



ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Γεννητρίες μόνιμου μαγνήτη για εφαρμογή στην αιολική ηλεκτοπαραγωγή

Συγγραφείς:

Σπυρίδων Γαλίφος

Ευθύμιος Ρούβαλης

Επιβλέπων Επίκουρος Καθηγητής:

Καραϊσάς Πέτρος

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες	4
Περίληψη	5
Εισαγωγή.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	7
1.1 Ενέργεια και μορφές	8
1.2 Αιολική Ενέργεια	10
1.2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	11
1.3 Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα.....	12
1.4 Αιολική ενέργεια σε παγκόσμιο και Ευρωπαϊκό επίπεδο	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	14
Αιολικά συστήματα.....	14
2.1 Αιολικά συστήματα – Ιστορική αναδρομή	15
2.2 Αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών (Α/Γ)	18
2.3 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου και οριζόντιου άξονα.....	18
2.3.1 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα	19
2.3.2 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα	21
2.4 Η δομή της ανεμογεννήτριας	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	26
Γεννήτριες	26
3.1 Είδη γεννητριών.....	27
3.2 Γεννήτριες συνεχούς ρεύματος	28
3.3 Γεννήτριες εναλλασόμενου ρεύματος.....	29
3.3 Ασύγχρονη (επαγωγική) γεννήτρια	30
3.4.1 Ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού (Squirrel Cage Induction Generator- SCIG)	31
3.4.2 Ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor Induction Generator- WRIG)	32
3.5 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	33
3.5.1 Σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor Synchronous Generator- WSRG)	34

3.5.2 Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Generator-
PMSG) 35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 436

ΣΥΓΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ36

(Permanent Magnet Synchronous Generator-PMSG).....36

4.1 Εισαγωγή στη σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη37

4.2 Κατηγορίες σύγχρονων γεννητριών μόνιμου μαγνήτη38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 541

Μαγνήτες41

5.1 Μόνιμοι μαγνήτες42

5.1.1 Τρόπος τοποθέτησης.....42

5.1.2 Υλικά μόνιμων μαγνητών43

5.1.2 Καμπύλη απομαγνήτισης μόνιμων μαγνητών44

5.2 Η δομή των σύγχρονων γεννητριών μόνιμου μαγνήτη.....45

5.3 Μαγνητισμός.....46

5.3.1 Μαγνητικό πεδίο47

5.3.2 Ένταση μαγνητικού πεδίου48

5.3.3 Μαγνητική επαγωγή49

5.3.4 Ο μαγνητισμός στην φυσική επιστήμη49

5.4 Ο νόμος των BIOT-SAVART.....52

5.5 Δύναμη LAPLACE53

5.6 ΜΑΓΝΗΤΗΣ53

5.7 Μαγνήτιση υλικού54

5.8 Μαγνητική διαπερατότητα – μαγνητική επιδεκτικότητα.....54

5.9 Ταξινόμηση μαγνητικών υλικών56

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ.....58

Περιεχόμενα πινάκων

Κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα.....

Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε τον καθηγητή μας κύριο Καραϊσά Πέτρο για την προσφορά του και την καθοδήγησή του στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, πολλές ευχαριστίες αξίζουν και οι γονείς και οι οικογένειες μας που μας στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια και πίστεψαν σε εμάς δίνοντας μας την δύναμη αλλά και την δυνατότητα να συνεχίσουμε να προοδεύουμε σε μορφωτικό και επαγγελματικό επίπεδο.

Περίληψη

Το κυρίως θέμα της εν λόγω πτυχιακής εργασίας είναι οι γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη με εφαρμογή στην αιολική ηλεκτροπαραγωγή.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στην ενέργεια και τις μορφές της. Και φυσικά ιδιαίτερη μνήα στην αιολική ενέργεια που αποτελεί και βασικό κομμάτι του κυρίως θέματος αυτής της πτυχιακής εργασίας.

Ακολουθεί μια ιστορική αναδρομή για την χρήση της αιολικής ενέργειας ανά τον κόσμο και τις εξελίξεις στην χρήση της.

Περιγράφονται τα διάφορα αιολικά συστήματα, οι διαφορές και τα πλεονεκτήματά τους. Αναλυτικότερα, ερευνούνται οι ανεμογεννήτριες, η δομή τους και τα διάφορα μέρη που τις απαρτίζουν.

Τα επόμενα κεφάλαια παραθέτουν πληροφορίες και λεπτομέρειες για τις γεννήτριες. Δίνονται παραδείγματα και αναλύσεις για το κάθε διαφορετικό είδος γεννήτριας.

Και τέλος γίνεται δίνεται ιδιαίτερη προσοχή και λεπτομέρεια στους μαγνήτες, τα είδη και τα υλικά που τους απαρτίζουν, καθώς και την χρήση τους στην αιολική ηλεκτοπαραγωγή.

Εισαγωγή

Κατά την φοίτησή μας στο ΤΕΙ Πειραιά και συγκεκριμένα στο τμήμα της Ηλεκτρολογίας μελετήσαμε πολλά και διαφορετικά είδη ενέργειας αλλά και γεννητριών. Ύστερα από έρευνα και προσωπικές εμπειρίες θελήσαμε η παρακάτω πτυχιακή εργασία να έχει θέμα την αιολική ενέργεια. Θεωρούμε ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στο παρελθόν, στο παρόν αλλά και προπάντων στο μέλλον θα έχουν μια ιδιαίτερη σημασία για την Ελλάδα.

Η εργασία που ακολουθεί έχει σκοπό απλά και κατανοητά να παραθέσει τις απαραίτητες γνώσεις στους αναγνώστες για να καταλάβουν την έννοια της αιολικής ενέργειας αλλά και την μελέτη των ανεμογεννητριών.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις γεννήτριες μόνιμης μαγνήτισης.

Μετά από βαθιά έρευνα και πρόσβαση σε βιβλία, αρχεία και έρευνες δίνεται στον αναγνώστη με απλό τρόπο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.1 Ενέργεια και μορφές

Η ενέργεια ορίζεται ως το μέγεθος που εντοπίζεται σε κάθε φυσικό σύστημα και γίνεται αντιληπτή από την ικανότητα ενός σώματος ή συστήματος να παράγει έργο και ευθύνεται για τις διάφορες μεταβολές που παρατηρούνται τόσο στον υλικό κόσμο όσο και στα ποικίλα φυσικά φαινόμενα. Βασικό χαρακτηριστικό της αποτελεί το γεγονός ότι παραμένει ποσοτικά αναλλοίωτη και η μορφή της μεταβάλλεται με κάθε παραγωγή έργου.

Η κατηγοριοποίηση των μορφών της ενέργειας εξαρτάται από τον τρόπο απόκτησης, αποθήκευσης και ανταλλαγής της. Διακρίνονται σε :

Μηχανική: Κινητική και Δυναμική (θέσεως και μορφής)
Χημική
Ηλεκτρική
Πυρηνική
Θερμική
Φωτεινή



Κατά γενική ομολογία ο όρος πηγές ενέργειας δεν ευσταθεί, λαμβάνοντας υπόψη ότι η ενέργεια δεν δημιουργείται και δεν καταστρέφεται. Παρόλα αυτά ο όρος χρησιμοποιείται για την περιγραφή της εν δυνάμει παραγόμενης ενέργειας. Οι πηγές ενέργειας χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: Μη ανανεώσιμες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Όλες οι πηγές ενέργειας μπορούν να χαρακτηριστούν ανανεώσιμες. Ο προαναφερθείς διαχωρισμός προκύπτει από τον χρόνο αναπλήρωσής τους και την ποσοτική διαθεσιμότητά τους. Στις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνονται κυρίως ο άνθρακας, το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο και η σχάση πυρήνων. Ο ρυθμός κατανάλωσής τους από τον άνθρωπο είναι αντιστρόφως ανάλογος του ρυθμού παραγωγής τους από τη φύση.

Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ορίζονται οι ενεργειακές πηγές οι οποίες βρίσκονται σε αφθονία στη φύση. Ευρέως γνωστές και ως ήπιες μορφές ενέργειας, χαρακτηρισμός που προκύπτει από δυο βασικά γνωρίσματα. Πρώτον, η εκμετάλλευσή τους δεν απαιτεί ενεργητική παρέμβαση από την ανθρώπινη πλευρά, όπως εξόρυξη, άντληση, καύση, συνήθεις διαδικασίες για την εκμετάλλευση των μη ανανεώσιμων πηγών. Δεύτερον, ονομάζονται «καθαρές» πηγές ενέργειας, «φιλικές» προς το περιβάλλον, διότι κατά την χρήση τους δεν απελευθερώνονται επιβλαβή παράγωγα.



Βασικές μορφές ενέργειας είναι οι ακόλουθες:

Ηλιακή ενέργεια: τα τεχνολογικά πρότυπα αξιοποίησής της εκμεταλλεύονται τη θερμότητα και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα του ήλιου. Κυριότερα συστήματα εκμετάλλευσης αποτελούν τα ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

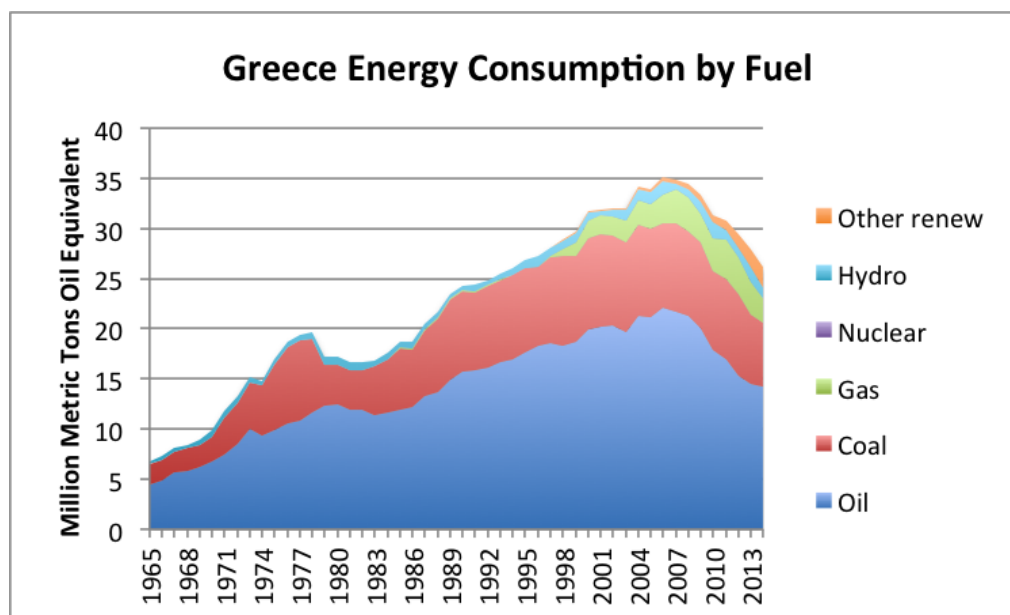
Υδραυλική ενέργεια: Αξιοποίηση υδατοπτώσεων με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή τον μετασχηματισμό της σε απολήψιμη μηχανική ενέργεια.

Ενέργεια της Βιομάζας: ορίζεται η ύλη βιολογικής (οργανικής) προέλευσης, πιο συγκεκριμένα πρόκειται για φυτικά και δασικά υπολείμματα, ζωικά απόβλητα, αστικά απορρίμματα, υπολείμματα βιομηχανίας τροφίμων και αγροτικής βιομηχανίας.

Γεωθερμική ενέργεια: αξιοποίηση της θερμότητας των εσωτερικών στρωμάτων της γης. Ευρεία χρήση στην αγροτική βιομηχανία.

Αιολική ενέργεια: παράγεται από ανεμογεννήτριες με τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η κατανάλωση στην Ελλάδα ανά μορφή ενέργειας για τα έτη από το 1965 έως και το 2013. Βασιζόμενο στα στατιστικά στοιχεία του BP Statistical Review of World Energy, 2015 data.¹



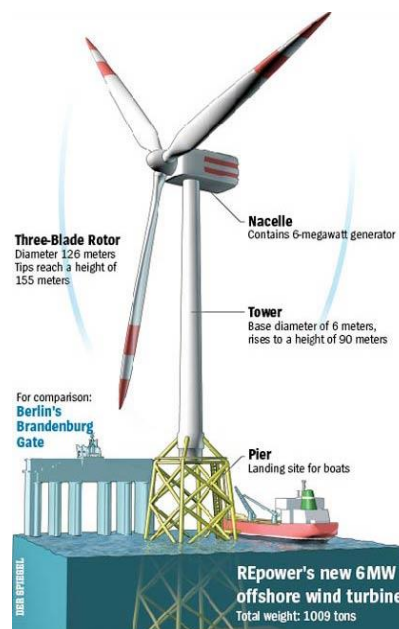
¹ <http://ourfiniteworld.com/2015/06/23/bp-data-suggests-we-are-reaching-peak-energy-demand/>

1.2 Αιολική Ενέργεια

Αιολική ορίζεται η ενέργεια που προέρχεται από την μετακίνηση των αέριων μαζών, οι οποίες βρίσκονται στην ατμόσφαιρα. Οι μετακινήσεις του αέρα οφείλονται στις μεταβολές αλλά και στις διαφορετικές τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης. Με τις τελευταίες να προέρχονται από την διαφορετική θέρμανση της ατμόσφαιρας από τον Ήλιο. Πιο συγκεκριμένα κατά την θέρμανση του αέρα, συντελείται η διαστολή του με αποτέλεσμα να γίνεται πιο ελαφρύς, να ξεπερνά το επίπεδο της θάλασσας κατά δέκα (10) χιλιόμετρα (km) και μετά να κατευθύνεται προς ψυχρότερα μέρη. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας πραγματοποιείται μείωση της ατμοσφαιρικής πίεσης με αποτέλεσμα μάζες αέρα να οδεύουν προς περιοχές χαμηλού βαρομετρικού. Αυτή η κίνηση των αέριων μαζών έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αέρα.

Η ανάγκη κατανόησης και εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας έχει τις ρίζες της στην αρχαιότητα. Αρχαίοι πολιτισμοί ανά τον κόσμο έχουν θεοποιήσει τον άνεμο και τις ιδιότητές του, όπως για παράδειγμα στον πολιτισμό των αρχαίων Ελλήνων ο θεός του ανέμου είναι ο Αίολος. Για πολλές εκατοντάδες χρόνια η κίνηση των πλοίων βασιζόταν στα ιστία και η κινητήριος δύναμη πολλών καθημερινών και μη δραστηριοτήτων στηριζόταν στη χρήση του ανεμόμυλου. Με την πάροδο των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας εγκαθιδρύεται η περίοδος της ευρείας χρήσης των συμβατικών καυσίμων και του ηλεκτρισμού. Η πετρελαϊκή κρίση και ο σταδιακός περιορισμός των συμβατικών καυσίμων, έφερε στην επιφάνεια την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αδιάκοπη εξέλιξη του αυτού του τομέα ενισχύεται και από την επιτακτική ανάγκη της προστασίας του περιβάλλοντος. Η αιολική αποτελεί μια από τις σημαντικότερες ανεξάντλητες πηγές ενέργειας.

Τα σύγχρονα συστήματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας ονομάζονται ανεμογεννήτριες (Α/Γ). Οι ανεμογεννήτριες είναι οι μηχανές που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του αέρα σε ηλεκτρική. Πιο συγκεκριμένα η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική επιτυγχάνεται με τη μορφή περιστροφής του άξονα της πτερωτής. Στο δεύτερο στάδιο, η γεννήτρια είναι υπεύθυνη για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

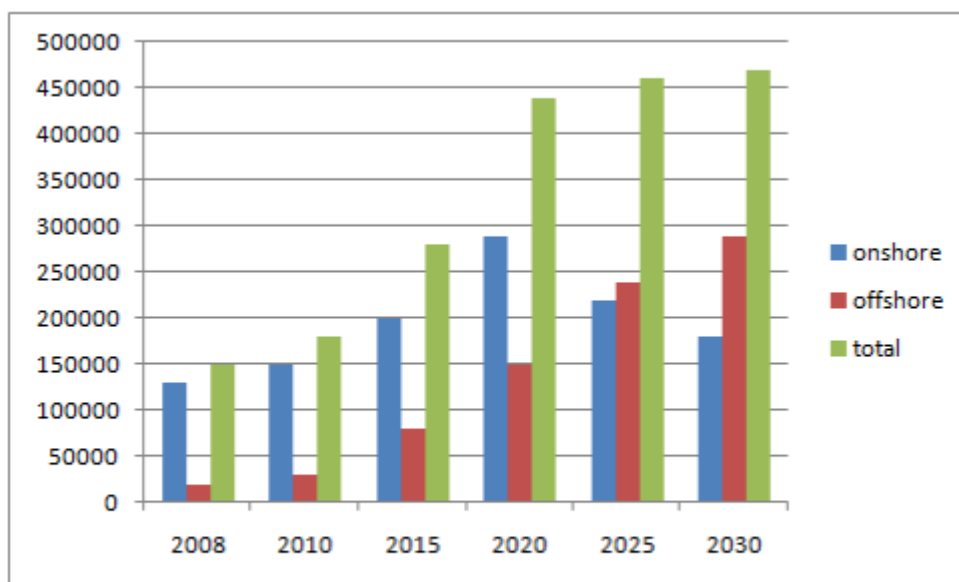


1.2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια από τις πλέον καθοριστικές λύσεις στο ζήτημα της ηλεκτροπαραγωγής, διότι παρουσιάζει πλήθος πλεονεκτημάτων.

Βασικό χαρακτηριστικό της χρήσης της αιολικής ενέργειας είναι η ανεξαρτησία της από τα ορυκτά καύσιμα, στοιχείο που συνεπάγεται τη μηδενική εκπομπή αέριων ρύπων και την εξασφάλιση προστασίας έναντι της αστάθειας των τιμών στην παγκόσμια οικονομία των ορυκτών καυσίμων. Οι αμελητέες επιδράσεις της στο φυσικό περιβάλλον την καθιστούν ιδιαίτερα φιλική προς αυτό. Αποτελεί ελεύθερη, άφθονη και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Επιπροσθέτως, αξίζει να αναφέρουμε πως η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας συμβάλλει τα μέγιστα στον οικονομικό τομέα. Αρχικά, διότι χαρακτηρίζεται από χαμηλό λειτουργικό κόστος. Ενδυναμώνει την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών και δημιουργεί πλήθος θέσεων εργασίας.

Το αρνητικό στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας μέσω των ανεμογεννητριών είναι πως ο άνεμος αποτελεί μια ανεξέλεγκτη και χρονικά μεταβαλλόμενη πηγή ενέργειας. Επίσης, αρνητικές αναφορές γίνονται για τους εκπεμπόμενους θορύβους που προέρχονται από τα περιστρεφόμενα μηχανικά μέλη και την περιστροφή των πτερυγίων. Επιπλέον, ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στη χωροθέτηση των ανεμογεννητριών λαμβάνοντας υπόψη τυχόν προστατευόμενες περιοχές προκειμένου να μην επηρεαστεί η χλωρίδα και πανίδα της εκάστοτε περιοχής. Τέλος, χρονοβόρα θεωρείται η διαδικασία έρευνας και χαρτογράφησης του αιολικού δυναμικού των μεγάλων περιοχών προκειμένου να εντοπιστούν τα ευνοϊκότερα και αποδοτικότερα σημεία.



ΠΗΓΗ: EWEA

1.3 Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

Η Ελλάδα είναι εφοδιασμένη με ένα πλούσιο αιολικό δυναμικό που εκτείνεται κυρίως στις περιοχές της Πελοποννήσου, της Κρήτης, της Στερεάς και των νησιών του Αιγαίου. Στις περιοχές αυτές είναι εγκατεστημένα τα περισσότερα αιολικά πάρκα της χώρας, πρόκειται για ανεμογεννήτριες οι οποίες είναι τοποθετημένες σε βέλτιστη διάταξη προκειμένου να αξιοποιηθεί στο μέγιστο βαθμό το αιολικό δυναμικό.

Οι πρώτες έρευνες και προσπάθειες αξιοποίησης του δυναμικού αυτού χρονολογούνται περίπου στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Το 1982 τίθεται σε λειτουργία το πρώτο αιολικό πάρκο της χώρας στην Κύθνο. Αποτελείτο από πέντε (5) ανεμογεννήτριες τύπου MAN των 200KW η κάθε μια. Αυτή η εγκατάσταση αποτέλεσε την αφετηρία δημιουργίας και άλλων αιολικών πάρκων σε περιοχές που παρουσίαζαν προβληματική ηλεκτροδότηση. Μολονότι η Ελλάδα βρίσκεται στην κορυφή της πυραμίδας των χωρών που υποδέχτηκαν την ιδέα της χρήσης ανεμογεννητριών και προχώρησαν στην υλοποίησή τους στα μέσα της δεκαετίας του 1980 με ισχύ 0,8 MW, η εξελικτική πορεία αυτής της προσπάθειας δεν ήταν η αναμενόμενη. Το 1990 η εγκατεστημένη αιολική ισχύς ήταν μόλις 1,5 MW. Στο τέλος του 20ού αιώνα το ποσοστό ανέρχεται στο 106,8 MW. Από το 2000 και έπειτα ξεκινά η πιο δυναμική περίοδος για την αιολική παραγωγή ενέργειας. Από τα σημερινά στατιστικά στοιχεία προκύπτει ότι η αιολική ενέργεια στη χώρα μας συνεχίζει την ανοδική πορεία. Πιο συγκεκριμένα και σύμφωνα με τα δεδομένα που παρουσιάζονται από την Ελληνική Επιστημονική Εταιρεία Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ) η συνολική αιολική ισχύς που εγκαταστάθηκε το 2014 ήταν 113,9 M, ελάχιστα μειωμένη συγκριτικά με το 2013. Στα τέλη του 2014 βρίσκονταν υπό κατασκευή ή είχαν συμβολαιοποιηθεί νέα αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 246,5 MW, η οποία αναμένεται να προστεθεί εντός του 2015 στο αιολικό δυναμικό της χώρας. Τα δεδομένα αυτά επιβεβαιώνουν την αναπτυξιακή δυναμική και τις προοπτικές εξέλιξης των αιολικών επενδύσεων στην Ελλάδα που υλοποιούνται προσφέροντας αφενός απασχόληση και εισόδημα σε μια κρίσιμη περίοδο για την ελληνική οικονομία και αφετέρου υποβοηθούν στην επίτευξη των στόχων του 2020 που ισοδυναμούν με εγκατάσταση 7,500 αιολικών και στην αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών ζητημάτων.

1.4 Αιολική ενέργεια σε παγκόσμιο και Ευρωπαϊκό επίπεδο

Η αιολική ενέργεια έχει εξελιχθεί παγκοσμίως σε πυλώνα των ενεργειακών συστημάτων και έχει αναγνωριστεί ως μια αξιόπιστη και προσιτή πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα στοιχεία της παγκόσμιας έκθεσης για το έτος 2014 της World Wind Energy Association (WWEA)² επιβεβαιώνουν την ανοδική της πορεία. Πιο συγκεκριμένα, η παγκοσμίως εγκατεστημένη αιολική ισχύς κατά το έτος 2014 ανέρχεται στα 371,559 MW σημειώνοντας αύξηση κατά 48% συγκριτικά με το 2013³. Κυρίαρχες χώρες στον τομέα αυτό αναδεικνύονται η Κίνα, οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, η Γερμανία, έπεται η Ισπανία και την πεντάδα ολοκληρώνει η Ινδία. Οι χώρες αυτές έχουν συμβάλει τα μέγιστα στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας τις τελευταίες δυο δεκαετίες.

Το 2014 αντιπροσώπευαν 266 GW ή το 72% της παγκόσμιας εγκατεστημένης αιολικής δύναμης, ποσοστό ελαφρώς μειωμένο του προηγούμενου έτους. Επίσης, η Κίνα, η Γερμανία και οι Η.Π.Α εξακολουθούν να διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στον τομέα της παγκόσμιας αγοράς καλύπτοντας σχεδόν τα δυο τρίτα (65%).

Στην Ευρώπη, σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία της European Wind Energy Association (EWEA), η εγκατεστημένη αιολική ισχύς κατά το έτος 2014 αγγίζει το ποσοστό των 12,819 MW από το οποίο το 11,791 MW προέρχεται από χώρες που εντάσσονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Εκτιμάται πως στον τομέα αυτό παρουσιάστηκε αύξηση περίπου 3,8% συγκριτικά με το 2013. Η Γερμανία βρίσκεται στην κορυφή των ευρωπαϊκών χωρών εγκαθιστώντας 5,279 MW αιολικής ισχύς. Τη δεύτερη θέση καταλαμβάνει το Ηνωμένο Βασίλειο με ποσοστό 1,736 MW, ακολουθεί η Σουηδία με ποσοστό 1,050 MW και η Γαλλία με 1,042 MW. Οι χώρες που ακολουθούν έχουν σημαντικά μειωμένα ποσοστά, όπως η Πολωνία με 444,3 MW και η Αυστρία με 411,2 MW⁴. Ωστόσο, εκτιμάται πως η αιολική ενέργεια στην Ευρώπη δεν θα αναπτυχθεί με ταχείς ρυθμούς έως τα τέλη της δεκαετίας που διανύουμε εξαιτίας αφενός της ευρύτερης επενδυτικής αβεβαιότητας και αφετέρου της ισχνής ανάπτυξης των οικονομιών των ευρωπαϊκών χωρών.

² <http://www.wwindea.org/>

³ <http://www.wwindea.org/wwea-bulletin-special-issue-2015>

⁴ <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2014.pdf>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Αιολικά συστήματα

2.1 Αιολικά συστήματα – Ιστορική αναδρομή

Ο ανεμόμυλος αποτελεί την πρόιμη μορφή των σύγχρονων ανεμογεννητριών. Ορίζεται ως η αιολική μηχανή κάθετου άξονα περιστροφής. Η βασικότερη χρήση του εντοπίζεται στην άντληση ύδατος και στην άλεση δημητριακών.

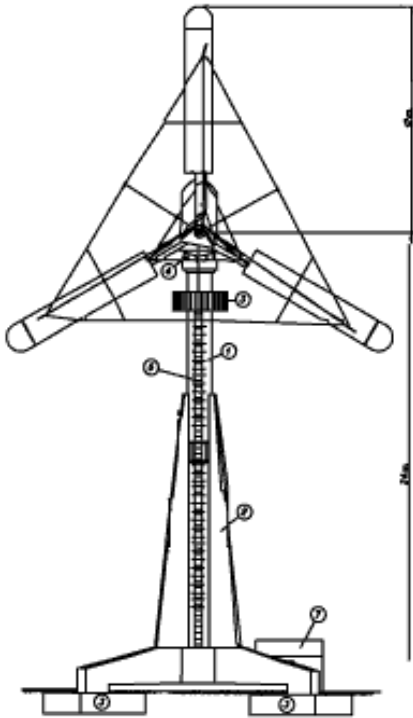
Πιο αναλυτικά, οι αρχαιότεροι ανεμόμυλοι (κατακόρυφου άξονα) εντοπίζονται σε χώρες της Ανατολής, συγκεκριμένα στην Περσία, εκεί όπου βρίσκεται το σημερινό Ιράκ και Αφγανιστάν, κατά τον 6ο και 9ο αιώνα μ.Χ.. Η πρώτη γραπτή αναφορά σε αυτή την αιολική μηχανή (πρόκειται για ένα περσικό συγκρότημα ανεμόμυλων του 644 μ.Χ.) εμφανίζεται σε αραβικά συγγραφικά έργα του 9ου αιώνα μ.Χ.. Η εξάπλωση των ανεμόμυλων στην Ευρώπη πραγματοποιήθηκε από τους Άραβες τον 12ο αιώνα μ.Χ. Στις αρχές του 14ου αιώνα αναπτύχθηκε στη Γαλλία ο ανεμόμυλος σε σχήμα πύργου. Στις αρχές του επόμενου αιώνα επινοήθηκε στις Κάτω Χώρες ο περιστρεφόμενος ανεμόμυλος με κοίλο εσωτερικά άξονα. Η τεχνογνωσία του ανεμόμυλου μεταφέρεται στην Αμερική τον 17ο αιώνα όπου χρησιμοποιήθηκε πρωτίστως για την άντληση νερού. Στην Ελλάδα η χρήση των ανεμόμυλων χρονολογείται από τον 13ο αιώνα και εμφανίζεται κυρίως στην περιοχή του Αιγαίου. Αναπτύχθηκε ο λεγόμενος μεσογειακός ανεμόμυλος (οριζόντιου άξονα), ο οποίος ήταν πέτρινος με πάνινα πτερύγια.

Ο σταδιακός περιορισμός της χρήσης των ανεμόμυλων παρατηρείται στις αρχές του 19ου αιώνα ως επακόλουθο της τεχνολογικής ανάπτυξης, την εμφάνισης κινητήρων εσωτερικής καύσης και της διάδοσης του ηλεκτρισμού.

Η εξελικτική πορεία των ανεμόμυλων υπήρξε μακρόχρονη. Ο πρώτος σταθμός απαντάται το 1888 στην Αμερική, όταν ο αμερικανικής καταγωγής μηχανικός Charles F. Brush (1849-1929) κατασκεύασε την πρώτη μορφή ανεμογεννήτριας που παρήγαγε 12 KW ηλεκτρικής ενέργειας.



Μετά τον Α΄ Παγκόσμιο Πόλεμο πολλαπλασιάστηκαν οι πειραματικές διαδικασίες σε ανεμόμυλους που διέθεταν ισχία αεροτομής, δηλαδή παρέπεμπαν σε πτερύγια αεροπορικής έλικας. Το 1931 πραγματοποιήθηκε η πρώτη εγκατάσταση τέτοιου είδους ανεμογεννήτριας στην Κριμαία.



Η πιο επιτυχημένη προσπάθεια πραγματοποιήθηκε από τον Johannes Juul (1887-1969), Δανό μηχανικό και μαθητή του Paul la Cour, στη Δανία το 1957, όταν κατασκεύασε την πρώτη ανεμογεννήτρια που παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια με εναλλασσόμενο ρεύμα (Danish Concept)⁵. Επρόκειτο για μια ανεμογεννήτρια τριών πτερυγίων, οριζόντιου άξονα και σταθερού βήματος.

Σημαντική τομή στην εξέλιξη των ανεμογεννητριών έλαβε χώρα το 1978, όταν κατασκευάστηκε η πρώτη ανεμογεννήτρια ισχύος μεγαλύτερη του 1MW. Το καινοτόμο σχέδιο υλοποιήθηκε από καθηγητές και μαθητές του σχολείου Tvind.

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες επωφελούνται από τα επιτεύγματα των τεχνολογιών της αεροδυναμικής, των υλικών και της πληροφορικής, έχουν εξαιρετική απόδοση και είναι ανταγωνιστικές έναντι των συμβατικών πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

⁵ <http://ele.aut.ac.ir/~wind/en/pictures/juul.htm>

Σχέδια και εικόνες από την πρώτη ανεμογεννήτρια στην Αμερική⁶.

SCIENTIFIC AMERICAN

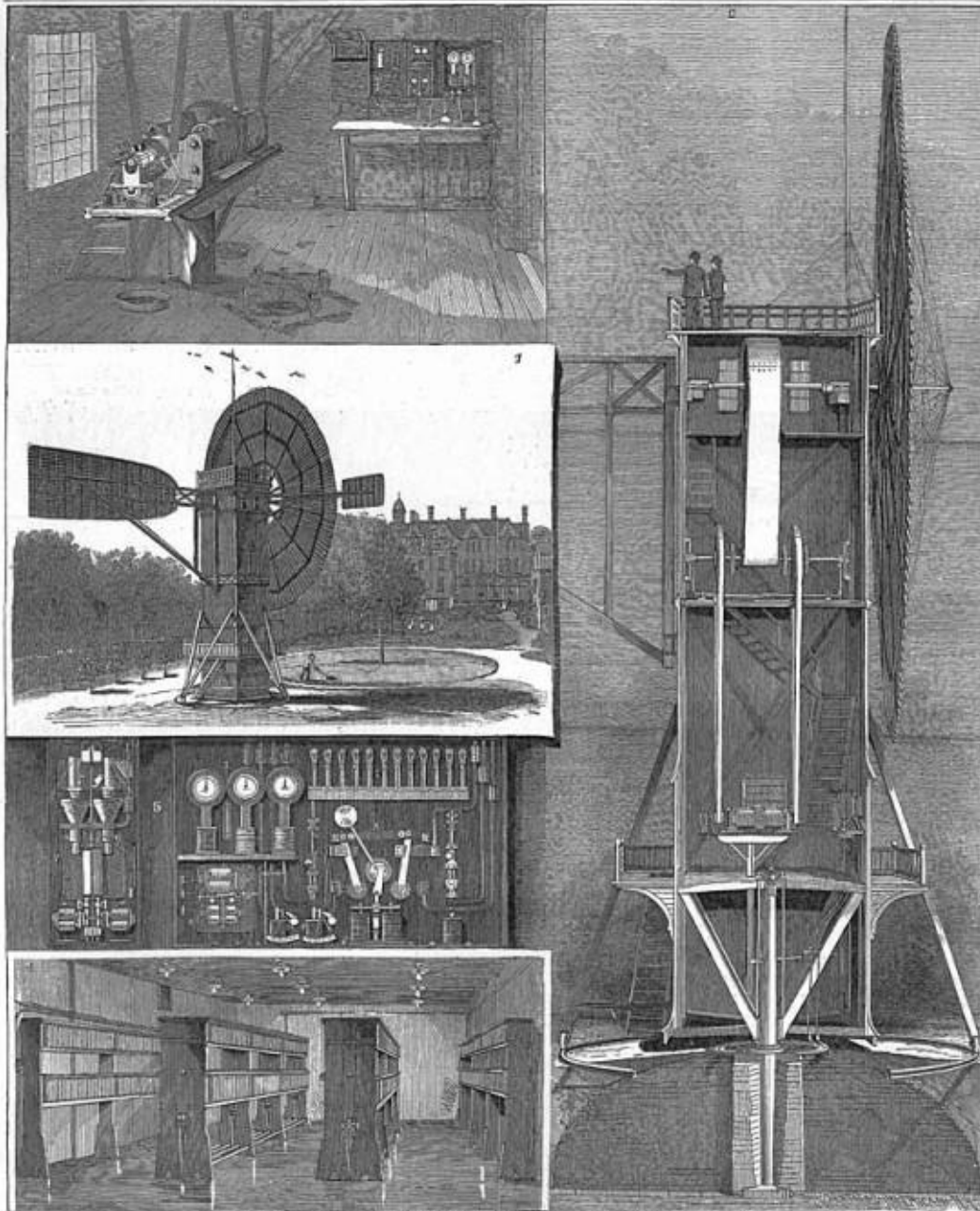
[Entered at the Post Office of New York, N. Y., as Second Class Matter. Copyright © 1890, by Munn & Co.]

A WEEKLY JOURNAL OF PRACTICAL INFORMATION, ART, SCIENCE, MECHANICS, CHEMISTRY, AND MANUFACTURES.

Vol. LXIII.—No. 52.
Established 1845.

NEW YORK, DECEMBER 30, 1890.

[55.00 A YEAR.
WASHTON.]



1. Windmill in the park. 2. Vertical section of the tower. 3. Dynamo. 4. Storage batteries. 5. Registering apparatus.
THE WINDMILL DYNAMO AND ELECTRIC LIGHT PLANT OF MR. CHARLES F. BRUSH, CLEVELAND, O.—[See page 399.]

⁶ <http://cleantechnica.com/2014/06/22/americas-first-wind-turbine-generated-electricity-1888/>

2.2 Αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών (Α/Γ)

Η ανεμογεννήτρια είναι η μηχανή που μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η αρχή λειτουργίας της ακολουθεί την εξής πορεία:

Ο αέρας περιστρέφει τα πτερύγια που είναι συνδεδεμένα με έναν περιστρεφόμενο άξονα.

Ο άξονας ενώνεται με ένα κιβώτιο μετάδοσης κίνησης και

Το κιβώτιο εν συνεχεία συνδέεται με έναν άλλον άξονα μεγάλης ταχύτητας περιστροφής μέσω του οποίου ενεργοποιείται μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.⁷

Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται σε πύργους στήριξης προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ικανότητα παραγωγής τους. Πιο συγκεκριμένα, η εγκατάστασή τους γίνεται σε ύψος ίσο ή μεγαλύτερο των 30 μέτρων με σκοπό την εκμετάλλευση ταχύτερου και συνεχούς αέρα. Το ύψος του πύργου στήριξης σε συνδυασμό με την τοποθέτηση των πτερυγίων και του δρομέα εξασφαλίζουν πρόσβαση με υψηλότερες ταχύτητες ανέμου. Σε ορισμένες περιοχές όπου το ύψος του εδάφους αυξάνεται κατά 10%, αυξάνεται ως επακόλουθο η ταχύτητα του ανέμου κατά 20% και η παραγόμενη ενέργεια κατά 34%.

Οι Α/Γ είναι σε θέση είτε να διαμορφώσουν αυτόνομα συστήματα για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών μιας μικρής εγκατάστασης, είτε να συνδεθούν στο δημόσιο δίκτυο με σκοπό τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε περισσότερους καταναλωτές.⁸

2.3 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου και οριζόντιου άξονα

Πολυετής έρευνα απαιτήθηκε για να αποκτήσουν οι ανεμογεννήτριες τη σημερινή τους μορφή. Οι επιστήμονες πειραματίστηκαν τόσο διαφοροποιώντας τον αριθμό των πτερυγίων, όσο και τον προσανατολισμό του άξονα μέχρι να κατασκευάσουν τη σύγχρονη ανεμογεννήτρια. Κριτήριο διαχωρισμού αποτελεί η θέση του άξονα περιστροφής ως προς τη ροή του ανέμου και την επιφάνεια του εδάφους.

Οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται συνεπώς σε ανεμογεννήτριες:

- κατακόρυφου άξονα (VAWT- Vertical axis wind turbine)
- και
- οριζόντιου (HAWT- Horizontal axis wind turbine).

⁷ <http://medilab.pme.duth.gr/invonio/operating-principle.html>

⁸ www.hellenic-college.gr/works/helcolpedia/.../wind-kolipetris-2013.pdf

2.3.1 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα έχουν τοποθετημένο τον περιστροφικό άξονα κάθετο προς το έδαφος και κατακόρυφο ως προς τη διεύθυνση του ανέμου. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες αυτής της κατηγορίας είναι δύο τύπων: Savonius και Darrieus. Η μεταξύ τους διαφορά, εκτός από τον σχεδιασμό τους, έγκειται στον χρόνο εκκίνησης και αποδοτικότητα. Οι ανεμογεννήτριες τύπου Savonius χαρακτηρίζονται από εύκολη εκκίνηση, αλλά περιορισμένη απόδοση, ενώ οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus έχουν δύσκολη εκκίνηση, αλλά διαθέτουν καλύτερα ποσοστά αποδοτικότητας. Για αυτόν το λόγο έχουν κατασκευαστεί ανεμογεννήτριες από τον συνδυασμό και των δύο αυτών τύπων.



Παράδειγμα τύπου ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα

Βασικότερα πλεονεκτήματα των κατακόρυφων ανεμογεννητριών αποτελούν τα εξής.

- Αρχικά, η μηχανή μπορεί να περιστρέφεται από άνεμο οποιασδήποτε κατεύθυνσης, στοιχείο που συνεπάγεται την απουσία μηχανισμού προσανατολισμού. Κατ' επέκταση αυτές οι ανεμογεννήτριες δύνανται να εγκατασταθούν ακόμα και σε περιοχές με μεγάλη μεταβλητότητα του ανέμου.
- Επίσης, η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων είναι εγκατεστημένα στο έδαφος, γεγονός που συνεπάγεται οικονομική και απλή σχεδίαση του πύργου.
- Εξίσου σημαντική είναι η περιορισμένη παραγωγή θορύβου.
- Υπάρχει ένα εύρος επιλογών ως προς το σημείο τοποθέτησης των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα γεγονός που εξασφαλίζεται από το μέγεθός τους.
- Τέλος η κατασκευή τους είναι χαμηλότερου κόστους.

Ωστόσο παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα που περιορίζουν την αποδοτικότητά τους.

Δεδομένου ότι η ροπή εκκίνησης είναι πολύ υψηλή συχνά χρήζουν κάποιας εξωτερικής παρέμβασης προκειμένου να ξεκινήσει η περιστροφική διαδικασία. Η ανάγκη αυτή καλύπτεται από την άντληση ρεύματος από το εκάστοτε δίκτυο.

Επιπλέον εξαιτίας του μικρού μεγέθους της κατασκευής τους παρατηρείται αδυναμία στην εκμετάλλευση ανέμων υψηλών ταχυτήτων παράγοντας στον οποίο οφείλεται η χαμηλή αποδοτικότητα.⁹

⁹ <http://medilab.pme.duth.gr/invonio/turbine-types.html>

2.3.2 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν τοποθετημένο τον άξονα περιστροφής παράλληλο προς την επιφάνεια της γης και προς την διεύθυνση του ανέμου. Συνήθως διαθέτουν 2 ή 3 πτερύγια τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης. Διαθέτουν σύστημα προσανατολισμού για να προσδιορίζεται η κατεύθυνση του αέρα. Η ισχύς τους φτάνει τα 5 MW, το ύψος του πύργου φτάνει τα 120 μέτρα και η διάμετρος του δρομέα κυμαίνεται από 40 έως 120 μέτρα. Έχουν κυριαρχήσει στην παγκόσμια αγορά σε ποσοστό περίπου 90%. Η μεγάλη τους διάδοση οφείλεται στην πληθώρα των πλεονεκτημάτων τους.



Παράδειγμα τύπου ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι

- Η εκμετάλλευση ανέμων υψηλών ταχυτήτων χάρη στο ύψος του πύργου της μηχανής.
- Επιπλέον διαθέτουν υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή και εύκολη διαδικασία συναρμολόγησης.
- Δεν είναι απαραίτητη η παρουσία ανέμων μεγάλης έντασης για να τεθεί σε λειτουργία η περιστροφική διαδικασία και να παραχθούν ικανοποιητικά ποσοστά ενέργειας.

Σημαντικά μειονέκτημα των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι:

Το υψηλό κόστος κατασκευής τους.

Επίσης στα αρνητικά στοιχεία περιλαμβάνεται ο παραγόμενος από την λειτουργία της ανεμογεννήτριας θόρυβος.

Τέλος, απαραίτητη κρίνεται η παρουσία ενός ενεργού μηχανισμού περιστροφής των πτερυγίων για τον προσανατολισμό στην κατεύθυνση του ανέμου.¹⁰

¹⁰ <http://www.turbinesinfo.com/horizontal-axis-wind-turbines-hawt/>

2.4 Η δομή της ανεμογεννήτριας

Τα βασικά δομικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας είναι τα ακόλουθα:

Κουβούκλιο: Περιέχει όλα τα βασικά στοιχεία την ανεμογεννήτριας, συμπεριλαμβανομένου του κιβωτίου ταχυτήτων και της ηλεκτρικής γεννήτριας.

Ανεμομετρητής: Κύρια λειτουργία του είναι η καταγραφή της ταχύτητας του ανέμου και η μεταφορά δεδομένων για την ταχύτητά του στον ελεγκτή (controller)

Πτερύγια (Blades): Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες έχουν δύο ή τρία πτερύγια. Ο άνεμος καθώς φυσά τους ασκεί πίεση, τα προκαλεί να ανυψωθούν και να εκτελέσουν περιστροφική κίνηση. Σε μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια 1000 KW κάθε πτερύγιο έχει μήκος 27 μέτρα και είναι σχεδιασμένο περίπου όπως ένα φτερό αεροπλάνου. Κατασκευάζονται από κράματα μετάλλων, ενισχυμένο πολυεστέρα και ξύλο ποτισμένο με ειδικές ριτίνες.

Φρένο(Brake): Πρόκειται για έναν δίσκο φρένου, ο οποίος δύναται να εφαρμοστεί είτε με μηχανικό, είτε με ηλεκτρικό, είτε με υδραυλικό τρόπο, με σκοπό τον τερματισμό της λειτουργίας του ρότορα (ηλεκτρικός κινητήρας) σε περιπτώσεις επείγουσας ανάγκης.

Ελεγκτής(Controller): Ο ελεγκτής θέτει σε λειτουργία τη μηχανή για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από 13 με 25,75 km/h και την τερματίζει όταν οι ταχύτητες φτάσουν περίπου τα 88,51 km/h. Οι τουρμπίνες δεν ενεργοποιούνται σε ταχύτητες μεγαλύτερες από 88,51 km/h, διότι υπάρχει κίνδυνος να καταστραφούν.

Κιβώτιο ταχυτήτων(Gear box): Τα γρανάζια συνδέουν τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνουν τις ταχύτητες περιστροφής από τις 30 έως 60 περιστροφές το λεπτό (rpm) σε 1000 έως 1800 περιστροφές το λεπτό που είναι η ταχύτητα περιστροφής που απαιτείται από τις περισσότερες ανεμογεννήτριες για να παράγουν ηλεκτρισμό. Βασικό μειονέκτημα είναι πως το κιβώτιο ταχυτήτων έχει μεγάλο κόστος γεγονός που ωθεί τους μηχανικούς στην ανεύρεση νέων λύσεων, όπως η δημιουργία ανεμογεννητριών «άμεσης ώθησης» (direct drive) οι οποίες λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής και δε χρειάζονται κιβώτιο ταχυτήτων.

Γεννήτρια (Generator): Πρόκειται συνήθως για μια γεννήτρια εισαγωγής που διατίθεται σε ευρεία κλίμακα στο εμπόριο και παράγει ηλεκτρισμό συχνότητας 50-60Hz AC. Η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική επιτυγχάνεται μέσω σύγχρονων και ασύγχρονων γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος και σπανίως μέσω ηλεκτρικών γεννητριών συνεχούς ρεύματος. Σημαντικό πλεονέκτημα των ασύγχρονων γεννητριών αποτελεί ή απλή κατασκευή τους και η εύκολη σύνδεση στο δίκτυο.

Άξονας υψηλής ταχύτητας (High-speed shaft): Περιστρέφεται περίπου με 1500 στροφές ανά λεπτό (rpm). Κύρια λειτουργία του είναι να θέτει τη γεννήτρια σε κίνηση. Είναι επίσης εξοπλισμένο με ένα δισκόφρενο σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Το μηχανικό αυτό φρένο χρησιμοποιείται σε περίπτωση που το αεροδυναμικό φρένο υποστεί βλάβη.

Άξονας χαμηλής ταχύτητας (Low-speed shaft): Συνδέει την κεφαλή του ρότορα με το κιβώτιο ταχυτήτων. Περιστρέφεται με περίπου 30 έως 60 περιστροφές το λεπτό (rpm)

Ατρακτίδιο (Nacelle): Βρίσκεται στην κορυφή του πύργου. Περιέχει το κιβώτιο ταχυτήτων, τους άξονες υψηλής και χαμηλής ταχύτητας, τη γεννήτρια, τον ελεγκτή και το φρένο.

Έλεγχος βήματος κλίσης πτερυγίων (Pitch control): Πρόκειται για τον πιο συνηθισμένο τρόπο ελέγχου της αεροδυναμικής ισχύος που παράγεται από τον δρομέα της ανεμογεννήτριας. Οι λεπίδες περιστρέφονται ή στρίβουν γύρω από τον άξονα τους, ανεξάρτητα από τον άνεμο, για να ελέγχουν την ταχύτητα του ρότορα και να τον αποτρέπουν από το να στρίβει σε ανέμους είτε ισχυροί, είτε ασθενείς για να παράγουν ηλεκτρισμό.

Ρότορας (Rotor): Αποτελεί μια κατηγορία στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών. Βασικό χαρακτηριστικό μιας στρεφόμενης ηλεκτρικής μηχανής είναι η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική και αντιστρόφως. Ως ρότορας ορίζονται οι λεπίδες και η πλήμνη (κέντρο του άξονα) μαζί.

Πυλώνας-Πύργος (Tower): Οι πύργοι των ανεμογεννητριών στηρίζουν τον ρότορα και το κουβούκλιο. Ως προς την κατασκευή τους μπορεί να είναι χαλύβδινοι σωληνοειδείς πύργοι ή δικτυωτοί πύργοι. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες διαθέτουν χαλύβδινους σωληνοειδείς πύργους. Έχουν κωνική μορφή, δηλαδή η διάμετρός τους αυξάνει προς τη βάση για να είναι ευσταθείς. Όσον αφορά τους δικτυωτούς πύργους είναι κατασκευασμένοι με χαλύβδινα δικτύωματα. Έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής, διότι απαιτείται το μισό υλικό από ότι στην προηγούμενη κατηγορία πύργων, στοιχείο το οποίο τους προσδίδει ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα.

Ανεμόμετρο και ανεμοδείκτης: Τα όργανα αυτά χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της έντασης και της διεύθυνσης του ανέμου. Όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί μια ελάχιστη τιμή, τα ηλεκτρικά σήματα του ανεμόμετρου χρησιμοποιούνται από τον ηλεκτρικό ελεγκτή της ανεμογεννήτριας για να τεθεί σε λειτουργία. Επίσης, τα σήματα του ανεμοδείκτη χρησιμοποιούνται από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή της ανεμογεννήτριας για να στραφεί προς τη σωστή κατεύθυνση του ανέμου μέσω του μηχανισμού περιστροφής.

Μονάδα ψύξης: Περιλαμβάνει έναν ηλεκτρικό ανεμιστήρα που βασική του λειτουργία είναι να ψύχει την ηλεκτρική γεννήτρια και επιπλέον περιέχει μια μονάδα ψύξης με λάδι που χρησιμοποιείται για να ψύχει το λάδι που βρίσκεται στο κιβώτιο ταχυτήτων.

Μηχανισμός περιστροφής (Yaw Drive): Αποτελεί σημαντικό συστατικό του συστήματος εκτροπής των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα. Για να εξασφαλιστεί ότι η ανεμογεννήτρια παράγει το μέγιστο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας, ο μηχανισμός περιστροφής έχει ως στόχο να διατηρήσει τον δρομέα στραμμένο προς τον άνεμο καθώς αυτός αλλάζει κατεύθυνση. Αυτό ισχύει μόνο για τις ανεμογεννήτριες με πνοή ανέμου προς τα πάνω (up wind). Οι ανεμογεννήτριες που είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν με πνοή ανέμου προς τα κάτω (down wind) δεν χρειάζονται σύστημα περιστροφής, διότι ο άνεμος φυσά και στρέφει τον δρομέα προς τα κάτω. Λέγεται ότι η γεννήτρια έχει σφάλμα περιστροφής, αν ο δρομέας δεν είναι κάθετος στη διεύθυνση του ανέμου. Το σφάλμα περιστροφής συνεπάγεται ότι η ανεμογεννήτρια θα αξιοποιεί μικρότερο μέρος της ενέργειας του ανέμου^{11, 12}.

¹¹ http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_windmill.htm

¹² https://prezi.com/phvtweway_ds/presentation/

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Γεννήτριες

3.1 Είδη γεννητριών

Οι ηλεκτρικές μηχανές ανάλογα με τη λειτουργία τους διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

Στους ηλεκτρικούς κινητήρες ή απλώς κινητήρες

Στις ηλεκτρικές γεννήτριες ή απλώς γεννήτριες

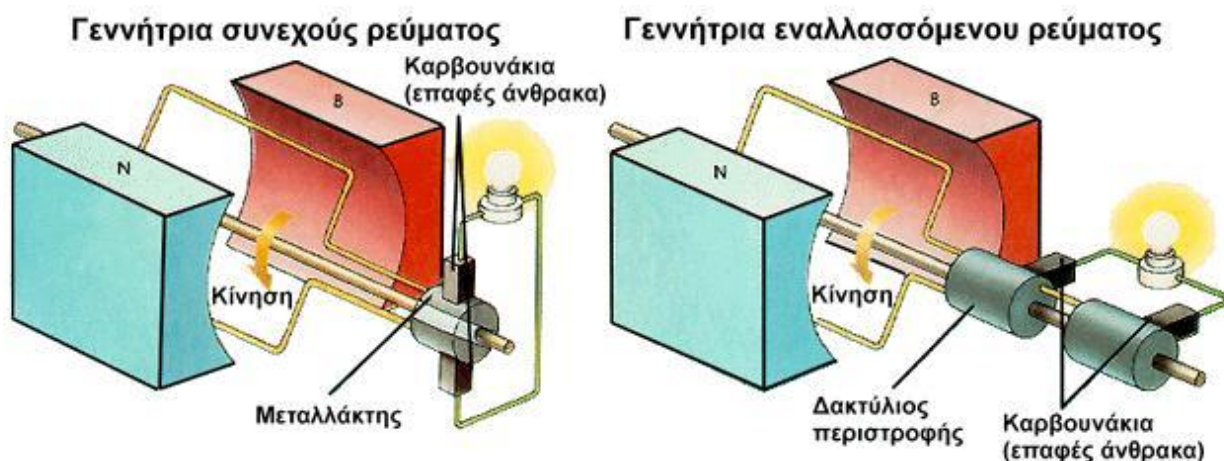
Οι κινητήρες είναι μηχανές που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Η λειτουργία τους βασίζεται στο φαινόμενο κατά το οποίο εάν ένας ρευματοφόρος αγωγός βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο, τότε εμφανίζεται δύναμη που ασκείται πάνω στον αγωγό.

Οι γεννήτριες είναι μηχανές οι οποίες παραλαμβάνουν μηχανική ενέργεια και την μετατρέπουν σε ηλεκτρική. Η λειτουργία τους βασίζεται στη διαδικασία κατά την οποία εάν κάποιο πηνίο περιστραφεί μέσα στο μαγνητικό πεδίο τότε προκύπτει τάση από επαγωγή στα άκρα του. Εάν το πηνίο βρίσκεται μέσα σε κλειστό κύκλωμα, τότε πρόκειται για κύκλωμα που διαρρέεται από ρεύμα.

Πιο συγκεκριμένα, αναφορικά με τις γεννήτριες μπορούν να διαιρεθούν περαιτέρω ανάλογα με το είδος του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγουν. Με βάση αυτό το κριτήριο προκύπτουν οι εξής δύο κατηγορίες:

Γεννήτριες συνεχούς ρεύματος

Γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος



3.2 Γεννήτριες συνεχούς ρεύματος

Προκειμένου να λειτουργήσει μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος θα πρέπει να πληρούνται οι παρακάτω συνθήκες:

- Να υπάρχει μαγνητικό πεδίο.
- Να υπάρχει αγωγός εντός του μαγνητικού πεδίου (να υπάρχει τύλιγμα στη μηχανή).
- Να υπάρχει κίνηση του αγωγού ως προς το μαγνητικό πεδίο ή του πεδίου ως προς τον αγωγό.

Αποτέλεσμα των προαναφερθέντων συνθηκών είναι η ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ) στα άκρα αυτού του αγωγού.

Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος ανάλογα με τον τρόπο που είναι συνδεδεμένο το τύλιγμα διέγερσής τους διακρίνονται στα παρακάτω είδη:

- Γεννήτριες με ξένη διέγερση
- Γεννήτριες με παράλληλη διέγερση
- Γεννήτριες με διέγερση σειράς
- Γεννήτριες με σύνθετη διέγερση

Οι γεννήτριες με ξένη διέγερση χρειάζονται μια ξένη πηγή που να τροφοδοτεί το τύλιγμα διέγερσης. Οι γεννήτριες παράλληλης και σύνθετης διέγερσης χαρακτηρίζονται ως αυτοδιεγερόμενες μηχανές, διότι κάνουν χρήση της μαγνητικής ροής του παραμένουστος μαγνητισμού στους πυρήνες των πόλων. Τέλος, οι γεννήτριες με σύνθετη διέγερση χωρίζονται σε γεννήτριες με αθροιστική σύνθετη διέγερση, αν το τύλιγμα σειράς ενισχύει το μαγνητικό πεδίο του παράλληλου τυλίγματος, και σε γεννήτριες με διαφορική σύνθετη διέγερση, αν το τύλιγμα σειράς αποδυναμώνει το μαγνητικό πεδίο του παράλληλου τυλίγματος.

3.3 Γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος

Η εφαρμογή ενός τριφασικού συστήματος ρευμάτων στον στάτη μιας μηχανής παράγει στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της. Αντιστρόφως, είναι δυνατόν να παραχθεί σύστημα τριφασικών τάσεων επαγωγής στα τυλίγματα του στάτη, εάν εφαρμοστεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής.

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας μιας μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος δημιουργούνται στο εσωτερικό της δύο μαγνητικά πεδία. Το πρώτο είναι το μαγνητικό πεδίο του κυκλώματος του δρομέα και το δεύτερο είναι το μαγνητικό πεδίο του κυκλώματος του στάτη. Η αλληλεπίδραση αυτών των δυο πεδίων έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή της ροπής εξόδου της μηχανής.

Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

- Στις ασύγχρονες ή επαγωγικές γεννήτριες.
- Στις σύγχρονες γεννήτριες ή εναλλακτήρες.

Η βασική τους διαφορά έγκειται στον τρόπο παραγωγής του ρεύματος διεγέρσεώς τους. Στην πρώτη κατηγορία το ρεύμα διεγέρσης παράγεται επαγωγικά στα τυλίγματα διεγέρσής τους, για αυτόν τον λόγο ονομάζονται επαγωγικές. Αντιθέτως, στην δεύτερη κατηγορία το ρεύμα διεγέρσης παράγεται από ανεξάρτητες πηγές συνεχούς ρεύματος.

3.3 Ασύγχρονη (επαγωγική) γεννήτρια

Η διάδοση της χρήσης των ασύγχρονων γεννητριών συνδέεται με την ανάπτυξη των ανεμογεννητριών ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο, καθώς παρουσιάζουν ορισμένα σημαντικά χαρακτηριστικά.

Το κυριότερο πλεονέκτημά μια ασύγχρονης γεννήτριας έγκειται στην απλότητα που παρουσιάζεται στο μηχανικό μέρος. Δεν χρειάζεται ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης και δεν χρειάζεται να κινείται συνεχώς με την ίδια ταχύτητα, στοιχείο που ευνοεί τη λειτουργία των ανεμογεννητριών. Επιπλέον έχει χαμηλό κόστος παραγωγής, πράγμα που οφείλεται στον μεγάλο αριθμό παραγωγής της. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της είναι πως αδυνατεί να παράγει άεργη ισχύ. Αντιθέτως, καταναλώνει άεργη ισχύ, για αυτόν το λόγο για να τεθεί σε λειτουργία απαιτείται η παρουσία μιας εξωτερικής πηγής άεργης ισχύος μόνιμα συνδεδεμένης. Αυτή η εξωτερική πηγή είναι υπεύθυνη για τη ρύθμιση της τάσεως στην έξοδο της γεννήτριας. Κατά συνέπεια οι εξωτερικοί πυκνωτές παράγουν το ρεύμα μαγνήτισης που αντιστοιχεί στην εκάστοτε γεννήτρια.

Από την άλλη πλευρά, σημαντικό πρόβλημα αποτελεί το γεγονός ότι η τάση στα άκρα έχει μεγάλη και άμεση εξάρτηση από το φορτίο και όποτε αυτό έχει ισχυρό επαγωγικό χαρακτήρα, είναι δυνατό να προκληθεί μεγάλη πτώση στα άκρα της γεννήτριας. Σε γενικές γραμμές η ασύγχρονη γεννήτρια επιδεινώνει τον συντελεστή ισχύος του δικτύου και προκαλεί μεγάλες πτώσεις τάσης.

Οι ασύγχρονες (επαγωγικές) γεννήτριες διακρίνονται σε δύο κυρίαρχα είδη που διέπονται από τις ίδιες αρχές λειτουργίας:

Ασύγχρονη (επαγωγική) γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού (Squirrel Cage Induction Generator-SCIG).

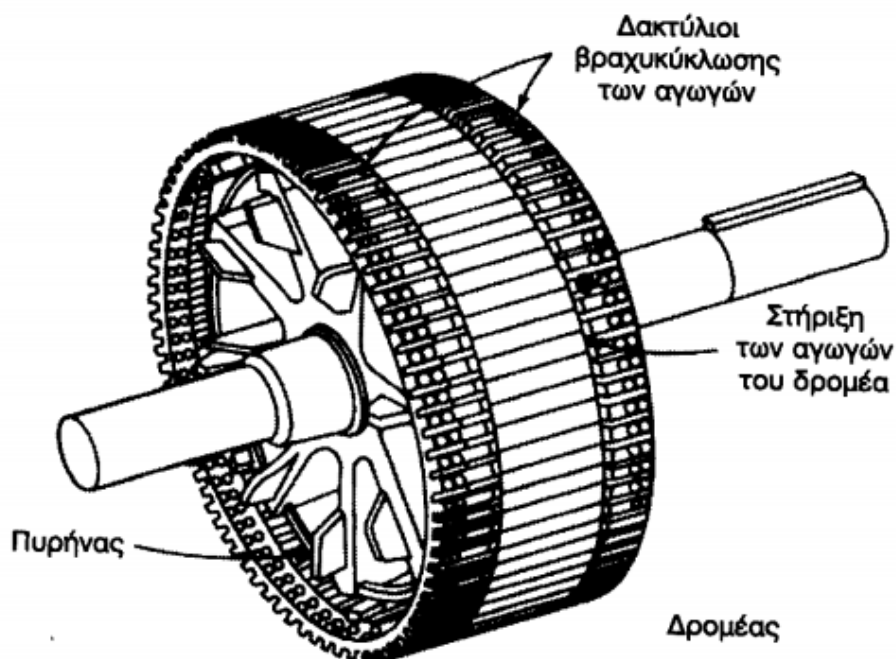
Ασύγχρονη (επαγωγική) γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor Induction Generator-WRIG).

Υπάρχει και μια τρίτη κατηγορία, η ασύγχρονη (επαγωγική) γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (Double Fed Induction Generator-DFIG). Κατασκευαστικά δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές από την γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα.

3.4.1 Ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού (Squirrel Cage Induction Generator-SCIG)

Αυτή η γεννήτρια ως προς το κατασκευαστικό κομμάτι διαθέτει τον κλωβό ο οποίος αποτελείται από μπάρες χαλκού σχετικά μεγαλύτερες ως προς το μήκος από τον δρομέα. Οι μπάρες τοποθετούνται μέσα στις εγχοπές του κλωβού και οι άκρες τους συγκολλούνται σε δυο χάλκινους ακροδακτύλιους, ούτως ώστε οι μπάρες να είναι βραχυκυκλωμένες μεταξύ τους. Η κατασκευή αυτή παραπέμπει σε κλειστό κλουβί, εκ του οποίου προήλθε και η ονομασία του.

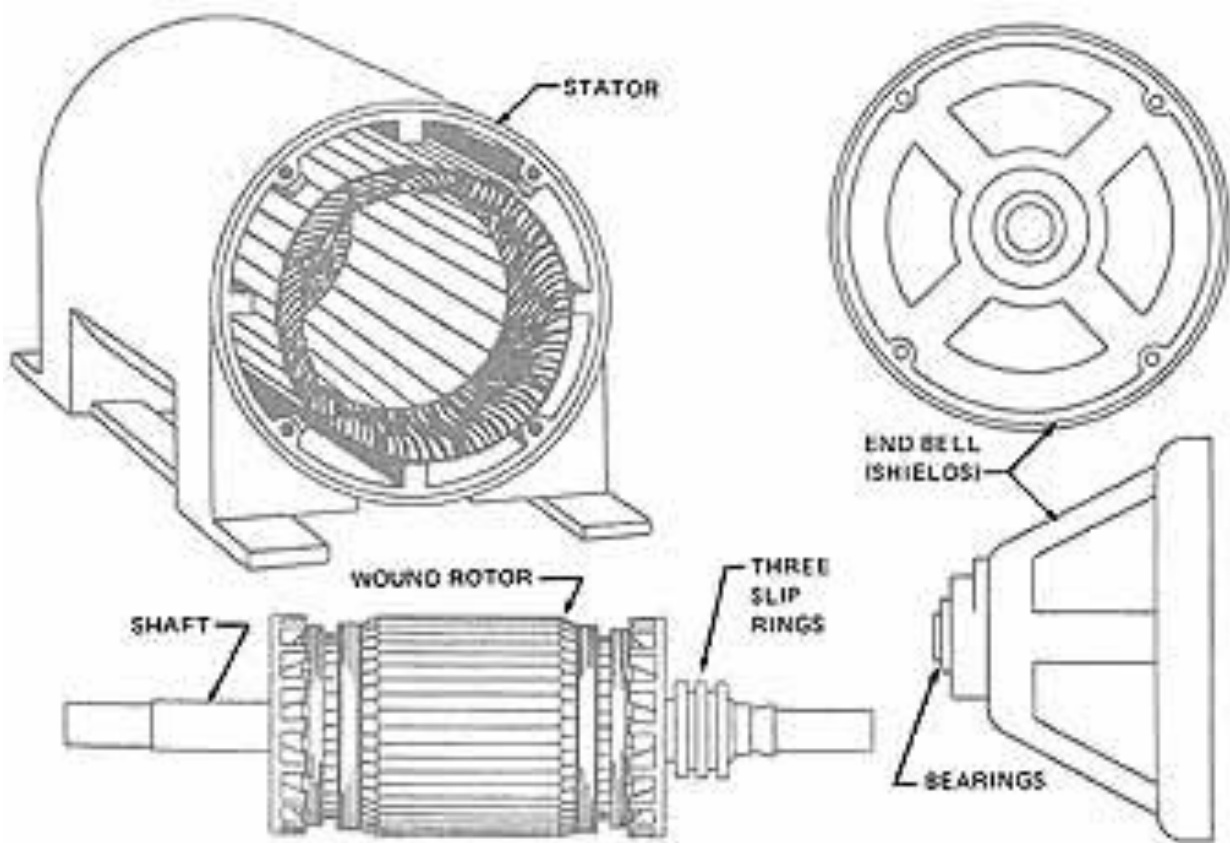
Αυτή η κατηγορία γεννήτριας χρησιμοποιήθηκε ευρέως στην τεχνολογία των σταθερών στροφών. Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος συνέβαλε στο να χρησιμοποιηθεί ως πλήρως μεταβλητής ταχύτητας ανεμογεννήτρια και να της προσδώσει σημαντικά λειτουργικά χαρακτηριστικά.



Σχεδιάγραμμα δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού

3.4.2 Ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor Induction Generator-WRIG)

Αυτό το είδος γεννήτριας διαθέτει ένα τριφασικό τύλιγμα παρόμοιο με αυτό του στάτη. Αυτό το τύλιγμα κατανέμεται ισόποσα στις εγκοπές του στάτη και υπάρχουν τρεις δακτύλιοι που συνδέουν τα άκρα του, οι γνωστοί και ως δακτύλιοι ολίσθησης (slip-rings), και περιστρέφονται μαζί με το δρομέα. Η σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα πραγματοποιείται από τους περιστρεφόμενους δακτυλίους και τις σχετικές με τους αυτούς ψήκτρες. Οι αντιστάσεις χρησιμοποιούνται κατά την εκκίνηση, ενώ οι ψήκτρες βραχυκυκλώνονται υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας.



Σχεδιάγραμμα δακτυλιοφόρου δρομέα

3.5 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Μια ηλεκτρική μηχανή, στη συγκεκριμένη περίπτωση μια γεννήτρια χαρακτηρίζεται ως σύγχρονη, εφόσον ο δρομέας της περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής. Σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής μπορεί να οριστεί μόνο αν υπάρχει Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), δηλαδή ένα σύστημα αποτελούμενο από σύγχρονες τριφασικές γεννήτριες, η παράλληλη λειτουργία των οποίων εξασφαλίζει την σταθερότητα της τάσης και της συχνότητας του συστήματος.

Οι σύγχρονες γεννήτριες έχουν σαφώς υψηλότερο κατασκευαστικό κόστος και είναι πιο περίπλοκες ως προς το μηχανολογικό κομμάτι σε σύγκριση με τις επαγωγικές γεννήτριες. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι πως το ρεύμα μαγνήτισης δεν προέρχεται από τον στάτη. Το απαραίτητο μαγνητικό πεδίο παράγεται, είτε από μόνιμους μαγνήτες, είτε από ηλεκτρομαγνήτες, δηλαδή τυλίγματα στον δρομέα που διαρρέονται από συνεχές ρεύμα. Κρίνεται η καταλληλότερη για τον έλεγχο πλήρους ισχύος που παράγεται από τη μηχανή, διότι συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος πλήρους κλίμακας. Ρόλος του μετατροπέα είναι πρώτον η απόσβεση των διαταραχών της ισχύος που οφείλονται στις ριπές του αέρα και στα μεταβαλλόμενα φαινόμενα του δικτύου, και δεύτερον ο έλεγχος της μαγνήτισης προκειμένου να παραμένει σύγχρονος με τη συχνότητα του δικτύου. Επιπλέον η σύγχρονη γεννήτρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί και δίχως κιβώτιο ταχυτήτων. Βασική προϋπόθεση, βέβαια, αποτελεί η ύπαρξη επαρκούς αριθμού πόλων.

Επιγραμματικά οι σύγχρονες γεννήτριες ή αλλιώς εναλλακτικές με βάση τον τρόπο κατασκευής τους και κυρίως με βάση τη διάταξη των μαγνητικών πόλων τις κατηγοριοποιούμε ακολούθως:

- Εναλλακτικές με εξωτερικούς πόλους.
- Εναλλακτικές με εσωτερικούς ή περιστρεφόμενους πόλους.

Οι εναλλακτικές με περιστρεφόμενους πόλους αποτελούν μια ιδιαίτερη ομάδα εναλλακτικών και ονομάζονται στροβιλοεναλλακτικές.

Οι σύγχρονες γεννήτριες διακρίνονται και σε δύο ακόμα σημαντικές κατηγορίες που είναι οι εξής:

- Σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor Synchronous Generator-WSRG)
- Σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Generator-PMSG)

3.5.1 Σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor Synchronous Generator-WSRG)

Η σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WSRG) παρουσιάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά ως προς την κατασκευή της. Ο στάτης περιλαμβάνει ένα τριφασικό τύλιγμα που δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με μια επαγωγική μηχανή. Η κατασκευή του δρομέα μπορεί να επιτευχθεί, είτε με έκτυπους πόλους, είτε με πόλους κυλινδρικής μορφής με κατανομημένο τύλιγμα. Στον δρομέα προσαρτάται ειδικό σύστημα για να τροφοδοτεί το τύλιγμα με συνεχές ρεύμα, ώστε να παραχθεί το απαιτούμενο πεδίο διέγερσης που στρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δυνατότητα ελέγχου της διέγερσης και συνεπώς της ροής προκειμένου να περιορίζονται οι απώλειες για διαφορετικά επίπεδα ισχύος.¹³

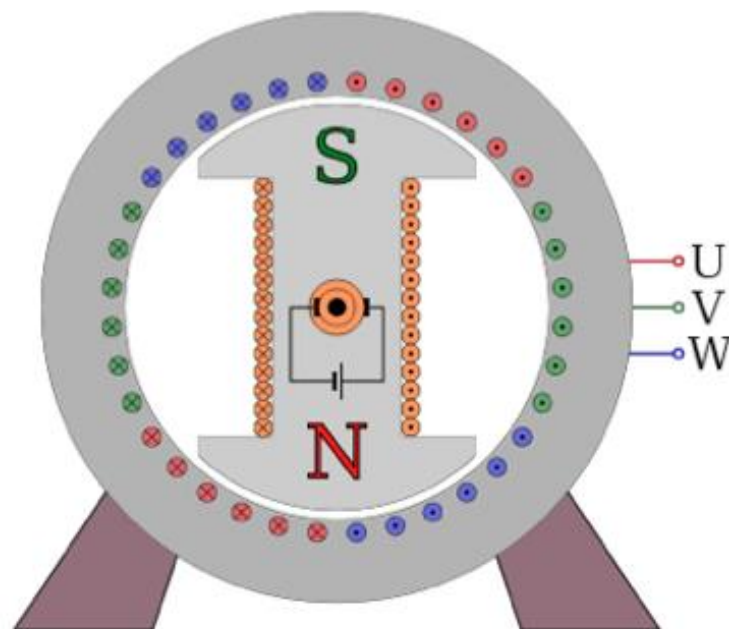


¹³ <http://digitalschool.minedu.gov.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C123/487/3182.12850/>

3.5.2 Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Generator-PMSG)

Κύριο χαρακτηριστικό της σύγχρονης γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη είναι η ύπαρξη μονίμων μαγνητών που εμπεριέχονται στον δρομέα για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου. Παρατηρείται ολοένα και αυξανόμενη χρήση αυτού του ίδιους γεννήτριας, επιλογή που υποστηρίζεται από πλήθος επιστημονικών άρθρων, λόγω της ιδιότητάς της να αυτό-διεγείρεται. Η συγκεκριμένη κατηγορία γεννήτριας θα αναλυθεί εκτενέστερα στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

14



¹⁴ <http://www.holi300.com/generator/>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΓΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ

(Permanent Magnet Synchronous Generator-PMSG)

4.1 Εισαγωγή στη σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη

Με τον όρο σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη αναφερόμαστε σε ακτινικές ή αξονικές γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη των οποίων η τροφοδοσία πραγματοποιείται από έναν ημιτονοειδή παλμό και είναι είτε εσωτερικού είτε εξωτερικού τύπου γεννήτριες. Βασική λειτουργία μιας γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη είναι η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας που λαμβάνει στην είσοδό της σε μηχανική και στη συνέχεια η μετατροπή της μηχανικής σε ηλεκτρική την οποία δίνει στην έξοδό της.

Χαρακτηρίζεται σύγχρονη, διότι ο δρομέας περιστρέφεται με σύγχρονο αριθμό στροφών, δηλαδή με τη ίδια ταχύτητα που περιστρέφεται το μαγνητικό πεδίο. Είναι αυτό-διεγείρομενη λόγω της ύπαρξης μόνιμων μαγνητών στον δρομέα, οι οποίοι παράγουν το μαγνητικό πεδίο. Αυτό συνεπάγεται το ότι δεν χρειάζεται επιπλέον παροχή ηλεκτρικού ρεύματος για την διέγερση της μηχανής, οπότε εξαιρούνται και οι απώλειες στο τύλιγμα διέγερσης. Συνεπώς εμφανίζει υψηλό βαθμό απόδοσης. Επιπλέον, η ύπαρξη μαγνητών συνοδεύεται από υψηλή πυκνότητα ροής με αποτέλεσμα να προκύπτει μικρότερο βάρος και όγκος για μια μηχανή δεδομένης ισχύος. Ο στάτης αυτής της κατηγορίας γεννητριών αποτελείται από συμβατικό τριφασικό τύλιγμα. Ο δρομέας εν συνεχεία αποτελείται από ένα σύστημα πόλων μαγνήτη, οι οποίοι μπορεί να είναι είτε κυλινδρικοί, είτε έκτυποι. Πολύ σημαντικό είναι το ότι μπορούν να παράγουν ισχύ σε οποιαδήποτε ταχύτητα, δηλαδή να δουλέψουν σε μεταβλητές ταχύτητες.

Από την άλλη πλευρά τα υλικά κατασκευής των μόνιμων μαγνητών είναι ακριβά και εξαιρετικά ευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, η χρήση διέγερσης με μόνιμο μαγνήτη απαιτεί τη χρήση ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος πλήρους κλίμακας για την προσαρμογή της τάσης και της συχνότητας της γεννήτριας στην αντίστοιχη τάση και συχνότητα της γραμμής, δεδομένο που προσδίδει επιπλέον κόστος. Ολοκληρώνοντας, η σύγχρονη φύση των γεννητριών μόνιμου μαγνήτη μπορεί αν προκαλέσει προβλήματα κατά την εκκίνηση, τον συγχρονισμό και τη ρύθμιση της τάσης και οφείλεται για δύσκαμπτη συμπεριφορά σε περίπτωση που η ταχύτητα του αέρα δεν είναι σταθερή.

Η χρήση γεννητριών μόνιμου μαγνήτη αυξάνεται ολοένα και περισσότερο τα τελευταία χρόνια. Τις τελευταίες δεκαετίες χρησιμοποιούνται σταδιακά στις εφαρμογές της αιολικής ενέργειας. Πραγματοποιούνται πολλές προσπάθειες προώθησής της χρήσης αυτής της κατηγορίας γεννητριών, λόγω της ιδιότητάς του να αυτό-διεγείρονται, η οποία τους επιτρέπει να λειτουργούν με υψηλό συντελεστή ισχύος και υψηλή απόδοση.

Ωστόσο, η ιδέα κατασκευής μιας μηχανής με μόνιμους μαγνήτες δεν προέκυψε τα τελευταία χρόνια. Το 1830 άρχισαν να γίνονται γνωστές αυτές οι κατηγορίες μηχανών. Βέβαια, η διάδοσή

τους δεν στέφθηκε με επιτυχία, εξαιτίας της κακής ποιότητας των σκληρών μαγνητικών υλικών της εποχής. Οι μηχανές μονίμου μαγνήτη έκαναν την επανεμφάνισή τους με την ανακάλυψη του alnico το 1931, του barium ferity το 1950 και ειδικότερα του υλικού του νεοδύμιο-σίδηρος-βόριο (NdFeb) το 1983. Η διαθεσιμότητα των μαγνητικών υλικών μεγάλης ενέργειας και η αισθητή πτώση της τιμής τους αποτελούν μερικά από τα στοιχεία που λειτούργησαν θετικά στην ανάπτυξη και τη διάδοση των γεννητριών μονίμου μαγνήτη.

4.2 Κατηγορίες σύγχρονων γεννητριών μονίμου μαγνήτη

Οι σύγχρονες γεννήτριες μονίμου μαγνήτη διακρίνονται σε ορισμένες κατηγορίες, οι οποίες προκύπτουν με βάση:

- Τη μορφή της επαγόμενης τάσης στο στάτη.
- Την κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής.
- Την τοποθέτηση των μαγνητών στον δρομέα.

Αξίζει να αναφέρουμε ότι η τελευταία κατηγορία μπορεί να υπάρξει συνδυαστικά με τις δυο προηγούμενες.

Με βάση το πρώτο κριτήριο διάκρισης, την μορφή της επαγόμενης τάσης στον στάτη, προκύπτουν οι εξής δύο κατηγορίες:

- Τραπεζοειδείς σύγχρονες μηχανές μονίμου μαγνήτη (trapezoidal PMSG)
- Ημιτονοειδείς σύγχρονες μηχανές μονίμου μαγνήτη (sinusoidal PMSG)

Αναφορικά με τη πρώτη κατηγορία τα φυσικά ρεύματα του στάτη έχουν τετραγωνική μορφή και η τάση εξ' επαγωγής έχει τραπεζοειδή μορφή. Στην δεύτερη κατηγορία τα φυσικά ρεύματα και η επαγόμενη τάση είναι ημιτονοειδούς μορφής. Βασικό χαρακτηριστικό αποτελεί η παραγωγή σταθερής και με ελάχιστες ταλαντώσεις ροπής.

Με βάση το δεύτερο κριτήριο κατηγοριοποίησης των σύγχρονων γεννητριών μονίμου μαγνήτη, δηλαδή την κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής, εμφανίζονται τρία ακόμα είδη:

- Μηχανές ακτινικής ροής.
- Μηχανές αξονικής ροής.
- Μηχανές εγκάρσιας ροής.

Η σύγχρονη γεννήτρια μονίμου μαγνήτη ακτινικής ροής (radical flux permanent magnet – RFPM) είναι το πιο διαδεδομένο είδος μηχανής. Οι δυναμικές γραμμές ανάμεσα στον δρομέα και τον στάτη ακολουθούν ακτινική κατεύθυνση. Το σχήμα αυτών των μηχανών είναι κυλινδρικό. Χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές άμεσης οδήγησης, διότι η κατασκευή της είναι αρκετά απλή και με χαμηλό κόστος. Επιπλέον, η επίτευξη μεγαλύτερων τιμών ισχύος προκύπτει από την απλή μεταβολή του μήκους της μηχανής, χωρίς να απαιτείται νέος σχεδιασμός. Ωστόσο μειονεκτεί έναντι των μηχανών αξονικής και εγκάρσιας ροής, επειδή καταλαμβάνει μεγαλύτερο όγκο και σε ό,τι σχετίζεται με το ενεργό βάρος και το μήκος του άξονα.

Ακολουθεί η σύγχρονη μηχανή μονίμου μαγνήτη αξονικής ροής (axial flux permanent magnet – AFPM) που η παραγόμενη μαγνητική ροή της εντοπίζεται στην κατεύθυνση του άξονα. Σε αυτήν την περίπτωση τα τυλίγματα και το μαγνητικό πεδίο ακολουθούν πορεία αξονικής διεύθυνσης. Το σχήμα είναι δισκοειδές. Αν την συγκρίνουμε με την μηχανή ακτινικής ροής θα διαπιστώσουμε ότι παρουσιάζει ορισμένες διαφορές. Διαθέτει απλούστερο τύλιγμα, χαμηλή οδοντωτή ροπή, κοντότερο άξονα και χαμηλό θόρυβο. Είναι σε θέση να παράγει ροπή και ισχύ υψηλής πυκνότητας, για αυτό προτιμώνται σε εφαρμογές που υπάρχουν περιορισμοί μεγέθους της μηχανής. Επιπροσθέτως, ο λόγος της διαμέτρου του πυρήνα προς το αξονικό μήκος είναι μεγαλύτερος από αυτόν στις μηχανές ακτινικής ροής. Η δυνατότητα διεύρυνσης της διαμέτρου του πυρήνα επιτρέπει την εγκατάσταση μεγαλύτερου αριθμού πόλων. Με αυτόν τον τρόπο αυτές οι μηχανές καθίστανται ιδανικές για εφαρμογές υψηλής συχνότητας ή χαμηλής ταχύτητας. Από την άλλη πλευρά εμφανίζει ένα σημαντικό μειονέκτημα που είναι η μεγάλη ελκτική δύναμη που αναπτύσσεται στο δίσκο του στάτη και του δρομέα με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ισορροπία. Ένα ακόμη αρνητικό στοιχείο είναι ότι εμφανίζουν την έννοια της κλιμάκωσης. Αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε αύξηση στο μήκος της μηχανής συνδέεται με αύξηση της διαμέτρου του διάκενου. Συνεπώς για να αυξηθεί η ονομαστική ισχύς απαιτείται νέα σχεδίαση.

Τέλος η σύγχρονη μηχανή μονίμου μαγνήτη εγκάρσιας ροής (transversal flux permanent magnet – TFPM) παράγει μαγνητική ροή η διεύθυνση της οποίας είναι κάθετη στη διεύθυνση της περιστροφής του δρομέα. Το στοιχείο διαφοροποίησης αυτής της κατηγορίας μηχανής από τις δύο προαναφερθείσες εντοπίζεται στο ότι η μηχανή επιτρέπει την αύξηση του χώρου για τα τυλίγματα,

δίχως να παρατηρείται μείωση του διαθέσιμου χώρου για την ανάπτυξη του κυρίως μαγνητικού πεδίου, γεγονός που συνεπάγεται τον περιορισμό των απωλειών χαλκού. Πρόκειται για μια συμπαγή κατασκευή με πολύ υψηλές ροπές, όμως αρκετά περίπλοκη ως προς την κατασκευή της

Με βάση το τρίτο και τελευταίο κριτήριο κατηγοριοποίησης των σύγχρονων γεννητριών μόνιμου μαγνήτη, δηλαδή την τοποθέτηση των μαγνητών στον δρομέα της μηχανής διακρίνονται οι παρακάτω τύποι:

- Μηχανή εσωτερικού μαγνήτη (Interior magnet type - IPMSG)
- Μηχανή επιφανειακού μαγνήτη (Surface mounted magnet type - SPMSG)

Στην μηχανή εσωτερικού μαγνήτη (Interior magnet type - IPMSG), οι μαγνήτες τοποθετούνται μέσα στον δρομέα. Τις περισσότερες φορές το μαγνητικό πεδίο που παράγεται δεν παρουσιάζει ομογένεια, πράγμα που εντοπίζεται στην μικρότερη επαγωγή του d-άξονα σε σύγκριση με αυτή του q-άξονα ($L_d \neq L_q$). Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή και αυτό οφείλεται στην λειτουργία του εσωτερικού δρομέα, ο οποίος παρέχει ευκολία στην απομάκρυνση της θερμότητας με την τοποθέτηση των τυλιγμάτων στο εξωτερικό και τον περιορισμό του κινητού μέρους στο εσωτερικό της μηχανής.

Στην δεύτερη κατηγορία οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στην επιφάνεια του δρομέα. Οι μαγνήτες, χάρη στη μαγνητική τους διαπερατότητα που ισούται σχεδόν με τη μονάδα, αντιμετωπίζονται σαν αέρας για τα μαγνητικά κυκλώματα. Για αυτόν τον λόγο, αν και βρίσκονται στην επιφάνεια του δρομέα, το διάκενο της μηχανής που αναπτύσσονται τα πεδία διατηρείται μεγάλο. Αυτές οι μηχανές συνήθως δεν παρουσιάζουν ανομοιογένεια στο μαγνητικό πεδίο και οι επαγωγές των αξόνων d και q είναι ίσες ($L_d = L_q$).¹⁵¹⁶

¹⁵ <http://sklpe.cqu.edu.cn/KXYJ/ei/ei48.pdf>.

¹⁶ <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/38933.pdf>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μαγνήτες

5.1 Μόνιμοι μαγνήτες

Οι μόνιμοι μαγνήτες λειτουργούν ως εναλλακτική πηγή πεδίου διέγερσης στις ηλεκτρικές μηχανές και αντικαθιστούν το τύλιγμα πεδίου που τροφοδοτείται με DC ρεύμα. Ο μόνιμος μαγνήτης διαθέτει αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια, η οποία έχει την ικανότητα να διατηρηθεί αν δεν επιβληθεί ισχυρό μαγνητικό πεδίο αντίθετα σε αυτόν. Βασικό χαρακτηριστικό του είναι ότι δε παρέχει ισχύ, αντιθέτως αποτελεί προϋπόθεση για την ανάπτυξη ροπής. Χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών προσφέροντας μειωμένες απώλειες και εξαλείφουν την ανάγκη για παροχή ρεύματος στο δρομέα μέσω ψητρών ή δακτυλίων. Αδυναμία των μόνιμων μαγνητών αποτελεί η σταθερή τιμή μαγνήτισής τους που έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία μεταβολής της διέγερσης. Καταλήγοντας, ενέχει η πιθανότητα απομαγνήτισης των μόνιμων μαγνητών εξαιτίας είτε επιβολής εξωτερικού πεδίου, είτε υψηλής θερμοκρασίας, είτε έντονης μηχανικής λειτουργίας.

5.1.1 Τρόπος τοποθέτησης

Οι τρόποι τοποθέτησης των μαγνητών είναι δύο. Πιο συγκεκριμένα μπορούν να τοποθετηθούν είτε στην επιφάνεια, είτε στο εσωτερικό του δρομέα. Συνήθως προτιμάται ο πρώτος τρόπος τοποθέτησης, ο επιφανειακός. Βασική αιτία αποτελεί η εύκολη κατασκευή του που συνεπάγεται βεβαίως και χαμηλό κατασκευαστικό κόστος.

Οι μαγνήτες με εσωτερική τοποθέτηση (inset magnets), που είναι μαγνητισμένοι ακτινικά, προκαλούν προεξοχές και οι επαγωγές σε ευθεία και οι τετραγωνισμένες κατευθύνσεις παρουσιάζουν διαφορές. Παρουσιάζουν μεγάλη διαρροή και συνεπώς έχουν μικρό συντελεστή απόδοσης. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που δεν προτιμούνται συχνά σε αιολικά συστήματα χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων.

Οι επιφανειακοί μαγνήτες (buried magnets), η μαγνήτιση των οποίων πραγματοποιείται σε ακτινική ή σε περιμετρική κατεύθυνση, μπορούν να κατασκευαστούν από πιο αδύναμα μαγνητικά υλικά, όπως για παράδειγμα, οι φερρίτες, και είναι σε θέση να εξασφαλίσουν μαγνητική προστασία σε συνθήκες βραχυκυκλώματος. Επίσης, είναι ιδιαίτερος χρήσιμοι σε συνθήκες υψηλών ταχυτήτων, διότι σε περίπτωση σφάλματος, οι γέφυρες του σιδήρου ανάμεσα στους μαγνήτες φτάνουν σε κορεσμό, που αποτρέπει το πεδίο απομαγνήτισης υψηλής αντιστροφής να φτάσει στους μαγνήτες. Και αυτές με τη σειρά τους παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά διαρροών και κατά συνέπεια χαμηλό συντελεστή απόδοσης.

5.1.2 Υλικά μόνιμων μαγνητών

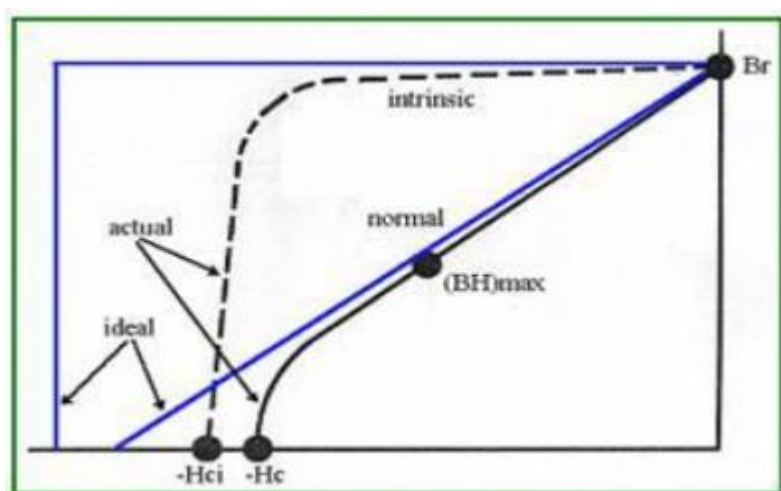
Οι μόνιμοι μαγνήτες χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές μηχανές με σκοπό τη δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου διεγέρσεως. Βασικό κριτήριο αξιολόγησης της λειτουργίας των μόνιμων μαγνητών είναι η ικανότητα παραγωγής ισχυρού μαγνητικού πεδίου με όσο το δυνατόν μικρότερη μάζα και η ικανότητα αντίστασής τους σε παράγοντες που προκαλούν απομαγνήτιση. Τα κράματα AlNiCo, κράματα σπάνιων γαιών και οι κεραμικοί μαγνήτες ή σκληροί φερριτές είναι οι βασικές κατηγορίες μαγνητικών υλικών που έχουν εφαρμοστεί σε ηλεκτρικές μηχανές.

Το λεγόμενο κράμα AlNiCo αποτελεί σύνθεση κραμάτων σιδήρου (Fe) με προσμίξεις αλουμίνιου (Al) σε ποσοστό 7-10%, νικελίου (Ni) σε ποσοστό 13-16% και κοβάλτιου (Co) σε ποσοστό 20-40%, από τα αρχικά των οποίων προκύπτει το AlNiCo. Μολονότι συνίσταται από ένα μέταλλο μη μαγνητικό (Al) και δύο ασθενή μαγνητικά μέταλλα (Ni,Co) παρουσιάζει ισχυρές μαγνητικές ιδιότητες. Ανακαλύφθηκε κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου από τον T. Mishima. Σε σύγκριση με τα μέχρι τότε υπάρχοντα υλικά διέθετε σπουδαίες ιδιότητες. Χαρακτηρίζεται από υψηλή πυκνότητα παραμένουσας μαγνητικής ροής και παρουσιάζει εξαιρετικές αντοχές σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτά τα στοιχεία συνέβαλαν στην ταχύτατη διάδοσή του και αντικατέστησε τους έως τότε χρησιμοποιούμενους χαλύβδινους μαγνήτες. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι εμφανίζουν μικρή αντοχή σε εξωτερικά πεδία απομαγνήτισης. Εν κατακλείδι οι μαγνήτες AlNiCo συχνά αντικαθίστανται από μαγνήτες σπάνιων γαιών και κεραμικούς μαγνήτες.

Οι μαγνήτες σπάνιων γαιών αποτελούνται από κράματα μετάλλων που εμπεριέχουν στοιχεία της ομάδας των λανθανιδών. Ως σπάνιες γαίες ή λανθανίδες ονομάζονται τα μέταλλα των οποίων τα οξείδια έχουν γαιώδη μορφή και ονομάστηκαν έτσι εξαιτίας της σπανιότητάς τους. Τα πιο διαδεδομένα στοιχεία είναι το σαμάριο (Sm) και το νεοδύμιο (Nd). Τα σπανιότερα μέταλλα αυτής της κατηγορίας είναι το θούλιο (Tm) και το λουτέτιο (Lu). Σημαντικά πλεονεκτήματα αυτών των μαγνητών είναι η υψηλή πυκνότητα μαγνητικής ροής, η υψηλή αντοχή σε πεδία απομαγνήτισης και το υψηλό ενεργειακό γινόμενο $(BH)_{max}$. Αποτελούν την συνηθέστερη επιλογή σε εφαρμογές κατά τις οποίες απαιτείται υψηλή πυκνότητα ισχύος ανά όγκο, βελτιωμένη δυναμική απόδοση και υψηλός βαθμός απόδοσης. Ανασταλτικό στοιχείο για τη χρήση τους σε εφαρμογές πολύ μεγάλης ισχύος είναι το μεγάλο κόστος τους.

Στην τελευταία κατηγορία μαγνητών βρίσκονται οι φερρίτες που είναι και οι πιο συνήθεις παραγόμενοι μαγνήτες στον κόσμο. Πρόκειται για κεραμικές ενώσεις που αποτελούνται από οξείδια σιδήρου (Fe_2O_3) σε συνδυασμό με ορισμένα μεταλλικά στοιχεία, όπως το βάριο ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) και το στρόντιο ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$). Στις μαγνητικές τους ιδιότητες εντάσσεται η υψηλή αντοχή σε εξωτερικά πεδία απομαγνήτισης. Πρόσθετα πλεονεκτήματα είναι το χαμηλό κόστος, η υψηλή ηλεκτρική αντίσταση και η υψηλή αντοχή στη διάβρωση. Από την άλλη πλευρά έχουν χαμηλή πυκνότητα παραμένουσας μαγνητικής ροής. Σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος με μέγιστο βαθμό τα 7,5 kW, οι φερρίτες κερδίζουν έδαφος έναντι των μαγνητών AlNiCo.¹⁷

5.1.2 Καμπύλη απομαγνήτισης μόνιμων μαγνητών



¹⁷ http://www.magnites-magnites.com/magnesy_alnico.php
http://www.magnites-magnites.com/magnesy_ferrytowe.php
[https://en.wikipedia.org/wiki/Ferrite\(magnet\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ferrite(magnet))

5.2 Η δομή των σύγχρονων γεννητριών μόνιμου μαγνήτη

Οι σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη ποικίλουν μπορεί να είναι μονοφασικές, διφασικές ή τριφασικές. Παρ' όλα αυτά, το είδος μηχανής που επικρατεί είναι αυτό της τριφασικής μηχανής.

Βασικό δομικά συστατικό αποτελεί:

1. Ο στάτης. Διακρίνεται σε τρία είδη:

- Στάτης με αυλακώσεις. Σε αυτήν την περίπτωση το διάκενο αέρα είναι μικρό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανοδική πορεία τιμών του συντελεστή διαπερατότητας και της συνεπαγόμενης πυκνότητας της μαγνητικής ροής του διάκενου. Παρατηρείται απομάκρυνση της θερμότητας από τα τυλίγματα προς την εξωτερική επιφάνεια του στάτη, λόγω του μεγάλου εύρους επαφής μεταξύ των τυλιγμάτων και του φερρομαγνητικού υλικού του στάτη.
- Στάτης χωρίς αυλακώσεις. Τα τυλίγματα του στάτη έχουν μορφή δακτυλίου και βρίσκονται εγκατεστημένα στο εσωτερικό του στάτη και διαχωρίζονται από τον δρομέα χάρη στο διάκενο αέρος. Σε αυτή τη δομή δεν καταγράφονται ταλαντώσεις στη ροπή. Επιπλέον τα τυλίγματα διαθέτουν περισσότερο χώρο. Βασικό μειονέκτημα είναι πως η παραγόμενη θερμότητα δεν εκτονώνεται προς την εξωτερική επιφάνεια του στάτη. Αυτό συνεπάγεται εντονο περιορισμό στην επιτρεπόμενη πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή διαπερατότητας και της πυκνότητας της μαγνητικής ροής του διάκενου. Εν κατακλείδι, η απόδοση μιας τέτοιας μηχανής είναι μικρότερη σε σύγκριση με μια μηχανή της προηγούμενης κατηγορίας.
- Στάτης με αυλακώσεις χωρίς ανοίγματα. Σε αυτή την περίπτωση τα δόντια του στάτη εφάπτονται στην εσωτερική επιφάνεια και φτάνουν ως το εξωτερικό του τμήμα. Η εγκατάσταση των τυλιγμάτων στις αυλακώσεις είναι σαφώς ευκολότερη, αλλά αυτή η μορφή στάτη παρουσιάζει αδυναμίες από μαγνητικής πλευράς.

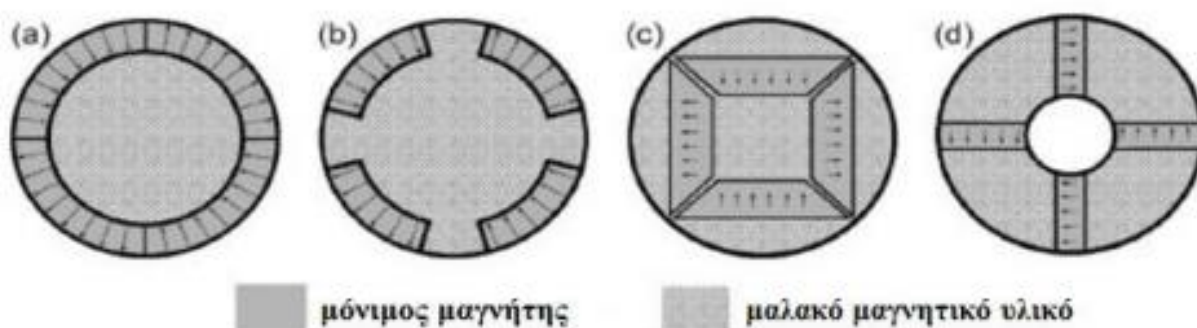
2. Ο δρομέας. Βασικό κατασκευαστικό υλικό είναι το ασάλι. Ο πυρήνας του δρομέα είναι συμπαγής, διότι το μαγνητικό πεδίο είναι συνεχές. Οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στην επιφάνειά του δημιουργώντας ανιθετικά ζεύγη πολικότητας. Οι δρομείς χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με το σχήμα και την τοποθέτηση των μαγνητών.

Έτσι προκύπτουν:

- Δρομείς με συγκολλημένους στην επιφάνειά τους μαγνήτες

- Δρομείς με μαγνήτες τοποθετημένους οριζόντια ακριβώς κάτω από την επιφάνειά τους
- Δρομείς με μαγνήτες κάθετα ενσωματωμένους στο εσωτερικό τους
- Δρομείς με μαγνήτες οριζόντια ενσωματωμένους στο εσωτερικό τους

Όταν οι μαγνήτες βρίσκονται στην επιφάνεια του δρομέα αντιμετωπίζουν ένα σημαντικό πρόβλημα. Το πρόβλημα έγκειται στην ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων. Οι μαγνήτες τοποθετούνται στην επιφάνεια του δρομέα, λαμβάνοντας υπόψη την θερμική διαστολή της συγκολλητικής ουσίας ούτως ώστε να μοιάζει με αυτή του μαγνήτη.



Διαφορετικές μορφές μαγνητών στο δρομέα : a) πάνω στην επιφάνεια b) οριζόντια κάτω από την επιφάνεια c) σφηνωμένους οριζόντια d) σφηνωμένους κάθετα

5.3 Μαγνητισμός

Σύμφωνα με τη Φυσική Επιστήμη, ο όρος μαγνητισμός χρησιμοποιείται προκειμένου να περιγράψει το φαινόμενο κατά το οποίο συγκεκριμένα υλικά, οι μαγνήτες, ασκούν ελκτικές ή απωστικές δυνάμεις σε άλλα αντικείμενα, οι οποίες προκύπτουν από την κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων. Οι ελκτικές ή απωστικές ιδιότητες των μαγνητών σχετίζονται με τη συσσωρευμένη μαγνητική μάζα στους πόλους τους. Πιο αναλυτικά τον 18^ο αιώνα ο Γάλλος φυσικός Charles Coulomb (1736-1806), περιέγραψε την διαδικασία αλληλεπίδρασης των μαγνητών υπό μορφή δυνάμεων που εντοπίζονται στους μαγνητικούς πόλους. Η δύναμη, F , που έχουν ποσότητες μαγνητισμού (pole strength), P_1 και P_2 , και απέχουν απόσταση, r , εκφράζεται με τον νόμο Coulomb από τη σχέση:¹⁸

¹⁸ <http://users.uoa.gr/~jalexopoulos/geomagnetismos.pdf>

5.3.1 Μαγνητικό πεδίο

Το μαγνητικό πεδίο είναι μια από τις στοιχειώδεις αρχές που διέπουν την έννοια του μαγνητισμού. Ως μαγνητικό πεδίο ορίζουμε τον χώρο μέσα στον οποίο ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις. Το πεδίο αυτό περιβάλλει τους μαγνήτες και η παράλληλη ή μη κατεύθυνση των μαγνητικών γραμμών, το μετατρέπει σε ισχυρό ή ασθενές, σε ομοιόμορφο ή ανομοιόμορφο. Η παραγωγή ενός μαγνητικού πεδίου σε έναν συγκεκριμένο χώρο συνδέεται με την μεταβολή της ενέργειας στον χώρο αυτό και συνεπάγεται την ταυτόχρονη παραγωγή μιας δύναμης. Αυτή η δύναμη μπορεί να εντοπιστεί στην επιτάχυνση ενός κινούμενου ηλεκτρικού φορτίου μέσα στο πεδίο, πάνω σε έναν ρευματοφόρο αγωγό, στην ροπή πάνω σε ένα μαγνητικό δίπολο.

μ = μαγνητική διαπερατότητα

P_1, P_2 = ποσότητες μαγνητισμού

r = απόσταση μεταξύ των πόλων

$$\vec{F} = \frac{1}{\mu} \frac{P_1 P_2}{r^2}$$

Υλικά που εμφανίζουν παρόμοιες μαγνητικές ιδιότητες είναι για παράδειγμα το νικέλιο, ο σίδηρος, ο ορυκτός μαγνήτης, ορισμένα είδη ατσαλιού, όπως ο σκληρός χάλυβας. Ο μαγνητισμός αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης έρευνας και τεχνολογίας. Εφαρμογές κίνησης, με τη βοήθεια του μαγνητικού πεδίου, παρατηρούνται σε συστήματα κινητήρων, σε γεννήτριες ισχύος και γενικότερα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παραγωγή του εκάστοτε μαγνητικού πεδίου προέρχεται από την κίνηση του ηλεκτρικού φορτίου. Η κίνηση του ηλεκτρικού φορτίου με τη σειρά της οφείλεται στο ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει από κάποιον αγωγό, όπως ανακαλύφθηκε από τον Oersted. Ο Δανός φυσικός Christian Oestred (1777-1851) πραγματοποίησε πλήθος πειραμάτων με σκοπό να εντοπίσει μια σύνδεση ανάμεσα στον μαγνητισμό και τον ηλεκτρισμό. Το 1920 περίπου σε μια διάλεξη στην Κοπεγχάγη ανακάλυψε το φαινόμενο για το οποίο είχε τόσο πειραματιστεί. Πιο αναλυτικά, τοποθέτησε μια μαγνητική βελόνα παράλληλα σε έναν ευθύγραμμο αγωγό. Όταν διαβίβασε ρεύμα από τον αγωγό παρατήρησε ότι η βελόνα εκτρεπόταν και ισορροπούσε σε διαφορετική θέση. Όταν διέκοπτε το ρεύμα, η βελόνα επανερχόταν στην αρχική της θέση. Όταν πάλι διαβίβαζε ρεύμα αντίθετης φοράς, η βελόνα εκτρεπόταν αντίθετα από την αρχική εκτροπή. Κατά την πειραματική διαδικασία διαπίστωσε ότι όσο αυξανόταν η ένταση του ρεύματος αυξανόταν και η εκτροπή της βελόνας. Αντιλήφθηκε λοιπόν, ότι προκειμένου να υποστεί εκτροπή η μαγνητική βελόνα θα πρέπει να

ασκηθεί πάνω της δύναμη. Δύναμη όμως, μπορεί να δεχτεί ένας μαγνήτης μόνο εντός μαγνητικού πεδίου. Συμπέρανε λοιπόν ότι γύρω από ρευματοφόρο αγωγό δημιουργείται μαγνητικό πεδίο.

Επίσης μαγνητικό πεδίο μπορεί να παραχθεί από μόνιμους μαγνήτες. Σε αυτή την περίπτωση το πεδίο δεν δημιουργείται από συμβατικό ρεύμα. Αντιθέτως προκύπτει από τις τροχιακές κινήσεις και τα spin των ηλεκτρονίων (με τον όρο spin αναφερόμαστε στην περιστροφική κίνηση των ηλεκτρονίων γύρω από τον άξονά τους) εντός του μόνιμου μαγνήτη. Αυτές οι κινήσεις των ηλεκτρονίων οδηγούν στην μαγνήτιση στο εσωτερικό του υλικού του μαγνήτη και στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου έξω από αυτό¹⁹.

5.3.2 Ένταση μαγνητικού πεδίου

Οι μαγνητικοί πόλοι έχουν την ικανότητα παραγωγής μαγνητικών πεδίων. Όταν δύο πόλοι βρεθούν σε απόσταση, r , ο ένας από τον άλλον, τότε, εξαιτίας της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης, παράγεται μια δύναμη, F . Η ένταση, H , (της δύναμης, F) ορίζεται ως:²⁰

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{P_2} = \frac{1}{\mu} \frac{P_1}{r^2}$$

Από τον τύπο προκύπτει ότι η ένταση ισοδυναμεί με τη δύναμη που ασκείται από έναν πόλο ανά ποσότητα μαγνητισμού σε έναν άλλον πόλο, όταν τοποθετηθεί σε απόσταση, r . Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι διανυσματική ποσότητα, με μέτρο και διεύθυνση.

¹⁹ <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-B134/513/3336,13490/>

<http://www.britannica.com/science/magnetic-field>

²⁰ <http://users.uoa.gr/~jalexopoulos/geomagnetismos.pdf>

5.3.3 Μαγνητική επαγωγή

Ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο έντασης, H , προκαλεί την ευθυγράμμιση των ευθυγράμμιση των μαγνητικών διπόλων ενός υλικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου έντασης, H' . Η διαδικασία αυτή περιγράφεται από τον τύπο:

$$H' = 4\pi J$$

$$J = \text{επαγόμενη μαγνήτιση του υλικού}$$

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο εντός και εκτός του υλικού υπολογίζεται από την σχέση:

$$B = H + H' = H + 4\pi J = H + 4\pi kH = H(1+4\pi k)$$

Το B ισοδυναμεί με την ποσότητα που μετράμε και ερμηνεύουμε κατά την εκτέλεση των μαγνητικών διασκοπήσεων. Η σχέση μπορεί να ορισθεί και ως:

$$B = \mu H$$

$$(\mu = 1+4\pi, \text{μαγνητική διαπερατότητα})$$

5.3.4 Ο μαγνητισμός στην φυσική επιστήμη

ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ MAXWELL

Ο James Clerk Maxwell (1834-1879, Σκωτσέζος, θεωρητικός φυσικός) θεωρείται ο ιδρυτής της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας όπως τη γνωρίζουμε σήμερα. Οι λεγόμενες εξισώσεις του Maxwell αποτελούν το σύνολο των διαφορικών εξισώσεων που θέτουν τα θεμέλια της κλασικής ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας. Πρόκειται για μια τετράδα εξισώσεων που περιγράφουν την συμπεριφορά ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, καθώς και τις αλληλεπιδράσεις τους με την ύλη. Ακολουθεί μια περιεκτική ανάλυση των τεσσάρων αυτών εξισώσεων.

1η Εξίσωση: Νόμος του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο.

Περιγραφή της σχέσης ανάμεσα σε ένα στατικό ηλεκτρικό πεδίο και τα ηλεκτρικά φορτία που το προκαλούν. Η κατεύθυνση των στατικών ηλεκτρικών πεδίων είναι από τα θετικά φορτία προς τα αρνητικά. Οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου ξεκινούν από θετικά ηλεκτρικά φορτία και καταλήγουν μόνο σε αρνητικά. Υπολογίζοντας τον συνολικό αριθμό των δυναμικών γραμμών που διέρχονται μέσω μιας κλειστής επιφάνειας, προσδιορίζουμε το συνολικό φορτίο που περικλείεται από την επιφάνεια αυτή δια της διαπερατότητας του ελεύθερου χώρου. Με άλλα λόγια, ο νόμος του

Gauss εκφράζει ότι η ηλεκτρική ροή μέσα από μια κλειστή επιφάνεια είναι ανάλογη με το συνολικό φορτίο Q_{in} που περικλείει η επιφάνεια.

$$\Phi = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon_0}$$

2η Εξίσωση: Νόμος του Gauss για το μαγνητικό πεδίο.

Εκφράζει την θέση ότι δεν υφίστανται μαγνητικά φορτία ή μαγνητικά μονόπολα. Αντί αυτού, υπάρχουν μαγνητικά δίπολα η ύπαρξη των οποίων εξασφαλίζει τη δημιουργία μαγνητικών πεδίων. Τα μαγνητικά δίπολα χαρακτηρίζονται και ως βρόχοι ρεύματος. Αυτή η εξίσωση, από την πλευρά των δυναμικών γραμμών, εκφράζει ότι οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου ούτε αρχίζουν, ούτε τελειώνουν, αλλά σχηματίζουν βρόχους ή επεκτείνονται στο άπειρο και επιστρέφουν πάλι πίσω. Η μαγνητική ροή που διέρχεται μέσα από μια κλειστή επιφάνεια ισούται με το μηδέν, μιας και οι δυναμικές μαγνητικές γραμμές είναι κλειστές (δεδομένου ότι δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα).

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

3η Εξίσωση: Νόμος του Faraday ή Νόμος της επαγωγής.

Περιγράφει πώς ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο. Η κυκλοφορία του ηλεκτρικού πεδίου, ή αλλιώς η ηλεκτρεγερτική του δύναμη, θα πρέπει να ισούται με τον (αρνητικό) ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής. Αυτή η πλευρά της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής αποτελεί την αρχή λειτουργίας σχεδόν κάθε ηλεκτρικής γεννήτριας.

$$\oint_C \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d\left(\int_S \vec{B} d\vec{S}\right)}{dt} = \int_S \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) d\vec{S}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

4η Εξίσωση: Νόμος του Ampere²¹

Ο νόμος του Ampere σε συνδυασμό με την προσθήκη του Maxwell περιγράφει τον τρόπο δημιουργίας των μαγνητικών πεδίων. Ο πρώτος τρόπος αναφέρεται στο ηλεκτρικό ρεύμα και πρόκειται για τον αρχικό νόμο του Ampere. Ο δεύτερος τρόπος σχετίζεται με τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία και πρόκειται για την προσθήκη του Maxwell. Η προσθήκη αυτή είναι μείζονος σημασίας, διότι αποδεικνύει ότι όχι μόνο ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο προκαλεί ένα ηλεκτρικό πεδίο, αλλά ισχύει και το αντίστροφο.

$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I_{in} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\left(\int_S \vec{E} d\vec{S}\right)}{dt}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

²¹<http://physicsgg.me/2011/04/17/%CE%BF%CE%B9-%CE%B5%CE%BE%CE%B9%CF%83%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82-maxwell/>

5.4 Ο νόμος των BIOT-SAVART

Οι δύο Γάλλοι επιστήμονες Jean-Baptiste Biot και Felix Savart, ύστερα από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν την δεκαετία του 1820, προχώρησαν στην διατύπωση του νόμου που ορίζει το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ένας αγωγός όταν αυτός διαρρέεται από ρεύμα.

Όταν ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα έντασης I , ένα μικρό τμήμα του αγωγού, με μήκος Δl , δημιουργεί μαγνητικό πεδίο ΔB μέτρου σε ένα σημείο A , που απέχει απόσταση r από το τμήμα Δl . Έτσι προκύπτει:

$$\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \Delta l}{r^2} \sin\theta$$

Στη εξίσωση αυτή το θ αντιπροσωπεύει τη γωνία που σχηματίζουν τα διανύσματα Δl και r . Η σταθερά μ_0 ($4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$) είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού. Το διάνυσμα ΔB είναι κάθετο στο επίπεδο που ορίζεται από το Δl και το r και η φορά του δίνεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού.

$$B_\theta = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Μια πιο εκτενής περιγραφή του νόμου. Ένα μαγνητικό πεδίο παράγεται από ένα αγωγό μέσα στον οποίον διαρρέεται ρεύμα ή από ένα κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο. Η τιμή του μαγνητικού πεδίου στον περιβάλλοντα χώρο ορίζεται ως το άθροισμα των (διανυσματικών) πεδίων που δημιουργούν όλα τα μικρά τμήματα του αγωγού που μελετάται. Η τιμή του μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογη τόσο της τιμής του ρεύματος στον αγωγό, όσο και του μήκους. Εξαρτάται επίσης από τον προσανατολισμό του συγκεκριμένου σημείου σε σχέση με το τμήμα του ρεύματος^{22, 23}.

²² <http://www.britannica.com/science/Biot-Savart-law>

²³ <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/em/lectures/node39.html>

5.5 Δύναμη LAPLACE

Ένα ηλεκτρικό φορτίο που κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο δέχεται δύναμη από το πεδίο αυτό. Αντιστοίχως ένας ρευματοφόρος αγωγός που βρίσκεται εντός μαγνητικού πεδίου δέχεται δύναμη από το πεδίο αυτό. Το μαγνητικό πεδίο ασκεί στον αγωγό μια δύναμη F ομόρροπη του βάρους του, το μέτρο της οποίας υπολογίζεται από τη διαφορά των ενδείξεων του δυναμόμετρου. Η δύναμη αυτή ονομάζεται **δύναμη Laplace**.

Ο νόμος της δύναμης Laplace διατυπώνεται ως εξής. Όταν ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός μήκους l βρεθεί εντός ομογενούς μαγνητικού πεδίου, τότε αναπτύσσεται στον αγωγό μια ηλεκτρομαγνητική δύναμη. Το μέτρο της δύναμης F είναι ανάλογο με το μήκος l του αγωγού, με την ένταση I του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό, με την ένταση B του μαγνητικού πεδίου και εξαρτάται από τη γωνία φ που σχηματίζει ο αγωγός προς τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών²⁴.

$$F = B \cdot I \cdot \eta \mu \varphi \cdot \ell$$

5.6 ΜΑΓΝΗΤΗΣ

Σύμφωνα με τους νόμους της Επιστήμης της Φυσικής, μαγνήτης ονομάζεται κάθε τεμάχιο υλικού, κατά κύριο λόγο μεταλλικό, που δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στον περιβάλλοντα χώρο. Πρακτικά το μαγνητικό πεδίο εμφανίζεται κατά την αλληλεπίδραση του μαγνήτη με άλλα σώματα.

Η γνώση της ύπαρξης του μαγνήτη χρονολογείται περίπου από τον 7^ο αιώνα π.Χ. με την ανακάλυψη ενός πετρώματος που είχε την ιδιότητα να έλκει σιδερένια αντικείμενα. Κατά τον 12^ο αιώνα λαοί της ανατολικής Ασίας χρησιμοποιούσαν μαγνήτες ως πυξίδες για τον προσανατολισμό τους στα ταξίδια.

Οι μαγνήτες διακρίνονται σε φυσικούς και τεχνητούς. Μιλώντας για φυσικούς μαγνήτες αναφερόμαστε σε τεμάχια του ορυκτού μαγνητίτη. Από την άλλη πλευρά οι τεχνητοί μαγνήτες προέρχονται από την επεξεργασία του χάλυβδα ή την επεξεργασία κραμάτων σιδήρου με άλλα μέταλλα, τα οποία αποκτούν μαγνητικές ιδιότητες ύστερα από εξωτερική επίδραση μαγνητικού

²⁴ <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-B134/513/3336,13496/>

πεδίου. Τα σχήματα των τεχνητών μαγνητών ποικίλουν. Συνήθεις μορφές είναι οι ραβδόμορφοι, κυλινδρικοί ή πεταλοειδείς μαγνήτες. Οι τεχνητοί μαγνήτες διακρίνονται με τη σειρά τους στους μόνιμους μαγνήτες και τους παροδικούς (προσωρινούς) μαγνήτες. Για τους μόνιμους μαγνήτες θα γίνει εκτενής περιγραφή στα επόμενα κεφάλαια.

Στα άκρα των μαγνητών, τα οποία ονομάζονται μαγνητικοί πόλοι, εντοπίζεται εντονότερο μαγνητικό πεδίο. Υπάρχει η ουδέτερη ζώνη που εντοπίζεται στη μέση της απόστασης των δύο άκρων και σε εκείνο το σημείο οι μαγνητικές ιδιότητες ισούνται με το μηδέν.

5.7 Μαγνήτιση υλικού

Με τον όρο μαγνήτιση περιγράφουμε την διαδικασία κατά την οποία ένας μαγνήτης μεταδίδει τις μαγνητικές του ιδιότητες σε άλλα μεταλλικά ή μαγνητικά υλικά. Η μαγνήτιση μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις τρόπους.

Ο πρώτος τρόπος είναι εξ επαφής. Κατά την εξ επαφής μαγνήτιση, ένα μαλακό σίδηρο ή ένα τεμάχιο από χάλυβα έρχονται σε επαφή με τον πόλο ενός μαγνήτη. Κατά την επαφή ο μαλακός σίδηρος ή το τεμάχιο από χάλυβα αποκτούν μαγνητικές ιδιότητες, εμφανίζοντας δύο πόλους εκ των οποίων αυτός που βρίσκεται στην κατεύθυνση του επιδρώντα μαγνήτη είναι ετερόνυμος εκείνου.

Ο δεύτερος τρόπος είναι εξ επαγωγής. Κατά την διαδικασία αυτή η μαγνήτιση των υλικών πραγματοποιείται από κάποια απόσταση από τον μαγνήτη και σε γενικές γραμμές παρουσιάζει τα ίδια αποτελέσματα με την προηγούμενη μορφή μαγνήτισης.

5.8 Μαγνητική διαπερατότητα – μαγνητική επιδεκτικότητα

Η μαγνητική διαπερατότητα (permeability) και η μαγνητική επιδεκτικότητα (susceptibility) είναι δύο βασικά χαρακτηριστικά των μαγνητικών υλικών βάση των οποίων τα διαφοροποιούμε σε αντίστοιχους τύπους.

Ως μαγνητική διαπερατότητα ορίζουμε τον λόγο της έντασης της μαγνητικής επαγωγής προς την ένταση του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου μέσα σε έναν χώρο. Δεν έχει μονάδα μέτρησης, διότι αποτελεί καθαρό αριθμό. Η μαγνητική διαπερατότητα είναι βασικό χαρακτηριστικό

των μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών. Ανάλογα με την τιμή της τα υλικά διακρίνονται σε: αμαγνητικά, διαμαγνητικά και σιδηρομαγνητικά υλικά. Η ικανότητα, λοιπόν του μαγνητικού πεδίου να περάσει το υλικό, ορίζεται ως:

$$\mu=B/H$$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα εκφράζει τον βαθμό ικανότητας του υλικού να μαγνητισθεί. Αναφέρεται δηλαδή στην ευκολία ή μη του υλικού να μαγνητισθεί ή να απομαγνητισθεί. Η σχέση αυτή εκφράζεται από τον τύπο:

$$\chi=M/H$$

Αν το B και το M είναι γραμμικά ή όχι μεταξύ τους, γεγονός που εξαρτάται από τον τύπο του υλικού του μέσου, τότε επηρεάζεται ο βαθμός σταθερότητας της διαπερατότητας και της επιδεκτικότητας. Ορισμένες φορές αντί της διαπερατότητας χρησιμοποιείται ο όρος της σχετικής διαπερατότητας μ_r που δίνεται από τη σχέση:

$$\mu_r= \mu/\mu_0$$

μ_0 = διαπερατότητα κενού = $4\pi \times 10^{-7}$ henry / m.

Η σχετική διαπερατότητα του κενού ισούται με 1 και σχετίζεται άμεσα με την επιδεκτικότητα. Από αυτό προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$\mu_r = \chi + 1$$

Δεδομένης της επεξήγησης των προαναφερθέντων εννοιών, μπορούμε να προχωρήσουμε στην κατηγοριοποίηση των μαγνητικών υλικών²⁵.

²⁵ <http://www.britannica.com/science/magnetic-permeability>

<http://www.britannica.com/science/magnetic-susceptibility>

<http://www.geotek.co.uk/products/magsusc>

5.9 Ταξινόμηση μαγνητικών υλικών

Τα μαγνητικά υλικά διαιρούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- τα διαμαγνητικά υλικά,
- τα παραμαγνητικά υλικά,
- τα σιδηρομαγνητικά υλικά.

Ας προχωρήσουμε σε μια περαιτέρω ανάλυση των κατηγοριών. Τα διαμαγνητικά υλικά (diamagnetic) παρουσιάζουν το φαινόμενο του διαμαγνητισμού. Ο διαμαγνητισμός είναι ένα φαινόμενο της κβαντικής μηχανικής και εμφανίζεται στα περισσότερα μαγνητικά υλικά. Περιγράφεται ως μαγνήτιση εξ επαγωγής με φορά αντίθετη προς εκείνη του μαγνητικού πεδίου. Αυτό σημαίνει πως, εάν ένα διαμαγνητικό υλικό πλησιάσει έναν βόρειο ή νότιο μαγνητικό πόλο, δημιουργεί αντιστοίχως βόρειο ή νότιο μαγνητικό πόλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα όλα τα διαμαγνητικά υλικά να απωθούνται από μαγνητικά πεδία. Ως διαμαγνητικά υλικά ορίζονται τα ορυκτά των οποίων οι κρύσταλλοι περιέχουν χημικά στοιχεία, που τα ηλεκτρόνιά τους πραγματοποιούν περιστροφές (spin) αντίθετες. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται ο χαλαζίας SiO_2 , ο αλβίτης $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, ο χρυσός κ.ά.. Τα διαμαγνητικά υλικά, όπως το νερό ή με βάση το νερό, παρουσιάζουν μια σχετική μαγνητική διαπερατότητα που είναι μικρότερη ή ισούται με το 1 ($\mu_r < 1$). Κατά συνέπεια η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι μικρότερη ή ίση με το 0, μιας και η επιδεκτικότητα ορίζεται ως, $\chi_v = \mu_v - 1$. Τα διαμαγνητικά υλικά διαθέτουν μια υποκατηγορία, τους υπεραγωγούς. Θεωρούνται τέλειοι διαμαγνήτες ($\chi_v = -1$), διότι απωθούν όλα τα μαγνητικά πεδία²⁶.

Τα παραμαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από το φαινόμενο του παραμαγνητισμού. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν μακροσκοπικά αισθητή μαγνήτιση με την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου και ο βαθμός θερμοκρασίας επηρεάζουν τον βαθμό της μαγνήτισης. Πρόκειται για ορυκτά οι κρύσταλλοι των οποίων περιέχουν ιόντα που πραγματοποιούν παράλληλη ταξινόμηση ηλεκτρονικών περιστροφών (spins). Ως προς τη δομή τους παρουσιάζουν τυχαία διεύθετη των μαγνητικών διπόλων. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα είναι λίγο μεγαλύτερη από τη μονάδα ($\mu_r > 1$). Γνωστά παραμαγνητικά υλικά είναι το οξυγόνο, το νάτριο, το κάλιο, το αλουμίνιο, το χλώριο κ.ά..

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούν την κυριότερη κατηγορία των μαγνητικών υλικών. Είναι μέταλλα με μεγάλης σημασίας ηλεκτροτεχνικές και μαγνητικές ιδιότητες. Διακρίνονται σε δύο βασικές ομάδες:

Τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά

Τα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά

²⁶ <http://www.metal.ntua.gr/uploads/4701/1182/chap5.pdf>

Η σχετική μαγνητική τους διαπερατότητα είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα ($\mu_r \gg 1$). Η μαγνήτιση τους δεν εξαρτάται από την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου. Έχουν την ικανότητα να μαγνητίζονται με σχετική ευκολία, αλλά η εξάρτηση της μαγνήτισης από το πεδίο δεν είναι γραμμική ή μονότονη. Οι ιδιότητές τους διατηρούνται μέχρι μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Όταν η τιμή αυτής της θερμοκρασίας ξεπεράσει το προβλεπόμενο όριο, τότε τα σιδηρομαγνητικά υλικά παρουσιάζουν παραμαγνητική συμπεριφορά σύμφωνα με τον νόμο Curie-Weiss:

$$X = C / (T - T_c)$$

Τα υλικά αυτά αποτελούνται από μικροσκοπικές περιοχές που παρουσιάζουν ομοειδή συμπεριφορά με τα μαγνητικά δίπολα και ονομάζονται μαγνητικές περιοχές (περιοχές Weiss). Οι μαγνητικές περιοχές έχουν τυχαίο προσανατολισμό, όταν τα υλικά δεν είναι μαγνητισμένα. Επομένως η συνολική μαγνητική τους ροπή ισούται με μηδέν. Όταν το μαγνητικό πεδίο επιδρά στα υλικά, τότε οι μαγνητικές περιοχές παρουσιάζουν ευθυγράμμιση προς το πεδίο. Αποκτούν ενιαία μαγνητική ροπή και εν συνεχεία το υλικό αποκτά μαγνήτιση M . Οι ήδη μαγνητισμένες περιοχές διατηρούν τον προσανατολισμό τους ακόμα και αν αφαιρεθεί το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά είναι μέταλλα που εμφανίζουν μικρή ένταση μαγνητικού πεδίου H και μεγάλη μαγνητική επαγωγή B , για αυτό διαθέτουν υψηλή μαγνήτιση. Η μαγνητική διαπερατότητα μ είναι μεγάλη και για αυτόν τον λόγο προτιμούνται στην κατασκευή πυρήνων για μετασχηματιστές, ηλεκτρομαγνήτες κ.ά.. Στην κατηγορία των μαλακών σιδηρομαγνητικών υλικών εντάσσονται ο μαλακός χάλυβας κατασκευής φύλλων και ελασμάτων, ο τεχνικά καθαρός σίδηρος, κράματα με μεγάλη ένταση μαγνητικού πεδίου H κ.ά..

Τα σκληρά παραμαγνητικά υλικά που χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό έντασης μαγνητικού πεδίου H και μικρή μαγνητική επαγωγή B . Οι τιμές των δύο αυτών στοιχείων προκύπτει χαμηλή τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας μ των υλικών, όταν αυτά τοποθετηθούν εντός μαγνητικού πεδίου. Τα υλικά αυτά κρίνονται κατάλληλα για την κατασκευή διαφόρων πηγών μαγνητικής ροής, όπως για σταθερούς μαγνήτες, που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτροακουστικές συσκευές (π.χ. μικρόφωνα). Στην κατηγορία αυτή εμπεριέχονται ορισμένες μορφές χάλυβα με διαφορετική περιεκτικότητα άνθρακα C , βολφραμίου W , χρωμίου Cr , μεταλλοκεραμικά υλικά κ.τ.λ.²⁷.

²⁷ http://vivliothmyy.ee.auth.gr/1080/3/Diataksi_tupou_HALBACH.pdf

<http://www.metal.ntua.gr/uploads/4701/1182/chap5.pdf>

<http://minos.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY483/notes/2014/chapter2.pdf>

<http://www.geo.auth.gr/106/theory/magnetism.htm#diamagnetic>

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

Σ.Ν.ΚΑΠΛΑΝΗΣ, Περιβάλλον & Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Εκδόσεις ΙΩΝ Αθήνα, 2003

ΣΤΑΜΑΤΗΣ ΜΥΛΩΝΑΣ, Πηγές Ενέργειας στο Μέλλον, Εκδόσεις Γιάννη Ρίζου & ΣΙΑ Ε.Ε Αθήνα, 1992

ΠΑΠΑΚΩΣΤΑΝΤΙΝΟΥ, ΓΕΩΡΓΑΚΗΣ, Ενέργεια, Βιβλιοσυνεργατική ΣΥΝ.ΕΠΕ Αθήνα, 1993

ΜΠΕΡΓΕΛΕΣ Γ. “Ανεμοκινητήρες”, εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2005

Περιοδικά- Άρθρα - Εκθέσεις:

Έκθεση Greenpeace “Αιολική Ενέργεια ή Κλιματικές Αλλαγές”
<http://www.greenpeace.org/greece/press/118523/32632>

Έκθεση Greenpeace και Global Wind Energy Association “Global Wind Energy Outlook 2006”
<http://www.greenpeace.org/greece/press/118523/658132>
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/13280/05767530.pdf?sequence=1>

Ηλεκτρονικές πηγές και αναφορές:

<http://photography.nationalgeographic.com/photography/photo-of-the-day/panachaiko-turbines-sunset/> , Τετάρτη 9 Δεκεμβρίου 2015

<http://www.diaforetiko.gr/to-iliovasilema-tis-patras-sti-fotografia-tis-imeras-tou-national-geographic/> Τετάρτη 9 Δεκεμβρίου 2015

http://users.sch.gr/imarinakis/aeolian_energy.htm Τρίτη 8 Δεκεμβρίου 2015

<https://el.wikipedia.org/wiki> Τρίτη 8 Δεκεμβρίου 2015

<http://mskukclass.weebly.com/lesson-2-forms-of-energy.html> Τετάρτη 9 Δεκεμβρίου 2015

<http://www.allaboutenergy.gr/> Τρίτη 8 Δεκεμβρίου 2015

<http://www.ypeka.gr/> Τρίτη 8 Δεκεμβρίου 2015

<http://www.naftemporiki.gr/story/660886/geothermia-mia-terastia-pigi-thermansis-kato-apo-ta-podia-mas> Τρίτη 8 Δεκεμβρίου 2015

<http://slideplayer.gr/slide/3080938/> Τρίτη 8 Δεκεμβρίου 2015

<http://www.amkat.gr/geoheatpumpsmain.htm> Τρίτη 8 Δεκεμβρίου 2015

<http://kpe-kastr.ark.sch.gr/site/presentations/RenEnergy/RenEnergyLyk.pdf> Τρίτη 8 Δεκεμβρίου 2015

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2014_pocketbook.pdf Τετάρτη 9 Δεκεμβρίου 2015

<http://ourfiniteworld.com/2015/07/08/what-greece-cyprus-and-puerto-rico-have-in-common/> Τετάρτη 23 Δεκεμβρίου 2015

<http://www.bp.com/> Τετάρτη 23 Δεκεμβρίου 2015

http://www.conserve-energy-future.com/Wind_Into_Energy.php Πέμπτη, 24 Δεκεμβρίου 2015

<http://ele.aut.ac.ir/~wind/en/pictures/juul.htm> Πέμπτη 24 Δεκεμβρίου 2015

<http://www.eoearth.org/view/article/153980/> Πέμπτη 24 Δεκεμβρίου 2015

<http://cleantechnica.com/2014/06/22/americas-first-wind-turbine-generated-electricity-1888/>
Πέμπτη 24 Δεκεμβρίου 2015

<http://www.greenenergyohio.org/page.cfm?pageId=341> Πέμπτη, 24 Δεκεμβρίου 2015

<http://medilab.pme.duth.gr/invonio/history.html> Πέμπτη, 24 Δεκεμβρίου 2015

<http://medilab.pme.duth.gr/invonio/turbine-types.html>

<http://www.windpowerengineering.com> Πέμπτη, 24 Δεκεμβρίου 2015

<http://www.turbinesinfo.com/horizontal-axis-wind-turbines-hawt/> Πέμπτη, 24 Δεκεμβρίου 2015

https://prezi.com/phvtweway_ds/presentation/ Παρασκευή, 25 Δεκεμβρίου 2015

<http://eclass.sch.gr/modules/document/file.php> Δευτέρα, 4 Ιανουαρίου 2016

http://www.industrial-electronics.com/elec4_17.html Δευτέρα, 4 Ιανουαρίου 2016

<http://ebooks.edu.gr/> Δευτέρα, 4 Ιανουαρίου 2016

<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/38933.pdf> Δευτέρα, 4 Ιανουαρίου 2016

<http://xn--drmstre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wtrb/async.htm>
Δευτέρα, 4 Ιανουαρίου 2016

<http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Synchronous+Generator> Δευτέρα, 4 Ιανουαρίου 2016

https://stamford-avk.com/sites/default/files/literature/technicalpapers/WP_WIND_S_EN_GS_01.pdf Δευτέρα, 4 Ιανουαρίου 2016

<http://digitalschool.minedu.gov.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C123/487/3182,12850/> Τρίτη, 5 Ιανουαρίου 2016

<http://sklpe.cqu.edu.cn/KXYJ/ei/ei48.pdf> Τρίτη, 5 Ιανουαρίου 2016

<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/38933.pdf> Τρίτη, 5 Ιανουαρίου 2016

<http://www.holi300.com/generator/> Τρίτη, 5 Ιανουαρίου 2016

<http://farside.ph.utexas.edu/teaching/em/lectures/node39.html> Τρίτη, 5 Ιανουαρίου 2016

<http://www.britannica.com/science/Biot-Savart-law> Τρίτη, 5 Ιανουαρίου 2016

<http://www.britannica.com/science/magnetic-permeability> Τρίτη, 5 Ιανουαρίου 2016

<http://www.britannica.com/science/magnetic-susceptibility> Τρίτη, 5 Ιανουαρίου 2016

<http://www.geotek.co.uk/products/magsusc> Τρίτη, 5 Ιανουαρίου 2016

<http://www.metal.ntua.gr/uploads/4701/1182/chap5.pdf> Τετάρτη, 6 Ιανουαρίου 2016

<http://minos.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY483/notes/2014/chapter2.pdf> Τετάρτη, 6 Ιανουαρίου 2016

<http://www.geo.auth.gr/106/theory/magnetism.htm#diamagnetic> Τετάρτη, 6 Ιανουαρίου 2016