμα 2.4.2. Γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος με κινητήρα



Σχήμα 2.4.3. Γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος συνδεδεμένη με 2 βαττόμετρα



Σχήμα 2.4.4. Γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος συνδεδεμένη με 2 βαττόμετρα, αμπερόμετρο, βολτόμετρο με την διέγερση της τροφοδοτούμενη από πηγή συνεχούς τάσης



Σχήμα 2.4.5 Παραλληλισμός δύο γεννητριών μαζί με όλη την διάταξη



Σχήμα 2.4.6. Αυχνίες και διακόπτης συγχρονισμού για παραλληλισμό 2 γεννητριών

Παράγραφος 2.5

Βήματα για την επίτευξη του παραλληλισμού των 2 γεννητριών

Συνδέουμε τα άκρα της εξόδου των γεννητριών που θέλουμε να παραλληλίσουμε σε έναν τριπολικό ασφαλειοδιακόπτη που παραμένει ανοικτός. Παράλληλα με τους ακροδέκτες εξόδου συνδέουμε για κάθε φάση δύο λυχνίες σε σειρά τάσης 220V. Στην έξοδο των 2 γεννητριών συνδέουμε ένα τριφασικό φορτίο.

Χειρισμοί

- 1) Θέτουμε σε λειτουργία τις 2 γεννήτριες.
- 2) Ρυθμίζουμε τις 2 γεννήτριες ώστε να έχουν ίσες τάσεις εξόδου.
- 3) Ρυθμίζουμε τις στροφές έτσι ώστε να έχουν ίδιες συχνότητες παραγόμενων τάσεων.
- 4) Κλείνουμε τον γενικό ασφαλειοδιακόπτη των γεννητριών ώστε να αρχίσουν να αναβοσβήνουν οι λυχνίες ,αν αναβοσβήνουν ταυτόχρονα έχουμε αντιστοιχία φάσεων.
- 5) Την στιγμή που οι λυχνίες είναι σβηστές κλείνουμε τον γενικό ασφαλειοδιακόπτη και ο παραλληλισμός έχει επιτευχθεί.

Αν σταματήσουμε να δίνουμε στροφές σε μία παραλληλισμένη γεννήτρια τότε μετατρέπεται σε σύγχρονο κινητήρα και μας δίνει ο ίδιος στροφές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο άνεμος έχει δύο κύρια χαρακτηριστικά:

- 1) τη δύναμη που συγκεντρώνεται στην ταχύτητα ή την ένταση και
- 2) τη διεύθυνση.

Η κινητική ενέργεια που παράγεται από την δύναμη του ανέμου και μετατρέπεται σε μηχανική ή και σε ηλεκτρική, ονομάζεται αιολική ενέργεια.

Ο άνεμος (αιολική ενέργεια) δημιουργείται από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο, προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας έτσι τους ανέμους. Είναι μια ήπια μορφή ενέργειας, φιλική προς το περιβάλλον, πρακτικά ανεξάντλητη, γι' αυτό και είναι ανανεώσιμη.

Η βιομηχανική εφαρμογή έχει αυξηθεί ταχύτατα τα τελευταία 10-15 χρόνια. Η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται συνεχώς με ετήσιο ρυθμό άνω του 30%. Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας γίνεται με ειδικές μηχανές, που μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι μηχανές αυτές ονομάζονται ανεμογεννήτριες.

Αν υπήρχε η δυνατότητα, με την σημερινή τεχνολογία, να καταστεί εκμεταλλεύσιμο το συνολικό αιολικό δυναμικό της γης, εκτιμάται ότι η παραγόμενη σε ένα χρόνο ηλεκτρική ενέργεια θα ήταν υπερδιπλάσια από τις ανάγκες τις ανθρωπότητας στο ίδιο διάστημα. Υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της γης επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας πάνω από 5.1m/sec, σε ύψος 10m πάνω από το έδαφος. Όταν οι άνεμοι πνέουν με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή την τιμή, τότε το αιολικό δυναμικό του τόπου θεωρείται εκμεταλλεύσιμο και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις μπορούν να καταστούν οικονομικά βιώσιμες, σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα.

Άλλωστε το κόστος κατασκευής των ανεμογεννητριών έχει μειωθεί σημαντικά και μπορεί να θεωρηθεί ότι η αιολική ενέργεια διανύει την πρώτη περίοδο ωριμότητας, καθώς είναι πλέον ανταγωνιστική των συμβατικών μορφών ενέργειας.

Οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες, με βάση τη θέση του άξονα περιστροφής:

- 1) **Κατακόρυφου άξονα**, ο οποίος παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την οριζόντια επιφάνεια του εδάφους.
- 2) **Οριζόντιου άξονα**, των οποίων ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους.

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα, ανεμογεννητριών, είναι εκείνα στα οποία ο άξονας περιστρέφεται οριζόντια και καταλαμβάνουν ποσοστό περίπου της τάξεως του 95% των διαθέσιμων συστημάτων αιολικής ενέργειας.

Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα είναι ευρέως γνωστές και είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διότι έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα περιστροφής. Ο περιστρεφόμενος μηχανισμός τους λέγεται δρομέας και μπορεί να αποτελείται από ένα πτερύγιο (μονόπτερος) ή και περισσότερα (πολύπτερος).

Για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης πρέπει το επίπεδο του δρομέα να είναι παράλληλο στην κατεύθυνση του ανέμου. Για το σκοπό αυτό στις μικρές ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου, υπάρχει ειδικό πτερύγιο που ευθυγραμμίζει τον άξονα του δρομέα ως προς τον άνεμο. Στις μεγάλες ανεμογεννήτριες υπάρχει ειδικός μηχανισμός που ονομάζεται σύστημα προσανατολισμού.

Μέρη ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα

Τα μέρη από τα οποία αποτελείται μία ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα είναι:

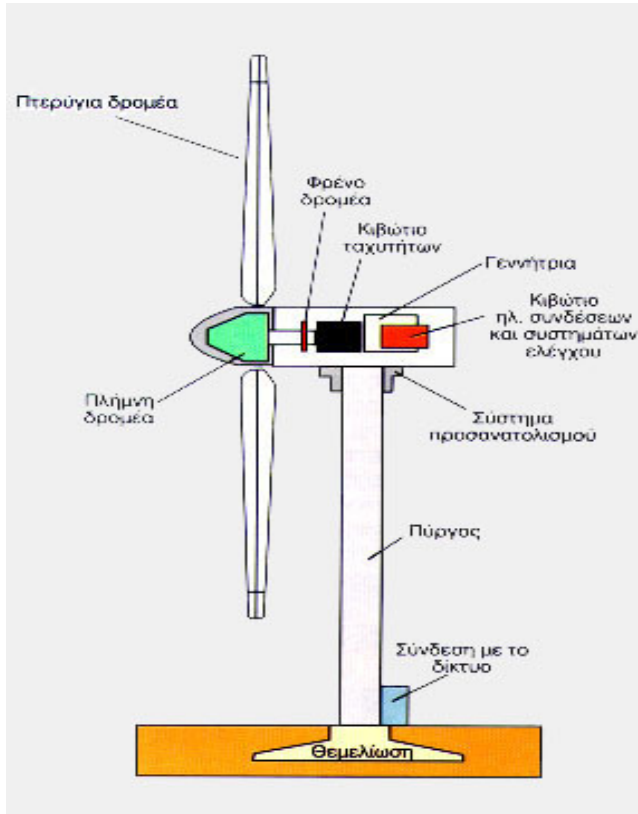
- 1) **Δρομέας.** Αποτελείται από δύο πτερύγια (συνήθως από ενισχυμένο πολυεστέρα). Τα πτερύγια προσδένονται πάνω στη πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονά της μεταβάλλοντας το βήμα.

Οι ανεμογεννήτριες με τρία πτερύγια (τρίπτερες), κατασκευάζονται και με ρότορες μικρών διαστάσεων και έχουν τη δυνατότητα εκμετάλλευσης ασθενούς αιολικού δυναμικού.



Σχήμα 3.1. Τρίπτερη ανεμογεννήτρια

Οι ανεμογεννήτριες με δύο πτερύγια (δίπτερες), κατασκευάζονται με ρότορα από 10 μέτρα και πάνω και έχουν κόστος κατασκευής και συντήρησης μικρότερο από αυτό των τρίπτερων αντίστοιχου μεγέθους.



Σχήμα 3.2. Δίπτερη ανεμογεννήτρια

- 2) **Σύστημα μετάδοσης της κίνησης.** Αποτελείται από τον κύριο άξονα περιστροφής, από τα έδρανα στήριξης και από το κιβώτιο προσαρμογής των στροφών.
Το κιβώτιο προσαρμογής των στροφών (κιβώτιο πολλαπλασιασμού των στροφών), προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας εξαρτάται από τον αριθμό ζευγών των πόλων που έχει και παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία.
- 3) **Ηλεκτρική γεννήτρια.** Συνήθως είναι σύγχρονη με 2 έως και 10 ζεύγη πόλων και συνδέεται με τον άξονα του κιβωτίου προσαρμογής, μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου, που μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.
Η ταχύτητα της γεννήτριας για τη συχνότητα των 50 Hz, που έχει το κεντρικό δίκτυο διανομής, θα πρέπει να είναι:

α) Για δύο ζεύγη πόλων ($p = 2$),

$$3)4) \quad \eta_s = \frac{f \cdot 60}{p}$$

$\eta_s = (f \cdot 60) / p$ και $\eta_s = 1500 \text{ στρ/min}$ ή 25 στρ/sec

β) Για δέκα ζεύγη πόλων ($p = 10$), $\eta_s = 300 \text{ στρ/min}$ ή 5 στρ/sec .

4)5) **Σύστημα πέδησης ή φρένο δρομέα.** Τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας και λειτουργεί όπως το συνηθισμένο δισκόφρενο.

5)6) **Σύστημα προσανατολισμού.** Βρίσκεται στην κορυφή του πύργου στήριξης με την ανεμογεννήτρια να εδράζεται πάνω σ' αυτό. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας αναγκάζει τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται συνεχώς παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.

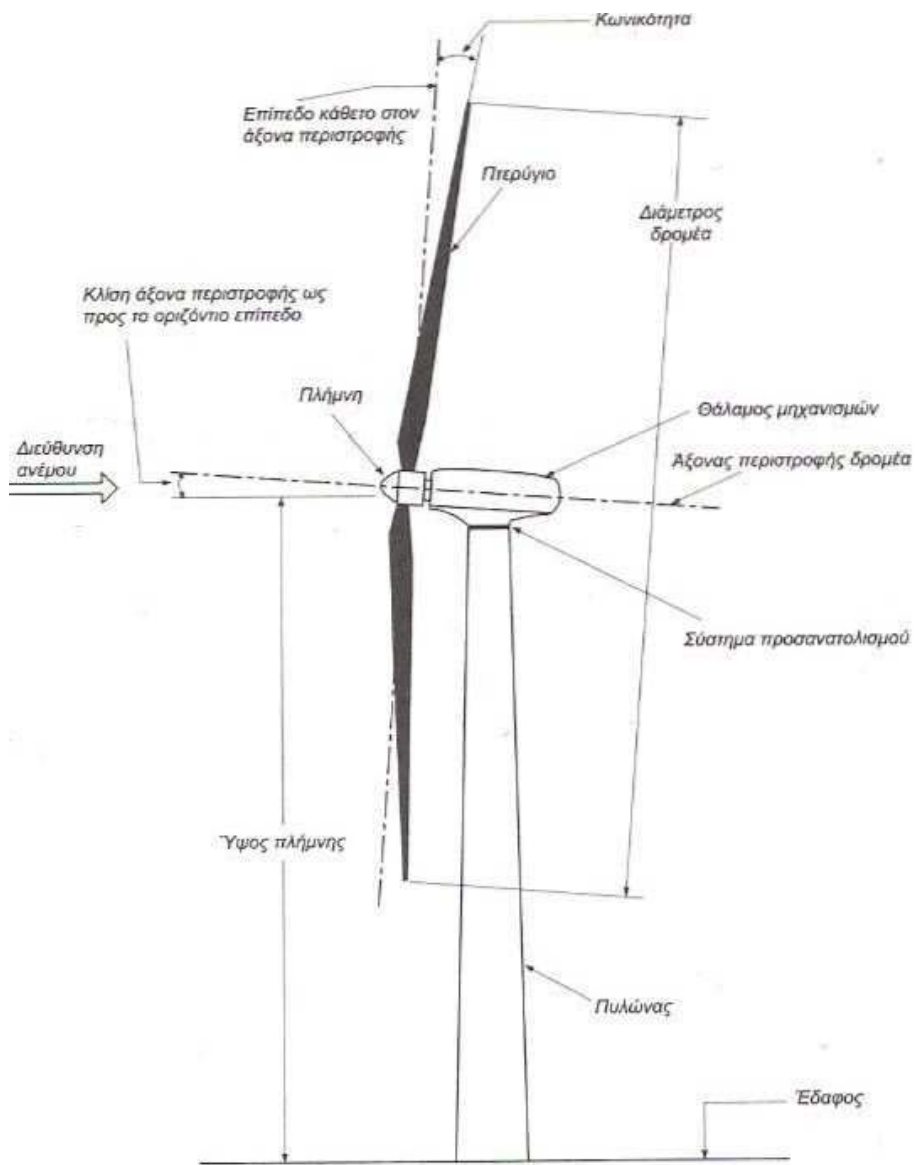
6)7) **Πύργος στήριξης.** Στηρίζει όλη την αναγκαία ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Είναι μεταλλικής κατασκευής (σωληνωτός ή δικτυωτός) και σπάνια από οπλισμένο σκυρόδεμα.

7)8) **Ηλεκτρικός Ηλεκτρονικός πίνακας.** Τοποθετείται συνήθως στη βάση του πύργου και με τις κατάλληλες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές διατάξεις, παρακολουθεί, ελέγχει και συντονίζει με ασφάλεια όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας.

8)9) **Βάση στήριξης (θεμελίωση).** Η βάση κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσα στο οποίο ~~εγκαθίσταται~~εγκιβωτίζεται ο κορμός του πύργου στήριξης. Το μέγεθος της βάσης στήριξης, (εξωτερικές διαστάσεις, διαστάσεις οπλισμού και κατηγορία σκυροδέματος) καθορίζεται μετά από προσεκτική μελέτη Μηχανικού.

Formatted: Font: Bold, Underline

Field Code Changed



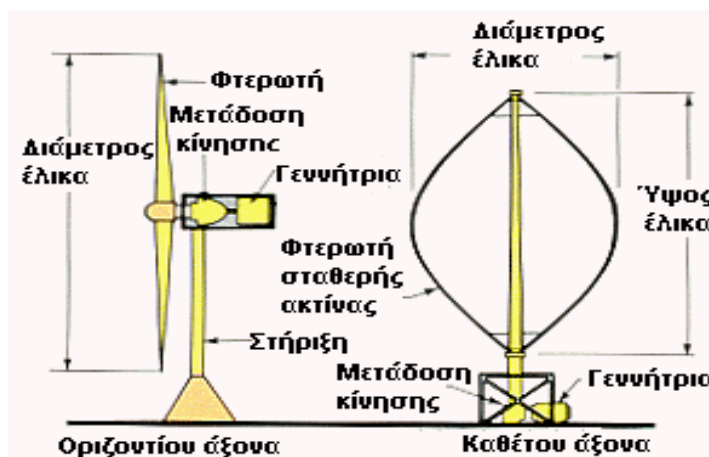
Σχήμα 3.3. Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα

Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα περιστροφής έχουν συνήθως χαμηλότερη απόδοση σχετικά με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, γι' αυτό δεν είναι και ιδιαίτερα διαδεδομένες. Ωστόσο, παρουσιάζουν μεγαλύτερο αρχιτεκτονικό ενδιαφέρον, ενώ είναι πιο αποτελεσματικές στο αστικό περιβάλλον, καθώς έχουν τη δυνατότητα να εκμεταλλεύονται τους ανέμους διαφορετικών κατευθύνσεων. Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα περιστροφής είναι πιο αθόρυβες και επηρεάζονται λιγότερο από τις αναταράξεις και τις δονήσεις, συγκριτικά πάντα με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, επειδή δεν χρειάζονται άνεμο συγκεκριμένης διεύθυνσης για να περιστραφούν.

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα αποτελούνται από τα ίδια μέρη με τις ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα, όμως η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων βρίσκονται στο έδαφος οπότε η συντήρησή τους είναι πιο εύκολη. Στο **σχήμα 3.4** φαίνονται τα μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα (αριστερά) σε αντιστοιχία με τα μέρη μιας ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα (δεξιά).

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κατασκευής ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα, η Savonius και η Darrieus. Η Savonius έχει σχήμα S στην κάτωψη, ενώ η Darrieus είναι σαν καλάθι. Ωστόσο, υπάρχουν και ανεμογεννήτριες που είναι συνδυασμός των δύο αυτών τύπων.



Σχήμα 3.4. Βασικά μέρη ανεμογεννητριών

- Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα τύπου Darrieus

Ο σχεδιασμός της ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα Darrieus έγινε από έναν Γάλλο αεροναυπηγό τον George Jean Marie Darrieus το 1931. Οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus αποτελούνται από καμπτόμενα πτερύγια και λειτουργούν με τη χρήση των δυνάμεων της άντωσης που ασκούνται πάνω στα πτερύγια. Ο αριθμός των πτερυγίων μπορεί να είναι δύο, τρία ή και περισσότερα. Ο λόγος που τα πτερύγια είναι καμπτόμενα είναι οι μεγάλες καμπτικές τάσεις που προκαλούνται λόγω των

φυγοκεντρικών δυνάμεων από την περιστροφή. Οι καμπτικές τάσεις μειώνονται σημαντικά εάν τα πτερύγια έχουν τη μορφή που θα έπαιρνε ένα χαλαρό σχοινί κατά την περιστροφή του. Αυτό συμβαίνει σε μεγάλες ανεμογεννήτριες. Σε μικρότερες, όπου οι φυγοκεντρικές δυνάμεις δεν είναι τόσο μεγάλες, τα πτερύγια είναι κατακόρυφα ή έχουν διάφορες μορφές ανάλογα με τις παραλλαγές του δρομέα.



Σχήμα 3.5. Ανεμογεννήτρια Darrieus

Τα πτερύγια τοποθετούνται σε διάταξη 180 ή 120 μοιρών. Η επιλογή του πλήθους των πτερυγίων πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή καθώς ο διπτέρυγος δρομέας έχει έντονη μεταβολή της ροπής με έντονες αποκλίσεις από τη μέση τιμή. Αντίθετα η αεροδυναμική του τριπτέρυγου δρομέα είναι σχετικά σταθερή σε ολόκληρη την περιοχή λειτουργίας του. Επίσης η αεροδυναμική απόδοση του τριπτέρυγου δρομέα είναι κατά κανόνα καλύτερη από αυτής του διπτέρυγου. Βέβαια είναι προφανές ότι ο διπτέρυγος είναι πιο οικονομικός.

Η απόδοση της ανεμογεννήτρια Darrieus είναι καλή σε σχετικά υψηλές ταχύτητες αέρα, όμως κατά την εκκίνηση δεν αναπτύσσεται ικανοποιητική ροπή με αποτέλεσμα να μην εκκινεί χωρίς «βοήθεια». Ένας τρόπος επίλυσης του προβλήματος αυτού είναι η εξωτερική διέγερση, δηλαδή η γεννήτρια να χρησιμοποιείται σαν κινητήρας περιστροφής του δρομέα. Μόλις ο δρομέας αποκτήσει την κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής ώστε να αρχίσει να αποδίδει ενέργεια η γεννήτρια επαναφέρεται στην αρχική της κατάσταση.

Άλλος τρόπος είναι η τοποθέτηση στον άξονα περιστροφής ενός μικρού δρομέα Savonius (περιγράφονται σε ακόλουθη παράγραφο) που χάρη στη μεγάλη ροπή εκκίνησης εξασφαλίζει εκκίνηση χωρίς προβλήματα.



Σχήμα 3.6. Ανεμογεννήτρια Darrieus με βοηθητική Savonius



Σχήμα 3.7. Ανεμογεννήτρια Darrieus τύπου H

Παραλλαγή της ανεμογεννήτρια Darrieus είναι η Darrieus-H(σχήμα 3.7), που έχει πάρει το όνομα της από το σχήμα της που θυμίζει το Η. Η διαφορά με την κλασσική Darrieus είναι τα πτερύγια τα οποία είναι κάθετα σε αυτήν την περίπτωση. Λόγω των κάθετων πτερυγίων η ταχύτητα περιστροφής μπορεί να είναι μεγαλύτερη άρα η απόδοση είναι καλύτερη. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι με την σωστή επιλογή πτερυγίων, μπορεί να επιτευχτεί εκκίνηση χωρίς εξωτερική πηγή ενέργειας ή τη χρήση βοηθητικής Savonius

- **Ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα τύπου Savonius**

Στις ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα τύπου Savonius, ο δρομέας ονομάζεται τύπου S λόγω του σχήματος της κάτωψης των πτερυγίων. Η περιστροφή του δρομέα από τον άνεμο δεν οφείλεται μόνο στη διαφορά του συντελεστή αντιστάσεως του κοίλου και του κυρτού πτερυγίου, αλλά και στο διάκενο (e), χάρη στο οποίο ο αέρας περνάει μέσα από αυτό και αυξάνει την πίεση στο πίσω μέρος του κυρτού πτερυγίου, αυξάνοντας έτσι τη ροπή που αναπτύσσεται γύρω από τον άξονα.

Ο δρομέας Savonius λόγω του ότι είναι κατακόρυφου άξονα και παρουσιάζει συμμετρία προσανατολίζεται αυτόματα κατά τη διεύθυνση του ανέμου και δεν έχει συνεπώς την ανάγκη των ακριβών διατάξεων προσανατολισμού του οριζοντίου άξονα.

Επίσης το παραγόμενο μηχανικό έργο μεταφέρεται μέσω του κατακόρυφου άξονα απ' ευθείας στο έδαφος όπου βρίσκεται και η γεννήτρια. Έτσι μειώνεται το κόστος σε σχέση με του οριζοντίου άξονα που τα όργανα βρίσκονται στον πύργο. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι το ότι εκκινεί μόνος του και παρουσιάζει μεγάλη ροπή εκκίνησης και λειτουργίας. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα έχουν ωθήσει σε μία σειρά ερευνών με σκοπό την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού για χρήση σε μικρές ισχύς, κυρίως σε οικιακά περιβάλλοντα παρά την αρκετά χαμηλή απόδοσή τους. Στο **σχήμα 3.8** παρουσιάζεται μία τυπική ανεμογεννήτρια Savonius για οικιακή χρήση αλλά και παραλλαγές που μπορούν να έχουν οι ανεμογεννήτριες αυτές για χρήση σε αστικό περιβάλλον.



Σχήμα 3.8. Ανεμογεννήτρια Savonius

Ισχύς ανεμογεννήτριας

Η ισχύς του ανέμου ορισμένης ταχύτητας, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{av} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot V^3 - P_{av} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot V^3$$

Όπου:

P_{av} = Ισχύς του ανέμου ή θεωρητική ισχύς σε KW

ρ_a = πυκνότητα του αέρα σε Kg/m³

A = Εμβαδόν του κύκλου που δημιουργείται από τη σάρωση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας σε m²

V = ταχύτητα του ανέμου σε m/sec

Για τα επί μέρους μεγέθη, θα έχουμε:

$$\rho_a = \frac{P_a}{R_g \cdot T_a}$$

Όπου,

P_a = πίεση περιβάλλοντος σε Nt/m²

R_g = σταθερά αερίων, που για τον αέρα λαμβάνεται ίση με 287 J/Kg * ⁰K

T_a = θερμοκρασία περιβάλλοντος σε ⁰K

$$T_a = \theta_a + 273$$

Σημείωση: Η πυκνότητα του αέρα στο επίπεδο της θάλασσας είναι 1,23Kg/m³

Στην πράξη, μια ανεμογεννήτρια, δεν μπορεί να παραλάβει όλη την ισχύ, επειδή ο αέρας που θα περνούσε πίσω από τον έλικα δεν θα απομακρυνόταν και η κινητική ενέργεια στην έξοδο θα ήταν μηδενική.

Η μηχανική ισχύς που μπορεί να παραχθεί από την αιολική ενέργεια, υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_{μηχ} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p$$

Όπου:

C_p = συντελεστής ισχύος, που σύμφωνα με το νόμο του Albert Benz, μπορεί να πάρει τιμή μέχρι 0,593 ($C_{pmax} = 0,593$).

Στην πράξη η τιμή του C_p λαμβάνεται συνήθως ίση με το 65% της τιμής του C_{pmax} ($C_p = 0,593 * 0,65 = 0,385$)

Formatted: Greek

Formatted: Greek

Formatted: Greek

Formatted: Greek

Formatted: Greek

Field Code Changed

Formatted: Greek

Formatted: Greek

Υπολογίζοντας τις μηχανικές απώλειες στους ανεμοκινητήρες στο 5% ($\eta_m = 0,95$) και τις ηλεκτρικές στο 2 μέχρι 5% ($\eta_H = 0,95$ ή $0,98$) η ηλεκτρική ισχύς που θα παραχθεί από τη γεννήτρια θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{\eta\lambda} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta_{H/m}$$

Όπου:

$$\eta_{H/m} = \eta_H \cdot \eta_m$$

Καθορισμός της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας

Η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας P_n , υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_n = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot C_p \cdot V_n^3 \cdot \eta_m$$

Όπου,

ρ_a = πυκνότητα του αέρα σε Kg/m^3

C_p = συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας

V_n = ονομαστική ταχύτητα του ανέμου, που υπολογίζεται από τη σχέση $V_n = 1,8 * V_m$

η_m = μηχανικός βαθμός απόδοσης της ανεμογεννήτριας που εξαρτάται από τις απώλειες κενού φορτίου, οι οποίες λαμβάνονται στο 10% περίπου της ονομαστικής ισχύος ($P_{\kappa*\phi} = 10\%$ ή $P_n = 0,1 * P_n$)

$$\text{και} \quad \eta_m = \frac{P_n}{P_n + P_{\kappa \cdot \phi}} \quad \eta_m = \frac{P_n}{P_n + 0,1P_n} = 0,9$$

P_n = ονομαστική ισχύς της A/Γ σε W

Καθορισμός της ταχύτητας στην οποία η ανεμογεννήτρια αρχίζει να λειτουργεί

Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας της A/Γ V_{mi} εξαρτάται από τις απώλειες κενού φορτίου και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{\kappa \cdot \phi} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot V_{mi}^3 \cdot C_p$$

Οπότε,

$$V_{mi} = \sqrt[3]{\frac{P_{κ \cdot \phi}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot C_p}}$$

και επειδή

$$P_{κ \cdot \phi} = 0,1P_n$$

Θα έχουμε

$$V_{mi} = \sqrt[3]{\frac{0,2P_n}{\rho_a \cdot A \cdot C_p}}$$

Όπου,

ρ_a = πυκνότητα του αέρα σε Kg/m³

C_p = συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας

P_n = ονομαστική ισχύς της Α/Γ σε W

A = επιφάνεια σάρωσης της φτερωτής της Α/Γ σε m²

V_{mi} = ταχύτητα έναρξης λειτουργίας σε m/sec

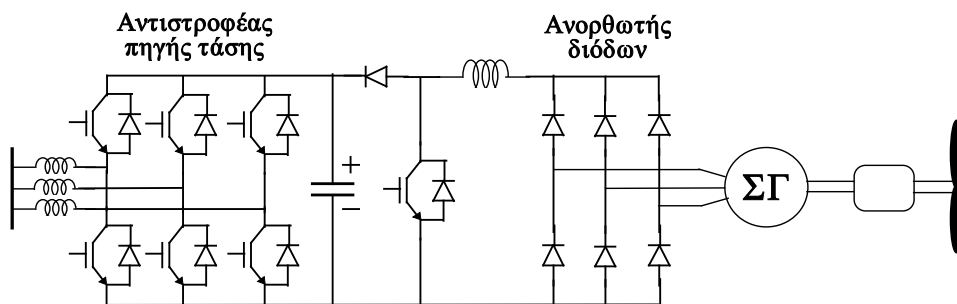
Η συγκεκριμένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την μετατροπή της αιολικής ενέργειας απαιτεί χρήση μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος καθώς και αντιστροφών έτσι ώστε να έχουμε σύνδεση με το δίκτυο. Η σύνδεση με το δίκτυο εξαρτάται και από το είδος της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιούμε. Τα 4 βασικά είδη ανεμογεννητριών είναι:

- 1) Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια κλοβού, η οποία συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός ανορθωτή και αντιστροφέα.
- 2) Ανεμογεννήτρια περιορισμένης λειτουργίας μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης δρομέα. Ο δρομέας τροφοδοτείται μέσω ανορθωτή και αντιστροφέα ή μέσω κυκλομετατροπέα.
- 3) Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδοτήσεως και σύστημα μετατροπέων ισχύος συνδεδεμένων στο δρομέα.
- 4) Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος.

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με την μελέτη της ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος και συγκεκριμένα με την σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών.

Παράγραφος 3.1

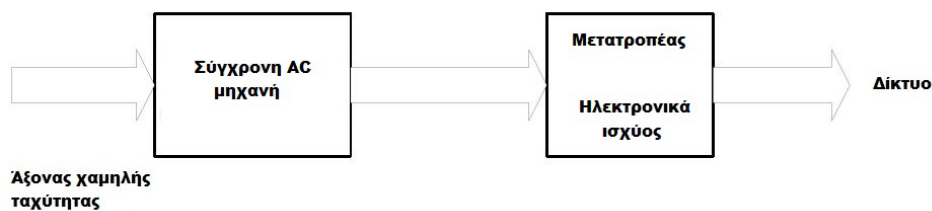
Γεννήτριες μόνιμων μαγνητών και ανάλυση ηλεκτρικού μέρους



Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να κατασκευαστούν είτε με σταθερής είτε με μεταβλητής ταχύτητας μηχανική είσοδο. Ένα από τα πεδία όπου η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει παίξει σημαντικό ρόλο τα τελευταία χρόνια είναι η ανάπτυξη καινοτόμων ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή εξαγωγή ενέργειας από τον αέρα, χαμηλότερο θόρυβο σε χαμηλές στροφές και καθαρότερη μεταφορά ισχύος στο δίκτυο.

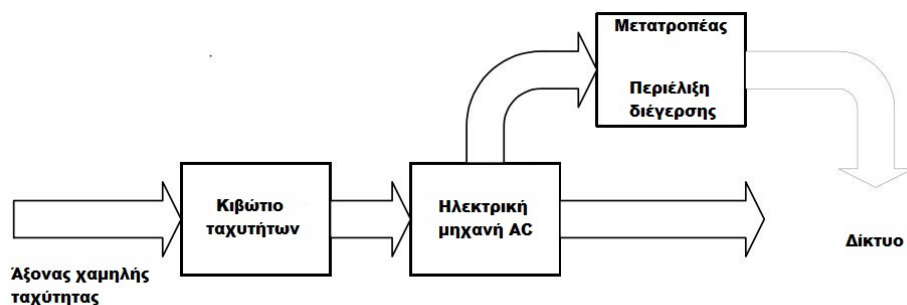
Η μεταβλητή ταχύτητα μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους, ωστόσο δύο εφαρμογές σε ηλεκτρομηχανικούς μετατροπείς μεταβλητής ταχύτητας διατηρούν το ενδιαφέρον σήμερα: **οι άμεσης-οδήγησης σύγχρονες γεννήτριες με μετατροπέα ισχύος και οι επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδότησης με κιβώτιο ταχυτήτων.**

Το *σχήμα 3.1.1* επεξηγεί τη διάταξη άμεσης-οδήγησης. Σε αυτή τη περίπτωση η ηλεκτρική μηχανή είναι μια σύγχρονη γεννήτρια απευθείας συνδεδεμένη στον μηχανικό άξονα. Η ηλεκτρική έξοδος της γεννήτριας είναι συνδεδεμένη σε ένα μετατροπέα ισχύος που συνδέεται στο δίκτυο.



Σχήμα 3.1.1 Διάταξη άμεσης-οδήγησης.

Η δεύτερη διάταξη όπως φαίνεται στο *σχήμα 3.1.2*, χρησιμοποιεί μια επαγωγική γεννήτρια με περιέλιξη στον ρότορα και δακτυλίους ολίσθησης. Το κύκλωμα του ρότορα (τύλιγμα διέγερσης) είναι συνδεδεμένο με ένα μετατροπέα ισχύος AC/AC που ανταλλάζει ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ του ρότορα και του δικτύου AC. Η επαγωγική γεννήτρια περιστρέφεται σε μία συμβατική ταχύτητα (1500 rpm για παράδειγμα) και ένα κιβώτιο ταχυτήτων χρειάζεται για να προσαρμόσει τον άξονα χαμηλής περιστροφής (25 rpm για παράδειγμα) στην γεννήτρια. Το ενδιαφέρον σε αυτή τη διάταξη είναι ότι χρησιμοποιείται χαμηλής ροπής επαγωγική μηχανή και επίσης μετατροπέας ισχύος βαθμονομημένος μόνο κατά ένα κλάσμα της ονομαστικής ισχύος που εξάγεται από τον αέρα.



Σχήμα 3.1.2. Διάταξη επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδότησης με κιβώτιο ταχυτήτων

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μετατροπής άμεσης-οδήγησης.

Η μετατροπή άμεσης οδήγησης εξαλείφει την μηχανική μετατροπή (κιβώτιο ταχυτήτων) και χρησιμοποιεί μια ηλεκτρική μηχανή με χαμηλή περιστροφική ταχύτητα. Η επιλογή ανάμεσα στις δύο μετατροπές εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ωστόσο ας δούμε τα μειονεκτήματα της γεννήτρια διπλής τροφοδότησης.

Τύποι σύγχρονων μηχανών και οι διαφορές τους

Η έρευνα των σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνητικού πεδίου (ΜΜΠ) με μικρότερη μάζα και κόστος απαιτεί μια επισκόπηση των διαφόρων εφαρμογών που υπάρχουν. Στη συνέχεια προσδιορίζοντας την μηχανή ΜΜΠ ως μία σύγχρονη μηχανή με μόνιμους μαγνήτες τοποθετημένους στον ρότορα, όπως και η κατασκευή μας, θα προσδιορίσουμε τα κύρια πλεονεκτήματα της διέγερσης μέσω ΜΜΠ έναντι της ηλεκτρικής διέγερσης. Όπως επίσης και συγκρίσεις μεταξύ των πολλών τύπων που μπορούν να προκύψουν.

Πλεονεκτήματα σύγχρονων μηχανών και συγκρίσεις

Σύγχρονες μηχανές με επαγωγικές μηχανές

Σήμερα συναντάμε πολλούς τύπους μηχανών άμεσης-οδήγησης. Οι επαγωγικές μηχανές απαιτούν περισσότερα ενεργά υλικά και είναι πιο ογκώδες από μια σύγχρονη μηχανή ΜΜΠ. Επίσης, οι επαγωγικές μηχανές τροφοδοτούν το πεδίο διέγερσης στον ρότορα μέσω των περιελίξεων του στάτη. Συνεπώς, οι περιελίξεις στον στάτη πρέπει να φέρουν και την ενεργό ισχύ που εξάγεται από τη μετατροπή και τη ενέργεια αντίδρασης που απαιτείται για την διέγερση του ρότορα. Αυτό αυξάνει τις απώλειες στον στάτη και απαιτεί μεγαλύτερη ενεργό διατομή του χαλκού και μεγαλύτερες εγκοπές στον στάτη.

Σύγχρονες μηχανές με μηχανές switched reluctance (SR)

Όπως και οι επαγωγικές μηχανές, οι SR μηχανές επίσης απαιτούν ηλεκτρική διέγερση στον ρότορα. Για ίδιες αποδόσεις, οι SR μηχανές είναι πιο συμπαγής και λίγο ελαφρύτερες από τις επαγωγικές, όπως επίσης και ο βαθμός μετατροπής μεγαλύτερος. Για μικρές διατομές (>1m) το κόστος μιας SR μηχανής είναι συγκρίσιμο με αυτό μιας ΜΜ μηχανής, ενώ για μεγαλύτερες διαμέτρους το κόστος μιας SR μηχανής είναι αρκετά μεγαλύτερο.

Σύγχρονες μηχανές: Διέγερση ΜΜΠ με ηλεκτρική διέγερση

Μία σύγχρονη μηχανή έχει την ικανότητα να παρέχει την διέγερση στο ρότορα. Αυτή η διέγερση μπορεί να εξασφαλίζεται είτε από ένα επαγωγικό τύμπανο είτε από μόνιμους μαγνήτες. Μία σύγχρονη μηχανή με περιελιγμένο ρότορα έχει ένα πολύ ενδιαφέρον χαρακτηριστικό: ρυθμιζόμενο ρεύμα διέγερσης κα συνεπώς ρυθμιζόμενη τάση άνευ φορτίου. Αυτό εξηγεί το γιατί χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές (π.χ. υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις, τουρμπινοκινητήρες κ.α.), όμως σε μία ανεμογεννήτρια το πλεονέκτημα αυτό δεν είναι τόσο χρήσιμο μιας και η σύγχρονη γεννήτρια είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα ισχύος. Μειονέκτημα μιας ηλεκτρικά διεγερμένης σύγχρονης μηχανής είναι οι υψηλές απώλειες στις περιελίξεις του ρότορα, που σε σύγκριση με τις απώλειες στους μαγνήτες λόγω των δινορευμάτων σε μια εφαρμογή με ΜΜΠ είναι πολύ υψηλότερη.

Περιγραφή τοπολογιών μηχανών με μόνιμο μαγνητικό πεδίο

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των μηχανών με ΜΜΠ είναι η ευελιξία τους. Υπάρχουν πολλές παράμετροι τις οποίες αν αλλάξουμε μπορούμε να έχουμε ένα μεγάλο αριθμό από τοπολογίες και παραλλαγές.

Παρακάτω θα δώσουμε μια περιγραφή για τις πιο αξιοσημείωτες τοπολογίες.

Για να εξετάσουμε τις διάφορες τοπολογικές μεταβλητές μια μηχανής ΜΜΠ, τέσσερα κύρια χαρακτηριστικά θα μελετηθούν:

1) Προσανατολισμός του κενού αέρος ως προς την περιστροφή του άξονα: **ακτινικός (radial(R))** ή **αξονικός (axial(A))**

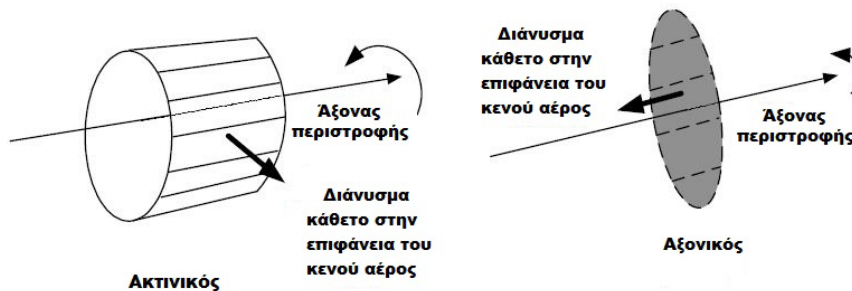
2) Προσανατολισμός του πυρήνα του στάτη ως προς τη κατεύθυνση της κίνησης: **διαμήκης ροής (longitudinal(L))** ή **εγκάρσιας ροής transverse(T)**

3) Προσανατολισμός μόνιμων μαγνητών ως προς το κενό αέρος: **επιφανειακά τοποθετημένοι (surface mounted(SF))** ή **συγκεντρωτικής ροής (flux concentrating(FC))**

4) Ως προς το σχήμα του στάτη: **με εγκοπές (slotted(S))** ή **χωρίς εγκοπές (slottles(SL))**

Προσανατολισμός κενού αέρος: ακτινικός(R) ή αξονικός(A)

Το κενό αέρος είναι απαραίτητο για το διαχωρισμό του ρότορα από το στάτη και σχηματίζει μια επιφάνεια ανάμεσα τους. Το κάθετο διάνυσμα στο κενό αέρος μπορεί να είναι είτε ακτινικά προσανατολισμένο είτε αξονικά. Στην πρώτη περίπτωση, το διάνυσμα είναι κάθετο στον άξονα περιστροφής, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, το διάνυσμα είναι παράλληλο στον άξονα περιστροφής. Όπως φαίνεται στο *σχήμα 3.1.3*.

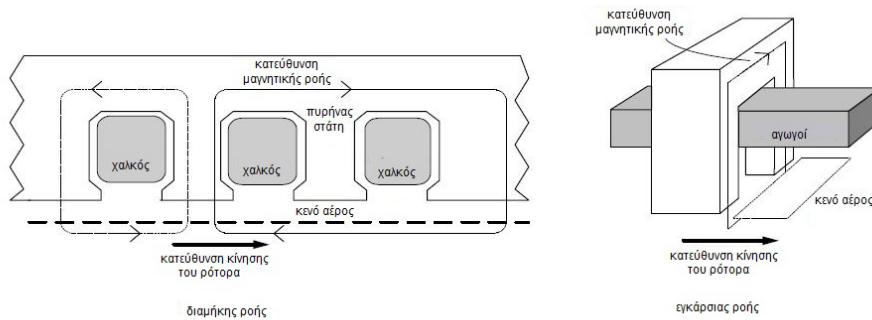


Σχήμα 3.1.3. Προσανατολισμός κενού αέρος: ακτινικός ή αξονικός

Στις μηχανές αξονικής ροής έχουμε δύο κατηγορίες ανάλογα με το που είναι τοποθετημένοι οι μαγνήτες μας. Η μία ονομάζεται **εξωτερικών πόλων** και όπως υποδηλώνει η ονομασία της οι μαγνητικοί πόλοι περιστρέφονται έξω από την περιφέρεια του οπλισμού του στάτη. Η δεύτερη ονομάζεται **εσωτερικών πόλων** και στην οποία οι μαγνητικοί πόλοι περιστρέφονται μέσα στον οπλισμό του στάτη.

Προσανατολισμός πυρήνα στάτη: διαμήκης ροής(L) ή εγκάρσιας ροής(T)

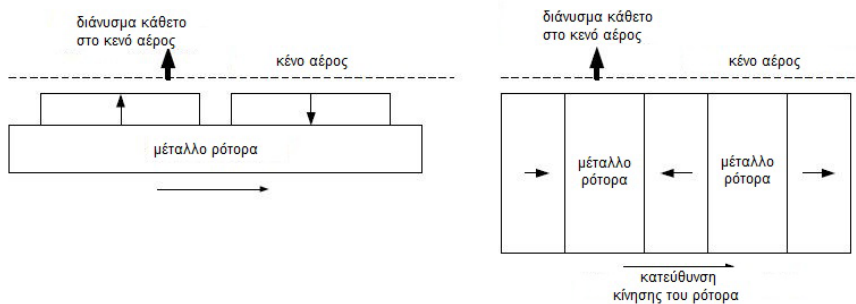
Ο πυρήνας του στάτη φέρει τη ροή γύρω από τις περιελίξεις του στάτη προκειμένου να δημιουργήσει μία ηλεκτρεγερτική δύναμη στις περιελίξεις. Η ροή αυτή μπορεί να μεταφερθεί με κατεύθυνση παράλληλη ή κάθετη στη κατεύθυνση της κίνησης. Στην πρώτη περίπτωση, η μηχανή ονομάζεται διαμήκης ροής και στη δεύτερη περίπτωση εγκάρσια ροής. Στους στάτες διαμήκης ροής βλέπουμε το διαθέσιμο χώρο για τους αγωγούς να μειώνεται καθώς μειώνεται το βήμα των πόλων.



Σχήμα 3.1.4. Προσανατολισμός πυρήνα στάτη: διαμήκης ροής ή εγκάρσια ροής

Προσανατολισμός MM ως προς το κένο αέρος: επιφανειακά τοποθετημένοι(SF) ή συγκεντρωτικής ροής(FC)

Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στον ρότορα. Ο μαγνητισμός των MM έχει μια κατεύθυνση η οποία μπορεί να είναι είτε κάθετη είτε παράλληλη σε ένα κάθετο διάνυσμα στο κένο αέρος, όπως φαίνεται στο **σχήμα 3.1.5**.



Σχήμα 3.1.5. Προσανατολισμός μαγνητών ως προς το κένο αέρος: επιφανειακά τοποθετημένοι(σχήμα αριστερά) ή συγκεντρωτικής ροής(σχήμα δεξιά)

Ο διαχωρισμός αφορά μόνο δύο πιθανές διατάξεις για τους MM πάνω στον ρότορα. Ωστόσο υπάρχουν και άλλοι πιθανοί σχηματισμοί όπως οι ένθετοι(Inset) και οι ενσωματωμένοι(buried) MM στον ρότορα με ακτινική μαγνήτιση. Σε όλες τις διατάξεις οι διπλανοί μαγνήτες έχουν αντίθετη πολικότητα, δηλαδή οι μάνητες

εναλλάσσονται **N** και **S** διαδοχικά, και η κίνηση του ρότορα δημιουργεί ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο στα πηνία του στάτη.

Προσανατολισμός ως προς το σχήμα του στάτη: με εγκοπές(S) ή χωρίς εγκοπές(SL)

Τα ελάσματα του στάτη μπορούν να κατασκευαστούν είτε με δόντια (tooth) είτε χωρίς δόντια (toothless). Στον στάτη με δόντια αυτά χρησιμοποιούνται για να φέρουν τη μαγνητική ροή και να συγκρατούν τους αγωγούς στου στάτη. Στον στάτη χωρίς δόντια, οι αγωγοί του στάτη είναι τοποθετημένοι στο κενό αέρος και η μαγνητική ροή πρέπει να περνάει ένα πυκνότερο διάστημα ενός μη μαγνητικού μέσου. Αυτό οδηγεί σε χαμηλότερη μαγνητική ροή εκτός φορτίου που απαιτεί τη χρήση παχύτερων μαγνητών.

Ένας στάτης χωρίς εγκοπές φέρει πλεονεκτήματα σε εφαρμογές μηχανών αξονικής ροής, γιατί είναι δύσκολο να κατασκευαστούν ελάσματα με εγκοπή για τέτοιου είδους μηχανές. Ωστόσο η απουσία εγκοπών οδηγεί σε προβλήματα συνοχής των περιελίξεων.

Ένα άλλο πλεονεκτημάτων μηχανών χωρίς εγκοπές είναι οι λιγότερες απώλειες πυρήνα. Σε ένα στάτη με εγκοπές, μια μεγάλη ποσότητα της μαγνητικής ροής πάει μέσω των δοντιών που συμπεριφέρονται σαν συλλέκτες της ροής. Η μαγνητική πυκνότητα και οι απώλειες πυρήνα είναι σε αυτή την περίπτωση μεγαλύτερες στα δόντια. Συνεπώς, οι μηχανές χωρίς εγκοπές μπορεί να είναι πιο ελκυστικές για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων. Όμως στη δική μας εφαρμογή όπου έχουμε γεννήτρια χαμηλών στροφών το πρόβλημα της απώλειας πυρή εκτός φορτίου είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα. Άλλο ένα μειονέκτημα των μηχανών χωρίς δόντια, είναι η αύξηση των απωλειών χαλκού λόγω της μαγνητικής ροής που διαχέει τις περιελίξεις ακόμα και εκτός φορτίου.

Κυριότεροι συνδυασμοί μηχανών μόνιμων μαγνητών

Τα τέσσερα χαρακτηριστικά που περιγράφονται παραπάνω είναι λίγο πολύ ανεξάρτητα μεταξύ τους. Μπορούν να συνδυαστούν δίνοντας διαφορετικές διατάξεις μηχανών MM. Παρακάτω περιγράφονται οι πιο σημαντικές από αυτές. Είναι αυτές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μηχανές MM άμεσης-οδήγησης.

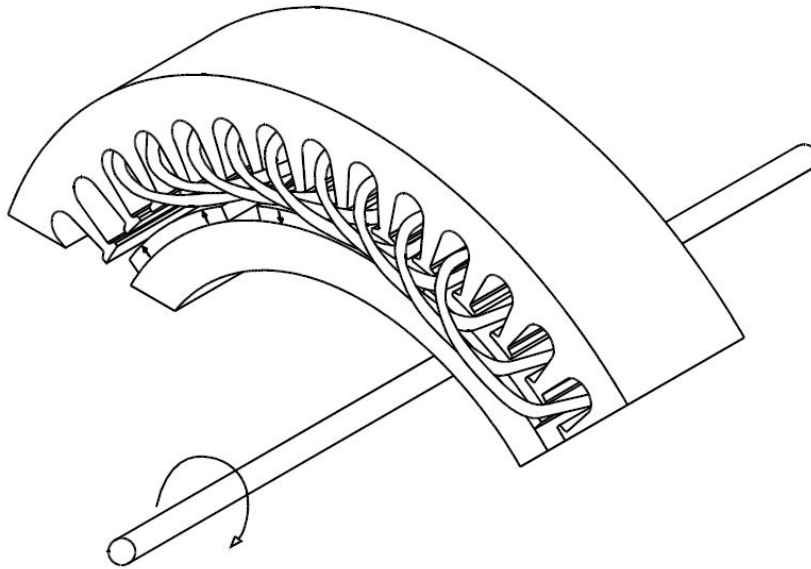
Παρακάτω θα δούμε μόνο τους δύο πρώτους συνδυασμούς που μας ενδιαφέρουν

Συμβατική σύγχρονη μηχανή μόνιμων μαγνητών

Αυτή τη μηχανή, όπως φαίνεται και στο **σχήμα 3.1.6**, τη συναντάμε στη βιβλιογραφία με διάφορα ονόματα όπως, μηχανή επιφανειακά τοποθετημένων MM ή , μηχανή επιφανειακά τοποθετημένων MM ακτινικής ροής πιο περιγραφικά. Επιλέξαμε την ονομασία “συμβατική σύγχρονη μηχανή MM” μιας και είναι λίγο πολύ ο πιο κοινός τύπος μηχανής.

Η “συμβατική” λοιπόν αυτή μηχανή είναι μια μηχανή ακτινικός (R), διαμήκης ροής (L), στάτη με εγκοπές και μόνιμους μαγνήτες επιφανειακά τοποθετημένους στον ρότορα. Το παράδειγμα, όπως φαίνεται στο **σχήμα 3.1.6**, είναι μια μηχανή με τριφασικές περιελίξεις στον στάτη, με αναλογία μια σχισμή ανά φάση ανά πόλο. Η περιέλιξη είναι διπλής στρώσης, με δύο αγωγούς ανά εγκοπή. Η γεννήτρια που

κατασκευάσαμε ανήκει σε αυτήν την οικογένεια μηχανών, για αυτό το λόγο θα αναφερθούμε σε αυτό παρακάτω εκτενέστερα.



Σχήμα 3.1.6: Συμβατική σύγχρονη μηχανή MM

Συμβατική σύγχρονη μηχανή MM με συγκεντρωτική ροή

Είναι μια ακτινική μηχανή, με διαμήκη ροή, στο στάτη έχει σχισμές, και οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι σε διάταξη συγκεντρωτικής ροής. Ο στάτης είναι όμοιος με τη μηχανή που περιγράφεται παραπάνω για αυτό χαρακτηρίζουμε κ αυτή ως συμβατική. Η διάταξη αυτή, επειδή είναι συγκεντρωτικής ροής, επιτρέπει μια μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής στο κενό αέρος από ότι η παραμένων αυτή των μόνιμων μαγνητών. Αυτό προσφέρει σημαντικές πιθανότητες να χρησιμοποιηθούν μαγνήτες φερρίτη αντί για του περισσότερο δαπανηρούς μαγνήτες σπάνιας γης (π.χ. μαγνήτες νεοδυμίου).

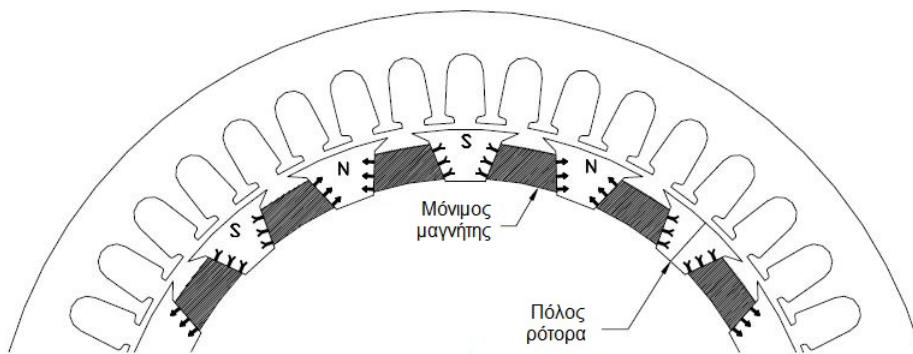
Αν χρησιμοποιηθούν μαγνήτες φερρίτη, θα πρέπει να περιμένουμε και μια αύξηση της μάζας για δεδομένη τιμή της ροπής, οπότε αφού δεν έχουμε κάποιο λειτουργικό πλεονέκτημα η επιλογή αυτή γίνεται λιγότερο ελκυστική.

Άλλο ένα πλεονέκτημα αυτής της γεωμετρίας είναι η ύπαρξη προεξοχών, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν επιπλέον ροπή μαγνητικής αντίστασης και να αυξήσει το εύρος ταχύτητας της μηχανής. Ωστόσο είναι αμφιλεγόμενο το κατά πόσο αυτό είναι χρήσιμο σε μια γεννήτρια ανεμογεννήτριας. Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να πάρουμε υπόψη μας είναι η ευκολία κατασκευής. Από αυτήν την οπτική γωνία η συγκεκριμένη τοπολογία δεν υπερτερεί της συμβατικής σύγχρονης μηχανής MM παραπάνω. Ένας ρότορας συγκεντρωτικής

ροής όπως φαίνεται στο **σχήμα 3.1.7** σίγουρα θα αυξήσει την πολυπλοκότητα της κατασκευής.

Οπότε για εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων, η τοπολογία αυτή μπορεί να προσφέρει καλύτερη διατήρηση μαγνητικής ροής. Στη περίπτωση όμως μίας γεννήτριας άμεσης-οδήγησης για ανεμογεννήτρια

που μας αφορά, η ταχύτητα περιστροφής είναι χαμηλή και η διατήρηση της μαγνητικής ροής δεν μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα.



Σχήμα 3.1.7: Συμβατική σύγχρονη μηχανή MM συγκεντρωτικής ροής

Παράγραφος 3.2

Μοντελοποίηση μηχανικού συστήματος

Τα μηχανικά συστήματα με ελαστικές ιδιότητες, όπως ο άξονας μετάδοσης κίνησης σε μια ανεμογεννήτρια, έχουν άπειρο αριθμό βαθμών ελευθερίας. Επομένως μια πιστή αναπαράσταση του συστήματος θα απαιτούσε τη μοντελοποίηση του ως συνεχές σύστημα. Παρ' όλα αυτά, περιορισμοί που υπεισέρχονται ως προς τις δυνατότητες των μεθόδων ανάλυσης αλλά και ως προς τα διαθέσιμα πραγματικά δεδομένα τέτοιων συστημάτων επιβάλλουν την απεικόνιση τους μέσω περιορισμένου αριθμού πεπερασμένων στοιχείων. Στόχος της απλούστευσης είναι η κατά το δυνατόν ακριβέστερη μεν αλλά όχι απαγορευτικά πολύπλοκη προσομοίωση τέτοιων συστημάτων.

Το είδος του μοντέλου που χρησιμοποιείται κατά την προσομοίωση ανεμογεννητριών για το μηχανικό σύστημα μετάδοσης της κίνησης, που συνδέει το δρομέα μέσω του ενδεχόμενου κιβωτίου ταχυτήτων με το δρομέα της γεννήτριας, καθορίζεται από το είδος της ανάλυσης και το εύρος συχνοτήτων στο οποίο συγκαταλέγονται τα φαινόμενα υπό μελέτη. Μια ανεμογεννήτρια αποτελείται τυπικά από το δρομέα, στον οποίο συνδέονται τα τρία πτερύγια, το άξονα που συνδέεται με αυτόν και χαρακτηρίζεται ως χαμηλής ταχύτητας, το κιβώτιο ταχυτήτων, τον άξονα που συνδέει το τελευταίο με τη γεννήτρια και την ίδια τη γεννήτρια. Όσο αυξάνονται οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση, δηλαδή οι μάζες, τα ελατήρια και τα στοιχεία απόσβεσης τόσο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στην αναπαράσταση.

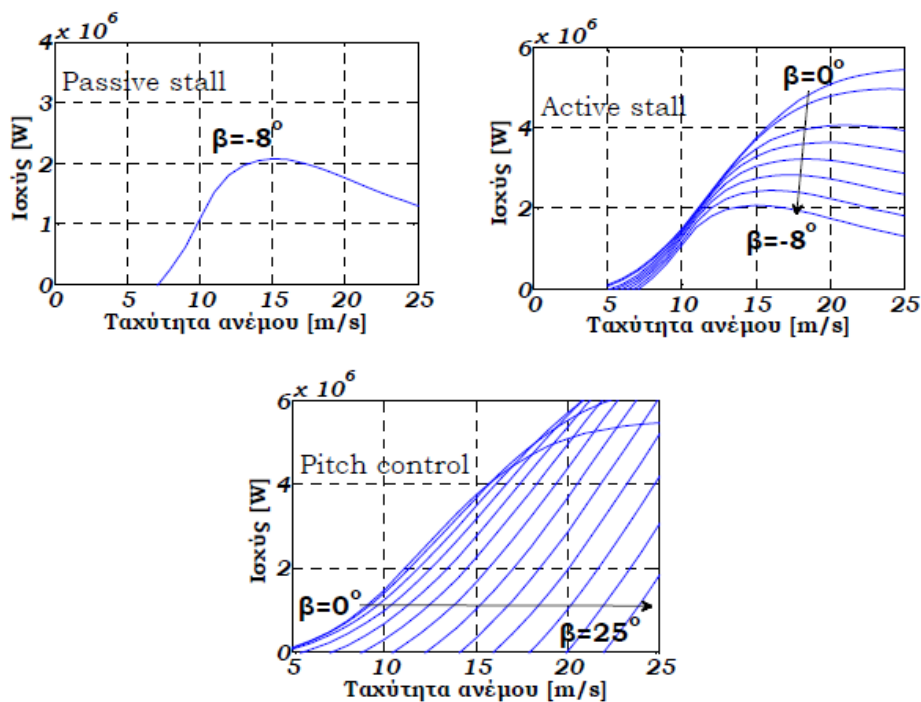
Παράγραφος 3.3

Έλεγχος αεροδυναμικής ισχύος

Όπως προκύπτει και από τα παραπάνω, η ισχύς που εξάγεται από τον άνεμο μέσω της περιστροφικής κίνησης του δρομέα, μπορεί να ελεγχθεί ρυθμίζοντας είτε την ταχύτητα περιστροφής είτε τη γωνία βήματος των πτερυγίων. Οι διαφορετικοί τρόποι ελέγχου των μεταβλητών αυτών που θα περιγραφούν στη συνέχεια είναι οι ακόλουθοι:

- 1) Παθητικός έλεγχος απώλειας στήριξης – *passive stall*
- 2) Ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης – *active stall*
- 3) Έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων – *pitch control*

Η διαφορά με την οποία ελέγχεται η αεροδυναμική ισχύς απεικονίζεται στο **Σχήμα 3.3.1**, όπου δίνονται οι καμπύλες αεροδυναμικής ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου ανάλογα με τη γωνία βήματος. Οι καμπύλες έχουν υπολογιστεί για σταθερή ταχύτητα περιστροφής δρομέα.



Σχήμα 3.3.1. Καμπύλες αεροδυναμικής ισχύος συναρτήσει ταχύτητας ανέμου για παθητικό έλεγχο απώλειας στήριξης, ενεργό έλεγχο απώλειας στήριξης και έλεγχο γωνίας βήματος πτερυγίων αντίστοιχα

Παθητικός έλεγχος απώλειας στήριξης – passive stall

Ο απλούστερος τύπος ελέγχου της αεροδυναμικής ισχύος είναι ο παθητικός έλεγχος απώλειας στήριξης που βασίζεται στο φαινόμενο *stall*, σύμφωνα με το οποίο η αεροδυναμική ισχύς δεν υπερβαίνει το όριο της μέγιστης ισχύος, όπως αυτό καθορίζεται από τη σχεδίαση του δρομέα και της γεννήτριας στην οποία συνδέεται. Ιδανικά, η ισχύς θα έπρεπε να αυξάνεται μέχρι το όριο της μέγιστης ισχύος και στη συνέχεια να παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την αλλαγή στην ταχύτητα του ανέμου (ιδανική ρύθμιση απώλειας στήριξης). Παρ' όλα αυτά, στην πραγματικότητα οι ανεμογεννήτριες δεν παρουσιάζουν μια τέτοια ιδανική συμπεριφορά. Όπως απεικονίζεται και στο **Σχήμα 3.3.1**, η ισχύς για ταχύτητες ανέμου υψηλότερες της ονομαστικής δεν παραμένει σταθερή, αλλά μειώνεται λόγω του φαινομένου *stall*. Η μέγιστη ισχύς μια ανεμογεννήτριας με χρήση του φαινομένου *stall* εξαρτάται από την πυκνότητα του ανέμου, τη συχνότητα του δικτύου και επιδράσεις αεροδυναμικής φύσεως.

Το βασικό πλεονέκτημα της διαμόρφωσης αυτής, είναι η απλότητα, η σύνδεση των πτερυγίων σε σταθερή γωνία στην πλύμη του δρομέα και η αποφυγή κινούμενων μηχανικών μερών και άλλων σύνθετων διαδικασιών ελέγχου που σχετίζονται με τον έλεγχο της γωνίας βήματος. Το σχέδιο αυτό ελέγχου αεροδυναμικής ισχύος αποτέλεσε το πλέον διαδεδομένο στην πρώτη φάση ανάπτυξης των εμπορικών ανεμογεννητριών ηλεκτροπαραγωγής, πριν την χρήση των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, καθώς και τη βασική επιλογή της σχεδίασης πτερυγίων για τις ανεμογεννήτριες σταθερών

στροφών *Τύπου Α*. Εν τούτοις, ελλείπει δυνατότητας ρύθμισης της γωνίας βήματος των πτερυγίων, η αεροδυναμική συμπεριφορά των πτερυγίων είναι απρόβλεπτη στο εύρος υψηλών ταχυτήτων ανέμου, και η ισχύς εξόδου μετά την εμφάνιση του φαινομένου *stall* παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις

προκαλώντας σοβαρές φορτίσεις στα πτερύγια και τους πύργους στήριξης, κυρίως στις ανεμογεννήτριες μεγάλης ονομαστικής ισχύος. Θέματα επίσης που σχετίζονται με την απόσβεση δονήσεων των πτερυγίων, η οποία στην περίπτωση σταθερής γωνίας βήματος πτερυγίων είναι αρκετά

μειωμένη, αυξάνουν την ευαισθησία των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο σε καταπονήσεις αεροδυναμικής φύσεως. Ο παθητικός έλεγχος έχει γενικά εφαρμογή σε ανεμογεννήτριες ισχύος μικρότερης του 1 MW, ενώ σε ισχείς μεγαλύτερες χρησιμοποιείται ο ενεργός έλεγχος, που αναλύεται στη συνέχεια.

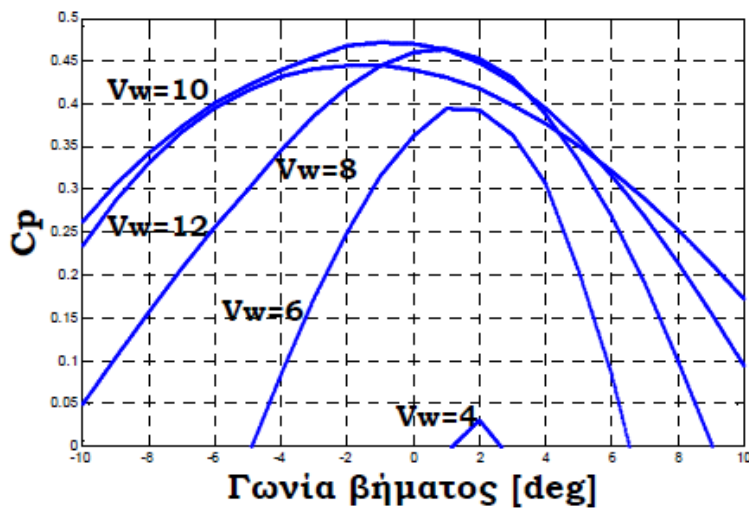
Ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης – active stall

Η αρχή λειτουργίας της ενεργού απώλειας στήριξης στηρίζεται στο συνδυασμό του παθητικού ελέγχου, που περιγράφηκε παραπάνω, και της μεταβλητής γωνίας βήματος των πτερυγίων. Η μέθοδος αυτή ελέγχου αεροδυναμικής ισχύος εφαρμόζεται στις ανεμογεννήτριες *Τύπου Α*, που χρησιμοποιούν ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού με απ' ευθείας σύνδεσης στο δίκτυο. Η γωνία βήματος πτερυγίων ρυθμίζεται με στόχο τη μερική βελτιστοποίηση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος C_p για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής καθώς και τον έλεγχο του φαινομένου *stall* και τη χρήση του για τον περιορισμό της ισχύος σε υψηλές ταχύτητες ανέμου. Η μεταβολή της γωνίας βήματος πτερυγίων μετατοπίζει το φαινόμενο *stall* προς εύρος υψηλότερων ταχυτήτων ανέμου και εξασφαλίζει σταθερή ισχύ, αντίθετα με τον παθητικό έλεγχο απώλειας στήριξης, καθώς και

αυξημένες δυνατότητες προστασίας της ανεμογεννήτριας από έντονες καταπονήσεις του μηχανικού συστήματος. Επομένως, σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου η λειτουργία προσομοιάζει στον έλεγχο γωνίας βήματος και ενώ η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι σταθερή, η απόδοση της ανεμογεννήτριας αυξάνεται μέσω της βελτιστοποίησης του συντελεστή C_p . Σε περίπτωση απότομης αύξησης της ταχύτητας ανέμου, το σύστημα ενεργού ελέγχου απώλειας στήριξης θα μεταβάλλει τη γωνία βήματος προς την αντίθετη κατεύθυνση απ' ότι ο έλεγχος γωνίας βήματος, επιδιώκοντας την άμεση λειτουργία του φαινομένου *stall* στα πτερύγια αναλύεται η δυνατότητα του ενεργού ελέγχου απώλειας στήριξης να αντισταθμίσει μειώσεις που παρατηρούνται στην ισχύ λόγω μόλυνσης των πτερυγίων ή πάγου, σε αντίθεση με τον παραδοσιακό παθητικό έλεγχο απώλειας στήριξης. Στον ενεργό έλεγχο απώλειας στήριξης διακρίνονται δύο περιοχές λειτουργίας ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου:

1) Βελτιστοποίηση Ισχύος

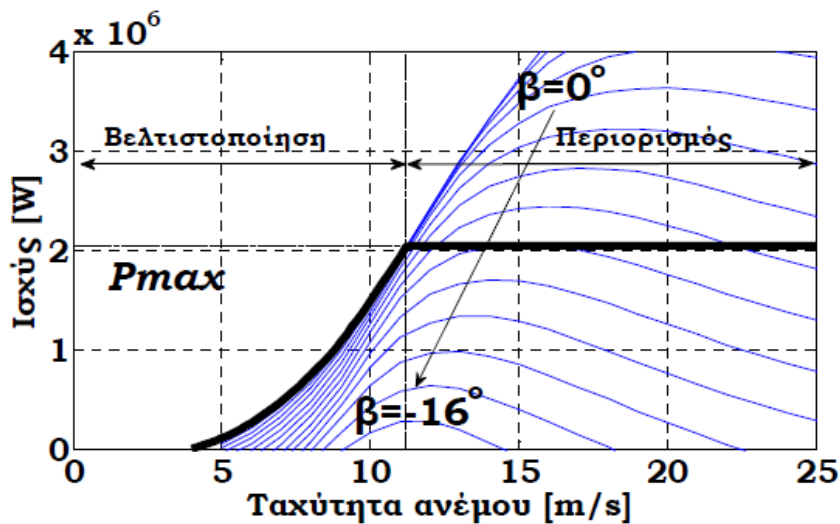
Στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου, με κάτω όριο την ταχύτητα εισόδου και άνω όριο την ονομαστική ταχύτητα ανέμου ο έλεγχος στοχεύει στη βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής ισχύος και επομένως της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου. Ο συντελεστής αεροδυναμικής ισχύος, $C_p(\lambda, \beta)$ μεταβάλλεται ώστε να έχει τη μέγιστη τιμή σε κάθε ταχύτητα ανέμου μέσω της ρύθμισης της γωνίας βήματος, β . Οι δύο συνθήκες, που πρέπει να ικανοποιούνται για να επιδιωχθεί η βελτιστοποίηση, αφορούν στην ταχύτητα του ανέμου και στην ηλεκτρική ισχύ εξόδου, οι οποίες πρέπει να είναι μικρότερες των ονομαστικών τους τιμών. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί τρόποι για τη βελτιστοποίηση, άλλοι από τους οποίους μεταβάλλουν το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου, λ , και άλλοι ρυθμίζουν τη γωνία βήματος. Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε ο δεύτερος τρόπος καθώς η λειτουργία της γεννήτριας σε δύο διαφορετικές ταχύτητες δεν εξετάστηκε, ως περιορισμένα εφαρμοσμένο σχέδιο στις εμπορικές ανεμογεννήτριες. Η βελτιστοποίηση της ισχύος υλοποιήθηκε ως σχήμα ελέγχου ανοιχτού βρόχου χωρίς ανάδραση. Η γωνία β ρυθμίζεται αποκλειστικά με βάση τη μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου σε ένα στοιχειώδες χρονικό διάστημα μέτρησης. Πρέπει να ληφθούν υπ' όψη και φαινόμενα όπως η κυμαινόμενη πυκνότητα αέρα ή η μόλυνση των πτερυγίων κατά την αναζήτηση της βέλτιστης τιμής γωνίας βήματος. Για κάθε ταχύτητα ανέμου αναζητείται η τιμή της γωνίας β που μεγιστοποιεί τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος $C_p(\lambda, \beta)$ βλέπε **Σχήμα 3.3.2**. Σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου η καμπύλη $C_p(\beta)$ έχει αιχμηρό μέγιστο, δηλαδή η τιμή του C_p είναι ευαίσθητη σε μικρές μεταβολές του βέλτιστου β , που αντιστοιχεί στο μέγιστο C_p . Αντίθετα σε μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου η καμπύλη γίνεται πιο επίπεδη και μικρές μεταβολές στη γωνία βήματος δεν επιφέρουν μεγάλες αλλαγές στις τιμές του C_p .



Σχήμα 3.3.2 Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος $C_p(\lambda, \beta)$ συναρτήσει της γωνίας βήματος β με παράμετρο την ταχύτητα του ανέμου U_w

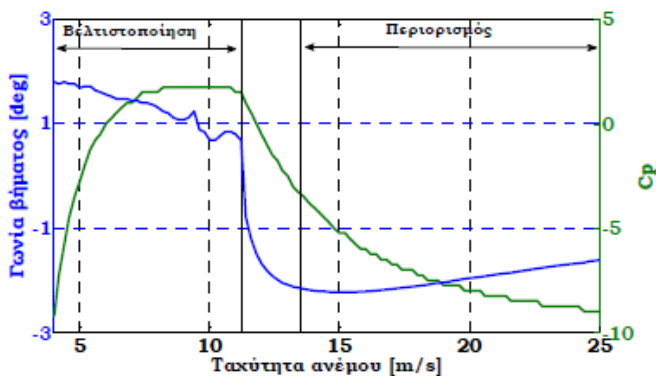
2) Περιορισμός Ισχύος

Η γωνία βήματος ρυθμίζεται με στόχο τον έλεγχο του φαινομένου απώλειας στήριξης στις ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής και μικρότερες της ταχύτητας αποκοπής. Η ισχύς περιορίζεται στην ονομαστική της τιμή όταν είτε η ηλεκτρική ισχύς είτε η ταχύτητα ανέμου υπερβαίνουν τις ονομαστικές τους τιμές, δίνοντας τη στατική καμπύλη ισχύος του Σχήματος 3.3.3 Το σχήμα ελέγχου στην περίπτωση αυτή είναι κλειστού βρόχου όπου η μετρούμενη και η μέση τιμή της ισχύος συγκρίνεται με την τιμή αναφοράς. Όταν η ισχύς υπερβαίνει την τιμή αναφοράς η γωνία βήματος ρυθμίζεται προς τις αρνητικές τιμές, ώστε να ενισχυθεί η επίδραση του φαινομένου απώλειας στήριξης, ενώ στην αντίθετη περίπτωση οδηγείται σε πιο θετικές τιμές.



Σχήμα 3.3.3. Στατική καμπύλη αεροδυναμικής ισχύος για ανεμογεννήτρια ενεργού ελέγχου απώλειας στήριξης 2 MW

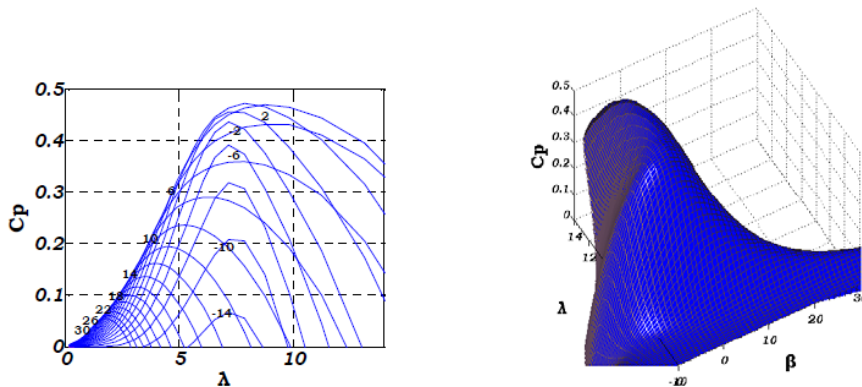
Στις καμπύλες του Σχήματος 3.3.4 η περιοχή μεταξύ των δύο διακριτών περιοχών βελτιστοποίησης και περιορισμού της ισχύος ονομάζεται περιοχή μετάβασης και οι τιμές της γωνίας βήματος υπολογίζονται με στόχο την ομαλή μετάβαση από τη μια κατάσταση λειτουργίας στην άλλη. Οι τιμές της γωνίας που υπολογίζονται κατά τη βελτιστοποίηση της ισχύος στις τιμές ταχύτητας ανέμου λίγο κάτω από την ονομαστική (άνω όριο της περιοχής βελτιστοποίησης) διαφέρουν πολύ από τις τιμές της γωνίας στις τιμές ταχύτητας ανέμου λίγο πάνω από την ονομαστική. Αυτό προκύπτει επειδή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.3, οι καμπύλες αεροδυναμικής ισχύος είναι πολύ απότομες και σχεδόν συμπίπτουν μεταξύ τους στην περιοχή αυτή ταχυτήτων ανέμου. Οι τιμές λοιπόν της γωνίας που χρησιμοποιούνται, προκύπτουν μέσω γραμμικής παρεκβολής (*linear extrapolation*) των προηγούμενων τιμών της στην περιοχή βελτιστοποίησης.



Σχήμα 3.3.4. Γωνία βήματος και αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος σε όλο το εύρος ταχυτήτων ανέμου

Έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων – pitch control

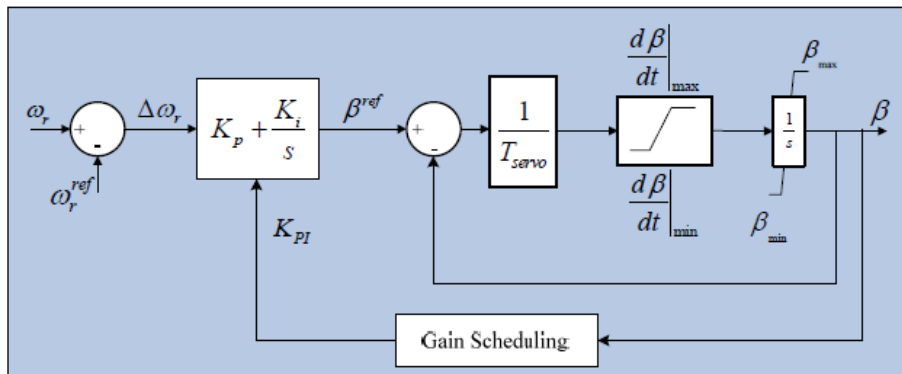
Πλέον στην πλειοψηφία των εμπορικών ανεμογεννητριών που εγκαθίστανται στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται ο έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων. Εφαρμόζεται στις ανεμογεννήτριες Τύπων Β, Γ και Δ και απαιτεί σύστημα στρέψης της γωνίας βήματος. Η αρχή λειτουργίας είναι η ίδια με τον ενεργό έλεγχο απώλειας στήριξης αν και το εύρος ρύθμισης της γωνίας είναι μεγαλύτερο σε αυτήν την περίπτωση. Μειώνονται οι καταπονήσεις στις υψηλές ταχύτητες ανέμου και επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων ανέμου. Η πιθανότητα εμφάνισης έντονων διακυμάνσεων *flicker* περιορίζεται σημαντικά, ενώ σε περίπτωση απότομης μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου, ο δρομέας απορροφάει ένα μέρος των διακυμάνσεων της αεροδυναμικής ισχύος στη μορφή αποθηκευμένης μηχανικής ενέργειας, αποφεύγοντας την περαιτέρω μετάδοση των διακυμάνσεων ισχύος στα ηλεκτρικά δίκτυα. Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος $C_p(\lambda, \beta)$ ως συνάρτηση πλέον του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου λ και της γωνίας βήματος β δίνεται στο **Σχήμα 3.3.5** σε διδιάστατη και τρισδιάστατη απεικόνιση στο $C_p - \lambda$ (με παράμετρο τη γωνία β) και στο $C_p - \lambda - \beta$, πεδίο ανάλυσης αντίστοιχα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν για τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος είτε αριθμητικές προσεγγίσεις, είτε δεδομένα από μετρήσεις σε πρωτότυπα ανεμογεννητριών.



Σχήμα 3.3.5. Απεικόνιση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος σε διδιάστατο και τρισδιάστατο πεδίο

Για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής μεγιστοποιείται η αεροδυναμική ισχύς, ρυθμίζοντας το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου, λ , ενώ η γωνία βήματος παραμένει σταθερή, όσο η ταχύτητα του δρομέα προσαρμόζεται μέσω του συστήματος ελέγχου της ανεμογεννήτριας στις μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου. Η λειτουργία των μεταβλητών στροφών εξασφαλίζεται μέσω του ελέγχου του ηλεκτρικού συστήματος της γεννήτριας, που περιγράφεται σε επόμενη ενότητα της παρούσας εργασίας. Στις ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής, η αεροδυναμική ισχύς περιορίζεται με ανάλογη ρύθμιση της γωνίας βήματος. Ο ελεγκτής γωνίας βήματος, που απεικονίζεται στο **Σχήμα 3.3.6**, ελέγχει την ταχύτητα του δρομέα μέσω ενός αναλογικού- ολοκληρωτικού ελεγκτή *PI*. Η μετρούμενη ταχύτητα του δρομέα ω_r

συγκρίνεται με την τιμή αναφοράς ω_r^{ref} ενώ στο μοντέλο περιλαμβάνεται η χρονική καθυστέρηση που υπεισέρχεται λόγω του σερβομηχανισμού (χρονική σταθερά T_{servo}) καθώς και τα όρια ρύθμισης τόσο της γωνίας βήματος ($0 \pm 30deg$) όσο και της παραγώγου της ($\pm 10deg/sec$). Τα όρια ρυθμού μεταβολής της γωνίας βήματος είναι απαραίτητα για τη ρεαλιστική προσομοίωση του μηχανισμού αλλαγής της γωνίας κυρίως σε περιπτώσεις απότομης μεταβολής της ταχύτητας του δρομέα.



Σχήμα 3.3.6. Ελεγκτής γωνίας βήματος στις ανεμογεννήτριες Τύπου Β, Γ και Δ

Στόχος του ελεγκτή γωνίας βήματος είναι ο περιορισμός της ταχύτητας του δρομέα στην ονομαστική της τιμή, καθορίζοντας εμμέσως ότι και η ισχύς δεν υπερβαίνει την ονομαστική. Η σύνδεση αυτή μεταξύ ισχύος και ταχύτητας περιστροφής προκύπτει μέσω της στρατηγικής Μέγιστης Απολαβής

Ισχύος (*Maximum Power Point Tracking strategy*) που ακολουθείται στις ανεμογεννήτριες Τύπου Γ και Δ από το σύστημα ελέγχου του ηλεκτρικού συστήματος, που θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα.

Ενώ το αργό σύστημα ελέγχου της γωνίας βήματος καθορίζει την ταχύτητα του δρομέα και της γεννήτριας και συνδέεται με την αργή απόκριση του μηχανικού συστήματος, ο γρήγορος έλεγχος των μετατροπέων που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών καθορίζει την ισχύ της γεννήτριας. Λόγω των διαφορετικών χρόνων απόκρισης ηλεκτρικού και μηχανικού συστήματος, προκύπτουν δυναμικές διακυμάνσεις της ταχύτητας του δρομέα σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες

της ονομαστικής, γεγονός που επιτρέπει στην πρόσθετη ενέργεια που οφείλεται σε απότομες μεταβολές της ταχύτητας ανέμου να αποθηκεύεται προσωρινά ως περιστροφική ενέργεια στη στρεφόμενη μάζα του δρομέα, ενώ παράλληλα το σύστημα ελέγχου των μετατροπέων εξασφαλίζει σταθερή ηλεκτρική ισχύ εξόδου.

Παράγραφος 3.4

Ισχύς εξόδου γεννήτριας συναρτήσει της μηχανικής ροπής εισόδου

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο μέσης τιμής το οποίο δέχεται ως εισόδους τη μηχανική ροπή στον άξονα και το συνεχές ρεύμα που ρέει στην έξοδο του ανορθωτή το οποίο είναι ανάλογο της ενεργού τιμής του ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη με σχέση

αναλογίας $I_{as} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{dc}$. Αποδεικνύεται θεωρητικά ότι υπάρχει σχέση μεταξύ της

ηλεκτρομαγνητικής ροπής που αναπτύσσει η γεννήτρια και του ρεύματος στο στάτη και η σχέση αυτή μπορεί να θεωρηθεί χωρίς σημαντικό σφάλμα γραμμική. Βέβαια η σχέση παύει να είναι γραμμική όταν η γεννήτρια φτάσει στο μέγιστο όριο ισχύος οπότε περαιτέρω αύξηση του ρεύματος μειώνει αντί να αυξάνει την ηλεκτρομαγνητική ροπή. Η μαθηματική απόδειξη του ισχυρισμού είναι δύσκολη αφού εμπλέκονται σε αυτήν όλα τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής. Απλοποιήσεις λόγω συμμετρικού κυλινδρικού δρομέα δεν μπορούν να γίνουν επειδή όπως θα αναφερθεί και στο επόμενο κεφάλαιο η μηχανή δοκίμιο παύει να θεωρείται ως γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα.

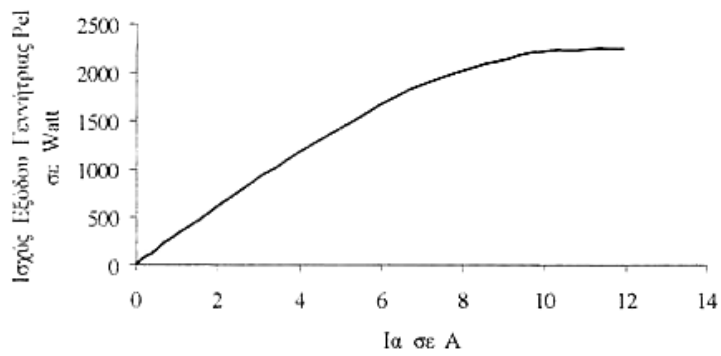
Π.Χ: Σε μία γεννήτρια η οποία αποδίδει ισχύ 1500Watt υπό φασική τάση πλάτους 220 Volt όταν ασκείται σε αυτήν μηχανική ροπή 40 Nm στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας.

Στο παρακάτω **σχήμα 3.4.1** παρατηρούμε την καμπύλη που συνδέει το πλάτος του ρεύματος στάτη με την ενεργό ισχύ που παράγει η γεννήτρια. Η ίδια μπορεί να θεωρηθεί γραμμική μέχρι τα 2000 Watt όπου η μηχανή πλησιάζει στο όριο μέγιστης ισχύος. Η καμπύλη ισχύος - μηχανικής ροπής που φαίνεται στο **σχήμα 3.4.2** είναι επίσης γραμμική. Αναμένεται λοιπόν και η καμπύλη ρεύματος - ροπής να είναι γραμμική. Συνεπώς η ενεργός τιμή του φασικού ρεύματος θα είναι περίπου $\tilde{I}_{as} = 5.5$

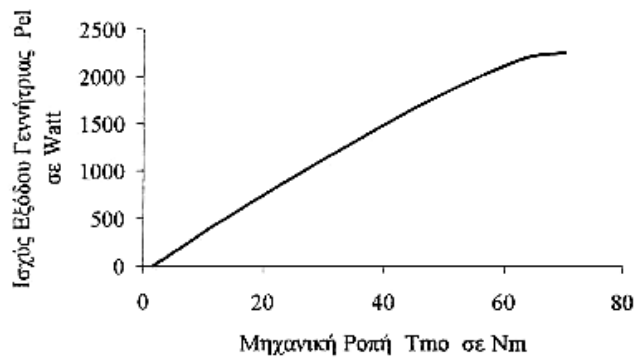
A Είναι λοιπόν εφικτό να χαραχθεί μια καμπύλη $T_e - \tilde{I}_{as}$ η οποία θα είναι γραμμική αύξουσα με κλίση $\frac{40Nm}{5.5A}$ ή $\frac{4.077kgm}{5.5A}$ μέχρι τα 2000 Watt και το αντίστοιχο ρεύμα

(περίπου 7.4 A) και θα τείνει σε ευθεία παράλληλη στον άξονα των τετμημένων για μεγαλύτερα ρεύματα. Για τις ανάγκες του μοντέλου είναι προτιμότερο να ευρεθεί μια σχέση που να συνδέει απευθείας τη ροπή με το ανορθωμένο ρεύμα. Η σχέση θα είναι

$$: T_e = \frac{4.077}{5.5 \cdot \sqrt{\frac{3}{2}}} I_{dc} = 0.6 \cdot I_{dc}$$



Σχ.3.4.1 Ισχύς εξόδου γεννήτριας συναρτήσει του πλάτους του ρεύματος στάτη



Σχ.3.4.2 Ισχύς εξόδου γεννήτριας συναρτήσει της μηχανικής ροπής εισόδου

Παράγραφος 3.5

Διατάξεις ελέγχου τάσης και της συχνότητας

Η ασφαλής και αξιόπιστη λειτουργία των ΣΗΕ επιβάλλει συγκεκριμένα όρια για τις τάσεις και τις διακυμάνσεις τόσο σε μόνιμη κατάσταση όσο και κατά τη διάρκεια μεταβατικών καταστάσεων που συνοδεύουν τα σφάλματα. Ακόμα και στη μόνιμη κατάσταση ενδέχεται μια διαταραχή στο ισοζύγιο παραγωγής-κατανάλωσης αέργου ισχύος να προκαλέσει αποκλίσεις της τάσης από τις ονομαστικές τιμές. Οι εξοπλισμοί τόσο του τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όσο και κατανάλωσης έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν μέσα σε προκαθορισμένα όρια τάσης. Σε περίπτωση μεγάλης απόκλισης από τα όρια αυτά, είτε μικρότερης απόκλισης αλλά μεγάλης χρονικής διάρκειας, η απόδοση των εξοπλισμών απειλείται και ο κίνδυνος καταστροφής τους αυξάνεται.

Ο έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος είναι καθοριστικός παράγοντας για την ευστάθεια του συστήματος. Μια παράμετρος, που καθιστά το είδος αυτό ελέγχου κρίσιμο, είναι ότι ο έλεγχος τάσης πρέπει να επιτελείται σε τοπικό επίπεδο – σε αντίθεση με τον έλεγχο συχνότητας και ενεργού ισχύος, που θα συζητηθεί παρακάτω. Η άεργος ισχύς δε μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις και επομένως ο έλεγχος πρέπει να υπεισέρχεται σε όλα τα τμήματα ενός δικτύου, περιλαμβάνοντας τον έλεγχο της παραγωγής, απορρόφησης και ροής αέργου ισχύος σε όλα τα επίπεδα τάσης ενός ΣΗΕ.

Βασική συνιστώσα ελέγχου είναι οι σύγχρονες γεννήτριες των συμβατικών μονάδων παραγωγής μέσω των αυτόματων ρυθμιστών τάσης και του πεδίου διέγερσης που εξασφαλίζουν τα προκαθορισμένα επίπεδα τάσης στον τερματικό ζυγό τους. Στο υπόλοιπο δίκτυο, επιπλέον μέσα που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο είναι:

1) Στοιχεία παραγωγής ή απορρόφησης αέργου ισχύος, όπως αποζεύξιμοι πυκνωτές και επαγωγικές αντιδράσεις, συσκευές *FACTS* και σύγχρονοι αντισταθμιστές (*STATCOM, SVC*)

2) Στοιχεία αντιστάθμισης γραμμών, όπως πυκνωτές σε σειρά

3) Μετασηματιστές με δυνατότητα ρύθμισης, όπως Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (*ΣΑΤΥΦ*).

Οι μέθοδοι αυτοί διακρίνονται σε ενεργή και παθητική αντιστάθμιση. Στην πρώτη περίπτωση η άεργος που καταναλώνεται ή παράγεται αυξομειώνεται αυτόματα με βάση την τάση του ζυγού στον οποίο συνδέονται, ενώ στη δεύτερη η συνεισφορά στον έλεγχο τάσης γίνεται μέσω της τροποποίησης των χαρακτηριστικών του δικτύου από τη στιγμή που ο εξοπλισμός είναι μόνιμα ή μέσω διακόπτη συνδεδεμένος στο δίκτυο μεταφοράς ή διανομής.

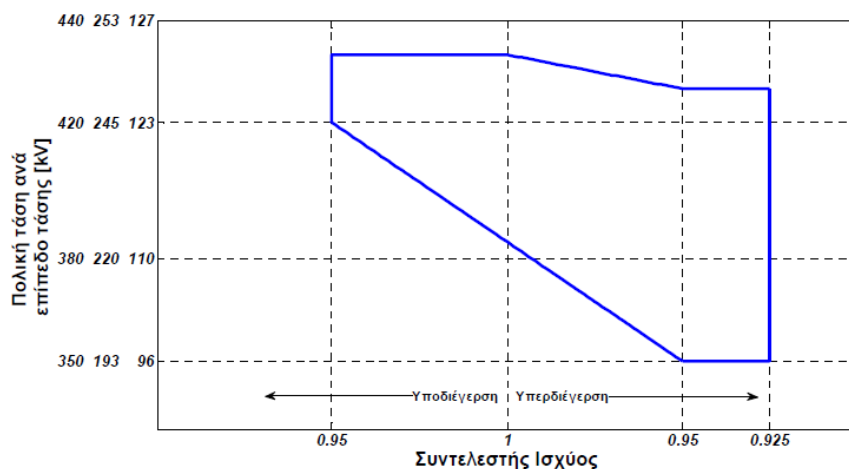
Η αυξημένη διεύθυνση μεγάλων αιολικών πάρκων στα ΣΗΕ οδήγησε σε τροποποιήσεις της ρύθμισης

αέργου. Στην πρώτη φάση εγκατάστασης αιολικών πάρκων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών ήταν εφοδιασμένες με γεννήτριες επαγωγής (*Τύπου Α και Β*) και κατανάλωναν άεργο ισχύ κατά τη λειτουργία τους. Οι πρώτες απαιτήσεις, που τέθηκαν από τους διαχειριστές του δικτύου, καθόριζαν ελάχιστες τιμές για το Συντελεστή Ισχύος (*ΣΙ*) του αιολικού πάρκου.

Με την εμφάνιση των αιολικών πάρκων με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών και τη συνακόλουθη ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της διείσδυσης, οι απαιτήσεις σχετικά με το ΣΙ του αιολικού σταθμού τροποποιήθηκαν και σήμερα περιλαμβάνουν ένα σύνολο αυξημένων ρυθμιστικών διαδικασιών. Το εύρος ρύθμισης του ΣΙ πλέον έχει διευρυμένα όρια, τόσο στην επαγωγική όσο και τη χωρητική περιοχή λειτουργίας. Επιπλέον, σε πολλούς κώδικες η περιοχή ρύθμισης εξαρτάται από τα επίπεδα τάσης των ζυγών στο δίκτυο στο οποίο συνδέεται το αιολικό πάρκο, δεδομένου ότι πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η παραγωγή ή κατανάλωση αέργου ισχύος, έστω και μέσα σε καθορισμένα όρια, από το αιολικό πάρκο πρέπει να εξασφαλίζει ονομαστικές τιμές τάσεις. Στους κώδικες δικτύων παρατηρείται μεγάλη ποικιλία σε σχέση με τον τρόπο συμβολής των αιολικών πάρκων στον έλεγχο τάσης και αέργου ισχύος. Σε μερικές περιπτώσεις τα αιολικά πάρκα δύνανται να επιτελέσουν ενεργό ρύθμιση τάσης, κατ' αντιστοιχία με τις συμβατικές γεννήτριες, στον τερματικό ή άλλο κοντινό ζυγό.

Το γενικό πλαίσιο απαιτήσεων από τα αιολικά πάρκα περιλαμβάνει τη ρύθμιση του ΣΙ είτε με βάση τις εντολές από κεντρικό σύστημα ρύθμισης του διαχειριστή του δικτύου είτε με χαρακτηριστική ρύθμιση με παράμετρο την τάση του συστήματος. Το **Σχήμα 3.5.1** αποτυπώνει το περιθώριο ρύθμισης του ΣΙ του αιολικού πάρκου συναρτήσει της τάσης του δικτύου, όταν η συχνότητα του δικτύου είναι στο εύρος $49.5\text{Hz} \div 50.5\text{Hz}$. Σε λειτουργία υπερδιέγερσης τα αιολικά πάρκα παράγουν άεργο ισχύ και σε λειτουργία υποδιέγερσης καταναλώνουν αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η άεργος ισχύς σε αυτήν την περίπτωση αναφέρεται στο σημείο σύνδεσης του αιολικού πάρκου στο δίκτυο, γεγονός που σημαίνει ότι ενδέχεται η άεργος που απαιτείται να μπορεί να προσφερθεί από πρόσθετα συστήματα αντιστάθμισης. Οι βηματικές αλλαγές στην παραγωγή αέργου ισχύος δεν πρέπει να ξεπερνάνε το 2.5% της ικανότητας στο σημείο σύνδεσης, για δίκτυα Υψηλής Τάσης (ΥΤ), και το 5% για δίκτυα Υπερυψηλής Τάσης (ΥΥΤ).

Επομένως συστήματα όπως στατοί αντισταθμιστές αέργου ισχύος (*Static Var Compensators – SVC*), που εξασφαλίζουν συνεχείς μεταβολές στην άεργο ισχύ μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά σε τέτοια περίπτωση. Ενδέχεται επίσης το αιολικό πάρκο να πραγματοποιεί ενεργό ρύθμιση της τάσης στο σημείο σύνδεσης του με βάση τιμές σε πραγματικό χρόνο που δίνονται από το διαχειριστή του δικτύου.



Σχήμα 3.5.1. Παραγωγή αέργου ισχύος συναρτήσει της τάσης χωρίς περιορισμό ενεργού ισχύος, Γερμανικός κώδικας

Σε κώδικες άλλων χωρών και σε σχέση με τον έλεγχο τάσης και αέργου ισχύος, υποδεικνύονται χαρακτηριστικές ενεργού – αέργου ισχύος, περιθώρια ρύθμισης ΣΙ, ρύθμιση ΣΙ ή τάσης ή αέργου ισχύος βάση τιμών σε πραγματικό χρόνο από το διαχειριστή και πλήθος άλλων ρυθμιστικών διαδικασιών. Οι απαιτήσεις αυτές σχετίζονται τόσο με στατικά φαινόμενα (συνεχής παροχή αέργου στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας) όσο και με δυναμικά φαινόμενα (δυναμική ικανότητα αέργου ισχύος).

Μια θεμελιώδης παράμετρος ασφαλούς λειτουργίας των ΣΗΕ είναι η συχνότητα η οποία πρέπει να παραμένει σχεδόν σταθερή και ίση με την ονομαστική της τιμή. Το ισοζύγιο παραγωγής- κατανάλωσης ενεργού ισχύος πρέπει να διασφαλίζει την ισορροπία σε κάθε χρονική στιγμή, ενώ σε διαφορετική περίπτωση προκύπτουν μικρές ή μεγάλες διακυμάνσεις στη συχνότητα. Η συχνότητα συνδέεται στενά με την ταχύτητα περιστροφής σύγχρονων και ασύγχρονων μηχανών που συνδέονται στο δίκτυο. Σε περίπτωση απόκλισης της συχνότητας από ένα καθορισμένο εύρος γύρω από την ονομαστική της τιμή η ασφάλεια και αξιοπιστία της λειτουργίας τους απειλείται. Σε αντίθεση με τη ρύθμιση τάσης, που αναλύθηκε παραπάνω, μια διαταραχή στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος σε ένα σημείο του δικτύου, προκαλεί διακυμάνσεις στη συχνότητα επηρεάζοντας τις συνιστώσες σε όλο το δίκτυο. Σημαντική πτώση της συχνότητας ενδέχεται να προκαλέσει υψηλά ρεύματα μαγνήτισης σε ασύγχρονους κινητήρες και μετασχηματιστές. Επίσης η συχνότητα χρησιμοποιείται για τη εξασφάλιση της λειτουργίας σύγχρονων χρονομετρητών, η λειτουργία των οποίων στηρίζεται στον υπολογισμό του ολοκληρώματος της συχνότητας.

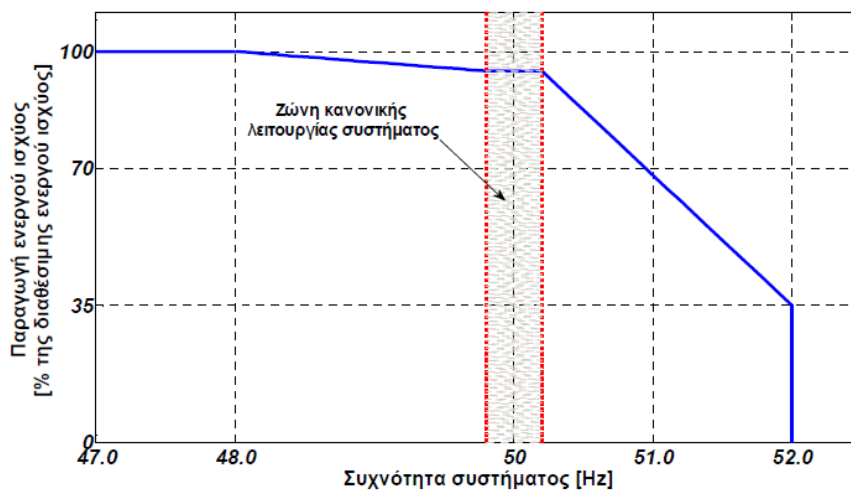
Η ρύθμιση της ενεργού ισχύος και συχνότητας περιλαμβάνει δυο διαδοχικές λειτουργικές περιοχές:

1) Πρωτεύουσα ρύθμιση, όπου οι τυχόν μεταβολές φορτίου (ή αντίστοιχες μεταβολές της παραγωγής ενεργού ισχύος) κατανέμονται μεταξύ των μονάδων παραγωγής αντιστρόφως ανάλογα προς το στατισμό των ρυθμιστών τους. Στη φάση αυτή,

εξασφαλίζεται η σταθεροποίηση της συχνότητας με μόνιμο σφάλμα από την ονομαστική τιμή.

2) Δευτερεύουσα ρύθμιση, όπου το μόνιμο σφάλμα συχνότητας διορθώνεται με κατάλληλη ρύθμιση στροφών των ρυθμιστών στροφών των γεννητριών. Οι μονάδες παραγωγής μεταβάλλουν την παραγωγή τους μετακινώντας κατάλληλα τις χαρακτηριστικές φορτίου - συχνότητας, εξασφαλίζοντας την επαναφορά της συχνότητας στο εύρος ονομαστικής λειτουργίας – συχνά στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως ρύθμιση φορτίου – συχνότητας (*load frequency control*).

Οι συμβατικές μονάδες είναι υποχρεωμένες να παραμένουν σε λειτουργία παρά τυχόν διακυμάνσεις της συχνότητας με σκοπό να συμμετέχουν στην απαραίτητη ρύθμιση. Στο πλαίσιο προσέγγισης των αιολικών πάρκων ως σταθμών παραγωγής οι κώδικες περιλαμβάνουν ειδικές αναφορές σχετικά με τη συμβολή των αιολικών μονάδων στον έλεγχο συχνότητας και ενεργού ισχύος. Σε πρώτη φάση, τα αιολικά είναι υποχρεωμένα να παραμένουν σε λειτουργία κατά τη διάρκεια διακυμάνσεων της συχνότητας σε εύρος περίπου 47÷52 Hz, καθ' ότι η αποσύνδεση τους σε περίοδο μειωμένης συχνότητας για παράδειγμα θα οδηγούσε σε περαιτέρω μείωση της συχνότητας επιβαρύνοντας ακόμα περισσότερο την αρχική καταπόνηση του συστήματος. Σε δεύτερη φάση πολλοί κώδικες απαιτούν ελεγχόμενη απόκριση ενεργού ισχύος από τα αιολικά πάρκα σύμφωνα με συγκεκριμένους όρους στις περιόδους μεταβολής της συχνότητας. Η συμμετοχή πλέον των αιολικών πάρκων τόσο στην πρωτεύουσα όσο και τη δευτερεύουσα ρύθμιση του συστήματος καθίσταται αναγκαία για την ασφαλή λειτουργία των ΣΗΕ σε περιβάλλον αυξημένης διεύθυνσης. Το **Σχήμα 3.5.2** δίνει μια καμπύλη μεταβολής ενεργού ισχύος αιολικών μονάδων ανάλογα με τη συχνότητα του συστήματος.



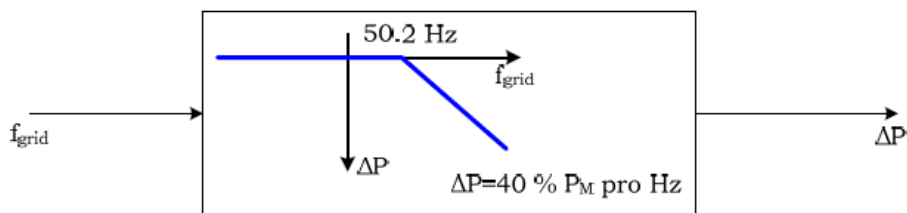
Σχήμα 3.5.2. Καμπύλη μεταβολής ενεργού ισχύος συναρτήσει της συχνότητας του συστήματος, Ιρλανδικός Κώδικας,

Σύμφωνα με την ενδεικτική αυτή καμπύλη, σε συνθήκες κανονικής συχνότητας το αιολικό πάρκο παράγει λιγότερη ενεργό από τη διαθέσιμη με βάση τον άνεμο ενεργό

ισχύ, ώστε να είναι σε θέση να προσφέρει έγχυση πρόσθετης ενεργού ισχύος σε περίπτωση υποσυχνότητας (λειτουργία αιολικού σε εφεδρεία ισχύος). Όταν η συχνότητα του συστήματος υπερβαίνει τη ζώνη κανονικής λειτουργίας (παραγωγή > κατανάλωση), το αιολικό πάρκο είναι υποχρεωμένο να περιορίσει την ενεργό ισχύ που προσφέρει στο δίκτυο ώστε να συμβάλει στην αποκατάσταση του ισοζυγίου ενεργού ισχύος.

Αντιθέτως σε χαμηλές συχνότητες (παραγωγή < κατανάλωση), η αιολική παραγωγή πρέπει να ισούται με τη μέγιστη διαθέσιμη. Τέτοιου είδους χαρακτηριστικές ελέγχου προσομοιάζουν στις καμπύλες στατισμών των συμβατικών μονάδων. Επιπλέον, οι αυξομειώσεις στην παραγωγή των αιολικών μονάδων σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν όρια ρυθμού μεταβολής, ενώ ενδέχεται το αιολικό πάρκο να δέχεται εντολή από το σύστημα ελέγχου του διαχειριστή του δικτύου να τροποποιεί την παραγωγή του με βάση σήμα αναφοράς για την ενεργό ισχύ εξόδου του.

Χρησιμοποιώντας πάλι το Γερμανικό κώδικα σαν βάση μελέτης και προσέγγισης των ζητημάτων που αφορούν στις τεχνικές απαιτήσεις από τις αιολικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δίνεται στο **Σχήμα 3.5.3** η μεταβολή της ενεργού ισχύος εξόδου συναρτήσει της συχνότητας του συστήματος.



Σχήμα 3.5.3 Μεταβολή ενεργού ισχύος εξόδου αιολικού πάρκου συναρτήσει της συχνότητας του συστήματος

Οι παράμετροι του παραπάνω σχήματος ορίζονται ως εξής:

$$\Delta P = 20 \cdot P_M \cdot \frac{50.2 \text{ Hz} - f_{\text{grid}}}{50 \text{ Hz}} \quad \text{όταν } 50.2 \text{ Hz} < f_{\text{grid}} < 51.5 \text{ Hz}$$

ΔP η μείωση ενεργού ισχύος εξόδου

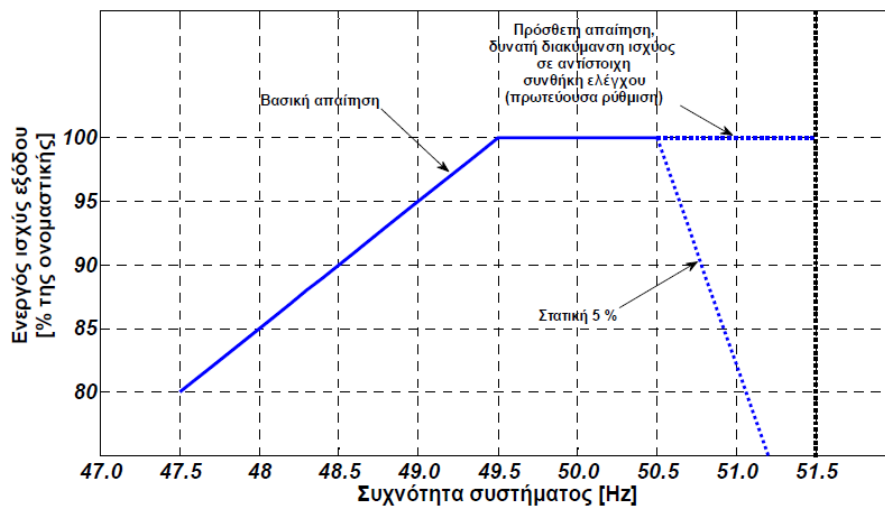
P_M η διαθέσιμη ενεργός ισχύς

f_{grid} η συχνότητα δικτύου

Στο εύρος $47.5 \text{ Hz} < f_{\text{grid}} < 50.2 \text{ Hz}$ δεν υπεισέρχεται περιορισμός. Όταν $f_{\text{grid}} \leq 47.5 \text{ Hz}$ και $f_{\text{grid}} \geq 51.5 \text{ Hz}$ προβλέπεται η αποσύνδεση από το δίκτυο χωρίς χρονική καθυστέρηση.

Το εύρος συχνοτήτων στο οποίο επιβάλλεται η παραμονή σε λειτουργία για τα αιολικά πάρκα είναι $47.5 \text{ Hz} \div 51.5 \text{ Hz}$. Όταν η συχνότητα ξεπεράσει τα 50.2 Hz, η ενεργός ισχύς εξόδου κάθε ανεμογεννήτριας πρέπει να μειωθεί με ρυθμό 40% της διαθέσιμης ισχύος ανά Hz. Όταν η συχνότητα επανέλθει στα 50.05 Hz, επιτρέπεται η

απόδοση της διαθέσιμης ισχύος. Προβλέπεται και εύρος ευαισθησίας μικρότερο από 10 mHz. Δεν απαιτείται από τους αιολικούς σταθμούς να διατηρούν εφεδρεία ισχύος ώστε να συμβάλλουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση ισχύος, ούτε και ζητείται ικανότητα *black-start*. Σαν ξεχωριστή απαίτηση, συμπεριλαμβάνεται η επιβολή ορίου στην ενεργό ισχύ εξόδου, με ρυθμό τουλάχιστον 10% της ικανότητας διασύνδεσης ανά λεπτό. Στην περιοχή συχνοτήτων 47.5 - 49.5 Hz επιτρέπεται η μείωση της ενεργού ισχύος έως το 80% της ονομαστικής. Το **Σχήμα 3.5.4** απεικονίζει τις βασικές απαιτήσεις ενεργού ισχύος του Γερμανικού κώδικα συναρτήσει της συχνότητας για το σύνολο των σταθμών παραγωγής.



Σχήμα 3.5.4 Μεταβολή ενεργού ισχύος εξόδου σταθμού παραγωγής συναρτήσει της συχνότητας του συστήματος για το Γερμανικό κώδικα

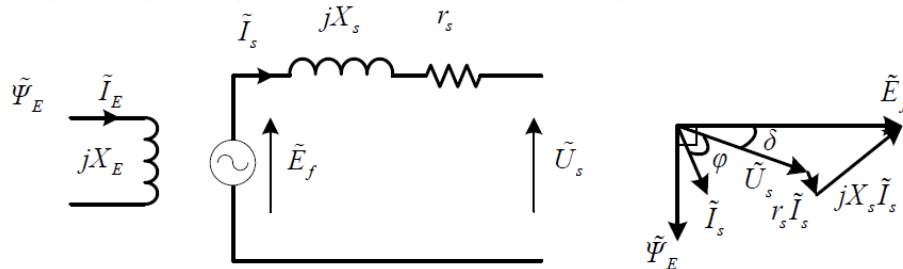
Παράγραφος 3.6

Ισοδύναμο κυκλώματα στη μόνιμη κατάσταση

Μια σύγχρονη γεννήτρια με ηλεκτρική διέγερση μπορεί να αναπαρασταθεί με το ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα του **Σχήματος 3.6.1**. Το διάγραμμα φασιθετών δίνεται επίσης για αυθαίρετο σημείο

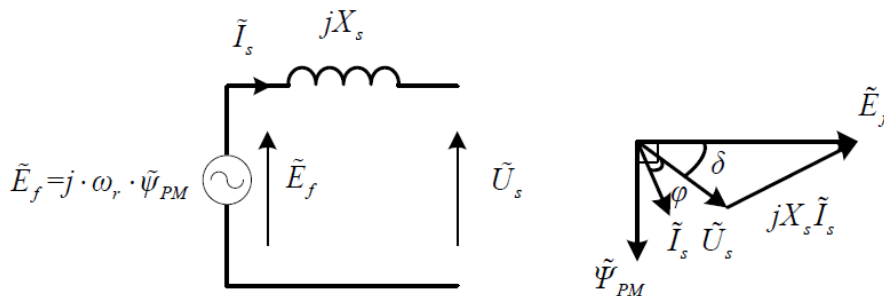
λειτουργίας. Το πεδίο του δρομέα παράγεται από το ρεύμα διέγερσης \tilde{I}_E , που επάγει την τάση \tilde{E}_f

(Ηλεκτρεγερτική Δύναμη – ΗΕΔ) στα τυλίγματα του στάτη.



Σχήμα 3.6.1. Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα και διανυσματικό διάγραμμα φασιθετών σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής Διέγερσης

Αν αμεληθεί η αντίσταση του κυκλώματος στάτη προκύπτει το απλοποιημένο ισοδύναμο, όπως αυτό που δίνεται στο **Σχήμα 3.6.2** για τη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών.



Σχήμα 3.6.2. Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα και διανυσματικό διάγραμμα φασιθετών σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών

όπου

\tilde{U}_s τάση στάτη X_s σύγχρονη αντίδραση

\tilde{I}_s ρεύμα στάτη \tilde{I}_E ρεύμα διέγερσης

\tilde{E}_f ηλεκτρεγερτική δύναμη – ΗΕΔ $\tilde{\Psi}_E$ ροή ηλεκτρικής διέγερσης

r_s αντίσταση τυλίγματος στάτη δ γωνία ροπής ή ισχύος

X_E αντίδραση τυλίγματος πεδίου ϕ γωνία συντελεστή ισχύος

Οι σχέσεις για την ενεργό ισχύ που παράγεται από τη γεννήτρια (είτε ηλεκτρικής διέγερσης είτε μονίμων μαγνητών) και την ηλεκτρομαγνητική ροπή προκύπτουν ως εξής, αν θεωρήσουμε την αντίσταση r_s αμελητέα σε σχέση με την X_s και μετά από επίλυση τους:

$$P_G = 3 \cdot r_s \cdot \{\tilde{U}_s \cdot \tilde{I}_s^*\} \Rightarrow$$

$$P_G = -3 \cdot \frac{\tilde{U}_s \cdot \tilde{E}_f}{X_s} \cdot \sin \delta$$

$$T_e = \frac{P_G}{\omega_m} \Rightarrow$$

$$T_e = -\frac{3}{\omega_m} \cdot \frac{\tilde{U}_s \cdot \tilde{E}_f}{X_s} \cdot \sin \delta$$

Η άεργος ισχύς της γεννήτριας είναι ίση με:

$$Q_G = 3 \cdot \text{Im}\{\tilde{U}_s \cdot \tilde{I}_s^*\} \Rightarrow$$

$$Q_G = 3 \cdot \frac{\tilde{U}_s - U_s \cdot E_f \cdot \cos \delta}{X_s}$$

Όπου

ω_m η μηχανική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας

Βιβλιογραφία

1. «Ηλεκτρικές μηχανές», Σ. Γαντζούδης, Μ. Λαγουδάκος, Α. Μπινιάρης, Εκδόσεις Ο.Ε.Δ.Β Αθήνα.
2. «Ηλεκτρικές μηχανές 1», Κ. Φωτιάδης, Εκδόσεις Ο.Ε.Δ.Β Αθήνα 1987.
3. «Ηλεκτρικές μηχανές», 4έκδοση, S.J Charman, Εκδόσεις Τζιόλα Θεσσαλονίκη 2009.
4. «Ηλεκτρικές μηχανές DC-AC», S.J Charman, Εκδόσεις Τζιόλα Θεσσαλονίκη 2001.
5. «Electric Machinery», second edition, P.F Ryff, Εκδόσεις Prentice Hall 1994.
6. «Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών 1», Γ. Πολλάλης, Εκδόσεις Ιων 2004.
7. «Ηλεκτρικές μηχανές 2», Δ. Ψωμιάδης, Εκδόσεις Ιων 2007.
8. «Ηλεκτρικές μηχανές», Π.Β Μαλατέστας, Εκδόσεις Τζιόλα 2013.
9. «Ηλεκτρικές μηχανές στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας», Γ. Γκαρούτσος, Εκδόσεις SPIN 2008.
10. «Εναλλακτικές μορφές ενέργειας», Β.Δ. Μπιτζιώνης, Δ.Β. Μπιτζιώνης, Εκδόσεις Τζιόλα 2011.
11. «Περιβάλλον & Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας», Σ.Ν. Καπλάνης, Εκδόσεις Ιων 2008.