

Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Τμήμα Μηχανικών Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων

**Μελέτη γεννητριών
μονίμων μαγνητών
για εφαρμογή σε
μικρής ισχύος Α.Π.Ε.**

*Κονταδάκης Αντώνιος
Επιβλέπων Καθηγητής:
Θεοδουλίδης Θεόδωρος*



Κοζάνη 2007

“Ένας επιστήμονας δεν είναι ποτέ σίγουρος. Όλοι το ξέρουμε αυτό. Όλοι ξέρουμε ότι όλες οι δηλώσεις μας είναι δηλώσεις κατά προσέγγιση με διαφορετικούς βαθμούς βεβαιότητας. Ότι όταν μια δήλωση γίνεται, η ερώτηση δεν είναι εάν είναι σωστή ή λάθος, αλλά πόσο πιθανόν είναι να είναι σωστή ή λάθος.”

Richard Feynman, 1964,
The Pleasure of Finding Things Out.

Κοιτώντας την εργασία, βρίσκω δύσκολο να συλλάβω την επιρροή που είχε η εμπειρία που απέκτησα μέσα σε λίγες λέξεις. Η διάρκεια των σπουδών μου στην Κοζάνη περιείχε δύσκολες στιγμές καθώς επίσης και στιγμές μεγάλου προσωπικού θριάμβου. Νιώθω, από τη μία λυπημένος που η παραμονή μου εδώ έχει τελειώσει και από την άλλη ανακουφισμένος που τελικά τελείωσε. Η εργασία που παρουσιάζεται στις ακόλουθες σελίδες είναι μόνο ένας πολύ μικροσκοπικός κόκκος άμμου που πέφτει πάνω στην επιφάνεια μιας απέραντης ερήμου που καλείται επιστήμη.

Μελετώντας τον τομέα του ηλεκτρομαγνητισμού και των ηλεκτρικών μηχανών δεν μπορούσα να πιστέψω πόσο περίπλοκη είναι η επιστήμη σήμερα. Μόνο δέος και αδυναμία ένιωσα. Με τις αβεβαιότητες, τα λάθη, τις ατέλειες και τις λανθασμένες επιλογές που εμφανίστηκαν κατά μήκος αυτού του ταξιδιού, γράφοντας μια εργασία που με έβαλε σε σκέψεις στο κατά πόσο είμαι ικανός και υπεύθυνος, να μιλήσω για τέτοια ζητήματα. “Ίσως να είναι το πιο αλαζονικό πράγμα που έχω κάνει”, αλλά έπειτα διάβασα το βιβλίο του *Richard Feynman* και συνειδητοποίησα ότι ακόμη και ο καλύτερος επιστήμονας είναι αβέβαιος. Αυτό με ανακούφισε και μου έδωσε τη δύναμη που έπρεπε για να γράψω αυτές τις σελίδες.

Εκτός από τα σοφά λόγια του *Feynman*, πολλοί άνθρωποι με έχουν βοηθήσει καθ' όλη τη διάρκεια αυτών των ετών. Είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων που είχα καθηγητή τον Κύριο Θεοδουλίδη Θεόδωρο, υπεύθυνο της πτυχιακής μου. Σας ευχαριστώ θερμά Κύριε καθηγητά. Οι πολύτιμες φιλικές συζητήσεις και η προσέγγιση προοπτικής, που φέρνει προς την έρευνα, είχαν μια βαθιά και ευεργετική επιρροή στον τρόπο σκέψης μου. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή μου Κύριο Κωνσταντινίδη Ευστάθιο, για τις πολύ χρήσιμες συμβουλές που μου έδωσε. Πολλές ευχαριστίες επίσης στους καθηγητές μου Τουρλιδάκη Αντώνιο και Μαρνέλλο Γεώργιο.

Ευχαριστώ τους φίλους μου για την υπομονή τους, ακόμα και αυτούς που δεν με άντεξαν. Ευχαριστώ την οικογένειά μου. Την αδελφή μου Αμαλία και τον άνδρα της, που πάντα με ενθάρρυναν και ήταν δίπλα μου. Τους γονείς μου που με εισήγαγαν στην επιστήμη, μου δίδαξαν την αξία της σκληρής εργασίας και μου έδωσαν ατελείωτη υποστήριξη όλα αυτά τα

χρόνια. Τέλος, επιθυμώ να ευχαριστήσω την ανιψιά μου, Μαρίζα (την οποία λατρεύω) για την αγάπη που μου χάρισε απλόχερα.

Κοζάνη, Νοέμβριος 2007

Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος συμβόλων	9
Περίληψη της εργασίας	13
Κεφάλαιο 1	14
Εισαγωγή Στις Ανεμογεννήτριες	14
1.1 Εισαγωγή	15
1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής άμεσης κίνησης	17
1.3 Ο καθορισμός του προβλήματος	19
1.3.1 Η βελτιστοποίηση των ηλεκτρικών γεννητριών ανάλογα με τις απαιτήσεις	19
Κεφάλαιο 2	22
Επισκόπηση Μηχανών Μονίμων Μαγνητών	22
2.1 Εισαγωγή	23
2.2 Σύγκριση των μηχανών που χρησιμοποιούν Μ.Μ. με τις περιελιγμένου δρομέα μηχανές και με τις διακοπτόμενης μαγνητικής αντίστασης μηχανές	23
2.2.1 Η σύγχρονη μηχανή Μ.Μ. σε σχέση με την επαγωγική μηχανή	24
2.2.2 Η σύγχρονη μηχανή Μ.Μ. σε σύγκριση με τη διακοπτόμενης μαγνητικής αντίστασης μηχανή	24
2.3 Η σύγχρονη μηχανή: Η μαγνητική διέγερση σε σχέση με την ηλεκτρική διέγερση	25
2.4 Περιγραφή τοπολογιών των μηχανών που χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες	29
2.4.1 Προσανατολισμός διακένου: Ακτινωτός ή Αξονικός	30
2.4.2 Προσανατολισμός των πυρήνων των στατών: Διαμήκης ή Εγκάρσιος	30
2.4.3 Προσανατολισμός των μονίμων μαγνητών, όσον αφορά το διάκενο: Επιφανειακής τοποθέτησης ή Συγκεντρωτικής ροής	31
2.4.4 Στέγαση χαλκού: Με εγκοπές ή χωρίς εγκοπές	32
2.5 Οι κύριοι συνδυασμοί των μηχανών με μόνιμους μαγνήτες	33
2.6 Οι μηχανές μονίμων μαγνητών που εξετάζονται	36
2.6.1 Η συμβατική σύγχρονη μηχανή με μόνιμους μαγνήτες	36
2.6.2 Η συμβατική σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών με συγκέντρωση ροής	37

2.6.3 Η μηχανή μονίμων μαγνητών, αξονικής ροής, με εγκοπές	38
2.6.4 Η TORUS (Σπειροειδής) μηχανή μονίμων μαγνητών	39
2.6.5 Η μηχανή εγκάρσιας ροής, μονίμων μαγνητών επιφανειακής τοποθέτησης	40
2.6.6 Η μηχανή εγκάρσιας ροής, με μόνιμους μαγνήτες συγκέντρωσης ροής	41
2.7 Ανακεφαλαίωση	42
Κεφάλαιο 3	43
Κατηγορίες Μονίμων Μαγνητών	43
3.1 Τα υλικά των μονίμων μαγνητών	44
3.2 Είδη μαγνητών	45
3.2.1 Οι κατηγορίες μαγνητών: Nd-Fe-B (VACODYM)	46
3.2.2 Οι κατηγορίες μαγνητών: Ανισότροποι Στερεοί Φερρίτες (anisotropic solid ferrites)	46
3.2.3 Οι κατηγορίες μαγνητών: Sm-Co (VACOMAX)	47
3.2.4 Οι κατηγορίες μαγνητών: Al-Ni-Co (Αλουμινίου-νικελίου-κοβαλτίου)	47
3.3 Συμπεράσματα και επιλογή του τύπου μαγνήτη	47
Κεφάλαιο 4	49
Σύγκριση Τοπολογιών	49
4.1 Εισαγωγή	50
4.2 Κριτήρια για τη σύγκριση μεταξύ των μηχανών μονίμων μαγνητών	50
4.3 Τάσεις στην απόδοση των μηχανών μονίμων μαγνητών: Μια βιβλιογραφική έρευνα	52
4.3.1 Οι αναμενόμενες μάζες και η πυκνότητα δύναμης	52
4.3.2 Το ρεύμα λειτουργίας για τους εγκάρσιους και διαμήκεις στάτες με εγκοπές	53
4.3.3 Η μάζα του υλικού των μαγνητών σε μια μηχανή χωρίς εγκοπές	54
4.3.4 Οι φερριτικοί μαγνήτες που χρησιμοποιούνται μηχανές μονίμων μαγνητών με συγκέντρωσης ροής	54
4.4 Μια βιβλιογραφική έρευνα για τα κατασκευασμένα και βελτιστοποιημένα σχέδια των μηχανών M.M.	55
4.5 Συμπεράσματα που προκύπτουν από τις έξι τοπολογίες μηχανών	57
Κεφάλαιο 5	59
Μελέτη Μηχανής Μονίμων Μαγνητών	59
5.1 Εισαγωγή	60
5.2 Η επιλογή της τοπολογίας προς ανάλυση	60

5.3 Η μέθοδος προσδιορισμού της αναλογίας D_r/D_0	62
5.3.1 Η ονομαστική ροπή T	62
5.3.2 Η αναλογία D_r/D_0	63
5.4 Ο προσδιορισμός των παραμέτρων γεωμετρίας	65
5.5 Οι τελικοί υπολογισμοί της ονομαστικής ροπής	67
5.6 Η βελτιστοποίηση της ροπής	68
Κεφάλαιο 6	69
Εφαρμογή Μεθόδου	69
6.1 Εισαγωγή	70
6.2 Επιλεγμένες κατηγορίες M.M.	70
6.3 Οι παράμετροι που εισάγονται κατά την σχεδίαση	70
6.4 Τρόπος υπολογισμού της μεθόδου προσδιορισμού της αναλογίας D_r/D_0	72
6.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	72
6.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της τοπολογίας	74
Κεφάλαιο 7	76
Ελαχιστοποίηση Των Μονίμων Μαγνητών	76
7.1 Εισαγωγή	77
7.2 Η τοπική συμβολή ενός μόνιμου μαγνήτη στην πεπλεγμένη ροή	77
7.2.1 Ο καθορισμός του προβλήματος, η γενική περίπτωση και οι υποθέσεις	78
7.3 Υποθέσεις που γίνονται κατά την μαθηματική έκφραση	79
7.3.1 Υπόθεση σταθερής μαγνήτισης για τους μόνιμους μαγνήτες	79
7.3.2 Υπόθεση τέλειου φερρομαγνητικού υλικού για το χάλυβα του δρομέα	79
7.3.3 Υπόθεση σταθερού μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A σε όλη τη διατομή των αγωγών	80
7.4 Η μαθηματική έκφραση	80
7.5 Εφαρμογή της μεθόδου ελαχιστοποίησης σε μία σύγχρονη συμβατική μηχανή M.M.	84
7.5.1 Υποθέσεις και Παραδοχές που γίνονται	84
7.5.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων	86
7.5.3 Διεξαγωγή συμπερασμάτων	87
7.6 Συμπεράσματα	87

Κεφάλαιο 8	89
Συμπεράσματα	89
Κεφάλαιο 9	91
Παραρτήματα	91
Παράρτημα Α*	92
Α. Διαστάσεις των πηνίων του δρομέα και των M.M. στις συμβατικές σύγχρονες μηχανές	92
Παράρτημα Β*	94
Β. Περισσότερες πληροφορίες για τους Nd-Fe-B (Neodymium) μαγνήτες	94
B.1 Γενικά	94
B.2 Ιδιότητες του neodymium	94
Παράρτημα Γ*	96
Γ. Σχέδια μηχανών M.M. που αναφέρονται στη βιβλιογραφία	96
Γ.1 Χαρακτηριστικά σχέδια συμβατικής M.M. σύγχρονης μηχανής αναφερόμενα σε δημοσιεύσεις	96
Γ.2 Χαρακτηριστικά σχέδια συμβατικής σύγχρονης μηχανής M.M. με συγκέντρωση ροής που αναφέρονται σε δημοσιεύσεις	98
Γ.3 Χαρακτηριστικά σχέδια TORUS μηχανής αναφερόμενα σε δημοσιεύσεις	99
Γ.4 Χαρακτηριστικά σχέδια των μηχανών M.M., εγκάρσιας ροής αναφερόμενα μέσα σε δημοσιεύσεις	100
Παράρτημα Δ*	101
Δ.1 Η αντίδραση οπλισμού και η απομαγνήτιση	101
Δ.2 Η οδοντωτή/απαιτούμενη ροπή	101
Δ.2.1 Οι προσεγγιστικοί υπολογισμοί της απαιτούμενης ροπής	102
Παράρτημα Ε*	103
Ε. Οι εκφράσεις της επαγόμενης τάσης Ε και της μαγνητικής ροής Φ	103
Παράρτημα Ζ*	105
Ζ. Ο κώδικας MatLab	105
Κεφάλαιο 10	108
Βιβλιογραφία	108

10.1 Πηγές:	109
10.2 Αναφορές:	109

Κατάλογος συμβόλων

☉ Λατινικά σύμβολα

A	Ρεύμα λειτουργίας
\dot{A}	Μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό
A_s	Επιφάνεια εγκοπής
A_g	Επιφάνεια διακένου
A_M	Επιφάνεια Μ.Μ.
A_r	Επιφάνεια δρομέα
ab	Εξωτερικό πλάτος της εγκοπής
B_a	Μαγνητική επαγωγή στο πηνίο
B_g	Μαγνητική επαγωγή στο διάκενο
$B_M=B_{PM}$	Μαγνητική επαγωγή του Μ.Μ.
B_r	Παραμένουσα μαγνητική επαγωγή του Μ.Μ
$B_{Fesat}=B_{max}$	Μέγιστη μαγνητική επαγωγή στο στάτη
$(BH)_{max}$	Ειδική μαγνητική ενέργεια του Μ.Μ.
C_{act}	Συνολικό κόστος του “ενεργού υλικού”
cd	Εσωτερικό πλάτος της εγκοπής
c_{Cu}	Συγκεκριμένο κόστος του χαλκού
c_{Fe}	Συγκεκριμένο κόστος του σιδήρου
c_{PM}	Συγκεκριμένο κόστος του Μ.Μ.
c_{PM1}	Συγκεκριμένο κόστος του Nd-Fe-B τύπου μαγνήτη
c_{PM2}	Συγκεκριμένο κόστος του φερριτικού τύπου μαγνήτη
d_{out}	Εξωτερική διάμετρος της μηχανής
D_r	Διάμετρος του δρομέα
D_0	Διάμετρος του στάτη
D_1	Απόσταση από το κέντρο της μηχανής ως την αρχή της εγκοπής
D_2	Απόσταση από το κέντρο της μηχανής ως το τέλος της εγκοπής
d_v	Στοιχειώδης όγκος του Μ.Μ.
d_{bi}	Βάθος πλάτης του στάτη

E	Εν κενώ επαγόμενη τάση της γεννήτριας
$e(t)$	Εν κενώ τάση
\bar{F}_t	Συνολική μέση εφαπτομένη δύναμη
F_t	Συνολική εφαπτόμενη δύναμη
$g=L_g$	Μήκος διακένου
H_a	Απομαγνητίζουσα δύναμη του πηνίου
H_g	Απομαγνητίζουσα δύναμη στο διάκενο
$H_c=H_{PM}$	Απομαγνητίζουσα δύναμη του Μ.Μ.
h_{Cur}	Ύψος του ηλεκτρικά διεγερμένου δρομέα
$h_M=h_{PM}$	Ύψος του Μ.Μ.
$I=I_s$	Ρεύμα στο στάτη
I_{rms}	Ονομαστικό ρεύμα
I_{max}	Μέγιστο ρεύμα στο στάτη
$i(t)$	Ρεύμα φάσης εν κενώ
J_c	Πυκνότητα ρεύματος
J_r	Πυκνότητα ρεύματος του περιελιγμένου δρομέα
\mathbf{j}	Διάνυσμα πυκνότητας ρεύματος
K	Σταθερά σύνδεσης της ροπής και του ρεύματος της μηχανής
K_p	Συντελεστής πλήρωσης
k_{topo}	Σταθερά τοπολογίας της μηχανής
k_{exc}	Σταθερά κυματομορφής
k_{sfill}	Παράγοντας πλήρωσης του χαλκού
L_M	Πάχος του Μ.Μ.
$l_s=L_0$	Μήκος της μηχανής/στάτη
L_a	
m	Αριθμός των φάσεων της μηχανής
m_{act}	Μάζα του “ενεργού υλικού”
m_{Cu}	Μάζα του χαλκού
m_{Fe}	Μάζα του σιδήρου
m_{PM}	Μάζα του Μ.Μ.
m_{yoke}	Μάζα του ζυγού του στάτη
m_r	Μάζα του δρομέα

m_{tooth}	Μάζα του δοντιού του στάτη
m_{top}	Μεγιστη μάζα α/γ
m_s	Μάζα του στάτη
N	Συνολικός αριθμός των στροφών των τυλιγμάτων μιας φάσης σε μια εγκοπή
N_{Cu}	Αριθμός των αγωγών μέσα σε μια εγκοπή
$n_r I_r$	Μαγνητεγερτική δύναμη του ηλεκτρικά διεγερμένου δρομέα
P	Ονομαστική ισχύς
P_C	Απώλειες χαλκού
S_d	Βάθος εγκοπής
$S_{con}=S_c$	Διατομή του αγωγού
S_{coil}	Διατομή του πηνίου
T	Ροπή της μηχανής
V	Όγκος
V_{Cu}	Όγκος του χαλκού
$V_{PM}=V_M$	Όγκος του Μ.Μ.
V_g	Όγκος του διακένου
V_{iron}	Όγκος του σιδήρου της μηχανής
V_{air}	Όγκος του αέρα της μηχανής
$V_{Universe}$	Όγκος της επιφάνειας έξω από τα όρια της μηχανής.
W_{Cur}	Πλάτος του πηνίου
W_t	Πλάτος της εγκοπής
W_s	Πλάτος του στάτη
W_g	Μαγνητική ενέργεια ανά πόλο

∅ Ελληνικά σύμβολα

α	Σταθερά
β	Σταθερά
γ	Συντελεστής
λ	Πεπλεγμένη ροή
λ_α	Πεπλεγμένη ροή στο πηνίο
λ_{PM}	Πεπλεγμένη ροή στο Μ.Μ.

μ_0	Μαγνητική διαπερατότητα του αέρα
$\mu_{rec}=\mu_r$	Μαγνητική διαπερατότητα του υλικού
ζ	Αναλογία διαμέτρου δρομέα σε σχέση με τη διάμετρο του στάτη
ρ	ειδική αντίσταση του χαλκού
τ_p	Πολικό βήμα
Φ_m	Μαγνητική ροή του Μ.Μ.
$\Phi_{pm}(t)$	Εν κενώ μαγνητική ροή που περνά σε κάθε πόλο
ω_m	Γωνιακή περιστροφική ταχύτητα της μηχανής

Περίληψη της εργασίας

Η εργασία εξετάζει μια ευρεία σειρά από τοπολογίες των μηχανών μονίμων μαγνητών για εφαρμογή τους σε α/γ. Στο κεφάλαιο 2 παρέχεται μια ευρεία επισκόπηση των διαφόρων τοπολογιών των μηχανών μονίμων μαγνητών. Μια ταξινόμηση προτείνεται βασισμένη σε τέσσερα χαρακτηριστικά. Το κεφάλαιο 3 περιγράφει τα μαγνητικά υλικά και τις βασικές κατηγορίες μαγνητών, μιας και παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατασκευή της γεννήτριας όσον αφορά το τελικό αποτέλεσμα.

Στο κεφάλαιο 4 οι περισσότερες από τις τοπολογίες των μηχανών M.M. που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2 μελετώνται βάσει δύο κριτήριων επιλογής, της αναλογίας κόστους/ροπής και της ροπής/μάζας. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η “μέθοδος προσδιορισμού της αναλογίας (D_r/D_0)”, η οποία καθορίζει τη βέλτιστη αναλογία της διαμέτρου του δρομέα σε σχέση με τη διάμετρο του στάτη για μία συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M.. Στο κεφάλαιο 6 ένας αλγόριθμος υπολογισμού της “μεθόδου προσδιορισμού της αναλογίας (D_r/D_0)” παρουσιάζεται και επιλύεται για την τοπολογία του κεφαλαίου 5 για δύο κατηγορίες M.M., με χρήση του λογισμικού *MatLab*. Στο κεφάλαιο 7 παρατίθεται μια μελέτη για την ελαχιστοποίηση του μαγνητικού υλικού που χρησιμοποιείται στις μηχανές M.M. (Μονίμων Μαγνητών). Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο 8 εξάγονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

Κεφάλαιο 1



Εισαγωγή Στις Ανεμογεννήτριες

1.1 Εισαγωγή

Η ενέργεια που προέρχεται από τον άνεμο αποτελεί ένα αυξανόμενο ποσοστό της ενέργειας που παρέχεται στο δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα μέσο ετήσιο ποσοστό αύξησης της ταξέως του 31% στην εγκατεστημένη ικανότητα αιολικής ενεργειας, διεθνώς, έχει παρατηρηθεί από το 1997 μέχρι το 2001 [*BTM 2001*] και συνεχώς αυξάνεται μέχρι σήμερα. Μέχρι ένα σημείο, αυτό το μεγάλο ποσοστό αύξησης ενισχύεται από τις πολιτικές για το περιβάλλον και τα φορολογικά κίνητρα των διαφόρων εθνικών κυβερνήσεων. Επίσης, ένας άλλος καθοριστικός παράγοντας είναι το μειωμένο κόστος παραγωγής της αιολικής ενέργειας [*EWE 1999*].

Η αιολική ενέργεια είναι τώρα σχεδόν ανταγωνιστική με άλλες παραδοσιακές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας όπως ο άνθρακας, το φυσικό αέριο και η πυρηνική παραγωγή [*Mil 2001*]. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας είναι βεβαίως ένας από τους βασικούς παράγοντες που βοήθησε, ώστε η αιολική ενέργεια να γίνει πιο αποδοτική και αξιόπιστη. Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να κατασκευαστούν με δυο τρόπους μηχανικής εισοδού (mechanical input):

- ◊ Σταθερής ταχύτητας (constant-speed),
- ◊ Μεταβλητής ταχύτητας (variable-speed).

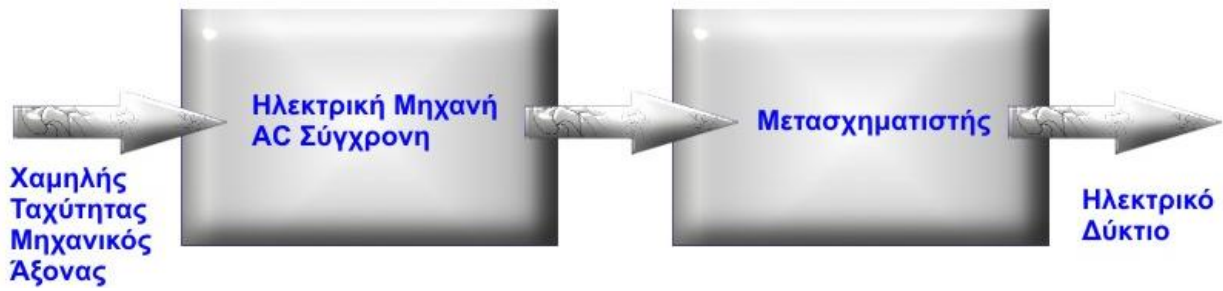
Η ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας έχει διάφορα πλεονεκτήματα, όπως:

- ◊ Υψηλότερη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού [*Zin 1997*].
- ◊ Χαμηλότερο θόρυβο για χαμηλές ταχύτητες ανέμου
- ◊ Καλύτερη μεταφορά ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο (grid) [*Car 1996*].

Για αυτούς τους λόγους, η ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας παίρνει ένα αυξανόμενο μερίδιο της αγοράς σήμερα. Η μεταβλητής ταχύτητας διαμόρφωση, μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Δύο είναι όμως, οι βασικότεροι τρόποι που χρησιμοποιούνται σήμερα:

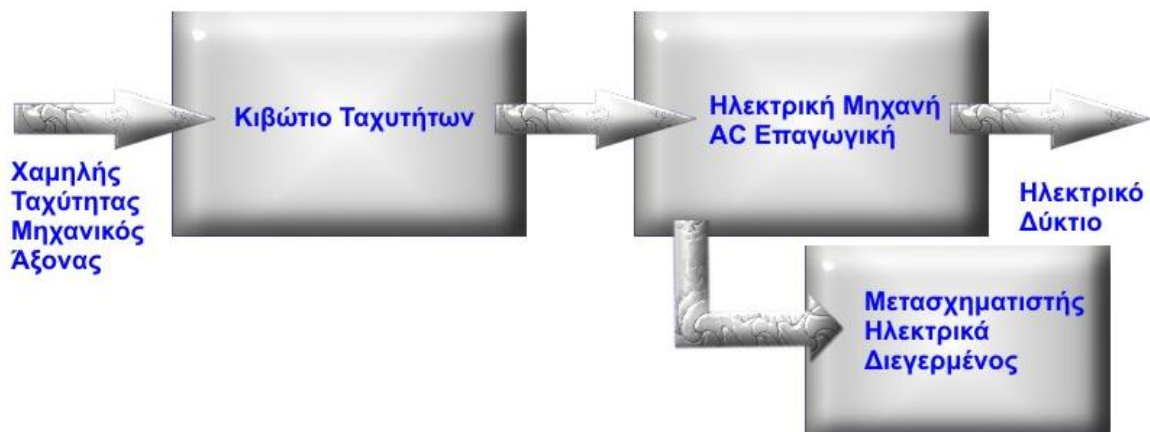
- ◊ Με χρήση σύγχρονης γεννήτριας άμεσης κίνησης (direct-drive).
- ◊ Με χρήση επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας με κιβωτίο ταχυτήτων (doubly-fed induction generator with gearbox).

Η εικόνα (1-1) επεξηγεί την άμεση κίνηση. Σε αυτή την περίπτωση, η μηχανή έχει μια σύγχρονη γεννήτρια που συνδέεται άμεσα με μηχανικό άξονα. Η ηλεκτρική παραγωγή της γεννήτριας συνδέεται με ένα μετασχηματιστή ισχύος, για τη μεταφορά της παραγόμενης ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο. [*Weh 1988a*], [*Gra 1996a*], [*Che 1996*], [*Pol 2001*].



ΕΙΚΟΝΑ 1-1: Χρήση AC Σύγχρονης μηχανής, άμεσης κίνησης, με μετασχηματιστή και σύνδεση της με το ηλεκτρικό δίκτυο

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα κατασκευαστών που αναπτύσσουν αυτήν την διαμόρφωση ανεμογεννητριών υψηλής ισχύος, όπως η *Enercon* στη Γερμανία, η *Lagerwey* στην Ολλανδία και η *Jeumont* [Let 1997] στη Γαλλία. Η δεύτερη δημοφιλής διαμόρφωση για την ηλεκτρομηχανική μετατροπή στις ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας είναι η επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας με κιβώτιο ταχυτήτων που μελετήθηκε στις δημοσιεύσεις [Smi 1981] και [Pen 1996], (βλ. εικόνα (1-2)).



ΕΙΚΟΝΑ 1-2: Βασικά χαρακτηριστικά μιας διπλής τροφοδοσίας ηλεκτρομηχανικής μετατροπής με τη χρησιμοποίηση επαγωγικής μηχανής με δακτυλίδια επαφής ψηκρών

Η διαμόρφωση της εικόνας (1-2) χρησιμοποιεί μια επαγωγική γεννήτρια με ένα περιελιγμένο δρομέα (*wound rotor*) ο οποίος έχει δακτυλίδια επαφής ψήκτρας (*slip rings*). Η επαγωγική γεννήτρια περιστρέφεται με μια συμβατική ταχύτητα (π.χ. 1500 rpm) και ένα κιβώτιο ταχυτήτων απαιτείται για να προσαρμόσει τον αργόστροφο περιστρεφόμενο άξονα (π.χ. 25 rpm) στη γεννήτρια. Από τη δημοσίευση [Smi 1981], αποδεικνύεται ότι ο μετατροπέας ισχύος του κιβωτίου των ταχυτήτων της επαγωγικής γεννήτριας εκμεταλλεύεται μόνο το 30% της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας και επιτρέπει ένα ικανοποιητικό εύρος ταχυτήτων.

Παραδείγματα επιχειρήσεων που αναπτύσσονται γύρω από την διπλής τροφοδοσίας αρχή είναι η *Vestas* και η *Neg-Micon* στη Δανία, η *General Electric* στις Ηνωμένες Πολιτείες και η *Nordex* στη Γερμανία.

1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής άμεσης κίνησης

Κάνοντας μια αναφορά στην εικόνα (1-2), η διαμόρφωση άμεσης κίνησης δεν απαιτεί το μηχανικό μετατροπέα (δηλ. το κιβώτιο ταχυτήτων) και χρησιμοποιεί μια ηλεκτρική διάταξη μηχανής με χαμηλή περιστροφική ταχύτητα. Η επιλογή μεταξύ συστήματος άμεσης κίνησης ή διπλής τροφοδοσίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και δεν είναι η πρόθεση αυτής της εργασίας να προσδιορίσει ποια είναι καλύτερη. Ωστόσο, μπορούμε να δώσουμε μερικά μειονεκτήματα της διαμόρφωσης της διπλής τροφοδοσίας, όπως αναφέρονται στις δημοσιεύσεις [*Dub 2001b*], [*Slo 2003*] και [*Dit 2003*]:

- ◇ Η απώλεια θερμότητας που προκαλείται από την τριβή μεταξύ των γραναζιών στο κιβώτιο ταχυτήτων.
- ◇ Η μακροπρόθεσμη φθορά των εξαρτημάτων της γεννήτριας, λόγω της τριβής μεταξύ των γραναζιών.
- ◇ Το λιπαντικό που απαιτείται στο κιβώτιο ταχυτήτων, πρέπει να αναπληρώνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα.
- ◇ Ο θόρυβος που προκαλείται από την περιστροφική κίνηση των γραναζιών.
- ◇ Ένα εξωτερικό κύκλωμα συγχρονισμού απαιτείται μεταξύ του στάτη και του ηλεκτρικού δικτύου για τον περιορισμό του ρεύματος εκκίνησης της γεννήτριας.

Όλα τα παραπάνω μειονεκτήματα ευνοούν τη διαμόρφωση άμεσης κίνησης. Εντούτοις, ένα σημαντικό μειονέκτημα της άμεσης κίνησης είναι η υψηλή ονομαστική ροπή της μηχανής. Αλλά η τελική επιλογή μεταξύ μιας κίνησης με κιβώτιο ταχυτήτων και μιας εναλλακτικής λύσης, όπως είναι η χρήση άμεσης κίνησης, είναι συνήθως βασισμένη σε οικονομικούς παράγοντες, σε αξιοπιστία και στις απαιτήσεις σε απόδοση. Σε πολλές περιπτώσεις, οι οικονομικοί παράγοντες θα επικρατήσουν και το χαμηλό κόστος της ηλεκτρικής μηχανής θα κάνει τη διαμόρφωση της άμεσης κίνησης μια λιγότερο ενδιαφέρουσα επιλογή.

Είναι γνωστό από τη δημοσίευση [*Har 1997*], ότι η μάζα των ηλεκτρικών μηχανών εξαρτάται από την ονομαστική ροπή τους (*torque rating*). Παραδείγματος χάριν, μια γεννήτρια 750 kW που περιστρέφεται με 25 rpm θα είναι πολύ βαρύτερη και πολύ πιο ακριβή από μια 750 kW γεννήτρια που περιστρέφεται με 1500 rpm. Αξίζει να αναφερθεί η μελέτη του *Böhmeke* [*Böh 1997*] (βλ. πίνακα (1-1)) η οποία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο ηλεκτρομηχανικός μετατροπέας ανεμογεννήτριας 1.5 MW που περιστρέφεται με 19 rpm και χρησιμοποιεί

σύγχρονη γεννήτρια άμεσης κίνησης περιελιγμένο δρομέα είναι περίπου 25% ακριβότερη από την μηχανικής κίνησης (κιβώτιο ταχυτήτων), επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-1: Σύγκριση κόστους μεταξύ επαγωγικής γεννήτριας 1.5 MW με κιβώτιο ταχυτήτων και σύγχρονης γεννήτριας 1.5 MW άμεσης κίνησης

ΜΕΡΗ ΠΟΥ ΑΝΑΛΥΟΝΤΑΙ	ΚΟΣΤΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΜΕ ΚΙΒΩΤΙΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ	ΚΟΣΤΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΑΜΕΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ
Κιβώτιο ταχυτήτων, φρεάτιο, Υδραυλικά	25% του συνολικού κόστους της α/γ	1% του συνολικού κόστους της α/γ
Γεννήτρια	8% του συνολικού κόστους της α/γ	36% του συνολικού κόστους της α/γ
Ηλεκτρικά συστήματα (συμπεριλαμβανομένου και του μετατροπέα)	11% του συνολικού κόστους της γεννήτριας	19% του συνολικού κόστους της α/γ
ΣΥΝΟΛΟ	44% του συνολικού κόστους της α/γ	56% του συνολικού κόστους της α/γ

*πηγή [Boh 1997]

Σύμφωνα με τη δημοσίευση [**Böh 2003**], ο *Böhmeke* παρέχει και μια άλλη σύγκριση μεταξύ των δύο διαμορφώσεων, δηλ. της άμεσης κίνησης και της διπλής τροφοδοσίας, σε σχέση με τις μάζες των εμπορικών ανεμογεννητριών. Η μελέτη συνοψίζεται στον πίνακα (1-2), όπου m_{top} είναι η μέγιστη μάζα μιας ανεμογεννήτριας, συμπεριλαμβανομένων των πτερυγίων (blades), του εξωτερικού καλύματος της ανεμογεννήτριας (nacelle) και όλων των μηχανικών μερών μέσα στο εξωτερικό κάλυμμα. Η D_r είναι η εξωτερική διάμετρος του δρομέα της γεννήτριας (turbine rotor).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-2: Σχέση μέγιστης μάζας μεταξύ άμεσης κίνησης και διπλής τροφοδοσίας συμβατικών α/γ εμπορίου

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	ΣΧΕΣΗ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΜΑΖΑΣ
Διπλής τροφοδοσίας α/γ	$m_{top} \approx 0.7D_r^{2.75}$
Άμεσης κίνησης α/γ	$m_{top} \approx 1.1D_r^{2.75}$

*πηγή [Boh 1997]

Ο πίνακας (1-2) δείχνει ότι οι ανεμογεννήτριες άμεσης κίνησης που υπάρχουν στην αγορά έχουν μια μέγιστη μάζα περίπου 60% υψηλότερη απ'ότι οι διπλής τροφοδοσίας ανεμογεννήτριες. Ωστόσο, οι α/γ άμεσης κίνησης του [Böh 2003] είναι συμβατικές σύγχρονες γεννήτριες, περιελιγμένου δρομέα. Κατά συνέπεια, θα μπορούσαμε να υποστηρίξουμε ότι η χρήση των μόνιμων μαγνητών μπορεί να μειώσει τη μάζα των γεννητριών.

Εξετάζοντας την α/γ άμεσης κίνησης «J48» της *Jeumont*, η όποια έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- ◇ Ισχύς εξόδου (output power) 750 kW.
- ◇ Γεννήτρια M.M. αξονικής ροής με αυλακώσεις.
- ◇ Μέγιστη μάζα της α/γ. $m_{top} = 47$ tn.
- ◇ Διάμετρο δρομέα $D_r = 48$ m.

Φαίνεται ότι η «J48» υπακούει στον ίδιο κανόνα με αυτόν που περιγράφεται στον πίνακα (1-2) για μια ανεμογεννήτρια άμεσης κίνησης περιελιγμένου δρομέα. Με βάση τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι άμεσης κίνησης ανεμογεννήτριες είναι βαρύτερες και πιο δαπανηρές γεννήτριες από ότι οι διπλής τροφοδοσίας διαμορφώσεις. Όσο αφορά το βάρος στο ζυγό του στάτη και του δρομέα, αυτό μπορεί να μειωθεί με τη χρήση μικρού πολικού βήματος τ_p , ενώ η απόδοση των γεννητριών άμεσης κίνησης μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση διέγερσης μόνιμων μαγνητών αντί ηλεκτρικής, όπως θα δούμε στα επόμενα κεφάλαια.

1.3 Ο καθορισμός του προβλήματος

1.3.1 Η βελτιστοποίηση των ηλεκτρικών γεννητριών ανάλογα με τις απαιτήσεις

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά κριτήρια για τη βελτιστοποίηση των ηλεκτρικών γεννητριών και έχουν σχέση με το σκοπό χρήσης και απαιτήσεων. Παραδείγματος χάριν, οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη και στα σκάφη σχεδιάζονται με τελικό στόχο την ελαχιστοποίηση της μάζας και των διαστάσεων (μικρές και ελαφριές). Οι γεννήτριες γενικής χρήσης και σκοπού είναι σχεδιασμένες, με τελικό στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής τους. Μια ανεμογεννήτρια θεωρείται μηχανή γενικής χρήσης και σκοπού και το κόστος της γεννήτριας λαμβάνεται ως ο κύριος παράγοντας.

Σε μια υψηλής ισχύος α/γ, η περιστροφική ταχύτητα είναι πολύ χαμηλότερη απ'ό,τι στις συμβατικές μηχανές (παραδείγματος χάριν, οι 1500 rpm και 1800 rpm είναι συμβατικές). Δεδομένου ότι η μάζα μιας ηλεκτρικής μηχανής αυξάνεται με την ονομαστική ροπή της, η μάζα

και το κόστος μιας γεννήτριας άμεσης κίνησης θα είναι πολύ αυξημένο από αυτή των 1500 rpm-γεννήτρια της ίδιας ονομαστικής ροπής. Η χρήση μιας 1500 rpm-γεννήτριας είναι δυνατή εάν ένα κιβώτιο ταχυτήτων παρεμβάλλεται μεταξύ της ατράκτου της α/γ και του άξονα της ηλεκτρικής μηχανής, που οδηγεί σε μια γεννήτρια με μια υψηλότερης περιστροφικής ταχύτητας αλλά χαμηλότερης ονομαστικής ροπής. Σύμφωνα με τους κατασκευαστές, η αύξηση του κόστους λόγω της προσθήκης ενός κιβωτίου ταχυτήτων είναι περισσότερο αντισταθμισμένη από τη μείωση κόστους που λαμβάνεται με μια ηλεκτρική μηχανή μειωμένης ονομαστικής ροπής.

Με άλλα λόγια, οι κατασκευαστές θα προτιμήσουν το συνδυασμό ενός κιβωτίου ταχυτήτων και μιας 1500 rpm μηχανής χαμηλής ονομαστικής ροπής, λόγω του υψηλότερου κόστους μιας μηχανής χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων με υψηλή ονομαστική ροπή. Αν και η διπλής τροφοδοσίας διαμόρφωση εμφανίζεται ως μια πιο οικονομικώς αποδοτική λύση, η χρήση ενός κιβωτίου ταχυτήτων φέρει μερικά μειονεκτήματα. Το κιβωτίο ταχυτήτων χρειάζεται συντήρηση, λιπαντικό και αντικαταστασή του ανά διαστήματα. Δημιουργεί πρόσθετες απώλειες θερμότητας λόγω τριβής, μειώνει την αξιοπιστία του συστήματος και δημιουργεί πρόσθετο θόρυβο. Αυτά τα μειονεκτήματα μπορούν να παραλειφτούν, υπό τον όρο ότι παραμένει ακόμα, μια οικονομικώς αποδοτική λύση.

Η διαμόρφωση άμεσης κίνησης αποφεύγει τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα και είναι επομένως επιθυμητή. Όμως, για να είναι ελκυστική, η άμεσης κίνησης διαμόρφωση, απαιτείται έρευνα προκειμένου να μειωθεί το κόστος των χαμηλών ταχυτήτων/υψηλής ροπής μηχανών. Αυτός είναι και ο κύριος στόχος αυτής της έρευνας. Μια από τις πρώτες ερωτήσεις που πρέπει να εξεταστούν είναι:

Ø Πόσο πρέπει να μειώσουμε το κόστος της γεννήτριας άμεσης κίνησης προκειμένου να καταστήσουμε το σύστημα χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων ανταγωνιστικό σε σχέση με ένα διπλής τροφοδοσίας σύστημα;

Το κόστος μιας γεννήτριας άμεσης κίνησης εξαρτάται όχι μόνο από το κόστος των τμημάτων που αποτελείται, αλλά και από τις χρησιμοποιούμενες εγκαταστάσεις παραγωγής, τον αριθμό μηχανών που πωλούνται, τα συνολικά κέρδη που έχει ο κατασκευαστής και άλλες μεταβλητές που είναι πέρα από το πεδίο της έρευνάς μας. Μια πλήρης εικόνα θα απαιτούσε μοντέλα αγοράς και παραγωγής. Μεταξύ αρκετών μεταβλητών, το κόστος αποσυναρμολόγησης μιας ηλεκτρικής μηχανής περιέχει και τον όρο 'ενεργό υλικό'. Το 'ενεργό υλικό' περιλαμβάνει όλα τα υλικά μέσα στη μηχανή. Σε αυτό το σημείο, πιστεύουμε ότι η περαιτέρω ανάλυση του κόστους του 'ενεργού υλικού' σε μία χαμηλής ταχύτητας μηχανής είναι μη σχετική.

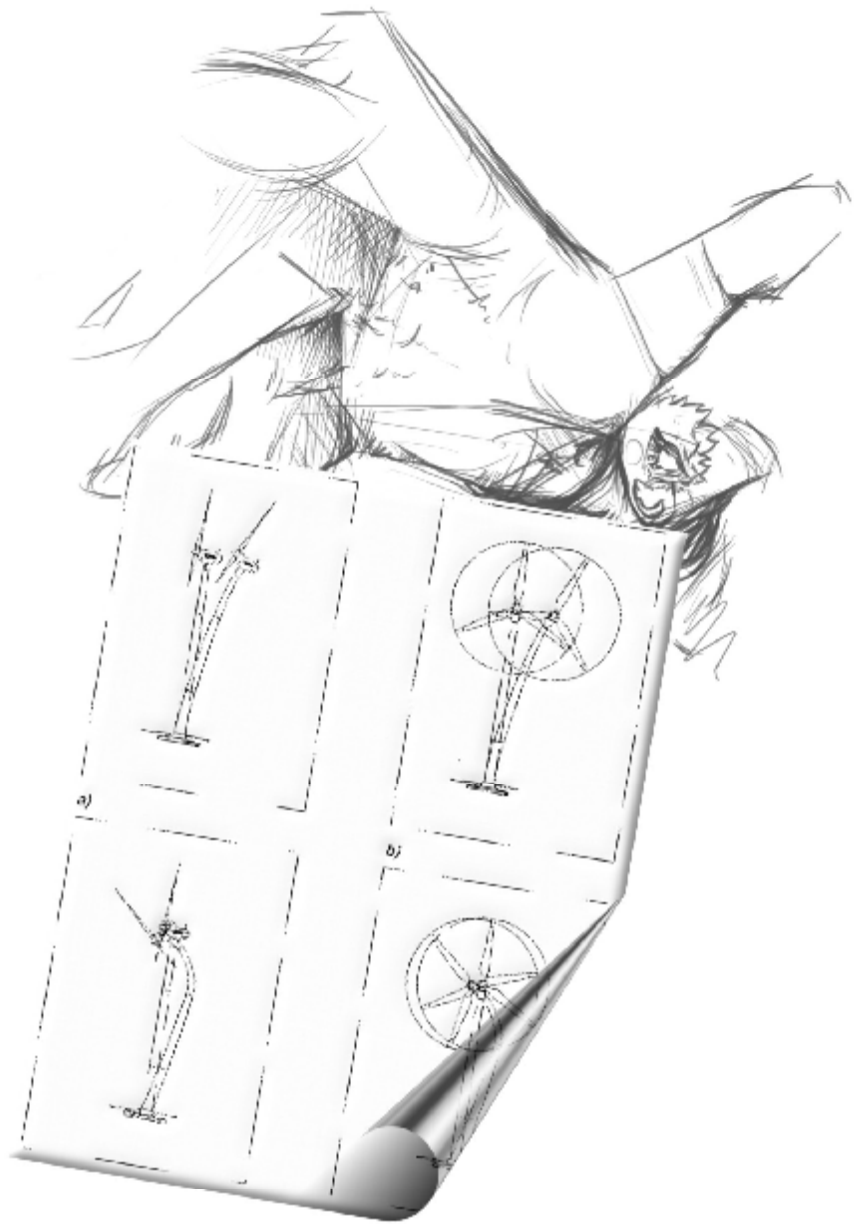
Έχουμε επιλέξει να επικεντρώσουμε την μελέτη στην περίπτωση της σύγχρονης μηχανής με μόνιμους μαγνήτες (permanent magnet). Στην πραγματικότητα, διάφοροι ερευνητές όπως [Mit 1995], [Had 1999] και [Lan 2000] έχουν συγκρίνει τις διάφορες σύγχρονες μηχανές M.M. με επαγωγικές μηχανές (induction machine) και με διακοπτόμενης μαγνητικής αντίστασης

(switched reluctance machine) σε διαμορφώσεις άμεσης κίνησης. Όλοι οι ερευνητές κατέληξαν στο ίδιο συμπέρασμα:

- Ø “Ότι η χρήση μονίμων μαγνητών στις σύγχρονες μηχανές οδηγεί σε χαμηλότερη μάζα του ‘ενεργού υλικού’ για δεδομένη ονομαστική ροπή”.

Συνεπώς η σύγχρονη μηχανή με μόνιμους μαγνήτες εμφανίζεται να είναι μια καλή αφετηρία για την ελαχιστοποίηση της μάζας και του κόστους στις μηχανές μονίμων μαγνητών χαμηλών ταχυτήτων. Σε αυτή την εργασία, η ορολογία ‘Σύγχρονη Μηχανή Μονίμων Μαγνητών’ (permanent magnet synchronous machine) δεν αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη γεωμετρία μηχανής Μ.Μ.. Αναφέρεται στη γενική έννοια των ηλεκτρικών μηχανών που έχουν μόνιμους μαγνήτες στους δρομείς. Σε αυτό το πλαίσιο, θα ερευνηθεί ένα ευρύ φάσμα των τοπολογιών που χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες. Ακόμα αν και δεν είναι η πρόθεση αυτής της εργασίας να υπολογιστεί το κόστος παραγωγής σε οποιαδήποτε γεωμετρία των μηχανών μονίμων μαγνητών, προσοχή πρέπει να δοθεί στην “ευκολία της κατασκευής” μιας δεδομένης γεωμετρίας. Μερικές από τις τοπολογίες των μηχανών που περιγράφονται κατασκευάζονται δύσκολα, λόγω της πολυπλοκότητας του σχεδίου τους. Γνωρίζοντας ότι μια μηχανή χαμηλών ταχυτήτων πρέπει να είναι οικονομικά ανταγωνιστική, η εργασία θα ερευνήσει τις μηχανές μονίμων μαγνητών με χαμηλή μάζα ‘ενεργών υλικών’ αλλά και ‘εύκολης κατασκευής’.

Κεφάλαιο 2



Επισκόπηση Μηχανών Μονίμων Μαγνητών

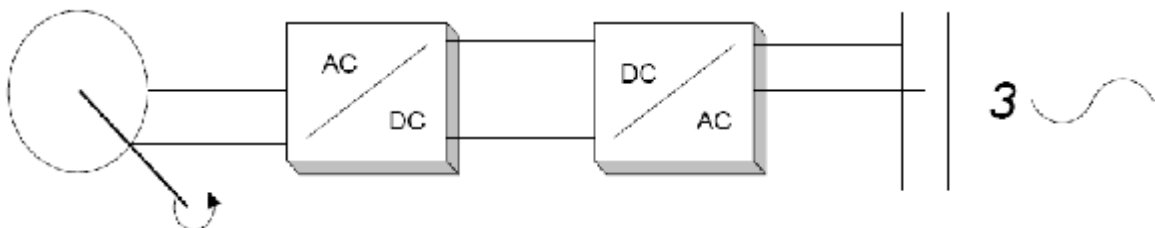
2.1 Εισαγωγή

Η έρευνα για τις σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών με την ελάχιστη μάζα και το ελάχιστο κόστος του 'ενεργού υλικού' απαιτεί μια επισκόπηση των διαφόρων μηχανών με μόνιμους μαγνήτες. Στο κεφάλαιο 1, καθορίσαμε τη "σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών" ως τη μηχανή με μόνιμους μαγνήτες τοποθετημένους στο δρομέα, η οποία λειτουργεί κατά τρόπο σύγχρονο. Μια γρήγορη επισκόπηση δείχνει εύκολα τις ευρείες δυνατότητες με τον τρόπο που οι Μ.Μ. μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα δρομέα. Η παράγραφος 2.2 παρέχει τα κύρια πλεονεκτήματα των σύγχρονων μηχανών με μόνιμους μαγνήτες που διεγείρονται με πηνία στα οποία ρέει ρεύμα. Στην παράγραφο 2.4, οι διαφορετικές οικογένειες και η γεωμετρία των μηχανών Μ.Μ. που βρίσκονται στην τρέχουσα επιστημονική βιβλιογραφία θα περιγραφούν. Όπως είναι προφανές από την παράγραφο 2.4, η κατανόηση της αρχής λειτουργίας τους, από μόνη της, δεν είναι επαρκής για να προσδιορίσει τη τοπολογία μηχανών μονίμων μαγνητών πρέπει να επιλεχτεί ανάλογα πάντα με τις απαιτήσεις, τις ανάγκες και τα μέσα που υπάρχουν. Αυτό θα τονίσει την ανάγκη για την χρησιμοποίηση κριτηρίων επιλογής για κάθε τύπο μηχανής με σκοπό τη συγκρισή τους από κοινού.

Η ανάλυση των κριτηρίων επιλογής για τις διάφορες γεωμετρίες των μηχανών μονίμων μαγνητών θα αποτελέσει το αντικείμενο του κεφαλαίου 4, όπου και θα περιγραφεί μια διαδικασία που στηρίζεται σε αυτά τα κριτήρια επιλογής. Τα κριτήρια αυτά χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση των διαφόρων γεωμετριών των μηχανών Μ.Μ. ανάλογα με τις απαιτήσεις.

2.2 Σύγκριση των μηχανών που χρησιμοποιούν Μ.Μ. με τις περιελιγμένου δρομέα μηχανές και με τις διακοπτόμενης μαγνητικής αντίστασης μηχανές

Η διαμόρφωση άμεσης κίνησης συζητήθηκε στο κεφάλαιο 1 (βλ. εικόνα (1-1)). Μια τέτοια διαμόρφωση συστημάτων άμεσης κίνησης περιγράφεται πάλι στην εικόνα (2-1).



ΕΙΚΟΝΑ 2-1: Διαμόρφωση άμεσης κίνησης

2.2.1 Η σύγχρονη μηχανή M.M. σε σχέση με την επαγωγική μηχανή

Διάφοροι τύποι μηχανών μπορούν να εξυπηρετήσουν τη λειτουργία της άμεσης κίνησης. Όπως συζητήθηκε προηγουμένως, διάφοροι ερευνητές όπως [Mit 1995], [Had 1999] και [Lan 2000a], έχουν επιβεβαιώσει τα πλεονεκτήματα που έχουν οι σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών από τις επαγωγικές μηχανές. Η επαγωγική μηχανή απαιτεί περισσότερο 'ενεργό υλικό' και είναι πιο ογκώδης από ότι μια σύγχρονη μηχανή M.M..

Οι επαγωγικές μηχανές παρέχουν το πεδίο διέγερσης στο δρομέα τους μέσω τυλιγμάτων στους στάτες. Συνεπώς, τα τυλίγματα των στατών πρέπει να φέρουν την ενεργό ισχύ που λαμβάνεται στη μετατροπή και την ισχύ που απαιτείται από το δρομέα για τη διέγερσή του. Αυτό καθιστά τις απώλειες στους στάτες υψηλότερες και απαιτείται μεγαλύτερη διατομή χαλκού και διάστημα αυλακώσεων στο στάτη. Με βάση αυτές τις ιδέες, οι επαγωγικές μηχανές δεν μειώνουν το 'ενεργό υλικό' στις άμεσης κίνησης ηλεκτρικές μηχανές.

2.2.2 Η σύγχρονη μηχανή M.M. σε σύγκριση με τη διακοπτόμενης μαγνητικής αντίστασης μηχανή

Όπως η επαγωγική μηχανή, έτσι και η διακοπτόμενης μαγνητικής αντίστασης μηχανή (SRM) επίσης δεν περιλαμβάνει τη διέγερση στο δρομέα. Η αρχή της διακοπτόμενης μαγν. αντίστασης μηχανής έχει συζητηθεί σε διάφορες δημοσιεύσεις, όπως στην [Law 1980]. Στην [Har 1989], η διακοπτόμενης μαγν. αντίστασης μηχανή συγκρίνεται με την επαγωγική μηχανή και λαμβάνονται σχέδια και για τους δύο τύπους μηχανών. Για ίδιες αποδόσεις, η (SRM) εμφανίζεται πιο συμπαγής και σχετικά ελαφρύτερη από την επαγωγική μηχανή. Στις δημοσιεύσεις των [Mil 1985] και [Mil 1993], συζητείται ότι το ρεύμα διέγερσης της διακοπτόμενης μαγν. αντίστασης μηχανής οδηγεί σε μια "ρήτρα διέγερσης" της τάξεως του 35-60% υψηλότερη από ότι για άλλες τοπολογίες μηχανών που αναλύονται. Στη [deH 1995], μια μελέτη εφαρμογής της (SRM) σε μια α/γ, δείχνει ότι η αναλογία μετατροπής της (SRM) είναι υψηλότερη από ότι για άλλες τοπολογίες μηχανών.

Η εφαρμογή της διακοπτόμενης μαγν. αντίστασης μηχανής σαν γεννήτρια άμεσης κίνησης για εφαρμογή σε α/γ έχει συζητηθεί στις δημοσιεύσεις [Tor 1993], [deH 1994], [deH 1995], [Car 1995], [Hao 1997], [Liu 1998] και [Mue 1999]. Στη [Dub 2000], μια περιεκτική σύγκριση γίνεται μεταξύ των διάφορων (SRM) πρωτότυπων που σχεδιάζονται από αυτούς τους ερευνητές σε σχέση με τις συμβατικές σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών (ακτινικού τύπου). Σύμφωνα με την απόδοση που αναφέρεται από τους ερευνητές, το κόστος των (SRM) μηχανών είναι λίγο πολύ συγκρίσιμο με αυτό των συμβατικών σύγχρονων μηχανών M.M. για διαμέτρους μικρότερες από 1 m. Για μεγαλύτερες διαμέτρους, η (SRM) μηχανή που σχεδιάζεται στη

δημοσίευση [deH 1995], η οποία συγκρίνεται επίσης και στη [Dub 2000], με την συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M., έχει πολύ υψηλότερο κόστος.

Με βάση τις διαθέσιμες επιστημονικές δημοσιεύσεις και έρευνες που έχουν γίνει, η (SRM) φαίνεται να έχει το ισοδύναμο ή υψηλότερο κόστος έναντι της συμβατικής σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών. Κατά συνέπεια, η επαγωγική και η (SRM) μηχανή δεν θα αναλυθούν περαιτέρω.

2.3 Η σύγχρονη μηχανή: Η μαγνητική διέγερση σε σχέση με την ηλεκτρική διέγερση

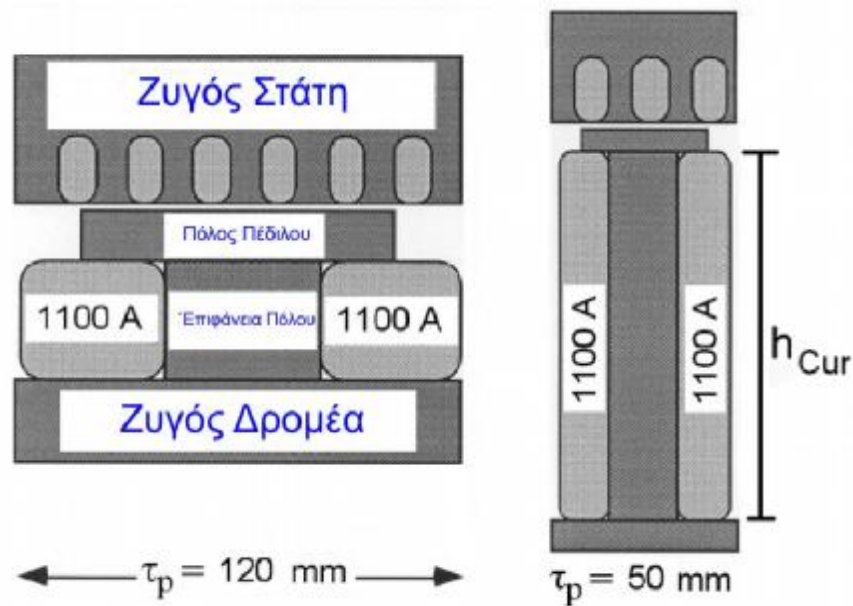
Η σύγχρονη μηχανή έχει τη δυνατότητα να παρέχει τη δική της διέγερση στο δρομέα. Μια τέτοια διέγερση στο δρομέα μπορεί να ληφθεί με τη βοήθεια ενός πηνίου που φέρει ρεύμα ή με τη χρήση μονίμων μαγνητών. Σε αυτή την εργασία, ο μαγνητική διάταξη είναι αυτή που επιλέγεται να εξεταστεί, αλλά είναι απαραίτητο σε αυτό το σημείο να τεκμηριωθεί γιατί η ηλεκτρικά διεγερμένη γεννήτρια είναι λιγότερο ενδιαφέρουσα για τη μείωση της μάζας και του κόστους του συστήματος. Η ηλεκτρική διέγερση έχει ένα πολύ ενδιαφέρον χαρακτηριστικό γνώρισμα έναντι της μαγνητικής διέγερσης:

Ø «Διευθετήσιμο ρεύμα διέγερσης και συνεπώς, διευθετήσιμη εν κενώ τάση».

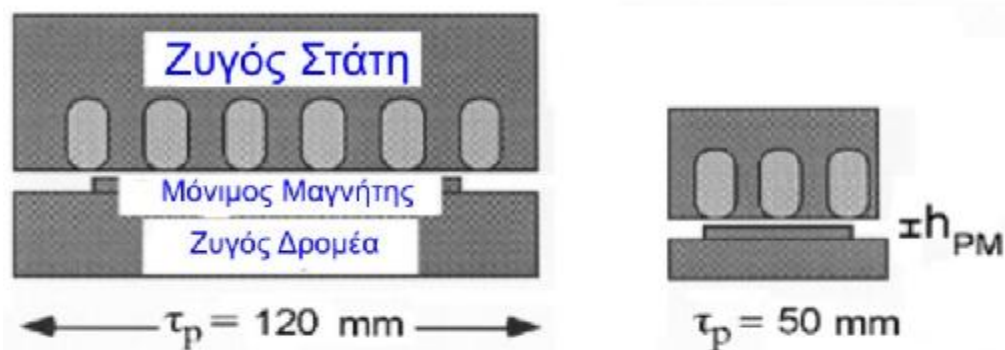
Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα εξηγεί γιατί οι σταθερές ταχύτητας, συνδεδεμένες με το ηλεκτρικό δίκτυο, υδρολανεμο-γεννήτριες χρησιμοποιούν περιελιγμένους δρομείς, αντιμαγνητικά διεγερμένους δρομείς. Στη βιομηχανία των α/γ, η σύγχρονη γεννήτρια συνδέεται στις περισσότερες περιπτώσεις με το ηλεκτρικό δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή, όπως παραδείγματος χάριν στις άμεσης κίνησης α/γ του Γερμανικού κατασκευαστή *Enercon* και του Ολλανδικού κατασκευαστή *Lagerwey*. Μέχρι τώρα, αυτοί οι δύο κατασκευαστές α/γ έχουν χρησιμοποιήσει σύγχρονες γεννήτριες με ηλεκτρικά διέγειρόμενους δρομείς. Αλλά οι κατασκευαστές κινούνται προς τη χρήση των σύγχρονων γεννητριών με μόνιμους μαγνήτες. Αυτή η τάση εξηγείται από το γεγονός ότι, για δεδομένη ονομαστική ροπή, μια σύγχρονη μηχανή με μεγάλο αριθμό ζευγών πόλων, επιτρέπει μείωση της μάζας της έδρασης του στάτη και της έδρασης του δρομέα, όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά στη [Gra 1996b].

Λαμβάνοντας υπόψη την παρούσα μελέτη μας, ένας μεγάλος αριθμός ζευγαριών πόλων είναι ελκυστικός και οι σύγχρονες μηχανές με μικρό πολικό βήμα, πρέπει να εξεταστούν για τη μείωση κόστους και μάζας. Όπως συζητείται μέσα στις [Jöc 1996], [Lam 2000], οι σύγχρονες μηχανές με τους ηλεκτρικά διεγερόμενους δρομείς δεν προσαρμόζονται εύκολα με τις μικρού πολικού βήματος διαμορφώσεις. Οι περιελιγμένοι δρομείς είναι βαρύτεροι από τους μαγνητικούς δρομείς και πιο ογκώδεις σε σχέση με τις μικρού πολικού βήματος, σύγχρονες

μηχανές. Οι εικόνες (3-2) και (3-3) επεξηγούν το πάχος των πόλων που απαιτείται στο μαγνητικό δρομέα για να δημιουργήσει ισοδύναμη μαγνητική επαγωγή στο διάκενο.



ΕΙΚΟΝΑ 2-2: Αύξηση του πάχους των πόλων σε ηλεκτρικά διεγερμένες σπείρες με μικρό πολικό βήμα



ΕΙΚΟΝΑ 2-3: Σταθερό πάχος σε μαγνητικά διεγερμένους πόλους δρομέα με μεταβλητό πολικό βήμα

Στο παράρτημα Α* δίνονται εκφράσεις που συνδέουν το ύψος h_{Cur} του υλικού των πηνίων με το ύψος h_{PM} ενός μαγνητικού υλικού που απαιτείται για την δημιουργία ίδιας μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Για ληφθεί η αναλογία, οι ακόλουθες υποθέσεις γίνονται:

- ◇ Η B_r θεωρείται σταθερή και η σχετική μαγνητική διαπερατότητα ίση με την μονάδα.
- ◇ Το πλάτος των Μ.Μ. είναι ίσο με το πολικό βήμα.
- ◇ Το πλάτος του πέδιλου του δρομέα είναι ίδιο με το πολικό βήμα στην περιελιγμένου δρομέα διαμόρφωση.
- ◇ Στους Μ.Μ. η απομαγνήτιση δεν εξετάζεται.

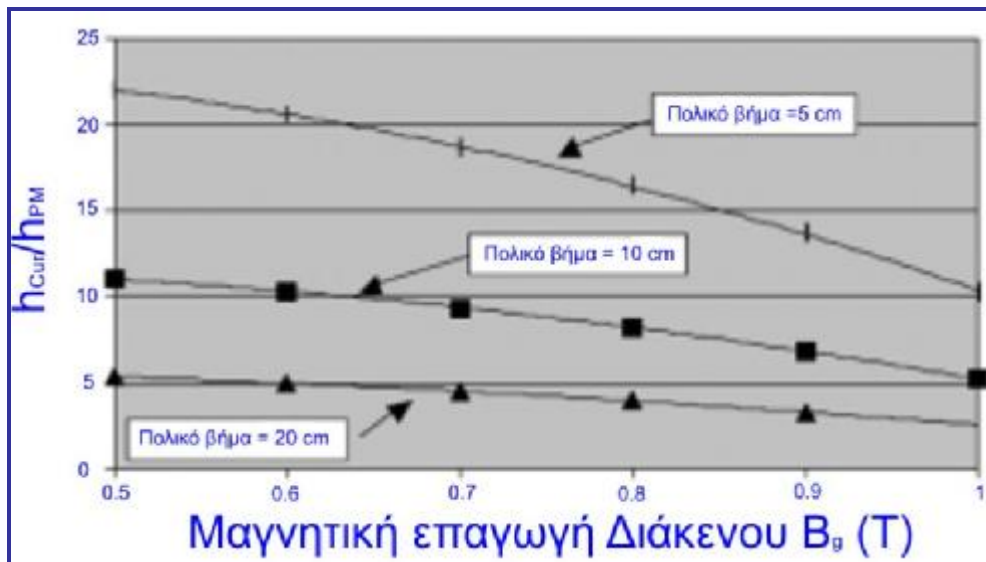
$$\frac{h_{Cur}}{h_{PM}} = \frac{2B_{Fesat} (B_r - B_g)}{m_0 J_c k_{rfill} t_p (B_{Fesat} - B_g)} \quad (2-1)$$

Η εξίσωση (2-1) επιβεβαιώνει ότι αν μειωθεί το πολικό βήμα τ_p (και συνεπώς ένας αυξανόμενος αριθμός ζευγών πόλων) θα οδηγήσει την ηλεκτρικά διεγερόμενη σύγχρονη μηχανή, σε αύξηση του πάχους του δρομέα, έναντι της μαγνητικής διέγερσης. Εάν υποθέσουμε τις ακόλουθες τιμές:

- ♦ Μαγνητική επαγωγή κορεσμού του σιάτη απο σίδηρο (iron saturation flux density) $B_{Fesat}=1.8$ T.
- ♦ Παράγοντας πλήρωσης χαλκού (copper filing factor) $k_{rfill} = 0.7$.
- ♦ Παραμένουσα μαγν. επαγωγή $B_r = 1.2$ T.

Πρέπει να δηλωθεί ότι επιλέγεται χαμηλή τιμή πυκνότητας ρεύματος (current density) $J_c = 2$ A/mm², για να παραχθεί μια αποδεκτή απόδοση στη μηχανή. Κατω από αυτές τις συνθήκες, ο όγκος και η μάζα των πηνίων των δρομέων (και των πυρήνων τους) στις σύγχρονες μηχανές περιελιγμένου δρομέα θα είναι σημαντικά υψηλότερες από τον όγκο και τη μάζα των αντίστοιχων μηχανών με μόνιμους μαγνήτες, που απαιτείται για να δημιουργήσει μια δεδομένη μαγν. επαγωγή στο διάκενο σε εν κενώ λειτουργία. Σύμφωνα με την εικόνα (2-3), αυτή η κατάσταση επιδεινώνεται όσο το πολικό βήμα μειώνεται. Όσον αφορά το κόστος, το κόστος των Nd-Fe-B μαγνητικών υλικών είναι περίπου 5 με 15 φορές υψηλότερες σε σχέση με το κόστος του χαλκού και του ελασματοποιημένου χάλυβα. Σύμφωνα με την εικόνα (2-4), ένα πολικό βήμα 10 cm δίνει μια αναλογία h_{Cur}/h_{PM} περίπου 10. Εάν εξετάζεται το κόστος, τότε το κόστος του μαγνητικού δρομέα είναι πιθανό να μειωθεί όταν το πολικό βήμα παίρνει τιμές μικρότερες από 10 cm.

Η εξίσωση (2-1) χρησιμοποιεί την υπόθεση 180^o τόξου πόλων για τους μόνιμους μαγνήτες, ενώ κανονικά ένα πίο μικρό τόξο πόλων χρησιμοποιείται με μαγνητική διέγερση. Επίσης, η εξίσωση (2-1) υποθέτει σταθερό πάχος διακένου στον ηλεκτρικά διεγερμένου δρομέα, ενώ το πέδιλο του πόλου συχνά έχει μια στρογγυλή μορφή προκειμένου να ληφθεί μια πίο ημιτονοειδής ροή. Αυτές οι παραλλαγές δεν συμπεριλαμβάνονται στο παράρτημα A* ή στην εξίσωση (2-1).



ΕΙΚΟΝΑ 2-4: Αναλογία πάχους πηνίου σε σχέση με το πάχος του μόνιμου μαγνήτη, για ισοδύναμη μαγνητική επαγωγή στο διάκενο για διαφορετικές τιμές πολικού βήματος

Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα της ηλεκτρικά διεγερόμενης σύγχρονης μηχανής είναι οι υψηλές απώλειες στα τυλίγματα των δρομέων. Αν και θα υπάρξουν μερικές απώλειες στους μαγνήτες που προκαλούνται από τη δημιουργία δινορευμάτων (eddy currents) στον όγκο των μονίμων μαγνητών, θα είναι συνήθως πολύ χαμηλότερες από τις απώλειες χαλκού στους ηλεκτρικά διεγερόμενους δρομείς. Αυτή η αύξηση στις απώλειες χαλκού θα μεγαλώσει επιπρόσθετα με την αύξηση του αριθμού των πόλων.

Για να επεξηγήσουμε καλύτερα τους περιορισμούς που υπάρχουν στο πολικό βήμα για τη μείωση των απωλειών, στους ηλεκτρικά διεγερόμενους δρομείς, αναφέρουμε δημοσιεύσεις όπως [Bir 1991] και [Pol 2001], που παρουσιάζουν βελτιστοποιημένα σχέδια σύγχρονης γεννήτριας, άμεσης κίνησης, με ηλεκτρικά διεγερόμενους δρομείς για εφαρμογή σε α/γ. Πολικά βήματα μεταξύ 20 και 45 cm είχαν προταθεί σε εκείνες τις περιπτώσεις. Αφ' ετέρου, δημοσιεύσεις όπως [Gra 1996b], [Lam 1997], [Pol 2000] έχουν παρουσιάσει βελτιστοποιημένα σχέδια για σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμους μαγνήτες στους δρομείς, με πολικό βήμα κυμαινόμενο μεταξύ 6.8 και 10 cm.

Στη δημοσίευση [Jöc 1996], μια σύγκριση κόστους και μάζας πραγματοποιείται μεταξύ μιας ηλεκτρικά διεγερόμενης και μιας μαγνητικής διεγερόμενης, σύγχρονης γεννήτριας, η οποία περιλαμβάνει τα τμήματα του δρομέα και του στάτη. Η σύγκριση περιλαμβάνει το κόστος του 'ενεργού υλικού', αλλά επίσης και το μακροπρόθεσμο κόστος των ηλεκτρικών απωλειών. Διαπιστώνεται ότι οι σύγχρονες μηχανές με μαγνητική διέγερση έχουν συνολικό κόστος και συνολική μάζα, χαμηλότερες από αυτές των σύγχρονων μηχανών με περιελιγμένους δρομείς (ηλεκτρικά διεγερόμενους) λόγω της δυνατότητας των μαγνητικών μηχανών να λαμβάνουν μικρές τιμές πολικού βήματος.

2.4 Περιγραφή τοπολογιών των μηχανών που χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες

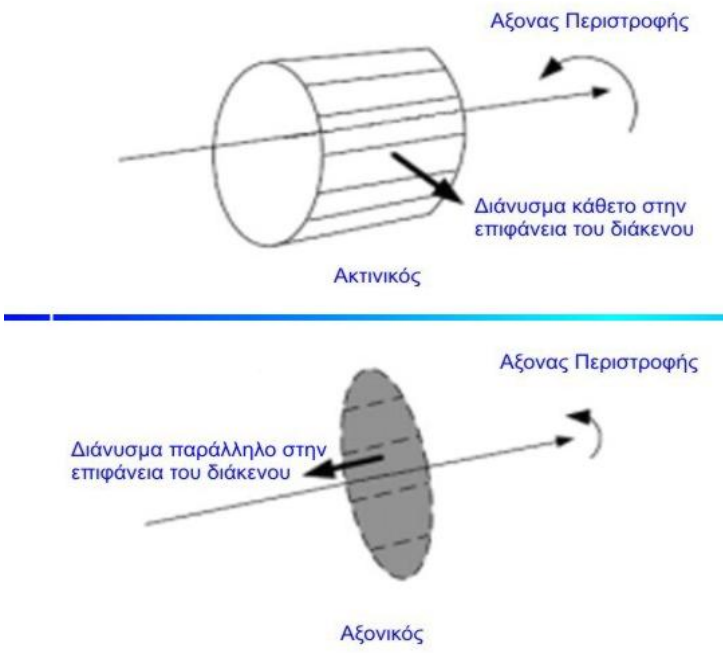
Το κεφάλαιο 1 έχει δώσει έμφαση στην ανάγκη για την μείωση του κόστους και της μάζας, των μηχανών άμεσης κίνησης. Οι μόνιμοι μαγνήτες μπορούν να παράγουν τη μαγνητική ροή κατά τρόπο συμπαγή, επιτρέποντας στις μηχανές να έχουν μικρά πολικά βήματα. Μια πολύ σημαντική πτυχή των μαγνητικών δρομέων, που δεν έχει συζητηθεί στο τελευταίο τμήμα, είναι η μεγάλη ευελιξία των μονίμων μαγνητών. Οι M.M. μπορούν να σχεδιαστούν στο χώρο σε διάφορες μορφές, θέσεις, μεγέθη και προσανατολισμούς. Με αποτέλεσμα να προκαλούν σχεδόν ατελείωτες δυνατότητες στον αριθμό των τοπολογιών και των διαφόρων παραλλαγών των μηχανών. Για να δώσουμε μια πλήρη περιγραφή όλων των γεωμετριών των μηχανών που χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες και που συζητούνται στην επιστημονική βιβλιογραφία θα χρειαζόταν περισσότερο από ένα κεφάλαιο αυτής της εργασίας. Γί αυτό, θα περιοριστούμε στην περιγραφή αυτών που πιστεύουμε ότι είναι η 'προεξέχουσα γεωμετρία'. Για να εξεταστούν οι διάφορες τοπολογικές παραλλαγές των μηχανών M.M., τέσσερα κύρια χαρακτηριστικά έχουν επιλεγεί:

- ◇ Προσανατολισμός διακένου, όσον αφορά τον περιστροφικό άξονα: Ακτινωτός (radial (R)) ή Αξονικός (axial (A)).
- ◇ Προσανατολισμός των πυρήνων των στατών, όσον αφορά την κατεύθυνση της κίνησης: Διαμήκης (longitudinal (L)) ή Εγκάρσιος (transverse (T)).
- ◇ Προσανατολισμός των μονίμων μαγνητών, όσον αφορά το διάκενο: Επιφανειακής τοποθέτησης (surface-mounted (SM)) ή Συγκεντρικής ροής (flux-concentrating (FC)).
- ◇ Στέγαση του χαλκού (Copper housing): Με εγκοπές/αυλακώσεις (slotted (S)) ή χωρίς εγκοπές (slotless (SL)).

∅ Αυτά τα χαρακτηριστικά συζητούνται αναλυτικότερα στις επόμενες παραγράφους.

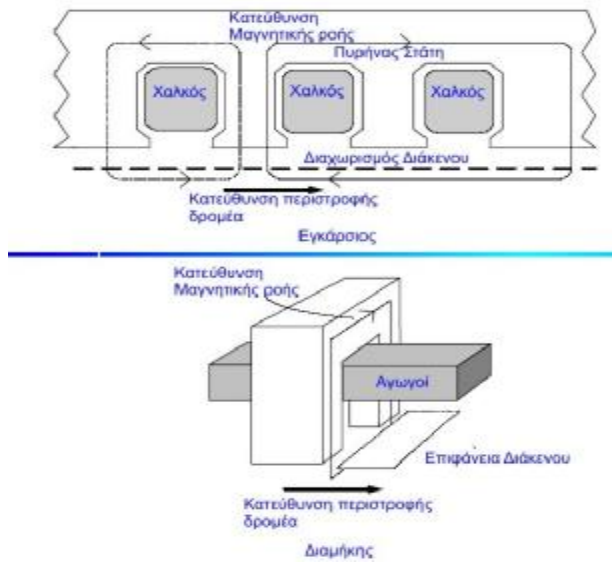
2.4.1 Προσανατολισμός διακένου: Ακτινωτός ή Αξονικός

Το διάκενο είναι απαραίτητο ως μέσο για το διαχωρισμό του δρομέα από το στάτη. Διαμορφώνει μια επιφάνεια μεταξύ του δρομέα και του στάτη. Το κάθετο διάνυσμα στο διάκενο μπορεί να είναι προσανατολισμένο ακτινωτά ή προσανατολισμένο αξονικά. Στη πρώτη περίπτωση, το διάνυσμα είναι κάθετο στον άξονα της περιστροφής, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, το διάνυσμα είναι παράλληλο στον άξονα της περιστροφής. Αυτό διευκρινίζεται στην εικόνα (2-5).



ΕΙΚΟΝΑ 2-5: Προσανατολισμός διακένου: Ακτινωτός (radial) πάνω ή Αξονικός (axial) κάτω

2.4.2 Προσανατολισμός των πυρήνων των στατών: Διαμήκης ή Εγκάρσιος



ΕΙΚΟΝΑ 2-6: Προσανατολισμός του πυρήνα του στάτη: Διαμήκης κάτω ή Εγκάρσιος πάνω

Ο πυρήνας των στατών φέρνει τη ροή γύρω από τα τυλίγματα του στάτη προκειμένου να δημιουργηθεί μια ηλεκτρεγερτική δύναμη σε αυτά. Η ροή μπορεί να μεταφερθεί σε μια κατεύθυνση παράλληλη ή κάθετη προς την κατεύθυνση της κίνησης. Στην πρώτη περίπτωση, η μηχανή ονομάζεται διαμήκης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, η μηχανή ονομάζεται εγκάρσια (Βλ. εικόνα (2-6)). Ο *Laithwaite* [Lai 1971] ήταν μεταξύ των πρώτων ερευνητών που έκανε τη διάκριση μεταξύ των διαμήκων και των εγκάρσιων

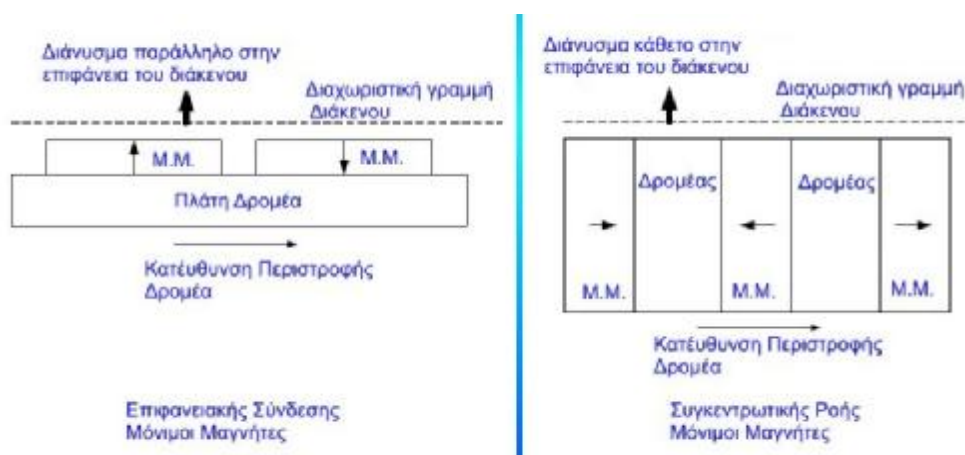
στατών. Οι διαμήκεις στάτες βλέπουν το διαθέσιμο διάστημα ως μέσο μείωσης των αγωγών όταν το πολικό βήμα μειώνεται. Το ρεύμα λειτουργίας (current loading), που είναι γνωστό ως γραμμική πυκνότητα ρεύματος, ορίζεται ως:

$$A = \frac{N_{Cu} I_s q m}{t_p} \quad (2-2)$$

Για ένα δεδομένο πλάτος δοντιού και ρεύμα λειτουργίας, εάν το πολικό βήμα t_p από μια διαμήκη μηχανή μειωθεί, θα υπάρξει λιγότερο διαθέσιμο διάστημα για τον χαλκό και η αξία $N_{Cu} I_s$ θα μειωθεί. Κατά συνέπεια, το ρεύμα λειτουργίας A από μια διαμήκη μηχανή δεν ποικίλλει πολύ με την μείωση του πολικού βήματος. Σε μια εγκάρσια μηχανή ($q = 1$ και $m = 1$), το διαθέσιμο διάστημα για τους αγωγούς δεν εξαρτάται από το πολικό βήμα. Εάν το t_p μειώνεται, η τιμή $N_{Cu} I_s$ μπορεί να παραμείνει η ίδια, ή ακόμα και να αυξηθεί εάν είναι απαραίτητο. Κατά συνέπεια, το ρεύμα λειτουργίας A σε μια εγκάρσια μηχανή θα αυξάνεται όσο το πολικό βήμα t_p θα μειώνεται.

2.4.3 Προσανατολισμός των μονίμων μαγνητών, όσον αφορά το διάκενο: Επιφανειακής τοποθέτησης ή Συγκεντρωτικής ροής

Οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται πάνω στο δρομέα. Η μαγνητική ροή έχει κατεύθυνση, η οποία μπορεί να είναι, είτε παράλληλη, είτε κάθετη σε ένα καθετο διάνυσμα στην επιφάνεια του διακένου, όπως διευκρινίζεται στην εικόνα (2-7). Στην πρώτη περίπτωση, οι μόνιμοι μαγνήτες είναι επιφανειακής τοποθέτησης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται με μια συγκεντρωτικής ροής διάταξη.



ΕΙΚΟΝΑ 2-7: Προσανατολισμός των μονίμων μαγνητών, όσον αφορά το διάκενο: Επιφανειακής τοποθέτησης (surface-mounted, (SM)) στα αριστερά ή Συγκεντρωτικής ροής (flux-concentrating (FC)) στα δεξιά

Αυτή η ταξινόμηση εξετάζει μόνο δύο πιθανά σχεδιαγράμματα για την τοποθέτηση των Μ.Μ. στο δρομέα. Εντούτοις, στη δημοσίευση [Sen 1997] υπάρχουν αναφορές και για άλλες πιθανές μαγνητικές διαμορφώσεις, όπως η παρεμβολή “inset-PM” και η ταφή “buried-PM” με ακτινωτή μαγνήτιση. Στη δημοσίευση [Spo 1992a] έχει προταθεί ένας συνδυασμός με επιφανειακής τοποθέτησης και συγκεντρωτικής ροής ρύθμιση. Επίσης, στις [Hal 1980], [Dub 2002a] περιγράφονται τα πλεονεκτήματα των μονίμων μαγνητών με μεταβλητές γωνίες μαγνήτισης. Αλλά στην περίπτωση μας, θα περιορίσουμε την ανάλυση στις δύο γενικές περιπτώσεις που παρουσιάζονται στην εικόνα (2-7).

2.4.4 Στέγαση χαλκού: Με εγκοπές ή χωρίς εγκοπές

Οι ελασματοποιήσεις των στατών μπορούν να γίνουν είτε με/είτε χωρίς δόντια. Στον οδοντωτό στάτη, τα δόντια χρησιμοποιούνται για να φέρουν τη μαγνητική ροή. Στο χωρίς δόντια στάτη, οι αγωγοί των στατών τοποθετούνται στο διάκενο και η μαγνητική ροή πρέπει έπειτα να διασχίσει ένα πολύ μεγαλύτερο διάστημα του μη μαγνητισμένου μέσου, η οποία θα οδηγήσει ή σε πιο ογκώδεις (από πλευράς πάχους) μαγνήτες ή δε θα μειώσει την εν κενώ μαγνητική επαγωγή, ή θα οδηγήσει και στα δυο. Παραδείγματος χάριν, η χωρίς αυλακώσεις σχεδιάσεις μηχανών προτεινόμενες στις δημοσιεύσεις [Car 1999b] και [Fic 2001] έχουν μια μέγιστη-μαγνητική επαγωγή στο διάκενο B_g , 0.52 T και 0.60 T.

Όπως θα περιγραφεί περαιτέρω, ο χωρίς αυλακώσεις στάτης έχει μερικά πλεονεκτήματα στις μηχανές με τα αξονικώς προσανατολισμένα διάκενα λόγω της δυσκολίας που υπάρχει στην κατασκευή των αυλακωμένων στατών. Εντούτοις, η απουσία των εγκοπών οδηγεί σε μείωση των προβλημάτων των τυλιγμάτων. Ένα δεύτερο πλεονέκτημα των χωρίς αυλακώσεων μηχανών είναι οι χαμηλές απώλειες σιδήρου. Στο στάτη με εγκοπές, το μεγαλύτερο μέρος της ροής περνά από τα δόντια του χάλυβα, ο οποίος συμπεριφέρεται όπως και οι συμπυκνωτές ροής. Η μαγν. επαγωγή και οι απώλειες σιδήρου είναι υψηλότερες στα δόντια απ'ό,τι στο στήριγμα των μαγνητικών πόλων (yoke). Σύμφωνα με το παραπάνω, οι χωρίς εγκοπές μηχανές μπορούν να είναι ενδιαφέρουσες για εφαρμογές που απαιτούν υψηλές συχνότητες, όπως στους σφόνδουλους (flywheels) [Ark 1992], [Hol 2002].

Εντούτοις, σε χαμηλής ταχύτητας εφαρμογές, το πρόβλημα των, εν κενώ, απωλειών σιδήρου στα δόντια δεν θεωρείται ως σημαντικό μειονέκτημα. Ένα μειονέκτημα των χωρίς αυλακώσεων μηχανών σε μερικές περιπτώσεις, είναι η αύξηση στις απώλειες χαλκού λόγω της μαγνητικής ροής που περνά μέσα από τα τυλίγματα του στάτη, ακόμη και όταν λειτουργεί εν κενώ. Αυτή η επίδραση εγγύτητας συζητείται στη δημοσίευση [Aca 1997] και οδηγεί σε πρόσθετες απώλειες δινορρευμάτων στα τυλίγματα του στάτη.

2.5 Οι κύριοι συνδυασμοί των μηχανών με μόνιμους μαγνήτες

Τα τέσσερα χαρακτηριστικά που περιγράφονται ανωτέρω είναι λίγο πολύ ανεξάρτητα μεταξύ τους. Αυτά μπορούν να συνδυαστούν, δίνοντας 16 διαφορετικά σχέδια μηχανών με μόνιμους μαγνήτες. Ο πίνακας (2-1) απαριθμεί τους διαφορετικούς συνδυασμούς. Οι πρώτοι έξι συνδυασμοί που βρίσκονται στο πάνω μέρος του πίνακα, θεωρούνται ως οι πιο ενδιαφέρουσες από πλευράς μελέτης μηχανές και για το λόγο αυτό επιλέγουμε να μελετήσουμε την απόδοσή τους λεπτομερέστερα. Οι υπόλοιποι δέκα συνδυασμοί των μηχανών που παρατίθενται στο κάτω μέρος του πίνακα, για τους λόγους που περιγράφονται στον πίνακα, επιλέγουμε να μην τους ερευνήσουμε. Σε αυτό το σημείο, είμαστε πεπεισμένοι ότι κανένα πρόσθετο όφελος δεν μπορεί να ληφθεί από αυτούς τους δέκα συνδυασμούς. Οι λόγοι θα γίνουν προφανέστεροι κατά τη διάρκεια της μελέτης. Προς το παρόν, επιλέγουμε να επικεντρωθούμε μόνο στους έξι τύπους μηχανών που απαριθμούνται στον πίνακα (2-1).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-1: Διαφορετικοί συνδυασμοί τύπων μηχανών M.M.

Όνομα της Μηχανής που αναφέρεται	Ακτινωτός (R) ή Αξονικός (A)	Διαμήκης (longitudinal (L)) ή Εγκάρσιος (transverse (T))	Επιφανειακής τοποθέτησης (SM) M.M. ή Συγκέντρωσης ροής (FC) M.M.	Με εγκοπές (S) ή χωρίς (SL)	Σχόλια
Συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M.	R	L	SM	S	Θα αναλυθεί περαιτέρω
Συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. με συγκέντρωση ροής	R	L	FC	S	Θα αναλυθεί περαιτέρω
Μηχανή M.M. αξονικής ροής με εγκοπές	A	L	SM	S	Θα αναλυθεί περαιτέρω
TORUS	A	L	SM	SL	Θα αναλυθεί περαιτέρω
Μηχανή εγκάρσιας ροής Επιφανειακής τοποθέτησης M.M.	R	T	SM	S	Θα αναλυθεί περαιτέρω
Μηχανή εγκάρσιας ροής με M.M. με συγκέντρωση ροής	R	T	FC	S	Θα αναλυθεί περαιτέρω

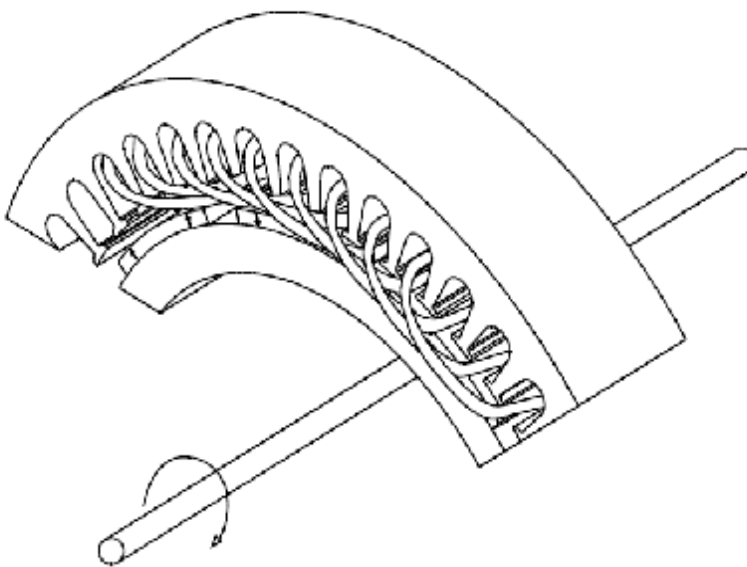
Όνομα της Μηχανής που αναφέρεται	Ακτινωτός (R) ή Αξονικός (A)	Διαμήκης (Longitudinal (L)) ή Εγκάρσιος (transverse (T))	Επιφανειακής τοποθέτησης (SM) M.M. ή Συγκέντρωσης ροής (FC) M.M.	Με εγκοπές (S) ή χωρίς (SL)	Σχόλια
Μη αναλυμένη στη διατριβη { Χωρίς ονομα}	R	L	SM/FC	SL	<i>Κανένα πλεονέκτημα δεν αναμένεται από πλευράς μείωσης υλικών. Το μεγάλο διάκενο θα οδηγήσει σε μεγαλύτερους μαγνήτες. Η συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. θα προτιμηθεί.</i>
Μη αναλυμένη στη διατριβη {Χωρίς ονομα}	R	T	SM/FC	SL	<i>Ποτέ δεν έχει συζητηθεί στη βιβλιογραφία. Μη εφαρμόσιμη.</i>
Μη αναλυμένη στη διατριβη { Χωρίς ονομα}	A	L	FC	S/SL	<i>Ποτέ δεν έχει συζητηθεί στη βιβλιογραφία. Το ποσό του υλικό αναμένεται να είναι υψηλότερο ή ίσο με την ακτινωτή έκδοση.</i>
Μη αναλυμένη στη διατριβη { Χωρίς ονομα}	A	T	SM/FC	SL	<i>Ποτέ δεν έχει συζητηθεί στη βιβλιογραφία. Μη εφαρμόσιμη.</i>
Μη αναλυμένη στη διατριβη { Χωρίς ονομα}	A	T	SM/FC	S	<i>Ποτέ δεν έχει συζητηθεί στη βιβλιογραφία. Το ποσό του υλικό αναμένεται να είναι υψηλότερο ή ίσο με την ακτινωτή έκδοση.</i>

2.6 Οι μηχανές μονίμων μαγνητών που εξετάζονται

Σε αυτό το τμήμα, οι έξι μηχανές M.M. που προσδιορίζονται στον πίνακα (2-1) θα περιγραφούν.

2.6.1 Η συμβατική σύγχρονη μηχανή με μόνιμους μαγνήτες

Αυτή η μηχανή φαίνεται στην εικόνα (2-8). Αυτός ο τύπος μηχανής έχει περιγραφεί με διαφορετικά ονόματα σε διάφορες δημοσιεύσεις. Ερευνητές όπως [Lam 2000] και [Gra 1996b] έχουν αναφερθεί σε αυτή με το όνομα “Μηχανή M.M., ακτινωτής ροής, με επιφανειακής τοποθέτησης μόνιμους μαγνήτες”, οι ερευνητές [Pol 1998], [Sle 1992] την έχουν περιγράψει με το όνομα “Μηχανή M.M.” και ο [Had 1999] έχει μιλήσει για την “Σύγχρονη μηχανή M.M.”. Από τα τέσσερα χαρακτηριστικά που μπορούν να δοθούν σε μια μηχανή και τους προκύπτοντες 11 συνδυασμούς, φαίνεται ότι κανένα από αυτά τα ονόματα δεν περιγράφει ακριβώς τη μηχανή που διευκρινίζεται στην εικόνα (2-8). Επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε το όνομα “Συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M.” σε όλη τη μελέτη, δεδομένου ότι αυτή η τοπολογία της μηχανής είναι λίγο πολύ ο πιο κοινός τύπος μηχανής μονίμων μαγνητών. Η ιδιότητα “Συμβατική” πρέπει να είναι επαρκής για να αναφερθεί στην γεωμετρία των μόνιμων μαγνητών που παρουσιάζεται στην εικόνα (2-8).



ΕΙΚΟΝΑ 2-8: Συμβατική σύγχρονη μηχανή μόνιμων μαγνητών

Αυτή είναι μια μηχανή με ακτινωτό (R) διάκενο, διαμήκη (L) στάτη με εγκοπές (S) και επιφανειακής τοποθέτησης (SM) μόνιμους μαγνήτες. Πρέπει να τονιστεί ότι προηγούμενες δημοσιεύσεις: [Dub 2000], [Dub 2001a], [Dub 2001b], [Dub 2002a] έχουν αναφερθεί συχνά σε αυτόν τον τύπο μηχανών με το όνομα “Ακτινωτής ροής μηχανή M.M.”, αλλά στο πεδίο της μελέτης προτιμάμε τη χρήση του ονόματος “Συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M.”.

Στην εικόνα (2-8), το παράδειγμα παρουσιάζει έναν τριφασικό στάτη, με μια εγκοπή ανά φάση και ανά πόλο. Τα τυλίγματα είναι τυλίγματα δύο στρωμάτων, με δύο αγωγούς ανά εγκοπή. Αυτή είναι η ίδια ρύθμιση τυλιγμάτων που συζητείται και στη δημοσίευση [Gra 1996b].

2.6.2 Η συμβατική σύγχρονη μηχανή μόνιμων μαγνητών με συγκέντρωση ροής

Η εικόνα (2-9) παρουσιάζει μια μηχανή M.M. με ακτινωτό (R) προσανατολισμό διακένου, διαμήκη (L) με εγκοπές (S) στάτη και μόνιμους μαγνήτες με συγκέντρωση ροής (FC). Αυτή η μηχανή περιγράφεται στις [Spo 1996], [Sen 1997], οι οποίες χρησιμοποιούν διαφορετικά ονόματα για την περιγραφή. Επειδή ο στάτης είναι παρόμοιος με τη συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M., επιλέγουμε το όνομα: “Συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. με συγκέντρωση ροής”. Όπως επισημαίνεται στη [Spo 1996], η συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. με συγκέντρωση ροής επιτρέπει μια μαγνητική επαγωγή στο διάκενο υψηλότερη από την παραμένουσα μαγνητική επαγωγή των M.M.. Αυτό το χαρακτηριστικό παρέχει ενδιαφέρουσες δυνατότητες για τους φερριτικούς μαγνήτες, αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί των άλλων κατηγοριών μαγνητών οι οποίοι είναι πιο δαπανηροί.

Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτής της γεωμετρίας μηχανών είναι η παρουσία προεξοχών (saliency), οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν μια πρόσθετη ροπή (reluctance torque) η οποία αυξάνει το εύρος της ταχύτητας στις εφαρμογές των μηχανών με επέκταση του πεδίου εξασθένησης (field-weakening range), [Sen 1997]. Εντούτοις, είτε είναι,



είτε όχι, αμφισβητήσιμη η έννοια εξασθένηση ροής, είναι κατάλληλη για να περιγράψει το φαινόμενο που δημιουργείται στις γεννήτριες των α/γ.

ΕΙΚΟΝΑ 2-9: Συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M., με συγκέντρωση ροής (flux concentration)

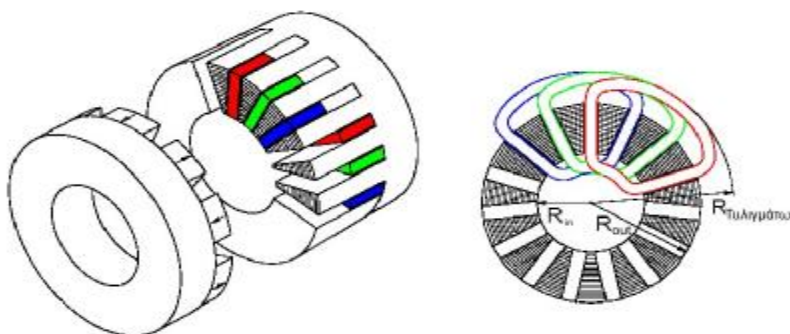
Αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι οικονομικοί φερριτικοί μαγνήτες, προκύπτουν και άλλα πλεονεκτήματα από τη χρήση αυτής της γεωμετρίας των μηχανών. Καμία δημοσίευση δεν έχει βρεθεί που να παρέχει μια περιεκτική σύγκριση του κόστους ή της μάζας με τη συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M.. Εάν φερριτικοί μαγνήτες χρησιμοποιούνται, μπορούμε να αναμένουμε

υψηλότερη μάζα για δεδομένη ροπή λόγω της αύξησης της ποσότητας του μαγνητικού υλικού. Κατά συνέπεια καμία εξοικονόμηση μάζας δεν αναμένεται απο αυτή τη γεωμετρία. Όσον αφορά το κόστος, δεν είναι σαφές εάν αυτή η γεωμετρία μπορεί να έχει κάποιο πλεονέκτημα. Στο κεφάλαιο 1, αναφέραμε ότι η ευκολία της κατασκευής είναι ένα σημαντικό ζήτημα. Από αυτή την άποψη, η συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. με συγκέντρωση ροής δεν είναι ανώτερη από την συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M.. Η συγκέντρωση ροής στο δρομέα, της εικόνας (2-9) θα αυξήσει πιθανώς την πολυπλοκότητα της κατασκευής της. Σε υψηλών ταχυτήτων εφαρμογές, αυτή η τοπολογία μπορεί να επιτρέψει καλύτερο περιορισμό των μαγνητών έναντι της συμβατικής σύγχρονης μηχανής M.M.. Στην περίπτωση γεννήτριας άμεσης κίνησης για εφαρμογή της σε α/γ, η περιστροφική ταχύτητα είναι χαμηλή και ο περιορισμός των μαγνητών δεν αποτελεί κύριο μέλημα.

2.6.3 Η μηχανή μονίμων μαγνητών, αξονικής ροής, με εγκοπές

Η μηχανή M.M., αξονικής ροής, με εγκοπές παρουσιάζεται στην εικόνα (2-10). Ο όρος “Μηχανή M.M., αξονικής ροής, με εγκοπές” δεν είναι πάλι επαρκής για να περιγράψει εξ’ ολοκλήρου αυτή τη γεωμετρία μηχανών, αλλά θα χρησιμοποιηθεί στη εργασία και θα αναφερθεί στην γεωμετρία με αξονικό (A) προσανατολισμό διακένου, στάτη με εγκοπές (S), με διαμήκη (L) προσανατολισμό και επιφανειακής τοποθέτησης μόνιμους μαγνήτες.

Αυτή η μηχανή έχει περιγραφεί στις δημοσιεύσεις [Let 1997], [Pro 2000], [Sah 2001]. Η τρίτη δημοσίευση [Sah 2001] περιγράφει μια μηχανή παρόμοια με αυτήν που παρουσιάζεται στην εικόνα (2-10).



ΕΙΚΟΝΑ 2-10: Μηχανή M.M., αξονικής ροής (axial-flux), με εγκοπές

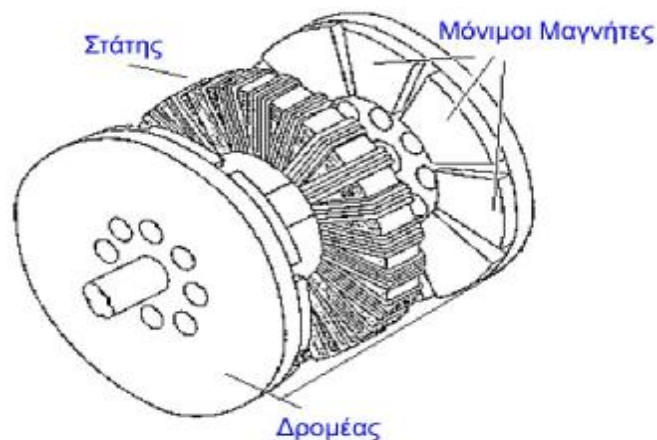
Οι δύο πρώτες δημοσιεύσεις περιγράφουν μια μηχανή με έναν διπλής όψης (double-sided) στάτη. Πολλοί ερευνητές όπως [Zha 1996], [Sit 2000], έχουν δώσει έμφαση στο μέγεθος της μηχανής M.M., αξονικής ροής, με εγκοπές. Για δεδομένη εξωτερική διάμετρο και δεδομένη ονομαστική ροπή, η μηχανή μπορεί να είναι πολύ πιο μαζεμένη (compactness) από την συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. [Dub 2001a]. Σε μερικές εφαρμογές όπου μειωμένος ογκος απαιτείται, η μηχανή M.M., αξονικής ροής, με εγκοπές πρέπει να εξεταστεί. Εντούτοις, για τη

μείωση της μάζας και του κόστους, καμία δημοσίευση δεν βρέθηκε που να ερευνά τα πλεονεκτήματα κόστους ή βάρους ή τα μειονεκτήματα της μηχανής M.M., αξονικής ροής, με εγκοπές έναντι άλλων τύπων μηχανών μονίμων μαγνητών.

Μια κατάλληλη ανάλυση της μηχανής M.M., αξονικής ροής, με εγκοπές, πρέπει επίσης να δώσει έμφαση στις δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά την κατασκευή της. Ο πυρήνας των στατών αποτελεί ένα μεγάλο κατασκευαστικό πρόβλημα. Ο πυρήνας στατών πρέπει να τοποθετηθεί σε στρώματα, δηλαδή να ελασματοποιηθεί, σε ένα πλάνο παράλληλο στην κατεύθυνση της κίνησης και παράλληλο στον περιστροφικό άξονα, όπως φαίνεται στην εικόνα (2-10). Σε μια μηχανή χωρίς εγκοπές, αυτό μπορεί να γίνει εύκολα με το τύλιγμα μιας ταινίας χάλυβα πάνω της. Εντούτοις, στη μηχανή με εγκοπές, το πλάτος του δόντιου πρέπει να είναι στην εξωτερική ακτίνα του στάτη ευρύτερο, απ'ό,τι στην εσωτερική ακτίνα. Αυτό το ζήτημα πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά κατά την κατασκευή της μηχανής M.M., αξονικής ροής, με εγκοπές.

2.6.4 Η TORUS (Σπειροειδής) μηχανή μονίμων μαγνητών

Η *TORUS* μηχανή παρουσιάζεται στην εικόνα (2-11). Η μηχανή, με αξονικά προσανατολισμένο (A) διάκενο, διαμήκη (L) χωρίς εγκοπές (SL) στάτη, έχει δύο δίσκους δρομέα και ένα δακτυλιοειδή στάτη (toroidally-wound). Αυτή η μαγνητική μηχανή συζητήθηκε μέσω στις δημοσιεύσεις [*DiN 1991*], [*Sti 1992*], [*Söd 1997*], [*Hua 1999*].



ΕΙΚΟΝΑ 2-11: Η μηχανή *TORUS*

Διαφορετικά ονόματα έχουν δοθεί σε αυτήν την γεωμετρία μηχανών, αλλά στην εργασία, θα υιοθετήσουμε το όνομα "*TORUS*", το οποίο προτάθηκε στη δημοσίευση [*Spo 1992b*]. Στην *TORUS* οι μόνιμοι μαγνήτες είναι επιφανειακής τοποθέτησης (SM) στους δίσκους των δρομέων με S-N-S-N-κ.λπ... τοποθέτηση. Οι νότιοι πόλοι βλέπουν ο ένας τον άλλο, ομοίως και οι βόρειοι πόλοι. Ο στάτης έχει μια πολύ απλή κατασκευή. Διαμορφώνεται από μια μονωμένη ταινία χάλυβα, η οποία είναι ακτινωτή (radially-wound). Ωστόσο, αυτή η τοπολογία έχει τα ακόλουθα μειονεκτήματα :

- ◇ Μεγάλο πλάτος διακένου λόγω της απουσίας δοντιών, που οδηγεί σε μεγάλο ύψος μαγνητών και συνεπώς σε υψηλό κόστος, όπως επισημαίνεται μέσα στη δημοσίευση [**Spo 1996**]
- ◇ Η πυκνότητα του χαλκού είναι περιορισμένη λόγω εσωτερικής (σπειροειδούς) διαμέτρου που είναι χαμηλότερη από τη συνολική (σπειροειδή) διάμετρο.
- ◇ Οι αγωγοί κοντά στην εσωτερική (σπειροειδή) διάμετρο συμβάλλουν λιγότερο στην παραγωγή ισχύος, λόγω της χαμηλότερης επαπτομενικής ταχύτητας, αν και συμβάλλουν εξίσου στις απώλειες χαλκού, όπως επισημαίνεται μέσα στη δημοσίευση [**DiN 1991**].

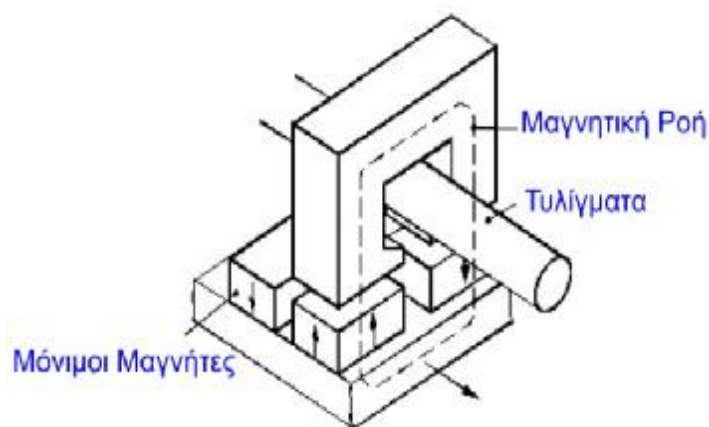
Τα τελευταία δύο χαρακτηριστικά ισχύουν και για τη μηχανή M.M., αξονικής ροής, με εγκοπές. Όπως και προϋγουμένος, δεν υπάρχει ικονοποποιητική έρευνα στην εξοικονόμηση του κόστους και της μάζας έναντι άλλων τύπων μηχανών. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι η *TORUS* μηχανή είναι ίσως μια από τις πιο εύκολες προς κατασκευή μηχανή.

2.6.5 Η μηχανή εγκάρσιας ροής, μονίμων μαγνητών επιφανειακής τοποθέτησης

Η μηχανή εγκάρσιας ροής με επιφανειακής τοποθέτησης μόνιμους μαγνήτες παρουσιάζεται στην εικόνα (2-12). Δημοσιεύσεις όπως [**Har 1993**] έχουν συζητήσει τη γεωμετρία αυτών των μηχανών. Αν και η αξονική έκδοση είναι θεωρητικά δυνατή να κατασκευαστεί, υποτίθεται στην εργασία ότι η μηχανή εγκάρσιας ροής με επιφανειακής τοποθέτησης μόνιμους μαγνήτες έχει ένα ακτινωτό (R) προσανατολισμό διακένου και έχει στάτη με εγκοπές με έναν εγκάρσιο (T) προσανατολισμό. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.4.2 ότι ο εγκάρσιος προσανατολισμός του πυρήνα του στάτη επιτρέπει στην περιοχή των τυλιγμάτων να είναι ανεξάρτητα επιλεγμένη από την τιμή του πολικού βήματος. Το πολικό βήμα μπορεί να πάρει πολύ μικρές τιμές 1 με 2 cm και συνεπώς το ρεύμα λειτουργίας μπορεί να φθάσει σε πολύ υψηλές τιμές.

Από την εικόνα (2-12), διαπιστώνεται ότι μόνο το μισό τμήμα των πόλων των δρομέων συμβάλουν στην παραγωγή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης στο τύλιγμα των στατών. Οι μόνιμοι μαγνήτες που βλέπουν άμεσα τους πυρήνες των στατών δημιουργούν μια ωφέλιμη ροή γύρω από τα πηνία των στατών, αλλά το τμήμα των M.M. που δεν βλέπουν τους πυρήνες των στατών ανταλλάσσουν τη ροή τους μέσω του αέρα. Χαρακτηριστικό που δεν παρατηρείται σε άλλες γεωμετρίες μηχανών. Εάν το πολικό βήμα, της μηχανής εγκάρσιας ροής με επιφανειακής τοποθέτησης μόνιμους μαγνήτες, γίνει αρκετά μικρό, η αύξηση στο ρεύμα λειτουργίας μπορεί ενδεχομένως να αντισταθμίσει αυτό το πρόβλημα. Η παρουσία μικρού πολικού βήματος και η επιφανειακή σύνδεση των μονίμων μαγνητών αυξάνει το αποτελεσματικό πάχος διακένου και αυξάνει συνεπώς την επίδραση της αντίδρασης του οπλισμού.

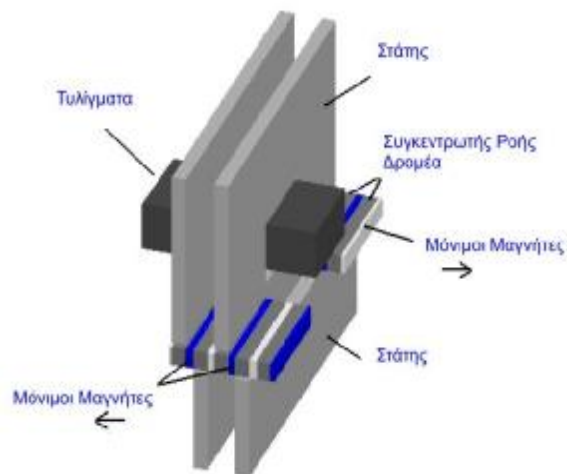
Όπως έχει συζητηθεί στη δημοσίευση [Har 1996], ένα μεγάλο μέρος της ροής του οπλισμού διαρρέει έξω από την περιοχή του πόλου και ένα μεγάλο μέρος της ροής που δημιουργείται από τους Μ.Μ. δεν πηγαίνει στον πυρήνα των στατών, αλλά διαρρέει προς τους γειτονικούς



μαγνήτες. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της εν κενώ μαγνητικής επαγωγής στον πυρήνα των στατών και συνεπώς τη μείωση της διαθέσιμης εν κενώ τάσης. Άλλες παραλλαγές της μηχανής εγκάρσιας ροής με επιφανειακής τοποθέτησης μόνιμους μαγνήτες, έχουν συζητηθεί στις [Weh 1986], [Bor 1996].

ΕΙΚΟΝΑ 2-12: Μηχανή εγκάρσιας ροής με επιφανειακής τοποθέτησης μόνιμους μαγνήτες

2.6.6 Η μηχανή εγκάρσιας ροής, με μόνιμους μαγνήτες συγκέντρωσης ροής



Η μηχανή εγκάρσιας ροής με Μ.Μ. με συγκέντρωση ροής παρουσιάζεται στην εικόνα (2-16). Στην εργασία, θα αναφερθούμε μόνο στη διαμόρφωση ακτινωτού (R) διακένου και όχι στο αξονικό. Η μηχανή εγκάρσιας ροής με Μ.Μ. με συγκέντρωση ροής που παρουσιάζεται στην εικόνα (2-16) έχει συζητηθεί στη [Weh 1995], αλλά βρίσκουμε και σε άλλες δημοσιεύσεις διάφορες παραλλαγές βασισμένες στις ίδιες αρχές.

ΕΙΚΟΝΑ 2-16: Η μηχανή εγκάρσιας ροής με Μ.Μ. με συγκέντρωση ροής

Η μηχανή εγκάρσιας ροής με Μ.Μ. με συγκέντρωση ροής διαφέρει κυρίως από την επιφανειακής τοποθέτησης έκδοση, από τις κατευθύνσεις της μαγνήτισης των μόνιμων μαγνητών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της διαρροής μεταξύ των παρακείμενων πόλων των δρομέων. Η χρήση της συγκέντρωσης ροής στους Μ.Μ. επιτρέπει επίσης πρόσθετους βαθμούς ελευθερίας στις διαστάσεις τους. Το πλάτος των Μ.Μ. μπορεί να αυξηθεί

χωρίς αύξηση του πολικού βήματος, το οποίο δεν ισχύει στην περίπτωση της επιφανειακής τοποθέτησης μηχανή.

2.7 Ανακεφαλαίωση

Σε αυτό το κεφάλαιο, έχουν μελετηθεί τα πλεονεκτήματα της μαγνητικής διέγερσης συγκριτικά με την περιελιγμένου δρομέα διέγερση. Η μαγνητική διέγερση παρέχει οικονομικότερους και ελαφρύτερους δρομείς για πολικό βήμα μικρότερο από 10-20 cm περίπου. Επίσης, οι μαγνητικοί δρομείς έχουν μηχανικές απώλειες, χαμηλότερες από εκείνες μιας σύγχρονης μηχανής με περιελιγμένο δρομέα (ηλεκτρικής διέγερσης). Η μεγάλη γεωμετρική ευελιξία των μονίμων μαγνητών επιτρέπει πολλές τοπολογικές παραλλαγές στις σύγχρονες μηχανές. Τέσσερα κύρια χαρακτηριστικά τονίστηκαν, τα οποία μπορούν να συνδυαστούν σε 16 γεωμετρικές μηχανών M.M.. Μεταξύ αυτών των 16 γεωμετριών, έξι έχουν περαιτέρω αναλυθεί:

- ◊ Η συμβατική σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών.
- ◊ Η συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. με συγκέντρωση ροής.
- ◊ Η μηχανή αξονικής ροής M.M, με εγκοπές.
- ◊ Η *TORUS*.
- ◊ Η μηχανή εγκάρσιας ροής επιφανειακής τοποθέτησης M.M..
- ◊ Η μηχανή εγκάρσιας ροής M.M. με συγκέντρωση ροής.

Κεφάλαιο 3



Κατηγορίες Μονίμων Μαγνητών

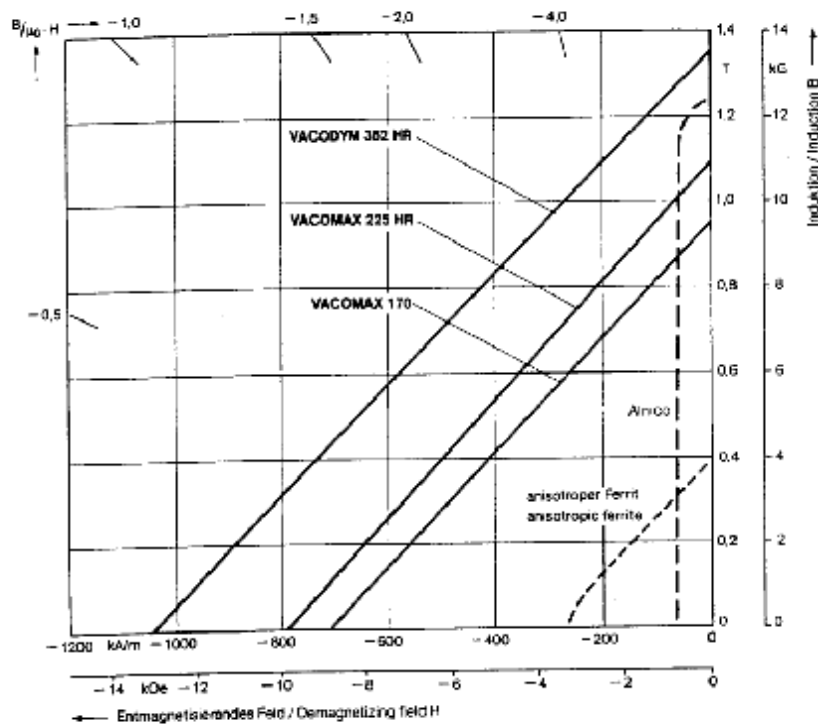
3.1 Τα υλικά των μονίμων μαγνητών

Η ροή μέσα στις μηχανές μονίμων μαγνητών δημιουργείται από τους ίδιους τους μαγνήτες. Η εσωτερικά παραγόμενη τάση της γεννήτριας και η ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα είναι ανάλογες της παραγόμενης μαγνητικής ροής της μηχανής. Η μαγν. ροή είναι σαφώς μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους στον σχεδιασμό μιας τοπολογίας. Η ροή προορίζεται να εμπλέξει του μαγνήτες με τις σπείρες των τυλιγμάτων της φάσης στο στάτη. Οι σπείρες βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στους μαγνήτες έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διαρροή των μαγνητών από τον Βόρειο (N) στο Νότιο (S) πόλο

Τόσο ο στάτης, όσο και ο δρομέας λόγω των υλικών κατασκευής τους απορροφούν πολύ μικρό μέρος της μαγνητεγερτικής δύναμης (MMF) που δημιουργείται από τους μαγνήτες και συνεπώς το μεγαλύτερο μέρος της χρησιμοποιείται για να οδηγήσει τη μαγνητική ροή στο διάκενο. Οι εγκοπές είναι ένας πάρα πολύ καλός τρόπος για να επιτευχθεί ένα στενό μήκος διακένου κρατώντας τα τυλίγματα της φάσης κοντά στους μαγνήτες. Επιπλέον, η κατασκευή με αυλακώσεις παρέχει μια στέγαση για τα τυλίγματα και αυξάνει την επαφή της επιφάνειας μεταξύ των τυλιγμάτων και των επιφανειών του δρομέα και του στάτη παρέχοντας ένα δρόμο χαμηλής θερμικής αντίστασης που είναι σημαντικό στη διατήρηση των τυλιγμάτων σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Το μαγνητικό υλικό (της κατασκευής του στάτη και του δρομέα) δεν έχει απεριόριστη χωρητικότητα για τη μεταφορά μαγνητικής ροής. Εάν η μαγνητική επαγωγή υπερβαίνει περίπου τα 1.6-1.7 T, η μαγνητική διαπερατότητα μειώνεται γρήγορα. Για μαγνητική επαγωγή περίπου 2.1 T, η μαγν. διαπερατότητα του μαλακού μαγνητικού υλικού είναι ουσιαστικά η ίδια με αυτή του αέρα. Μια μαγνητική σχεδίαση, πρέπει να διασφαλίσει ότι η μαγνητική επαγωγή στο μαλακό μαγνητικό υλικό διατηρείται κάτω από ορισμένα θερμοκρασιακά επίπεδα, διαφορετικά η μαγνητεγερτική δύναμη που προκαλείται από τους μαγνήτες θα σπαταληθεί στην οδήγηση της ροής μέσω του μαλακού μαγνητικού υλικού.

3.2 Είδη μαγνητών



ΕΙΚΟΝΑ 3-1: Χαρακτηριστικά μαγνητών*
* Πηγή VACUUMSCHMEIZE GmbH

Στις παρακάτω παραγράφους θα παρατεθούν οι βασικές κατηγορίες των μονίμων μαγνητών που χρησιμοποιούνται στις γεννήτριες. Ο πίνακας (3-1) αποτελείται από τις χονδρικές τιμές αγοράς ανά κυβικό εκατοστόμετρο και ανά γραμμάριο για τα διάφορα είδη μαγνητών.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1: Ενδεικτικές τιμές για τις διάφορες κατηγορίες μαγνητών*

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΜΑΓΝΗΤΗ	ΤΙΜΗ/cm ³	ΤΙΜΗ/gr
Nd-Fe-B	4.52	0.60
SmCo ₅ : Sm ₂ Co ₁₇	19.30-33.60	2.30-4.00
Φερριτικοί	0.30-0.44	0.06-0.09
Al-Ni-Co	5.00-6.30	0.70-0.90

* Τα τελευταία χρόνια η τιμή των μαγνητών σπανίων γαιών μειώνεται συνεχώς λόγω της ανάπτυξης νέων τεχνολογιών κατά την παραγωγή τους. Οι τιμές μεταβάλλονται συνεχώς για αυτό και είναι ενδεικτικές.

3.2.1 Οι κατηγορίες μαγνητών: Nd-Fe-B (VACODYM)

Ο Nd-Fe-B (VACODYM) μαγνήτης έχει καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με άλλα είδη, επειδή έχει μεγάλες τιμές παραμένουσας μαγνητικής επαγωγής B_r και απομαγνητίζουσας δύναμης (coercive force) H_C . Είναι οι μαγνήτες σπανίων γαιών. Οι τιμές αυτής της κατηγορίας μαγνητών είναι:

- ◇ B_r μεταξύ 1.0 - 1.35 T.
- ◇ H_C μεταξύ 760 και 1020 kA/m.
- ◇ Η μέγιστη ειδική μαγνητική ενέργεια (maximum specific magnet energy) $(BH)_{max}$ είναι περίπου 190-320 kJ/m³.

Στο Παράρτημα B* παρέχονται ορισμένες, επιπλέον πληροφορίες για τους (VACODYM) μαγνήτες

3.2.2 Οι κατηγορίες μαγνητών: Ανισότροποι Στερεοί Φερρίτες (anisotropic solid ferrites)

Για τους ανισότροπους στερεούς φερρίτες ισχύουν οι ακόλουθες τιμές:

- ◇ B_r : 0.33 - 0.4 T.
- ◇ H_C : 150-260 kA/m.
- ◇ $(BH)_{max}$: 14.3-29.5 kJ/m³.

Π.χ. Οι φερρίτες έχουν χαμηλή παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_r και απομαγνητίζουσα δύναμη H_C σε σύγκριση με τους μαγνήτες σπανίων γαιών. Κατά συνέπεια, η $(BH)_{max}$ είναι 10-11 φορές μικρότερη. Αυτό σημαίνει ότι για γεννήτριες με παρόμοια χαρακτηριστικά (ονομαστική ισχύ, αποδοση κ.λπ.) και βελτιστοποιημένο σύστημα μαγνητών που χρησιμοποιούνται κοντά στο σημείο, που αντιστοιχεί στο $(BH)_{max}$, έχει σαν αποτέλεσμα, να αυξάνεται αναλόγως ο όγκος των φερριτιτών, έναντι του όγκου των μαγνητών σπανίων γαιών. Το συνολικό βάρος της γεννήτριας που έχει φερριτικούς μαγνήτες αυξάνεται σημαντικά λόγω των μεγαλύτερων διαστάσεων των δρομέων. Επιπλέον, η χαμηλή τιμή της παραμένουσας μαγνήτισης B_r περίπου 0.4 T, απαιτεί ειδική τοποθέτηση των μαγνητών προκειμένου να συγκεντρωθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η μαγνητική ροή μέσα στο διάκενο.

3.2.3 Οι κατηγορίες μαγνητών: Sm-Co (VACOMAX)

Για ίδιες θερμοκρασιακές συνθήκες (περίπου 25 °C), οι Sm-Co ομάδα μαγνητών (VACOMAX) έχουν τιμές:

- ◇ B_r : 0.9-1.1 T.
- ◇ H_C : 660–820 kA/m.
- ◇ και $(BH)_{max}$: 160-225 kJ/m³.

Είναι προφανές, ότι αυτοί οι μαγνήτες με την ίδια γεωμετρία και παρόμοιες συνθήκες λειτουργίας, παράγουν μικρότερη μαγνητική ροή στο διάκενο σε σχέση με τους (VACODYM) τύπους.

3.2.4 Οι κατηγορίες μαγνητών: Al-Ni-Co (Αλουμινίου-νικελίου-κοβαλτίου)

Το κύριο μειονέκτημα των Al-Ni-Co μαγνητών είναι η χαμηλή απομαγνητίζουσα δύναμη

- ◇ H_C : 35-150 kA/m.
- ◇ με B_r : 0.8-1.35 T.
- ◇ και $(BH)_{max}$: 36-80 kJ/m³.

Συγκρίνοντας τους με τους μαγνήτες σπανίων γαιών, η μέγιστη ειδική μαγνητική ενέργεια, παραγόμενη από τους Al-Ni-Co είναι 4 με 9 φορές μικρότερη. Για να δημιουργήσουν την ίδια μαγνητική επαγωγή στο διάκενο, όπως οι (VACODYM) μαγνήτες, οι Al-Ni-Co μαγνήτες πρέπει να έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις (κυρίως ύψος). Επιπλέον, οι Al-Ni-Co τύποι μαγνητών, όπως και οι φερριτικοί, έχουν μη γραμμικά χαρακτηριστικά και μπορούν να απομαγνητιστούν κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μαγνητικής ενέργειας τους, γεγονός που οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση του όγκου κατά 30-40 %.

3.3 Συμπεράσματα και επιλογή του τύπου μαγνήτη

Από την παρουσίαση φαίνεται, ότι το Nd-Fe-B σύστημα μαγνητών είναι καλύτερο από πλευράς κριτηρίων διαστάσεων και βάρους. Μειώνει τον όγκο και τη μάζα των μαγνητών, τα εξαρτήματα του δρομέα (rotor fittings) και βελτιώνει την τεχνολογία της κατασκευαστικής διαδικασίας. Η χρήση ενός φερριτικού συστήματος μαγνητών έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού όγκου του συστήματος, κατά μέσο όρο 16 φορές, σε σχέση με τον όγκο ενός Nd-Fe-B τύπου για την παραγωγή ίδιας ισχύος. Τεχνικές παράμετροι και αξίες άλλων συστημάτων

μαγνητών, όπως *Sm-Co* και *Al-Ni-Co* δεν πλεονεκτούν για χρήση τους σε μια γεννήτρια μονίμων μαγνητών.

Επομένως, τα *Nd-Fe-B* (καλύτερη απόδοση, χαμηλό βάρος και μικρές διαστάσεις) μαγνητικά συστήματα μπορούν να εξεταστούν και να προτιμηθούν για χρήση σε μια γεννήτρια μονίμων μαγνητών. Τα φερριτικά μαγνητικά συστήματα έχουν μεγάλο όγκο γεγονός που καθιστά το δρομέα βαρύτερο λόγω του αυξημένου βάρους των μαγνητών και των εξαρτημάτων, αλλά είναι η πιο φθηνή κατηγορία από πλευράς κόστους. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η τιμή αγοράς μαγνητών σπανίων γαιών σταδιακά μειώνεται, είναι λογικό να ελαχιστοποιηθεί η μάζα της γεννήτριας με την επιλογή ενός μαγνητικού συστήματος βασισμένο σε *Nd-Fe-B*.

Κεφάλαιο 4



Σύγκριση Τοπολογιών

4.1 Εισαγωγή

Έξι τοπολογίες μηχανών μονίμων μαγνητών επιλέχθηκαν στο κεφάλαιο 2 για περαιτέρω ανάλυση:

- ◇ Η συμβατική σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών.
- ◇ Η συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. με συγκέντρωση ροής.
- ◇ Η μηχανή αξονικής ροής M.M, με εγκοπές.
- ◇ Η *TORUS*.
- ◇ Η μηχανή εγκάρσιας ροής επιφανειακής τοποθέτησης M.M..
- ◇ Η μηχανή εγκάρσιας ροής M.M. με συγκέντρωση ροής.

Σε αυτό το κεφάλαιο, η συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. θα χρησιμοποιηθεί ως μηχανή αναφοράς για τη σύγκριση τους. Οι άλλες 4 τοπολογίες θα συγκριθούν με βάση δύο κριτήρια:

- ◇ “Ροπή/μάζα”
- ◇ “Κόστος/ροπή”

Η αφθονία σε σχέδια μηχανών που παρουσιάζονται στην τρέχουσα επιστημονική βιβλιογραφία θα είναι επαρκής για να καθιερώσει ορισμένες τάσεις σχετικά με την *TORUS*, τις μηχανές M.M. εγκάρσιας ροής και τη συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. με συγκέντρωση ροής με φερριτικούς μαγνήτες. Όσο αναφορά την μηχανή M.M. αξονικής ροής με εγκοπές (*slotted axial-flux PM machine*), δεν βρέθηκαν πολλές δημοσιεύσεις για να καθοριστεί εάν αυτή η τοπολογία είναι συμφέρουσα συγκρινόμενη με αυτή της συμβατικής σύγχρονης μηχανής M.M.. Επομένως, το πρότυπο της τοπολογίας δεν συμπεριλήφθηκε στη μελέτη που ακολουθεί.

Οι πληροφορίες που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθούν για διαπιστωθούν ορισμένες τάσεις για τις έξι γεωμετρίες των μηχανών M.M., βάση των κριτηρίων εκλογής. Σε αυτό το σημείο πρέπει να υπογραμμιστεί ότι δεν είναι πρόθεση αυτής της εργασίας να προσδιορίσει πια τοπολογία είναι η καλύτερη, μιας και η τελική επιλογή καθορίζεται από τις απαιτήσεις, τις ανάγκες και το σκοπό χρήσης μιας γεννήτριας.

4.2 Κριτήρια για τη σύγκριση μεταξύ των μηχανών μονίμων μαγνητών

Όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.5, τα μαγνητικά χαρακτηριστικά των μηχανών μπορούν να συνδυαστούν με διάφορους τρόπους και να διαμορφωθούν 16 διαφορετικές τοπολογίες. Εντούτοις, στην παράγραφο 2.6, επιλέξαμε έξι από αυτές τις γεωμετρίες των μηχανών για περαιτέρω μελέτη. Εξετάζοντας ορισμένους από τους στόχους αυτής της εργασίας, οι οποίοι είναι η έρευνα για τη μείωση της μάζας και κόστους των μηχανών με

μόνιμους μαγνήτες, καθώς και η μείωση του μαγνητικού υλικού, πρέπει να καθορίσουμε τα κριτήρια για τη σύγκριση αυτών των έξι γεωμετριών των μηχανών.

Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 1, μόνο το 'ενεργό υλικό' εξετάζεται σε αυτήν την σύγκριση. Ο στόχος εδώ είναι η μείωση της μάζας και του κόστους του 'ενεργού υλικού', το οποίο αποτελείται από:

- ◊ Τους ρευματοφόρους αγωγούς (current-carrying conductors).
- ◊ Το υλικό (διαστάσεις, κατηγορία κ.τ.λ.) των μονίμων μαγνητών.
- ◊ Το χάλυβα (magnetic flux-carrying steel).
- ◊ Τον κονιοποιημένο σίδηρο (όπου χρησιμοποιείται).

Το 'ενεργό υλικό' είναι μόνο ένα τμήμα της κατασκευής των μηχανών και αποτελεί μόνο ένα μέρος του συνολικού κόστους των μηχανών. Κατά τη δημοσίευση [*Gra 1996b*], αναφέρονται οι επιρροές των διαστάσεων των μηχανών (διάμετρος και μήκος) στο κόστος της μηχανής και στη δομή. Σύμφωνα με τον ίδιο ερευνητή, η ανάλυση δεν είναι λεπτομερής. Εντούτοις, τονίζεται ότι οι διαστάσεις των μηχανών θα ασκήσουν επίδραση στο συνολικό κόστος των μηχανών αλλά στην εγασία αυτή δεν λαμβάνονται υπόψη.

☉ *Γιατί απαιτείται 'ενεργό υλικό' σε μια ηλεκτρική μηχανή; Ποιος είναι ο σκοπός του;*

Εμπειρικά γνωρίζουμε ότι αγωγοί απαιτούνται για να φέρουν το ηλεκτρικό ρεύμα και ότι ο χάλυβας και οι μαγνήτες απαιτούνται για να φέρουν και να παραγάγουν τη μαγνητική ροή που απαιτείται στην ηλεκτρομηχανική μετατροπή. Κατά συνέπεια, το 'ενεργό υλικό' είναι απαραίτητο για τη μετατροπή της μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική ισχύ. Δεδομένου ότι το 'ενεργό υλικό' και η ηλεκτρική ισχύς συσχετίζονται, μπορούμε να αναρωτηθούμε εάν η αναλογία ηλεκτρικής ισχύος πάνω στη μάζα του 'ενεργού υλικού' θα μπορούσε να είναι μια ενδιαφέρουσα βάση για τη σύγκριση των μηχανών. Ο τύπος της μηχανής M.M που θα έχει την καλύτερη απόδοση θα έχει μια υψηλή αναλογία "ροπής/μάζας" και μια χαμηλή αναλογία "κόστους/ροπής".

Με βάση τη δήλωσή μας, ότι μόνο το 'ενεργό υλικό' εξετάζεται σε αυτή την εργασία, η ροπή ανα μάζα του 'ενεργού υλικού', επιλέγεται ως πρώτο κριτήριο. Η μείωση της μάζας του 'ενεργού υλικού' μπορεί να οδηγήσει στη μείωση του κόστους. Ωστόσο, αυτό μπορεί να μη συμβαίνει πάντα. Παραδείγματος χάριν, μια δεδομένη μηχανή με μεγάλες ποσότητες μαγνητικού υλικού μπορεί να είναι ελαφρύτερη μεν, αλλά ακριβότερη δε, από μια μηχανή με λεπτούς μαγνήτες αλλά ογκώδη στάτη. Το υψηλό συγκεκριμένο κόστος του μαγνητικού υλικού έναντι του χαμηλότερου κόστους του χαλκού και του χάλυβα κάνει τη χρήση των κριτηρίων ανεπαρκής για να κρίνει μια μηχανή M.M.. Αυτό παρακάμπτεται δίνοντας ένα συγκεκριμένο κόστος σε κάθε τύπου υλικού:

- ◊ Συγκεκριμένο κόστος του χαλκού $c_{Cu} = 6$ Euros/kg.

- ◇ Συγκεκριμένο κόστος του ελασματοποιημένου χάλυβα και κονιοποιημένου σιδήρου $c_{Fe} = 6$ Euros/kg.
- ◇ Συγκεκριμένο κόστος των *Nd-Fe-B* μαγνητών $c_{PM1} = 40$ Euros/kg.
- ◇ Συγκεκριμένο κόστος των φερριτικών μαγνητών $c_{PM2} = 6$ Euros/kg.

Η συνολική μάζα και το κόστος του 'ενεργού υλικού' δίνονται από τις εξισώσεις:

$$C_{act} = c_{Fe}(m_{yoke} + m_{tooth} + m_r) + c_{Cu}m_{Cu} + c_{PM}m_{PM} \quad (4-1)$$

$$m_{act} = m_{yoke} + m_{tooth} + m_r + m_{Cu} + m_{PM} \quad (4-2)$$

4.3 Τάσεις στην απόδοση των μηχανών μονίμων μαγνητών: Μια βιβλιογραφική έρευνα

Σε αυτό το τμήμα, παρέχουμε μια γενική ανάλυση όσο αφορά τις αναλογίες ροπή/μάζα και κόστος/ροπή των διαφόρων μηχανών M.M.. Αυτές θα μας επιτρέψουν να παρατηρήσουμε ορισμένες τάσεις των μηχανών. Χρησιμοποιώντας τις έννοιες της πυκνότητας δύναμης (force density), του ρεύματος λειτουργίας και της μαγνητικής επαγωγής, είναι δυνατόν να ταξινομηθούν οι αναμενόμενες αποδόσεις των τοπολογιών.

4.3.1 Οι αναμενόμενες μάζες και η πυκνότητα δύναμης

Η πυκνότητα δύναμης μιας ηλεκτρικής μηχανής είναι η συνολική μέση εφαπτόμενη δύναμη (total average tangential force) \bar{F}_t , διαιρεμένη με την επιφάνεια του διακένου A_g . Η πυκνότητα δύναμης χρησιμοποιείται συχνά ως ένδειξη για την απόδοση μιας τοπολογίας επειδή είναι ανεξάρτητη από την συνολική διαστάση της μηχανής. Συσχετίζεται επίσης με την αναλογία της ροπής ανα όγκο διακένου όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\bar{F}_t}{A_g} = \frac{\bar{F}_t}{2pr_g l_s} = \frac{\bar{F}_t r_g}{2pr_g l_s r_g} = \frac{\bar{T}_t}{2V_g} \quad (4-2)$$

Στις περισσότερες περιπτώσεις, μια μηχανή με υψηλή πυκνότητα δύναμης θα έχει επίσης μια υψηλή τιμή της πυκνότητας ροπής (η ροπή διαιρείται με το συνολικό όγκο της μηχανής). Δεδομένου ότι ο όγκος και η μάζα συσχετίζονται, μια υψηλή πυκνότητα δύναμης αναμένεται να δώσει καλή απόδοση από πλευράς αναλογίας ροπής/μάζας και αναλογίας κόστους/ροπής. Η πυκνότητα δύναμης μπορεί εκφραστεί με βάση των παραμέτρων των ηλεκτρικών μηχανών [Mil 1989]:

$$\frac{\bar{F}_t}{A_g} = k_{exc} k_{topo} AB_g \quad (4-3)$$

Όπου:

- ◇ Το ρεύμα λειτουργίας A έχει καθοριστεί από την εξίσωση (2-2) (Παράγραφος 2.4.2).
- ◇ Η σταθερά k_{exc} εξαρτάται από τις κυματομορφές των A και B_g (και συνεπώς από τις κυματομορφές του ρεύματος και της τάσης, αλλά και από την γωνία φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος. Υποθέτουμε ότι για όλους τους τύπους των μηχανών, ότι έχουν παρόμοιες κυματομορφές ρευμάτων και τάσης, με ίσες γωνίες φάσεων. Κατά συνέπεια και ίσες τιμές k_{exc} υποτίθεται για όλους τους τύπους των μηχανών.
- ◇ Η σταθερά k_{topo} εξαρτάται από την τοπολογία κάθε μηχανής. Για τις περισσότερες μηχανές M.M. εγκάρσιας ροής, η k_{topo} είναι μικρότερη από 1 επειδή δεν δημιουργούν όλοι οι μόνιμοι μαγνήτες μια χρήσιμη ροή στο διάκενο. Για τις τέσσερις διαμήκης τοπολογίες των μηχανών που περιγράφονται ανωτέρω, η λαμβάνεται $k_{topo}=1$.

Τα ακόλουθα σχόλια μπορούν να γίνουν σχετικά με την αναμενόμενη πυκνότητα δύναμης των μηχανών M.M. εγκάρσιας ροής, της *TORUS* και της συμβατικής σύγχρονης μηχανής M.M. με συγκέντρωση ροής που χρησιμοποιεί φερριτικούς μαγνήτες.

4.3.2 Το ρεύμα λειτουργίας για τους εγκάρσιους και διαμήκεις στάτες με εγκοπές

Το ρεύμα λειτουργίας A από έναν στάτη με εγκάρσιο προσανατολισμό μπορεί να είναι μέχρι και 10 φορές υψηλότερο απ'ό,τι για έναν διαμήκη στάτη με εγκοπές [*Weh 1986*]. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο διαθέσιμο διάστημα για τον χαλκό στις αυλακώσεις ενός εγκάρσιου στάτη. Αντιθέτως, σε έναν διαμήκη στάτη η περιοχή των εγκοπών μειώνεται ουσιαστικά καθώς το πολικό βήμα μειώνεται.

Αν και το ρεύμα λειτουργίας A μπορεί να δεκαπλασιαστεί, η k_{topo} της μηχανής M.M. εγκάρσιας ροής είναι περίπου η μισή από αυτή μιας διαμήκους μηχανής. Συνεπώς, αναμένεται ότι η πυκνότητα δύναμης μιας μηχανής M.M. εγκάρσιας ροής θα είναι μέχρι περίπου 5 φορές υψηλότερη. Σύμφωνα με την δημοσίευση [*Weh 1986*], η πυκνότητα δύναμης μιας μηχανής M.M. εγκάρσιας ροής αναφέρεται 4-5 φορές υψηλότερη απ' ότι για μια διαμήκη μηχανή. Με βάση την υψηλότερη πυκνότητα δύναμης, αναμένεται ότι οι εγκάρσιας ροής, μηχανές M.M. μπορούν να εξοικονομήσουν ουσιαστικά τη μάζα και το κόστος του απαιτούμενου “ενεργού υλικού”. Αν και το μεγάλο ρεύμα λειτουργίας A είναι ευεργετικό όσο αναφορά το κόστος και τη μάζα των μηχανών, αξίζει να αναφερθεί ότι, για δεδομένο πολικό βήμα, αύξηση του ρεύματος λειτουργίας A θα οδηγήσει σε μια αύξηση της αντίδρασης οπλισμού (*armature reaction*).

Στις α/γ άμεσης κίνησης, η μεγάλη αντίδραση οπλισμών θα οδηγήσει σε υψηλότερη εκτίμηση του ηλεκτρονικού ανορθωτή (electronic rectifier) που συνδέεται με τη γεννήτρια, η όποια με την σειρά της θα αυξήσει το συνολικό κόστος του συστήματος. Μια πλήρης βελτιστοποίηση συστημάτων πρέπει να λάβει υπόψη το κόστος της ηλεκτρικής ισχύος. Εντούτοις, αυτό δεν αναλυεται μεσα στην εργασία, λόγω των πολύ υψηλότερων δαπανών των μηχανών. Στο παράρτημα Δ* αναλύεται η αντίδραση οπλισμού.

4.3.3 Η μάζα του υλικού των μαγνητών σε μια μηχανή χωρίς εγκοπές

Στο παράρτημα Α*, το πλάτος h_{PM} των μονίμων μαγνητών σε μια επιφανειακής τοποθέτησης μηχανή δίνεται από:

$$h_{PM} = g \frac{B_g}{B_r - B_g} \quad (4-4)$$

Υποθέτοντας ότι όλες οι μαγνητικές ροές είναι γραμμικές (κινούνται σε ευθεία γραμμή), σε μια μηχανή χωρίς εγκοπές, η εν κενώ μαγνητική επαγωγή (no-load flux density) B_g στο διάκενο θα είναι συχνά χαμηλότερη απ'ό,τι για μια μηχανή με εγκοπές. Το διάκενο g μιας μηχανής χωρίς εγκοπές είναι πολύ μεγαλύτερο, το οποίο θα οδηγήσει σε πιο μεγάλους (ογκώδεις) μαγνήτες (υψηλότερες τιμές του h_{PM}). Συνεπώς, μπορούμε να περιμένουμε ότι η μάζα και το κόστος μιας μηχανής χωρίς εγκοπές, θα είναι ελαφρώς υψηλότερα από αυτά μιας μηχανής με εγκοπές λόγω της αύξησης της μάζας των μονίμων μαγνητών. Δεδομένου ότι αυτή η εργασία μελετά τη μείωση της μάζας και του κόστους του "ενεργού υλικού", η TORUS μηχανή και άλλες μηχανές χωρίς εγκοπές δεν είναι ευνοϊκές επιλογές. Οι ποσότητες των μαγνητικών υλικών θα οδηγήσει σε μια δαπανηρότερη επιλογή.

4.3.4 Οι φερριτικοί μαγνήτες που χρησιμοποιούνται μηχανές μονίμων μαγνητών με συγκέντρωσης ροής

Ένας συγκέντρωσης ροής, μονίμων μαγνητών, δρομέας μπορεί "να ενισχύσει" την παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_r . Μια υψηλή μαγνητική επαγωγή διακένου B_g μπορεί να ληφθεί ακόμη και με χαμηλές τιμές της παραμένουσας μαγνητικής επαγωγής B_r . Επίσης, το συγκεκριμένο κόστος των φερριτικών μαγνητών είναι περίπου 10 φορές χαμηλότερο από αυτό των μαγνητών σπανίων γαιών. Κατά συνέπεια, η χρήση των φερριτικών μαγνητών έχει προσδιοριστεί από αρκετούς ερευνητές όπως: [Spo 1996] σαν μια ενδιαφέρουσα δυνατότητα για την συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. με συγκέντρωση ροής.

Κατά την δημοσίευση [Sen 1997], αποδεικνύεται ότι η καλύτερη χρησιμοποίηση των μαγνητικών υλικών σε μια συγκεντρωσης ροής γεωμετρία θα επιτευχθεί, εάν οι μόνιμοι μαγνήτες χρησιμοποιηθούν με τις μέγιστες τιμές των (B_{PM}, H_{PM}) , ή της μέγιστης ειδικής μαγνητικής ενέργειας $(BH)_{max}$. Αποδεικνύεται ότι ο όγκος των μαγνητικών υλικών θα είναι αντιστρόφως ανάλογος της $(BH)_{max}$. Στις επιφανειακής τοποθέτησης μαγνητικές διαμορφώσεις, οι M.M. δεν θα λειτουργήσουν απαραίτητως στις μέγιστες τιμές της $(BH)_{max}$. Η μαγν. επαγωγή του μαγνήτη θα καθοριστεί γενικά από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης των μηχανών, η οποία θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια.

Σε έναν συγκεντρώσης ροής δρομέα, η μαγν. επαγωγή των M.M. και η μαγν. επαγωγή του διακένου μπορεί να διαφέρουν. Σε τέτοιες συνθήκες, ενδείκνυται η λειτουργία των M.M. στις μέγιστες τιμές της $(BH)_{max}$. Η μέγιστη ειδική μαγνητική ενέργεια $(BH)_{max}$ ενός φερριτικού μαγνήτη είναι περίπου 12 φορές μικρότερη από αυτή του *Nd-Fe-B* μαγνήτη [Dex 2002]. Συνεπώς, ο όγκος των φερριτικών μαγνητών θα είναι περίπου 12 φορές μεγαλύτερος από ότι των *Nd-Fe-B* μαγνητών εάν και οι δύο μαγνήτες υποτίθεται ότι λειτουργούν στις τιμές των μέγιστων ειδικών μαγνητικών ενεργειών τους αντίστοιχα. Κατά συνέπεια, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μάζα της συμβατικής σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών με συγκέντρωση ροής θα είναι μεγαλύτερη εάν φερριτικοί μαγνήτες χρησιμοποιηθούν αντί *Nd-Fe-B*. Επίσης, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το κόστος των δύο διαμορφώσεων των μηχανών θα είναι λίγο πολύ το ίδιο. Με βάση αυτόν το συλλογισμό, δεν υπάρχει κανένα πλεονέκτημα από τη χρήση ενός φερριτικού μαγνήτη για την μείωση της μάζας και τη μείωση των δαπανών μιας μηχανής.

4.4 Μια βιβλιογραφική έρευνα για τα κατασκευασμένα και βελτιστοποιήσιμα σχέδια των μηχανών M.M.

Η μελέτη μέχρι τώρα σχετικά με την αναμενόμενη μάζα και κόστος για μια δεδομένη πυκνότητα δύναμης προτείνει ότι η *TORUS* και η συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. με συγκέντρωση ροής που χρησιμοποιεί φερριτικούς μαγνήτες δεν είναι κατάλληλη για τη μείωση των δαπανών μιας γεννήτριας άμεσης κίνησης. Επίσης, η μελέτη πρότεινε ότι οι μηχανές M.M. εγκάρσιας ροής μπορούν να φέρουν ουσιαστική μείωση του κόστους και της μάζας έναντι των συμβατικών σύγχρονων μηχανών M.M.. Στην πραγματικότητα, τα σχέδια των μηχανών που λαμβάνονται από από διάφορες δημοσιεύσεις επιβεβαιώνει αυτή την τάση.

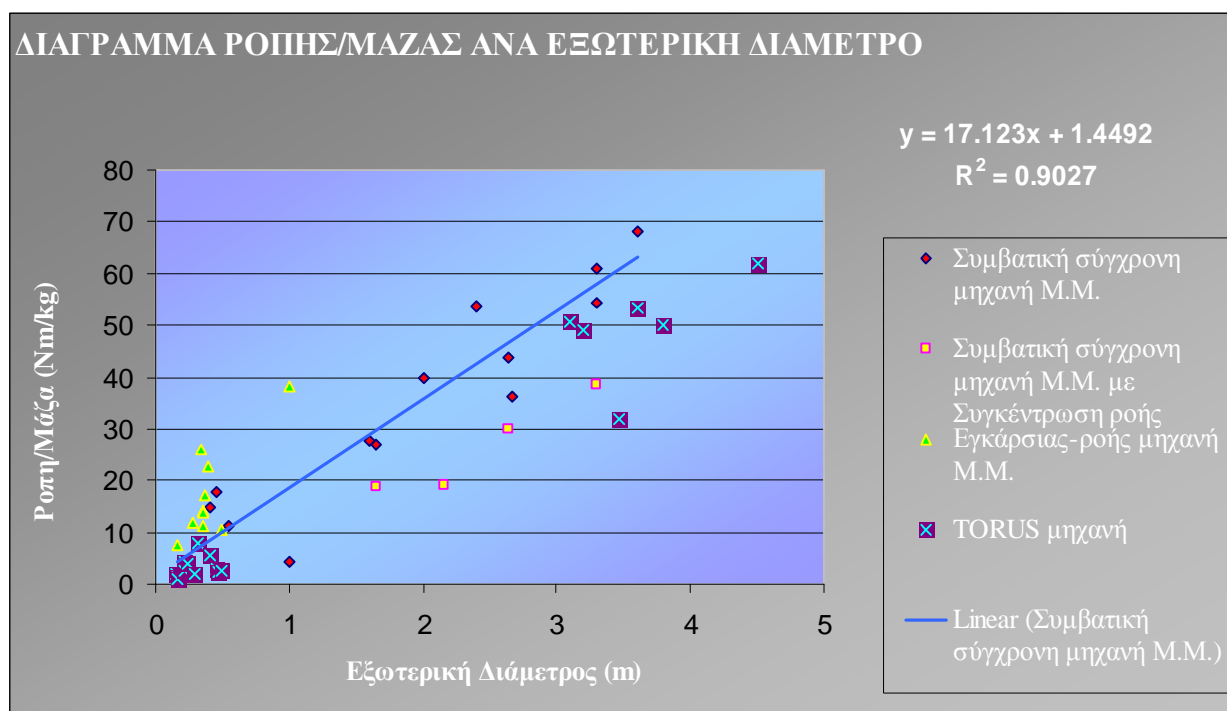
Σχέδια της συμβατικής σύγχρονης μηχανής M.M. έχουν προταθεί στις [Spo 1992a], [Lam 1996], [Zha 1996], [Gra 1996b], [Gra 1997], [Lan 2000a], [Mit 2002]. Σχέδια *TORUS* μηχανών έχουν παρουσιαστεί στις [DiN 1991], [Hon 1991], [Spo 1992a], [Spo 1992b], [Sti 1992], [Car 1994], [Car 1997], [Cha 1997], [LoB 1997], [Söd 1997], [Car 1999a], [Car 1999b], [Cha 1999], [Bro 2002]. Σχέδια συμβατικής σύγχρονης μηχανής M.M. με συγκέντρωση ροής (με

φερριτικούς μαγνήτες) έχουν παρουσιαστεί στις [Spo 1992a], [Spo 1996]. Σχέδια μηχανών M.M εγκάρσιας ροής έχουν παρουσιαστεί στις [Weh 1988a], [Mec 1996], [Hen 1997], [Har 1998], [Mad 1998], [Bli 2000], [Lan 2000a].

Στο παράρτημα Γ* έχει δημιουργηθεί ένας πίνακας που περιέχει όλα τα στοιχεία για τα παραπάνω σχέδια των μηχανών μονίμων μαγνητών που αναφέρονται, με τα χαρακτηριστικά τους. Οι αναλογίες ροπής/μάζας των σχεδίων των μηχανών M.M. παρουσιάζονται στο διάγραμμα (4-1) και οι αναλογίες κόστους/ροπής παρουσιάζονται στο διάγραμμα (4-2). Η μάζα και το κόστος όλων των μηχανών που απαριθμούνται μέσα στο παράρτημα Γ* και που παρουσιάζονται στα διαγράμματα (4-1) και (4-2) λαμβάνονται από τις διαστάσεις που αναφέρονται στις διάφορες δημοσιεύσεις.

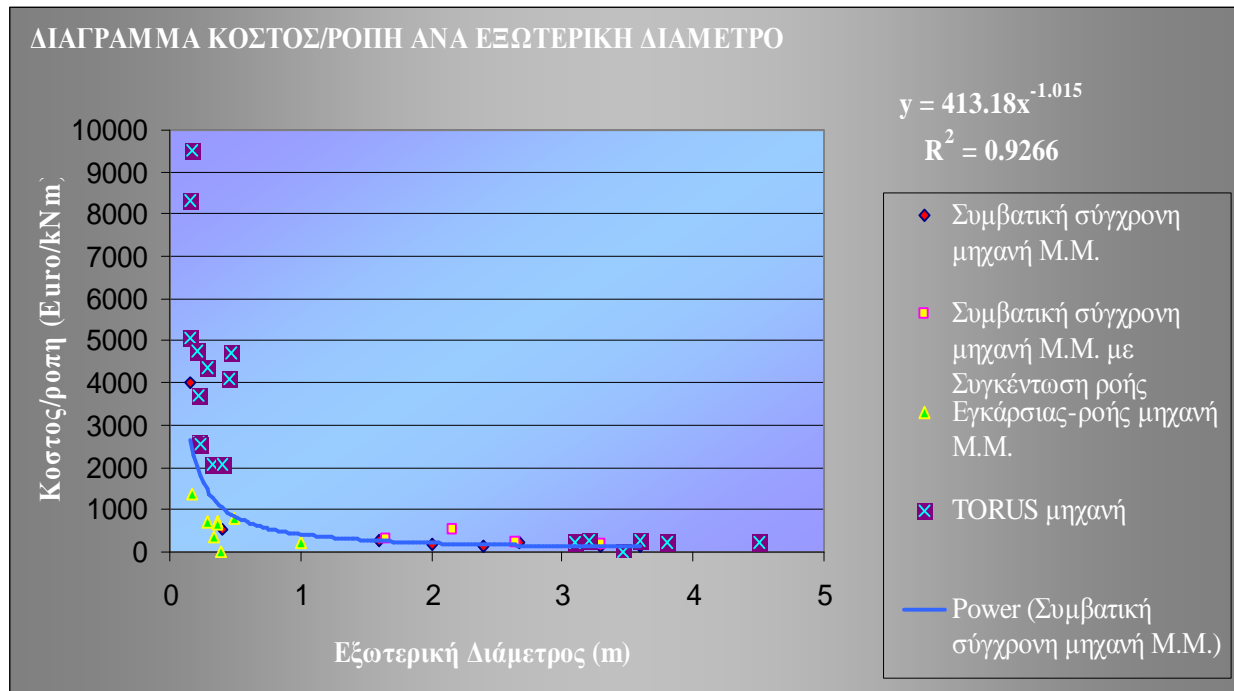
Πρέπει να τονιστεί ότι μια τέτοια σύγκριση έχει περιορισμένη αξία, επειδή όλα τα σχέδια μηχανών που βρίσκονται μέσα από τις δημοσιεύσεις και που απαριθμούνται στο παράρτημα Γ* έχουν διαφορετικές ταχύτητες, αποδόσεις και μέθοδους ψύξης. Η απόδοση διαδραματίζει έναν κυρίαρχο ρόλο στην ισχύ των μηχανών. Επομένως, οι γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζονται εδώ δεν μπορούν να αιτιολογήσουν πλήρως την επιλογή μιας μηχανής M.M. ή την απόρριψη της, συγκριτικά μιας άλλης. Ωστόσο, αυτές οι δύο γραφικές παραστάσεις δίνουν μια επιβεβαίωση στην ανάλυση βασισμένη στην πυκνότητα δύναμης που συζητήθηκε προηγουμένως.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4-1: Ροπή/Μάζα των σχεδίων των μηχανών M.M. που αναφέρονται σε δημοσιεύσεις. (Μόνο η μάζα του 'ενεργού υλικού' έχει ληφθεί υπόψη)



*Η γραμμή δείχνει την μέση τιμή της Ροπής/Μάζας

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4-2: Κόστος/Ροπή των σχεδίων των μηχανών M.M. που αναφέρονται σε δημοσιεύσεις.
(Μόνο η μάζα του 'ενεργού υλικού' έχει ληφθεί υπόψη)



*Η γραμμή δείχνει την μέση τιμή του Κόστους/Ροπής μιας συμβατικής σύγχρονης μηχανής

Τα ακόλουθα συμπεράσματα συνάγονται:

- ◆ Κατα μέσο όρο, η *TORUS* έχει ελαφρώς χαμηλότερη αναλογία ροπής/μάζας και πολύ υψηλότερη αναλογία κόστους/ροπής από τη συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M..
- ◆ Κατα μέσο όρο, οι μηχανές M.M. εγκάρσιας ροής (*TFPM*) έχουν υψηλότερη αναλογία ροπής/μάζας και χαμηλότερη αναλογία κόστους/ροπής από τη συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M..
- ◆ Κατα μέσο όρο, η συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. με συγκέντρωση ροής (με φερριτικούς μόνιμους μαγνήτες) έχει ελαφρώς χαμηλότερη αναλογία ροπής/μάζας και συγκρίσιμη ή υψηλότερη αναλογία κόστους/ροπής από τη συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M..

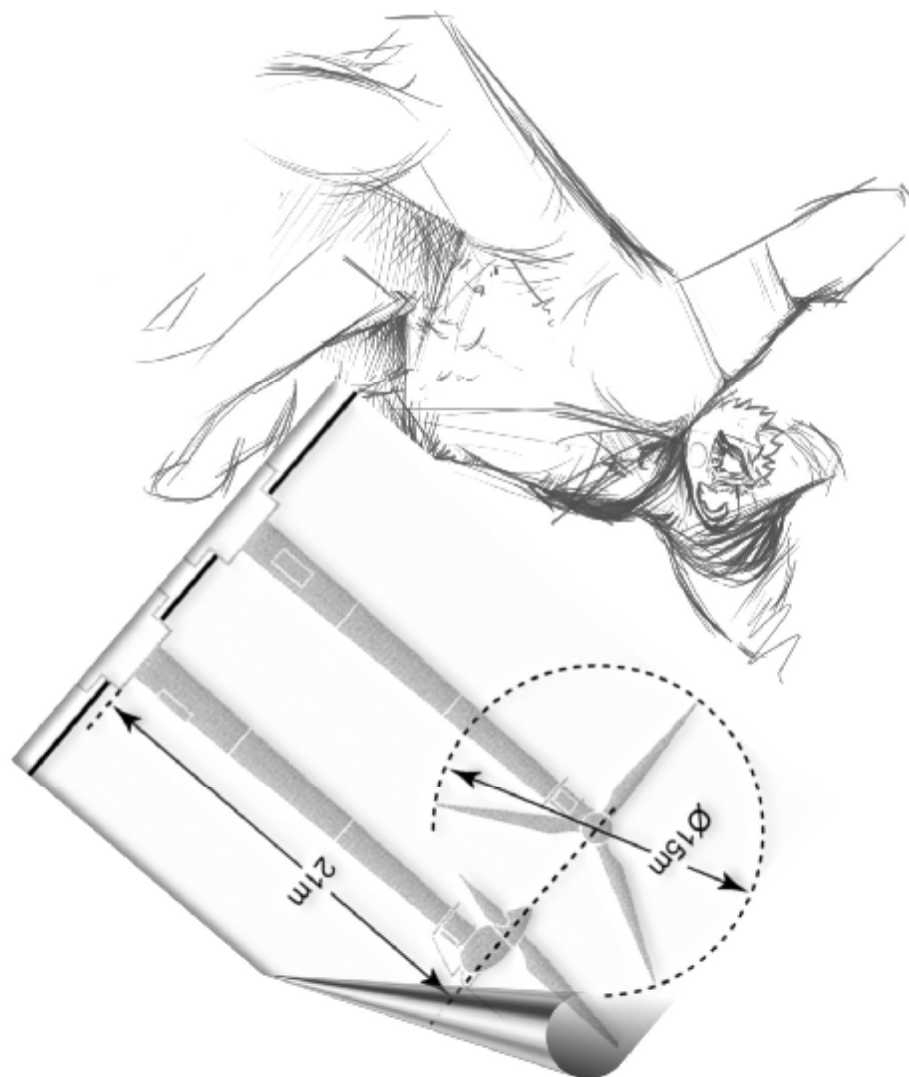
4.5 Συμπεράσματα που προκύπτουν από τις έξι τοπολογίες μηχανών

Η σύγκριση από τις έξι τοπολογίες μηχανών που προσδιορίστηκαν στο κεφάλαιο 2 έχει συζητηθεί. Σχετικά με την συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. με συγκέντρωση ροής (με φερριτικούς μαγνήτες), η μάζα της θα είναι μεγαλύτερη εάν φερριτικοί μαγνήτες χρησιμοποιηθούν αντί *Nd-Fe-B*. Επίσης, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το κόστος των δύο διαμορφώσεων των μηχανών θα είναι λίγο πολύ το ίδιο. Με βάση αυτόν τον συλλογισμό, δεν

υπάρχει κανένα πλεονέκτημα από τη χρήση ενός φερριτικού μαγνήτη για την μείωση της μάζας και τη μείωση των δαπανών μιας μηχανής. Σχετικά με την *TORUS* και άλλες μηχανές χωρίς εγκοπές δεν είναι ευνοϊκές επιλογές. Οι ποσότητες των μαγνητικών υλικών θα οδηγήσει σε μια δαπανηρότερη επιλογή. Το ίδιο συμπέρασμα επιβεβαιώθηκε από την βιβλιογραφική έρευνα των σχεδίων των μηχανών.

Στην εργασία που παρουσιάζεται εδώ, η σύγκριση μεταξύ της μηχανής M.M. εγκάρσιας ροής και της συμβατικής σύγχρονης μηχανής M.M. φαίνεται να ευνοεί την εγκάρσιας ροής μηχανή M.M., λόγω των υψηλότερων τιμών του A και της πυκνότητας δύναμης. Από τη μελέτη που διεξάγεται σε αυτό το κεφάλαιο, φαίνεται σαφώς ότι η απόδοση διαδραματίζει έναν κυρίαρχο ρόλο στην αποταμίευση δαπανών και μάζας για έναν δεδομένο τύπο μηχανών. Στη σύγκριση των δαπανών μεταξύ των μηχανών M.M. εγκάρσιας ροής και των συμβατικών σύγχρονων μηχανών M.M., οι μηχανές M.M. εγκάρσιας ροής, έχουν μεγαλύτερο κόστος, λόγω του ότι συχνά έχουν χαμηλότερη ικανότητα παραγωγής ισχύος, όπως περιγράφεται στη δημοσίευση [[Har 1998](#)]. Αυτό θα συμβάλει στην αύξηση του κόστους μιας εγκάρσιας ροής, M.M. (TFPM), γεννήτριας με τη χρήση ενός ανορθωτή που θα πρέπει να τοποθετηθεί, λόγω της υψηλής ονομαστικής ισχύος.

Κεφάλαιο 5



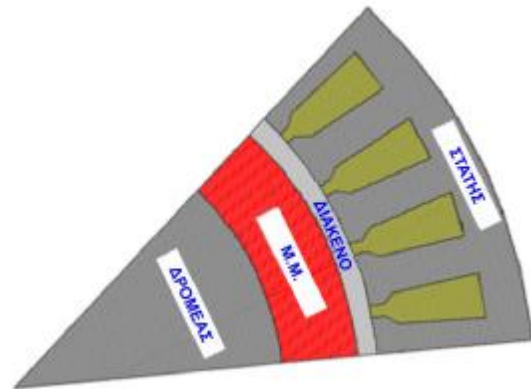
Μελέτη Μηχανής Μονίμων Μαγνητών

5.1 Εισαγωγή

Ο στόχος του κεφαλαίου 5 είναι η βελτιστοποίηση μιας γεννήτριας με χρήση Μ.Μ.. Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιαστεί μία μέθοδος η οποία προσδιορίζει τη βέλτιστη αναλογία της διαμέτρου του δρομέα σε σχέση με τη διάμετρο του στάτη που αντιστοιχεί στη μέγιστη ονομαστική ροπή. Η μέθοδος ονομάζεται “μέθοδος προσδιορισμού της αναλογίας (D_r/D_0)” [Cha 1993] της σχεδίασης μιας τοπολογίας. Πρώτα όμως πρέπει να επιλεγεί η τοπολογία της μηχανής.

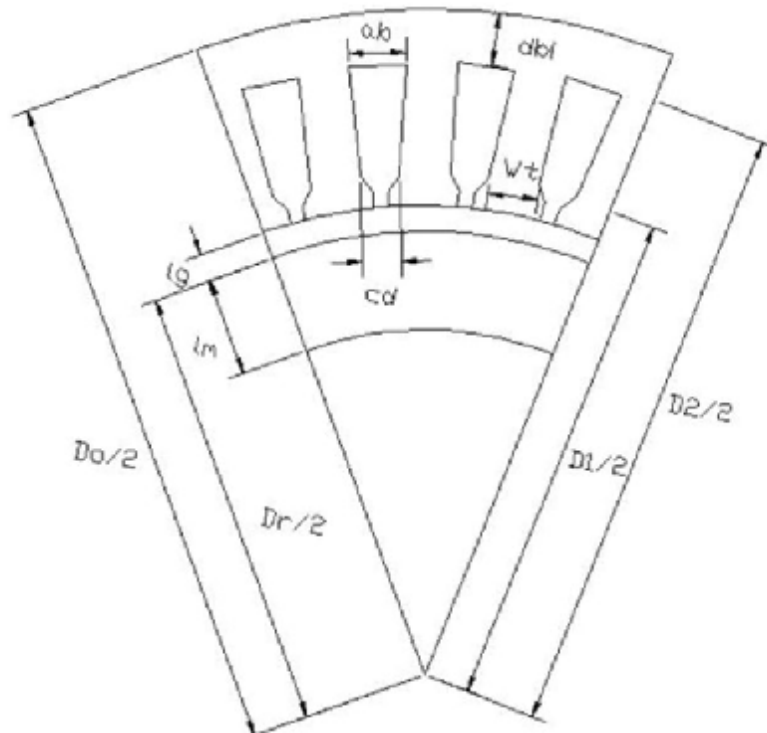
5.2 Η επιλογή της τοπολογίας προς ανάλυση

Με βάση τα προηγούμενα κεφάλαια η εργασία αυτή θα εξάγει το αναλυτικό πρότυπο της “Συμβατικής σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών”. Η επιλογή αυτής της τοπολογίας της γεννήτριας έγινε δεδομένου ότι αυτή η τοπολογία της μηχανής είναι λίγο πολύ ο πιο κοινός τύπος μηχανής και συνεπώς συναντάτε συχνά σε ανεμογεννήτριες



ΕΙΚΟΝΑ 5-1: Σύγχρονη μηχανή Μ.Μ.

Η “Συμβατική σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών” η οποία έχει ακτινωτό (R) διάκενο, διαμήκη (L) στάτη με εγκοπές (S) και επιφανειακής τοποθέτησης (SM) μόνιμους μαγνήτες. Ο γενικός σχεδιασμός της κατόψεως της γεννήτριας Μ.Μ. χωρίς τις διαστάσεις έχουν παρουσιαστεί στην εικόνα (2-8), της παραγράφου (2.6.1), ενώ οι εικόνες (5-1) και (5-2) παρουσιάζουν την ίδια διάταξη πάνω στην οποία είναι τοποθετημένοι οι Μ.Μ. (5-1) και οι βασικές διαστάσεις (5-2).



ΕΙΚΟΝΑ 5-2: Διαστάσεις σύγχρονης μηχανής Μ.Μ.

Όπου:

- ◇ L_a : Μήκος μηχανής
- ◇ A_s : Επιφάνεια εγκοπής
- ◇ S_d : Βάθος εγκοπής
- ◇ τ_p : Πολικό βήμα
- ◇ W_i : Πλάτος εγκοπής
- ◇ d_{bi} : Βάθος πλάτης του στάτη
- ◇ N_s : Συνολικός αριθμός εγκοπών
- ◇ L_m : Πάχος Μ.Μ.
- ◇ L_g : Μήκος διακένου
- ◇ D_r : Διάμετρος δρομέα
- ◇ D_0 : Διάμετρος στάτη
- ◇ K_p : Συντελεστής πλήρωσης
- ◇ A : Ρεύμα λειτουργίας
- ◇ ab : Εξωτερικό πλάτος εγκοπής
- ◇ cd : Εσωτερικό πλάτος εγκοπής
- ◇ D_1 : Απόσταση από το κέντρο της μηχανής ως την αρχή της εγκοπής
- ◇ D_2 : Απόσταση από το κέντρο της μηχανής ως το τέλος της εγκοπής
- ◇ P_c : Απώλειες χαλκού

5.3 Η μέθοδος προσδιορισμού της αναλογίας D_r/D_0

Η “μέθοδος προσδιορισμού της αναλογίας (D_r/D_0)” είναι μια τεχνική η οποία βελτιστοποιεί την ονομαστική ροπή της μηχανής προσδιορίζοντας την αναλογία (D_r/D_0) που αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή. Αυτό γίνεται με τον καθορισμό της ροπής συναρτήση των παραμέτρων σχεδίασης της μηχανής και κατόπιν δίνοντας της μηδενική τιμή λαμβάνουμε την βέλτιστη αναλογία.

5.3.1 Η ονομαστική ροπή T

Η δύναμη F που δρά πάνω σε έναν ηλεκτρικά διεγερμένο αγωγό, μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο B παρουσιάζεται στην εικόνα (4-3) και ισούται με:

$$F = BIL_a \quad (5-1)$$

Όπου:

- ◇ I : Ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό
- ◇ L_a : Ενεργό αξονικό μήκος της μηχανής



ΕΙΚΟΝΑ 5-3: Απεικόνιση μηχανής

Η ροπή ανα αγωγό ισούται με:

$$T = F \frac{D_r}{2} = BIL_a \frac{D_r}{2} \quad (5-2)$$

Συνεπώς η ροπή σε μία μηχανή που έχει N αγωγούς θα ισούται με:

$$T = F \frac{D_r}{2} = BIL_a \frac{D_r}{2} N \quad (5-3)$$

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το ρεύμα I διαφέρει από μηχανή σε μηχανή, το ρεύμα λειτουργίας Q είναι μία πιο κατάλληλη παράμετρος για τον υπολογισμό της διαμέτρου του δρομέα D_r και του αριθμού των αγωγών N . Το ρεύμα λειτουργίας Q καθορίζεται από την εξίσωση:

$$Q = \frac{NI_{ms}}{pD_r} \text{ (amps / m)} \quad (5-4)$$

$$\Rightarrow I_{rms} = \frac{QpD_r}{N} \quad (5-5)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (5-5) στην εξίσωση (5-3) λαμβάνουμε:

$$T = B \frac{QpD_2}{N} L_a \frac{D_2}{2} N \Rightarrow$$

$$T = \frac{p}{2} QD_2^2 L_a B \quad (5-6)$$

5.3.2 Η αναλογία D_r/D_0

Η ροπή για οποιαδήποτε μηχανή υπολογίζεται από την ισχύ εξόδου της μηχανής διαιρεμένη με τη γωνιακή ταχύτητα:

$$T = \frac{P}{\omega} \Rightarrow P = T\omega \quad (5-7)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (5-6) στην εξίσωση (5-7) λαμβάνουμε:

$$P = \frac{p}{2} AD_2^2 L_a B_g \omega \quad (5-8)$$

Όπου:

♦ B_g : Μαγνητική επαγωγή στο διάκενο

Η αναλογία ισχύος ανα όγκο:

$$\frac{P}{V} = 2 \left(\frac{D_r}{D_0} \right)^2 \frac{L_a}{L_0} B_g A \omega \quad (5-9)$$

Συνεπώς η αναλογία ροπής ανα όγκο θα ισούται:

$$\frac{T}{V} = 2 \left(\frac{D_r}{D_0} \right)^2 \frac{L_a}{L_0} B_g A \quad (5-10)$$

Θέτοντας τον όρο $(D_r/D_0)=x$, η εξίσωση (5-10) γράφεται ως εξής:

$$\frac{T}{V} = 2x^2 \frac{L_a}{L_0} B_g A \quad (5-11)$$

Για τη βελτιστοποίηση της ροπής το ρεύμα λειτουργίας A και η μαγνητική επαγωγή του διακένου πρέπει να καθοριστούν.

∅ Η μαγνητική επαγωγή του διακένου B_g

Η μαγν. επαγωγή στο διάκενο B_g καθορίζεται από την εξίσωση:

$$B_g = \frac{B_r}{1 + m_r \frac{L_g}{L_m}} \quad (5-12)$$

∅ Το ρεύμα λειτουργίας Q

Το ρεύμα λειτουργίας καθορίζεται από την εξίσωση:

$$A = \frac{J_c A_s K_p N_s}{p D_r} \quad (5-13)$$

Όπου:

$$J_c = \sqrt{\frac{P_c}{A_s r L_a}} \quad (5-14)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (4-14) στην εξίσωση (4-13) λαμβάνουμε:

$$A = \frac{K_p N_s}{p D_r} \sqrt{\frac{P_c}{A_s r L_a}} \quad (5-15)$$

Από την επιλεγμένη γεωμετρία της μηχανής (Βλ. εικόνα (5-2)) η επιφάνεια της εγκοπής A_s θα ισούται με:

$$A_s = \frac{1}{N_s} \left[p \left(\frac{D_0 - 2d_{bi}}{4} \right) - p \frac{D_r^2}{4} \right] - W_t (D_0 - d_{bi} - D_r) \quad (5-16)$$

∅ Ο Κορεσμός και μαγνητική επαγωγή στο στάτη



Κατά τη σχεδίαση μιας μηχανής πρέπει να γίνεται έλεγχος ως προς την εμφάνιση κορεσμού. Η μαγνητική επαγωγή στην πλάτη του στάτη δεν πρέπει να ξεπεράσει την τιμή $B_{max}=1.6$ T. Θεωρώντας τη μαγνητική ροή του διακένου Φ_g για μια εγκοπή ίση με τη μαγνητική ροή που αντιστοιχεί σε μία εγκοπή του στάτη Φ_{tooth} όπως φαίνεται στην εικόνα (5-4), λαμβάνουμε:

ΕΙΚΟΝΑ 5-4: Απεικόνιση μιας εγκοπής

$$\begin{aligned}\Phi_g &= \Phi_{tooth} \\ B_g A_{airgap/tooth} &= B_{max} A_{tooth} \\ B_g t_p L_a &= B_{max} W_t L_a \\ W_t &= \frac{B_g t_p}{B_{max}}\end{aligned}\tag{5-17}$$

☉ Η εξίσωση (5-17) αποτελεί το πρώτο κριτήριο ελέγχου κορεσμού.

Η μαγνητική ροή διαιρείται κατά μήκος του Μ.Μ. σε δύο διευθύνσεις με τιμή $\Phi_{max}/2$

$$\begin{aligned}\Phi_{slots} &= \Phi_{backiron} \\ \Phi_{backiron} &= \frac{N_s \Phi_{perslot}}{p} \\ B_{max} d_{bi} &= \frac{N_s B_{max} \frac{W_t}{2}}{p} \\ d_{bi} &= \frac{N_s W_t}{2p}\end{aligned}\tag{5-18}$$

☉ Η εξίσωση (5-18) αποτελεί το δεύτερο κριτήριο ελέγχου κορεσμού.

5.4 Ο προσδιορισμός των παραμέτρων γεωμετρίας

Οι εξισώσεις των διαστάσεων της επιλεγμένης τοπολογίας προκύπτουν από τη γεωμετρία της μηχανής. Οι διαστάσεις συνοψίζονται στον πίνακα (5-2):

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2: Εκφράσεις των διαστάσεων της μηχανής

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ Μ.Μ.
Πολικό βήμα	$t_p = \frac{pD_r}{N_s}$
Απόσταση από το κέντρο της μηχανής ως την αρχή της εγκοπής	$D_1 = D_0 - 2d_{bi}$
Απόσταση από το κέντρο της μηχανής ως το τέλος της εγκοπής	$D_2 = D_r + 2L_g$
Εξωτερικό πλάτος της εγκοπής	$ab = \frac{pD_2}{N_s} - W_t$
Εσωτερικό πλάτος της εγκοπής	$cd = \frac{pD_1}{N_s} - W_t$
Βάθος εγκοπής	$S_d = \frac{D_1 - D_2}{2}$

☐ Ο προσδιορισμός της επιφάνειας της εγκοπής A_s

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (5-16) τις εξισώσεις της παραγράφου 5.3.3 και με χρήση των δυο κριτηρίων ελέγχου κορεσμού που προσδιορίστηκαν στην παράγραφο 5.3.2 η επιφάνεια εγκοπής A_s θα ισούται με:

$$A_s = \frac{1}{N_s} \left[p \left[\frac{D_0 - 2d_{bi}}{4} - \frac{D_r^2}{4} \right] - \left(\frac{D_0 - d_{bi} - D_r}{2} \right) N_s W_t \right] \quad (5-19)$$

$$A_s = \frac{D_0^2}{N_s} \left[\frac{D_0 - 2d_{bi}}{D^2} - \frac{D_r^2}{D_0} \right] - \left[\left(\frac{D_0}{2} - \frac{p}{2} \frac{B_g}{B_{\max}} \frac{D_r}{p} - \frac{D_r}{2} \right) N_{sW_t} \right] \quad (5-20)$$

Από όπου τελικά λαμβάνουμε τα αποτελέσματα του πίνακα (5-3).

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3: Εκφράσεις των διαστάσεων της μηχανής

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ Μ.Μ.
Επιφάνεια εγκοπής	$A_s = \frac{p}{4} \frac{D_0^2}{N_s} [ax^2 - bx + l]$
Συντελεστής α	$a = 2 \left[\left(\frac{B_g}{B_{\max}} \right)^2 + \frac{p}{p} \left(\frac{p}{2} + 2 \right) + 2 \frac{B_g}{B_{\max}} - 1 \right]$
Συντελεστής β	$b = 3 \frac{B_g}{B_{\max}} \left(\frac{p}{p} + 1 \right)$
Συντελεστής λ	$l = 1$

5.5 Οι τελικοί υπολογισμοί της ονομαστικής ροπής

Η εξίσωση της ονομαστικής ροπής της μηχανής συνοψίζεται στον πίνακα (5-4):

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-4: Εκφράσεις των διαστάσεων της μηχανής

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ Μ.Μ.
Ροπή	$Ty = x \sqrt{ax^2 + bx + l}$
Σταθερά γ	$y = \frac{2(1 + \frac{L_g}{L_m} m_r)}{B_r \sqrt{\frac{P_c}{r} D_0^{2.5} L_a \sqrt{K_p}}}$

5.6 Η βελτιστοποίηση της ροπής

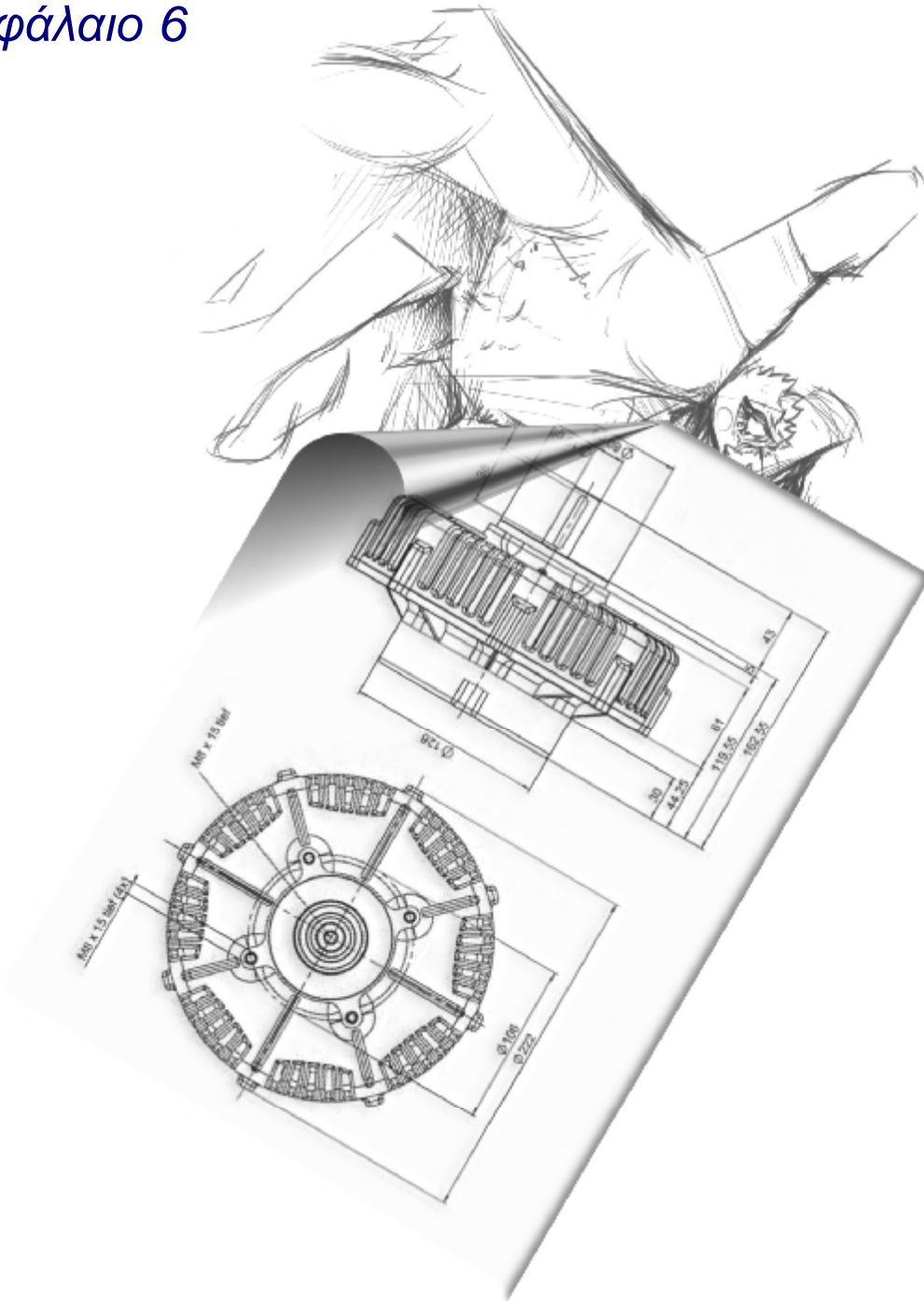
Η βελτιστοποίηση της ροπής γίνεται μεταβάλλοντας τον δεξιό όρο της εξίσωσης του πίνακα (5-4).

$$\frac{dT}{dx} = 2ax^2 + \frac{3}{2}bx + l \quad (5-21)$$

Θέτοντας την εξίσωση (5-21) ίση με το μηδέν, η αναλογία ζ που αντιστοιχεί στη βέλτιστη ροπή καθορίζεται από την εξίσωση:

$$x = \frac{-1.5 \pm \sqrt{(1.5b)^2 - 8al}}{4a} \quad (5-22)$$

Κεφάλαιο 6



Εφαρμογή Μεθόδου

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάστηκε μια μέθοδος βελτιστοποίησης, από πλευράς γεωμετρίας, μίας συμβατικής σύγχρονης μηχανής M.M., η “μέθοδος προσδιορισμού της αναλογίας (D_r/D_0)”. Αρχικά θα οριστεί ένα προκαταρκτικό σχέδιο (βασικές διαστάσεις) για την προτεινόμενη γεννήτρια. Πάνω στο δρομέα της γεννήτριας θα τοποθετηθούν οι M.M.. Ο στόχος αυτού του απλού γραμμικού εργαλείου σχεδίασης είναι να υπάρξει μια αρχική γεωμετρία για τις λεπτομερείς έρευνες. Η επίλυση της μεθόδου θα γίνει με χρήση του λογισμικού *Mat Lab* όπου και θα παρουσιαστεί ένας κώδικας ο οποίος θα υπολογίζει την βέλτιστη αναλογία (D_r/D_0) μιας συμβατικής σύγχρονης μηχανής M.M. για δύο κατηγορίες M.M..

6.2 Επιλεγμένες κατηγορίες M.M.

Στον πίνακα (6-1) παρουσιάζονται οι δύο κατηγορίες M.M. που επιλέγονται για εφαρμογή στην επιλεγμένη τοπολογία.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-1: Επιλεγμένες κατηγορίες M.M. προς ανάλυση

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ M.M.	ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΜΑΓΝ. ΕΠΑΓΩΓΗ B_r (T)	ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΖΟΥΣΑ ΔΥΝΑΜΗ H_c (KA/m)	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ μ_r
Φερριτικοί	0.4	265	1.15
Nd-Fe-B	1.1	700	1.05

6.3 Οι παράμετροι που εισάγονται κατά την σχεδίαση

Σε αυτή τη διαδικασία, παράμετροι εισάγονται ως σταθερές και άλλες χρησιμοποιούνται ως μεταβλητές. Οι εξισώσεις που αναπτύχθηκαν για την συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M (με εγκοπές) θα χρησιμοποιηθούν για τη “μέθοδο προσδιορισμού της αναλογίας (D_r/D_0)”. Σε αυτή τη μεθοδολογία, οι ακόλουθες παράμετροι εισάγονται ως σταθερές στη διαδικασία της βελτιστοποίησης:

Ø Εισαγωγή σταθερών παραμέτρων και απαραίτητες υποθέσεις που γίνονται

Οι υποθέσεις οι οποίες γίνονται καθορίζονται κυρίως, απο την επιλεγμένη τοπολογία της μηχανής και απο τις απαιτήσεις. Οι ακόλουθες υποθέσεις χρησιμοποιούνται:

- ◇ Η γεννήτρια περιελυγμένου δρομέα έχει ονομαστική ισχύ 300W.
- ◇ Ο αριθμός των φάσεων για τον τύπο της μηχανής είναι: $m = 3$
- ◇ Ο τύπος της μηχανής έχει ημιτονοειδή εν κενώ τάση $e(t)$ και ρεύμα φάσης $i(t)$
- ◇ Οι απώλειες της αντίστασης του αέρα και οι απώλειες τριβής θεωρούνται αμελητέες.
- ◇ Η πεπλεγμένη ροή σε λειτουργία πλήρους φορτίου είναι ίση με την πεπλεγμένη ροή στην εν κενώ.
- ◇ Οι μόνιμοι μαγνήτες *Nd-Fe-B* τύπου έχουν σταθερή παραμένουσα μαγνητική επαγωγή $B_r = 1.1$ T, απομαγνητίζουσα δύναμη $H_M = 700$ (KA/m), με γραμμική μαγνητική διαπερατότητα $\mu_{rec}=1.05$. Οι μόνιμοι μαγνήτες *φερριτικού* τύπου έχουν σταθερή παραμένουσα μαγνητική επαγωγή $B_r = 0.4$ T, απομαγνητίζουσα δύναμη $H_M = 265$ (KA/m), με γραμμική μαγνητική διαπερατότητα $\mu_{rec}=1.15$. Όλοι οι μόνιμοι μαγνήτες είναι ορθογώνιοι με φορά μαγνητικού πεδίου εφαπτομενική στον άξονα περιστροφής του δρομέα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-2: Διαστάσεις συματικής σύγχρονης γεννήτριας

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΤΙΜΗ (cm)
Αριθμός των πόλων	4
Μήκος του στάτη	13.6
Εσωτερική διάμετρος του στάτη	7.0
Εξωτερική διάμετρος του στάτη	11.1
Μήκος του δρομέα	13.6
Εσωτερική διάμετρος του δρομέα	2.35
Εξωτερική διάμετρος του δρομέα	6.95
Μήκος του διακένου	0.05

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΤΙΜΗ (cm)
Πλάτος των εγκοπών του στάτη	0.3 (για μία εγκοπή)
ΜΕΓΕΘΟΣ	ΤΙΜΗ
Αριθμός εγκοπών στάτη	36
Περιστροφική ταχύτητα του δρομέα (rpm)	1500
Αριθμός των τυλιγμάτων του χαλκού ανα εγκοπή	60

6.4 Τρόπος υπολογισμού της μεθόδου προσδιορισμού της αναλογίας D_r/D_0

Για την επίλυση της “μεθόδου προσδιορισμού της αναλογίας (D_r/D_0)” χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *MatLab*. Ένας αλγόριθμος δημιουργήθηκε με στόχο τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων της μηχανής και των μεταβλητών. Ο κώδικας που γράφτηκε για τον υπολογισμό παρουσιάζεται στο παράρτημα Ζ*.

6.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε για δύο κατηγορίες Μ.Μ., όπως έχει αναφερθεί στις προηγούμενες παραγράφους. Τα αποτελέσματα των βελτιστοποιημένων διαστάσεων της “μεθόδου προσδιορισμού της αναλογίας (D_r/D_0)” παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (6-3):

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-3: Βελτιστοποιημένες διαστάσεις της τοπολογίας

ΜΕΓΕΘΟΣ (cm)	ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ ΦΕΡΡΙΤΙΚΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ	ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ Nd-Fe-B ΜΑΓΝΗΤΕΣ
T_p	5.7	4.1
W_t	1.3	2.5
d_{bi}	5.8	11.4
D_1	99.4	88.3
D_2	65.7	46.5
ab	7.4	5.2
cd	4.4	1.5
S_d	16.9	20.9
L_a	136	136
L_m	5	5
L_g	0.5	0.5
D_r	64.7	45
D_0	111	111

Η ονομαστική ροπή, η μαγνητική ροή του διακένου, το ρεύμα λειτουργίας και η επαγόμενη τάση, για τη συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. που προκύπτουν από την εφαρμογή του φερριτικού και του *Nd-Fe-B* συστήματος μαγνητών αντίστοιχα, παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (6-4). Ενώ στον πίνακα (6-5) παρουσιάζεται ο όγκος των υλικών για κάθε τύπο μηχανής.

Σημείωση: Στο παράρτημα E^* περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού της επαγόμενης τάσης E και της μαγνητικής ροής Φ .

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-4: Βελτιστοποιημένες διαστάσεις της τοπολογίας

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ ΦΕΡΡΙΤΙΚΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ	ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ Nd-Fe-B ΜΑΓΝΗΤΕΣ
Ροπή T (Nm)	5.5	9.1
Ρεύμα λειτουργίας A (KA/m)	17.25	20.5
Επαγόμενη τάση E (V)	353.6	909.7
Μαγνητική ροή διακένου Φ_g (Wb)	0.0278	0.0555

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-5: Όγκος των υλικών για τις δύο μηχανές

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (Kg/m ³)	ΟΓΚΟΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕ ΦΕΡΡΙΤΙΚΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ (cm ³)	ΟΓΚΟΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕ Nd-Fe-B ΜΑΓΝΗΤΕΣ (cm ³)
Χαλκός	8.9*10 ³	195.54	136.99
Σίδηρος	7.87*10 ³	685.75	877.12
Φερριτικοί μαγνήτες	4.9*10 ³	127.53	-
Nd-Fe-B μαγνήτες	7.4*10 ³	-	86.62

6.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της τοπολογίας

Η μελέτη έγινε για μία συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. Πάνω στο δρομέα έχουν τοποθετηθεί επιφανειακά δυο διαφορετικά είδη μονίμων μαγνητών. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν φερριτικοί μαγνήτες, ενώ στη δεύτερη περίπτωση Nd-Fe-B μαγνήτες. Οι βέλτιστες διαστάσεις της μηχανής και για τα δύο συστήματα μαγνητών παρουσιάστηκαν στον πίνακα (6-3). Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι η επιλογή του M.M. αποτελεί ένα από τα βασικότερα κριτήρια στη σχεδίαση μιας τοπολογίας.

Από την ανάλυση των δύο μηχανών προκύπτει ότι η ροπή της μηχανής αυξάνεται κατά τη λειτουργία της εάν χρησιμοποιηθούν Nd-Fe-B μαγνήτες. Αυτό οφείλεται στο ότι η ροπή

εξαρτάται από το ρεύμα λειτουργίας της μηχανής. Η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή των *Nd-Fe-B* μαγνητών είναι υψηλότερη σε σχέση με τους φερριτικούς μαγνήτες. Οι εγκοπές στο στάτη είναι πλατύτερες και πιο λεπτές, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο αριθμός των τυλιγμάτων ανά εγκοπή και κατά συνέπεια το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του χαλκού, με τελικό αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος λειτουργίας. Ο συνολικός όγκος των Μ.Μ. στην περίπτωση του φερριτικού συστήματος παρουσιάζεται αυξημένος σε σχέση με το *Nd-Fe-B* σύστημα.

Κεφάλαιο 7



Ελαχιστοποίηση Των Μονίμων Μαγνητών

7.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εισάγουμε μια μέθοδο που επιτρέπει την μείωση του όγκου των μαγνητών μέσα στις μηχανές που χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες. Αυτή η μέθοδος είναι βασισμένη στην ιδέα ότι κάθε στοιχείο όγκου μέσα σε έναν μόνιμο μαγνήτη έχει μια ορισμένη συμβολή στη μαγνητική ροή που δημιουργείται από το μαγνήτη. Μια μαθηματική έκφραση παρουσιάζεται, η οποία καθορίζει τη συμβολή του όγκου κάθε ενός στοιχείου του μαγνήτη σε σχέση με τη συνολική ροή που ρέει προς το πηνίο του στάτη.

Από αυτήν την έκφραση, μπορούμε να αφήσουμε έξω τα στοιχεία όγκου του μαγνήτη που παρέχουν χαμηλή συμβολή και να δώσουμε περισσότερη έμφαση σε εκείνα που έχουν υψηλή συμβολή. Αυτό θα οδηγήσει σε μια καλύτερη χρησιμοποίηση του μόνιμου μαγνήτη και τελικά σε μείωση του συνολικού κόστους και μάζας της γεννήτριας. Μια μαθηματική έκφραση παρατίθεται, η οποία εκφράζει την εν κενώ πεπλεγμένη ροή (no-load flux linkage) από το πηνίο ενός τυλίγματος του στάτη από πλευράς των στοιχείων όγκου στο μαγνήτη.

7.2 Η τοπική συμβολή ενός μόνιμου μαγνήτη στην πεπλεγμένη ροή

Η κατασκευή ελαφριών και αποδοτικών ηλεκτρικών μηχανών έχει ωθηθεί από τη χρήση των μαγνητικών υλικών με υψηλή παραμένουσα μαγν. επαγωγή B_r . Στις σύγχρονες μηχανές, τα ογκώδη τυλίγματα στο δρομέα (ηλεκτρική διέγερση) μπορούν σήμερα να αντικατασταθούν επιτυχώς από μόνιμους μαγνήτες. Αν και είναι μικρότεροι σε μέγεθος από τους συμβατικούς ηλεκτρομαγνήτες, οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν ένα σχετικά πολύ υψηλό κόστος (σε Euro/kg) από ότι ο ελασματοποιημένος χάλυβας και χαλκός (laminated steel & copper). Σε πολλές περιπτώσεις, το κόστος των μαγνητικών υλικών αποτελεί ένα σημαντικό μέρος των συνολικών δαπανών των μηχανών.

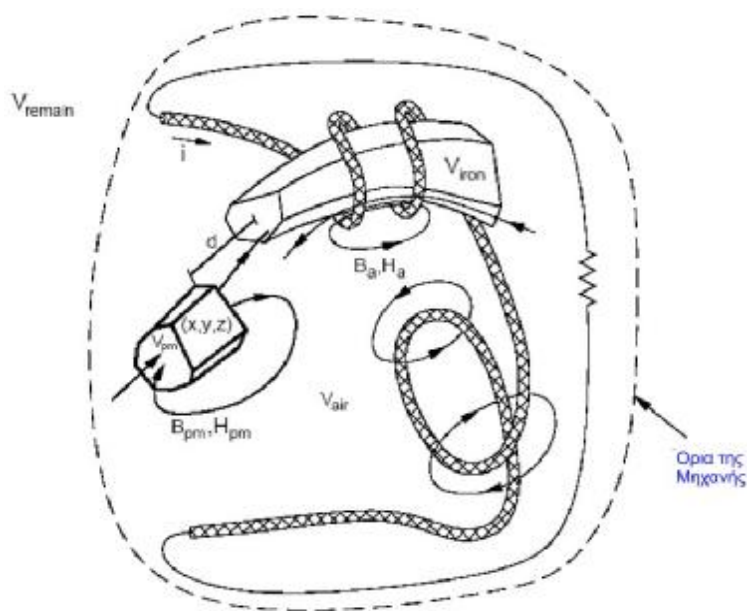
☐ *“Είναι πιθανό κάποιο μέρος του όγκου του μόνιμου μαγνήτη να μπορεί να φέρει μια υψηλή συμβολή στην εν κενώ τάση, ενώ άλλα μέρη να φέρουν μια χαμηλότερη συμβολή;”*

Σε αυτό το τμήμα, ο στόχος είναι να προσδιοριστούν ποια μέρη του όγκου του μαγνήτη έχουν υψηλή συμβολή στη συνολική πεπλεγμένη ροή από τα τυλίγματα του στάτη, σε λειτουργία εν κενώ. Προκειμένου να ληφθεί η τοπική (διαιρεμένη σε τμήματα) μαγνητική συμβολή σε σχέση με τη συνολική πεπλεγμένη ροή, μια μαθηματική έκφραση παρουσιάζεται για τη πεπλεγμένη ροή που δημιουργείται από έναν μόνιμο μαγνήτη. Συνήθως, η πεπλεγμένη ροή από ένα πηνίο, λαμβάνεται με τον υπολογισμό της μαγν. επαγωγής γύρω από την περιοχή του πηνίου. Σε αυτό το κεφάλαιο, η εν κενώ πεπλεγμένη ροή λαμβάνεται με τον υπολογισμό των τιμών του πεδίου γύρω από τη γεωμετρία των μονίμων μαγνητών και όχι από τη γεωμετρία του πηνίου.

Χρησιμοποιώντας την προκύπτουσα μαθηματική έκφραση, μπορούμε να αποδώσουμε σε κάθε μαγνητικό στοιχείο όγκου d_v μέσα στον μόνιμο μαγνήτη μια τοπική συμβολή στην εν κενώ πεπλεγμένη ροή.

7.2.1 Ο καθορισμός του προβλήματος, η γενική περίπτωση και οι υποθέσεις

Στην παράγραφο 7.4, θα παρουσιαστεί μια μαθηματική έκφραση για τη πεπλεγμένη ροή που προκλήθηκε από τον μόνιμο μαγνήτη μέσω της περιοχής του πηνίου σε λειτουργία εν κενώ. Η έκφραση αυτή είναι γενική και μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορες γεωμετρίες μηχανών μόνιμων μαγνητών. Μια γενικευμένη μαγνητική μηχανή παρουσιάζεται στην εικόνα (7-1), όπου τα σχέδια του σιδήρου, του μόνιμου μαγνήτη και του πηνίου μέσα στα όρια μιας μηχανής είναι αυθαίρετα. Καθορίζουμε τα όρια μιας μηχανής ως την περιοχή εκείνη όπου περιέχει το μεγαλύτερο μέρος της μαγνητικής ροής που προέρχεται από το πηνίο και τον μόνιμο μαγνήτη μιας μηχανής και μέσα στα όποια τα εξωτερικά δημιουργημένα μαγνητικά πεδία έχουν αμελητέα επίδραση. Στην εικόνα (7-1), όλα τα μαγνητικά υλικά μέσα σε μια μηχανή περιλαμβάνονται μέσα στον όγκο V_{PM} . Όλος ο χάλυβας περιλαμβάνεται μέσα στον όγκο V_{iron} και το διάστημα που παραμένει μέσα στα όρια της μηχανής περιλαμβάνεται μέσα στον όγκο V_{air} . Έξω από τα όρια της μηχανής, οι διανυσματικές ποσότητες, \hat{B} και \hat{H} που δημιουργήθηκαν από το πηνίο και από τον μόνιμο μαγνήτη είναι αμελητέες. Επίσης, ο μόνιμος μαγνήτης και το πηνίο ενδεχομένως να υπάρχουν και έξω από τα όρια της μηχανής που δημιουργήσαμε.



ΕΙΚΟΝΑ 7-1: Γενικευμένη μηχανή μόνιμων μαγνητών με αυθαίρετες μορφές σιδήρου, μαγνήτη και πηνίου

Το πρώτο βήμα στη μέθοδο για τις μαγνητικές επιφάνειες είναι η παραγωγή μιας έκφρασης για την εν κενώ πεπλεγμένη ροή. Πρωτα όμως πρέπει να γίνουν μερικές υποθέσεις.

7.3 Υποθέσεις που γίνονται κατά την μαθηματική έκφραση

7.3.1 Υπόθεση σταθερής μαγνήτισης για τους μόνιμους μαγνήτες

Για το υπόλοιπο αυτής της ανάλυσης, θα υποθέσουμε ότι όλοι οι μόνιμοι μαγνήτες μέσα στα όρια της μηχανής έχουν σταθερή μαγνήτιση, τα $B(H)$ χαρακτηριστικά των μόνιμων μαγνητών καθορίζονται από την εξίσωση:

$$\dot{B} = m_{rec} m_0 \dot{H} + \dot{B}_r \quad (7-1)$$

Στην εξίσωση (7-1), τα \dot{B} και \dot{H} είναι αντίστοιχα η μαγνητική επαγωγή και η ένταση του μαγνητικού πεδίου μέσα στους μόνιμους μαγνήτες. Η B_r είναι η παραμένουσα μαγν. επαγωγή και υποτίθεται ότι είναι σταθερή. Η σχετική διαπερατότητα μ_{rec} των “ιδανικών μαγνητών” υποτίθεται ότι είναι ίση με 1. Αυτές οι δύο υποθέσεις δεν είναι σοβαροί περιορισμοί στην μαθηματική έκφραση που θα προσδιοριστεί περαιτέρω, εάν το μαγνητικό υλικό είναι *Nd-Fe-B*. Στην πραγματικότητα οι *Nd-Fe-B* μαγνήτες έχουν χαρακτηριστικές τιμές για τιμές σχετικής μαγν. διαπερατότητας μ_{rec} , από 1.0 μέχρι 1.1 και έχουν $B(H)$ χαρακτηριστικά που είναι περίπου γραμμικά, από $\dot{B} = B_r$ μέχρι $\dot{B} = 0$ T.

Όπως αναφέρεται στην τελευταία παράγραφο, η B_r υποτίθεται ότι είναι ανεξάρτητη από την \dot{H} . Αυτό σημαίνει ότι για οποιοδήποτε σημείο του χώρου μέσα στους μόνιμους μαγνήτες, υποθέτουμε ότι η παραμένουσα μαγν. επαγωγή B_r είναι σταθερή, ανεξαρτήτως της έντασης του μαγνητικού πεδίου για οποιοδήποτε σημείο.

7.3.2 Υπόθεση τέλειου φερρομαγνητικού υλικού για το χάλυβα του δρομέα

Υποτίθεται ότι όλα τα μεταλλικά μέρη είναι τέλεια: έχουν άπειρη διαπερατότητα και είναι ακόρεστα. Στην πραγματικότητα τα μεταλλικά υλικά έχουν μια σχετική μαγνητική διαπερατότητα σχετικά υψηλή κάτω από το σημείο κορεσμού τους, η οποία εμφανίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Κατά συνέπεια, η υπόθεση του “τέλειου μετάλλου” δεν θα επηρεάσει την μαθηματική έκφραση που παρουσιάζεται κατωτέρω, εφ' όσον δεν εμφανίζεται κορεσμός στα μεταλλικά μέρη. Η ισχύς της προτεινόμενης μεθόδου θα πρέπει να αναλυθεί προσεκτικά σε εκείνες τις περιπτώσεις όπου εμφανίζεται ο κορεσμός. Αυτό δεν γίνεται εδώ.

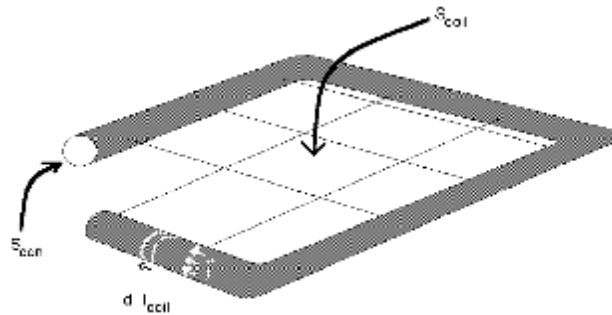
7.3.3 Υπόθεση σταθερού μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού \mathbf{A} σε όλη τη διατομή των αγωγών

Το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό \mathbf{A} υποτίθεται ότι έχει σταθερό μέγεθος και κατεύθυνση σε οποιαδήποτε δεδομένη διατομή ενός αγωγού. Αυτή η υπόθεση είναι η ιδανική περίπτωση. Εάν χωρίσουμε τους αγωγούς σε πάρα πολύ λεπτούς αγωγούς (στοιχειώδης διαμέτρου), στους όποιους το ρεύμα να περνά μέσω μιας απείρως μικρής διατομής, η τιμή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού \mathbf{A} θα είναι πολύ μικρή όταν οι αγωγοί βρίσκονται γύρω από έναν φερρομαγνητικό πυρήνα δρομέα, όπως συμβαίνει στις περισσότερες ηλεκτρικές μηχανές.

Οι περισσότερες από τις μαγνητικές ροές που περνούν μέσα στο μέταλλο, μας οδηγούν στην θεώρηση αμελητέου \mathbf{A} , έναντι της απόλυτης τιμής του \mathbf{A} σε εκείνο τον αγωγό. Εντούτοις, υπάρχουν περιπτώσεις, όπως στους δρομείς μεγάλων επαγωγικών μηχανών, όπου η διατομή των αγωγών είναι μεγάλη και η υπόθεση των πάρα πολύ λεπτών στοιχειώδων αγωγών δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Για τους αγωγούς στο κενό (ή τον αέρα), η τιμή του \mathbf{A} μέσω των απείρων στοιχειωδών διατομών των αγωγών μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα εάν οι διατομές είναι αρκετά μικρές.

7.4 Η μαθηματική έκφραση

Στο σύστημα της εικόνας (7-1), θεωρούμε ότι το πηνίο είναι φτιαγμένο από πολλές στροφές, όπου ένα ρεύμα i επιτρέπεται να ρέει.



ΕΙΚΟΝΑ 7-2: S_{coil} και S_{con} για μία στροφή ενός πηνίου

Γράφουμε ότι το περιεχόμενο $i\mathbf{l}$ που 'βλέπει' το πηνίο, όπως φαίνεται στην εικόνα (7-2), ισούται με:

$$i\mathbf{l} = \left[\iint_{S_{agwou}} \mathbf{j} \times d\mathbf{s}_{coil} \right] \times \left[\iint_{S_{con}} \mathbf{B} \times d\mathbf{s}_{con} \right] \quad (7-2)$$

Όπου:

- ◇ λ και \dot{B} : Η πεπλεγμένη ροή (flux linkage) και η μαγν. επαγωγή πεπλεγμένης ροής (flux density linkage) του πηνίου, συμπεριλαμβανομένης και της ροής που δημιουργείται από τον μόνιμο μαγνήτη και της ροής που δημιουργείται από το ρεύμα i .
- ◇ \dot{j} : Το διάνυσμα πυκνότητας ρεύματος μέσα στον αγωγό.
- ◇ S_{coil} : Μια οριακή διατομή, ολόκληρου του πηνίου (coil).
- ◇ S_{con} : Η διατομή του αγωγού.

Όπως συζητείται μέσα στη δημοσίευση [Maw 1957], το $i\lambda$ είναι το ποσό της μαγνητικής ενέργειας (magnetic energy) και της μαγνητικής ομο ενέργειας (magnetic co-energy) που “βλέπει” το πηνίο. Το περιεχόμενο $i\lambda$ μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$iI = \iiint_{V_{universe}} (\dot{B} \times \dot{H}) dv \quad (7-3)$$

Μόνο εάν το διανυσματικό δυναμικό \dot{A} σε όλοκληρη την διατομή του αγωγού είναι αμελητέο (υπόθεση από παράγραφο 7.3.3), τότε το πηνίο θεωρείται πάρα πολύ μικρό και η πεπλεγμένη ροή λ μέσω της οριακής περιοχής από τον αγωγό θα είναι ανεξάρτητη από το όριο που έχει επιλεχθεί. Και οι τρεις μεταβλητές της εξίσωσης (7-3) έχουν δημιουργηθεί από το ρεύμα στο πηνίο και από τους μόνιμους μαγνήτες. Οι υποθέσεις των παραγράφων 7.2.1 και 7.2.2, υπέθεταν ότι οι μόνιμοι μαγνήτες και το μέταλλο είναι γραμμικά υλικά. Αυτές οι υποθέσεις μας επιτρέπουν να υποδιαιρέσουμε τις μεταβλητές σε λ_a , H_a , B_a , μεταβλητές που δημιουργούνται με την επαγωγίμη ροή στο πηνίο και λ_{PM} , H_{PM} και B_{PM} , μεταβλητές που δημιουργούνται από τους μόνιμους μαγνήτες μόνο. Οι μεταβλητές: H_a , B_a , H_{PM} και B_{PM} παρουσιάζονται στην εικόνα (7-1). Ξαναγράψουμε την εξίσωση (7-3):

$$iI = \iiint_{V_{universe}} (\dot{B}_a + \dot{B}_{PM}) \cdot (\dot{H}_a + \dot{H}_{PM}) dv \quad (7-4)$$

Από τις εξισώσεις του Maxwell, έχουμε:

$$\nabla \cdot \dot{B}_{PM} = 0 \quad (7-5)$$

$$\nabla \cdot \dot{B}_a = 0 \quad (7-6)$$

$$\nabla \times \dot{H}_{PM} = 0 \quad (7-7)$$

Όπως αναφέρεται και στη δημοσίευση [Bro 1962], ο ακέραιος που λαμβάνεται από ολόκληρη την επιφάνεια, από το το περιεχόμενο των δύο διανυσμάτων είναι μηδέν. Από όπου και λαμβάνουμε:

$$iI = \iiint_{V_{universe}} (\dot{B}_a + \dot{B}_{PM}) \cdot \dot{H}_a dv \quad (7-8)$$

Ορίζουμε λ_{PM} τη πεπλεγμένη ροή που δημιουργείται από τους μόνιμους μαγνήτες στο πηνίο. Για να λάβουμε τη λ_{PM} , χρησιμοποιούμε την εξίσωση (7-8) η οποία είναι το ποσό της επαγωγίμης ροής στο πηνίο $i\lambda_a$. Αυτό λαμβάνεται εύκολα από την εξίσωση (7-1), με την εξέταση

της περίπτωσης όπου μόνο το πεδίο και η διαρροή υπάρχει μέσα στα όρια της μηχανής που έχουν δημιουργηθεί από το ρεύμα που ρέει στο πηνίο. Εκφράζουμε το iI_a σαν:

$$iI_a = \iiint_{V_{universe}} \dot{\mathbf{B}}_{PM} \cdot \dot{\mathbf{H}}_a dv \quad (7-9)$$

Με παρεμβολή της εξίσωσης (7-9) στην εξίσωση (7-8), λαμβάνουμε:

$$iI_{PM} = \iiint_{V_{universe}} \dot{\mathbf{B}}_{PM} \cdot \dot{\mathbf{H}}_a dv \quad (7-10)$$

Αυτό το αποτέλεσμα επιτυγχάνεται επίσης και στη δημοσίευση [**Bro 1962**]. Στην εξίσωση (7-10), η περιοχή της ολοκλήρωσης είναι ακόμα ολόκληρη η επιφάνεια. Είναι δυνατό να απλοποιηθεί αυτή η έκφραση περαιτέρω, εάν διαιρέσουμε τη συνολική επιφάνεια σε τέσσερις υπο-περιοχές, οι οποίες παρουσιάζονται στην εικόνα (7-1):

- ◊ Ο όγκος V_{PM} του μόνιμου μαγνήτη στη μηχανή.
- ◊ Ο όγκος V_{iron} του μέταλλο στη μηχανή.
- ◊ Ο όγκος του αέρα V_{air} στη μηχανή.
- ◊ Ο όγκος όλης της επιφάνειας $V_{universe}$ έξω από τα όρια της μηχανής.

Σημείωση: Πρέπει να σημειωθεί ότι ο V_{air} περιέχει όχι μόνο τον αέρα, αλλά όλο το υλικό για το οποίο η διαπερατότητα είναι κοντά στην μονάδα (όπως τους μονωτές, τα πηνία, το διάκενο, κ.λπ.).

◊ Υπο-περιοχή V_{iron}

Μέσα στο μέταλλο, τα μαγνητικά πεδία H_a και H_{PM} είναι μηδέν, λόγω της υπόθεσης της παραγράφου 7.3.2. Μπορούμε να γράψουμε:

$$\iiint_{V_{iron}} \dot{\mathbf{B}}_{PM} \cdot \dot{\mathbf{H}}_a dv = \iiint_{V_{iron}} \dot{\mathbf{B}}_a \cdot \dot{\mathbf{H}}_{PM} dv = 0 \quad (7-11)$$

◊ Υπο-περιοχή V_{air}

Η υπο περιοχή του αέρα παρουσιάζει επίσης μια σχέση αμοιβαιότητας μεταξύ των H_a , B_{PM} και B_a , H_{PM} . Μπορούμε να γράψουμε:

$$\iiint_{V_{Air}} \dot{\mathbf{B}}_{PM} \cdot \dot{\mathbf{H}}_a dv = \iiint_{V_{Air}} m_0 \dot{\mathbf{H}}_{PM} \cdot \dot{\mathbf{H}}_a dv = \iiint_{V_{Air}} \dot{\mathbf{B}}_a \cdot \dot{\mathbf{H}}_{PM} dv \quad (7-12)$$

◊ Υπο-περιοχή V_{remain}

Όπως καθορίζεται προηγουμένως, οι διανυσματικές ποσότητες H_a , B_{PM} και B_a , H_{PM} είναι μηδέν έξω από τα όρια της μηχανής. Μπορούμε να γράψουμε:

$$\iiint_{V_{remain}} \dot{B}_{PM} \cdot \dot{H}_a dv = \iiint_{V_{remain}} \dot{H}_{PM} \cdot \dot{B}_a dv = 0 \quad (7-13)$$

☐ Υπο-περιοχή V_{PM}

Μέσα στον μόνιμο μαγνήτη, η καταστατική εξίσωση της μαγνητικής επαγωγής δίνεται από την εξίσωση (7-1). Η μ_{rec} είναι ίση με την μονάδα, όπως υποδεικνύεται από την υπόθεση της παραγράφου 7.3.1. Ξαναγράφουμε την εξίσωση (7-10) για τον όγκο του μόνιμου μαγνήτη:

$$\iiint_{V_{PM}} \dot{B}_{PM} \cdot \dot{H}_a dv = \iiint_{V_{PM}} \dot{H}_{PM} \cdot \dot{H}_a dv + \iiint_{V_{PM}} \dot{B}_r \cdot \dot{H}_a dv \quad (7-14)$$

Οπού:

♦ H_a : Το πεδίο που λαμβάνεται όταν η $B_r=0$.

Εξετάζουμε τους μαγνήτες όπως αντικαθίστανται από το κενό, αφού η μαγνητική διαπερατότητα των μονίμων μαγνητών είναι η ίδια στο κενό. Επομένως, ξαναγράφουμε την εξίσωση (7-14):

$$\iiint_{V_{PM}} \dot{B}_{PM} \cdot \dot{H}_a dv = \iiint_{V_{PM}} \dot{H}_{PM} \cdot \dot{B}_a dv + \iiint_{V_{PM}} \dot{B}_r \cdot \dot{H}_a dv \quad (7-15)$$

☐ Συνολικά όλες οι υπο-περιοχές

Αθροίζοντας τις τέσσερις υπο περιοχές, λαμβάνουμε ολόκληρη την επιφάνεια. Παρεμβάλλοντας την εξίσωση (7-11), την εξίσωση (7-12), την εξίσωση (7-13) και την εξίσωση (7-15), στην εξίσωση (7-10) και γράφουμε:

$$iI_{PM} = \iiint_{V_{universe}} \dot{H}_{PM} \cdot \dot{B}_a dv + \iiint_{V_{PM}} \dot{B}_r \cdot \dot{H}_a dv \quad (7-16)$$

Πάλι, το ολοκλήρωμα που λαμβάνεται από ολόκληρη την επιφάνεια του περιεχομένου των δύο διανυσμάτων είναι μηδέν. Ως εκ τούτου, ο πρώτος όρος της δεξιάς πλευράς της εξίσωσης (7-16) είναι ίσος με μηδέν. Αρα λαμβάνουμε:

$$iI_{PM} = \iiint_{V_{PM}} \dot{B}_r \cdot \dot{H}_a dv \quad (7-20)$$

Από την εξίσωση (7-20), λαμβάνουμε μια έκφραση για τη λ_{PM} :

$$I_{PM} = \iiint_{V_{PM}} \left[\frac{\mathbf{r}}{i} \right] \cdot \mathbf{B}_r dv \quad (7-21)$$

Η εξίσωση (7-21) εκφράζει τη πεπλεγμένη ροή που δημιουργείται από τους μόνιμους μαγνήτες μέσω ενός πηνίου από την άποψη μιας λειτουργίας που είναι ενσωματωμένη σε ολόκληρο τον όγκο των μόνιμων μαγνητών σε αλληλεπίδραση με το πηνίο. Δίνει σε κάθε στοιχειώδη όγκο d_v μέσα στους μόνιμους μαγνήτες μια συμβολή στη πεπλεγμένη ροή που φεύγει από το πηνίο κάτω από συνθήκες εν κενώ λειτουργίας. Σε μια μηχανή μόνιμων μαγνητών, μπορεί να περάσει ένα ρεύμα i στο πηνίο και να υπολογιστεί το H_a στον όγκο του μόνιμου μαγνήτη. Ενσωματώνοντας το περιεχόμενο της H_a με το B_r στον όγκο του μόνιμου μαγνήτη λαμβάνουμε την εν κενώ πεπλεγμένη ροή του πηνίου στο οποίο το ρεύμα ρέει. Αυτή η μέθοδος ισχύει για οποιαδήποτε θέση του δρομέα. Υπάρχει μια αμοιβαία σχέση μεταξύ της εξίσωσης (7-21) και στον συμβατικό καθορισμό της εν κενώ πεπλεγμένης ροής που δίνεται από την εξίσωση:

$$I_{PM} = \iint_{S_{coil}} \mathbf{B}_{PM} \cdot d\mathbf{S}_{coil} \quad (7-22)$$

Στην εξίσωση (7-22), η πεπλεγμένη ροή σε εν κενώ λειτουργία ορίζεται ως μια μαγνητική ποσότητα που δημιουργείται από τους μόνιμους μαγνήτες (B_{PM}) που δρά στη γεωμετρία του πηνίου (S_{coil}), ενώ στην εξίσωση (7-21), εκφράζει τη λ_{PM} ως μαγνητική ποσότητα που δημιουργείται από το πηνίο (H_a) και δρά στη γεωμετρία των μόνιμων μαγνητών (V_{PM}). Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (7-21) όχι μόνο για να προσδιορίσει την συμβολή κάθε στοιχείου όγκου μέσα στον V_{PM} , αλλά και για να επιλεγούν οι περιοχές μέσα στους μόνιμους μαγνήτες, οι οποίες έχουν την υψηλότερη συμβολή (αφήνοντας έξω τις περιοχές με τη χαμηλότερη συμβολή). Με τον τρόπο αυτό, οι μόνιμοι μαγνήτες διαμορφώνονται έτσι ώστε να υπάρχει αύξηση της συνολικής πεπλεγμένης ροής που δημιουργείται από τα πηνία του στάτη σε λειτουργία εν κενώ, ανά mm^3 του μαγνητικού υλικού.

7.5 Εφαρμογή της μεθόδου ελαχιστοποίησης σε μία σύγχρονη συμβατική μηχανή M.M.

7.5.1 Υποθέσεις και Παραδοχές που γίνονται

Σε αυτό το τμήμα η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει τους μόνιμους μαγνήτες σε μια συμβατική σύγχρονη μηχανή μόνιμων μαγνητών, με τρεις φάσεις, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα (7-3).

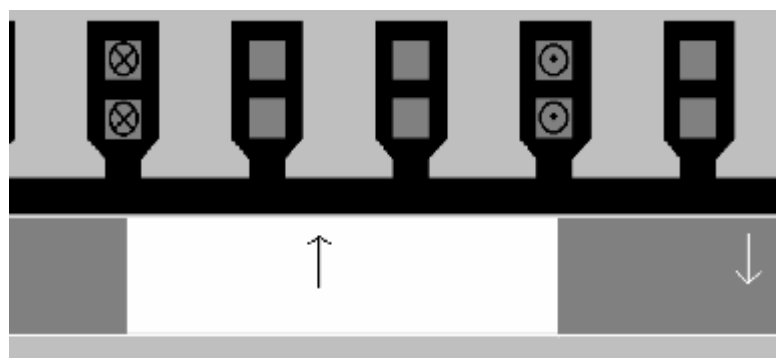
☉ Η γραμμική μηχανή έχει τις εξής διαστάσεις:

- ◇ Στην προτεινόμενη μέθοδο οι Μ.Μ. κατά την διαδικασία υπολογισμού της (FEM) αντικαθιστούντε από το «κενό».
- ◇ Ένα ρεύμα $I=10$ A θεωρείται ότι ρέει τα πηνία στο στάτη.
- ◇ Η παραμένουσα μαγν. επαγωγή B_r μέσα στους Μ.Μ. θεωρείται σταθερή.
- ◇ $g=2$ mm
- ◇ $\tau_p=2.4$ cm
- ◇ $h_M=6$ mm
- ⊗ Ο τύπος των μόνιμων μαγνητών που χρησιμοποιείται είναι Nd-Fe-B και έχει:
 - ◇ παραμένουσα μαγνητική επαγωγή $B_r = 1.23$ T
 - ◇ μαγνητική διαπερατότητα $\mu_{rec}=\mu_0=1$.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη μέθοδος ελαχιστοποίησης του όγκου, έχει σαν τελικό στόχο την αύξηση της αναλογίας:

⊗ (πεπλεγμένη ροή) / (Όγκος μόνιμου μαγνήτη) $[\lambda_{PM}/V_{PM}]$.

Μια σημαντική παραδοχή που γίνεται στη διαδικασία που ακολουθείται αφορά την επίδραση που έχουν οι Μ.Μ. στην τάση της μηχανής $e(t)$, της οποίας η τοπική συμβολή της είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη κατά τη λειτουργία της μηχανής.

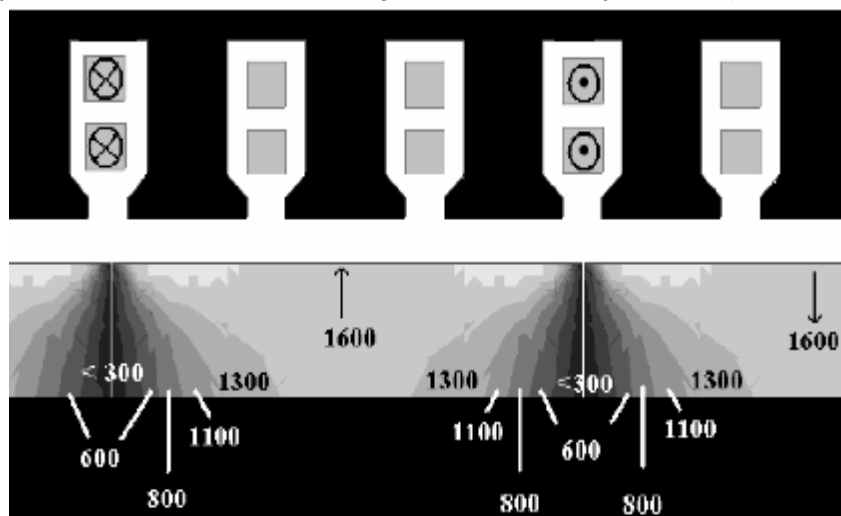


EΙΚΟΝΑ 7-3: Αναπαράσταση μιας τριφασικής, γραμμικής, συμβατικής σύγχρονης μηχανής. Μόνο η πρώτη φάση αναλύεται

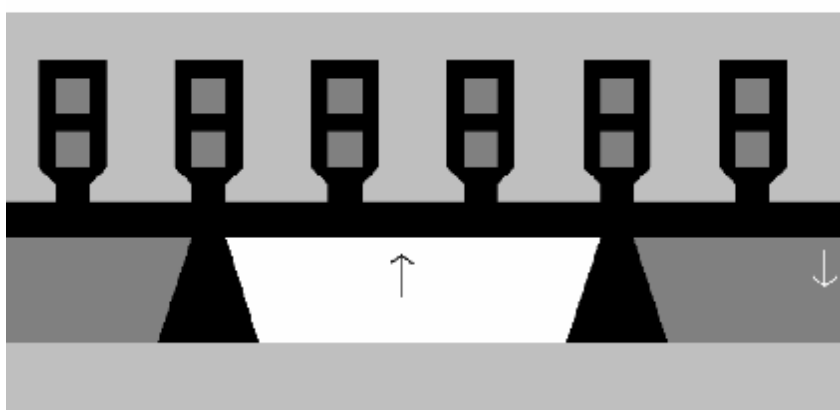
Η επίδραση αυτή δεν λαμβάνεται υπόψη. Διότι κατά τον υπολογισμό της εξίσωσης (7-21) θεωρήθηκε ο d_v ανεξάρτητος της $e(t)$, αν και στην πράξη δεν ισχύει, όπως διευκρινίζεται στην [Dub 2003a]. Αυτή η επίδραση, έχει συζητηθεί επίσης στις δημοσιεύσεις [Del 1991] και [Del 1992]. Η παραδοχή αυτή όμως δεν επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Η παραδοχή γίνεται μίας και οι Μ.Μ. δεν μπορούν να διαμορφωθούν κατά τη λειτουργία της μηχανής. Η εικόνα (7-3) παρουσιάζει μια γραμμική έκδοση μιας συμβατικής σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών, όπου η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών Μ.Μ. είναι μηδέν. Αν και συνήθως υπάρχει μια απόσταση μεταξύ των Μ.Μ., η περιοχή αυτή θεωρείται από τους ερευνητές ότι δεν συμβάλει ουσιαστικά στη διαρροή και δεν λαμβάνεται κατά την σχεδίαση της μηχανής. Οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν συνήθως ορθογώνιο σχήμα με απόσταση μεταξύ τους 0.1 με 0.3 φορές το πολικό βήμα. Σε αυτή τη διάταξη η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων θα χρησιμοποιηθεί για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων.

7.5.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Οι κατανομές των H_M και B_r που προκύπτουν από την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, φαίνονται στην εικόνα (7-4) και αντιπροσωπεύουν την συμβολή κάθε στοιχειώδη όγκου d_v στη πεπλεγμένη ροή λ_{PM} στο πηνίο. Το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε μία φάση της μηχανής, οι άλλες φάσεις αμελούνται από την υπολογιστική διαδικασία (δεν διεγείρονται). Από την επίλυση του λογισμικού (FEM), όπως φαίνεται και στην εικόνα (7-4) έχει την μικρότερη συμβολή στη ροή κατά τη λειτουργία εν κενώ, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με την υπόθεση της παραγράφου 7.5.1. Επομένως αυτή είναι η περιοχή η οποία σύμφωνα με τη μεθοδολογία πρόκειται να αφαιρεθεί.



ΕΙΚΟΝΑ 7-4: Κατανομές των B_r και H_M που υπολογίζονται από την FEM. Οι B_r θεωρείται σταθερή μέσα στους M.M. και το ρεύμα διέγερσης $I=10$ A.



ΕΙΚΟΝΑ 7-5: Η νέα διαμόρφωση που προκύπτει από την μέθοδο ελαχιστοποίησης μέσω της FEM.

Στην εικόνα (7-5) φαίνεται η νέα διαμόρφωση (τύπου-V) στην οποία έχει αφαιρεθεί εκείνη η περιοχή των M.M. με την μικρότερη συμβολή. Με βάση τις υποθέσεις και παραδοχές που έχουν γίνει μπορούμε να υπολογίσουμε την επιφάνεια των M.M. πριν την διαμόρφωση και μετά:

$$\emptyset E_{\text{πριν}} = 144 \text{ mm}^2$$

$$\emptyset E_{\text{μετά}} = 120 \text{ mm}^2$$

∅ Η πεπλεγμένη ροή πριν την διαμόρφωση $\lambda_{PM}=16.5 \text{ mWb/m}$, ενώ μετά την διαμόρφωση $\lambda_{PM}=17.5 \text{ mWb/m}$.

7.5.3 Διεξαγωγή συμπερασμάτων

Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν από πριν και μετά την εφαρμογή της διαδικασίας ελαχιστοποίησης τα εξής συμπεράσματα προκύπτουν:

- ◇ Ο όγκος μειώνεται κατά 17%
- ◇ Η πεπλεγμένη ροή αυξάνεται κατά 13%

Ο πίνακας (7-1) παρουσιάζει την πεπλεγμένη ροή πριν και μετά τη διαμόρφωση με βάση τις εξισώσεις (7-21) και (7-22), που υπολογίστηκαν στην παράγραφο 7.4.4.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7-1: Αποτελέσματα με χρήση της FEM για τις δύο διαμορφώσεις πριν και μετά

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ	λ_{PM} από εξίσωση (7-22) σε mWb/m	λ_{PM} από εξίσωση (7-21) σε mWb/m	λ_{PM}/V_{PM} σε mWb/m ³
<i>Πριν</i> (εικ. (7-3))	17.5	17.6	122
<i>Μετά</i> (εικ. (7-4))	16.5	16.6	138

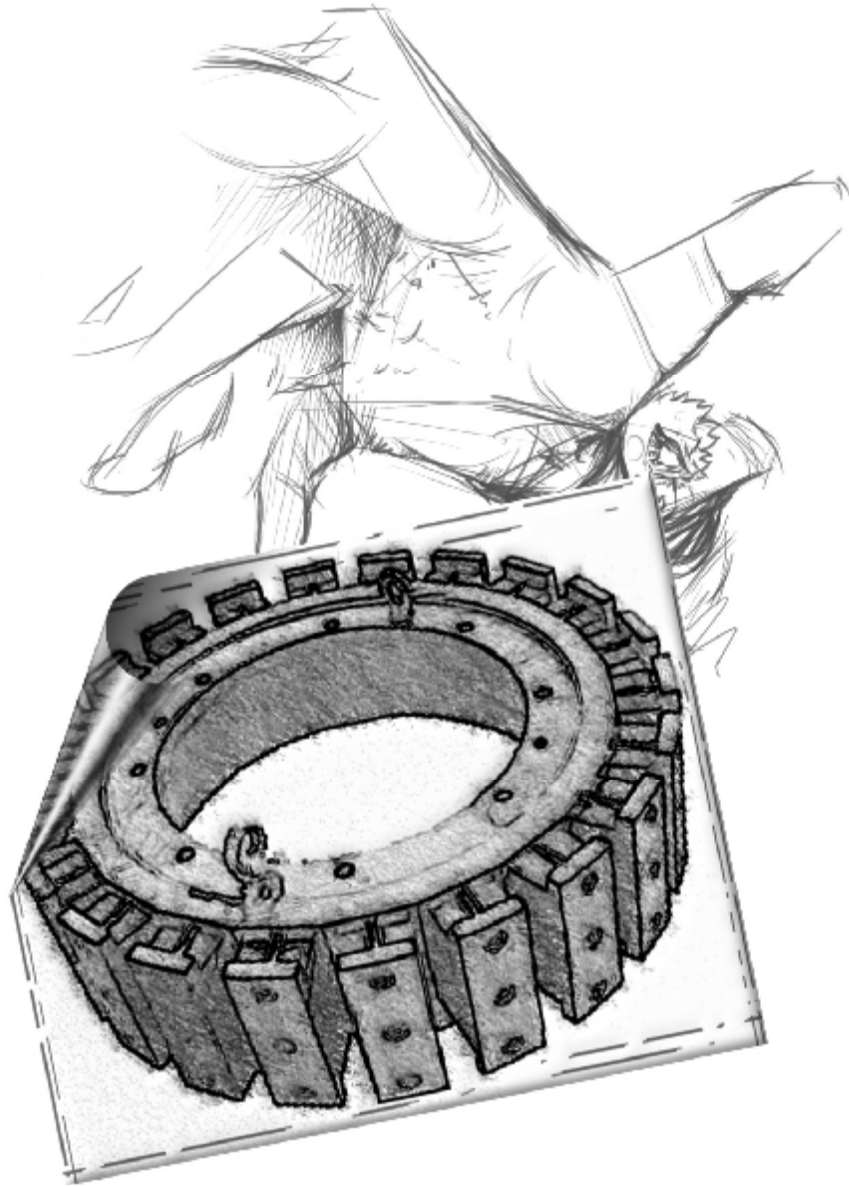
Η εξίσωση (7-21) δίνει σε κάθε στοιχειώδη όγκο d_v ενός Μ.Μ. μία συμβολή στην εν κενώ πεπλεγμένη ροή και αντιστοιχεί στην τρίτη στήλη του πίνακα (7-1), ενώ στη δεύτερη στήλη παρέχεται η λ_{PM} από την χρήση της εξίσωσης (7-22) η οποία ενσωματώνει την κατανομή της B_{PM} στην περιοχή του πηνίου. Η απόκλιση που προκύπτει από την χρήση των δύο εξισώσεων είναι μικρότερη από 6% και οφείλεται στην ακρίβεια του λογισμικού (FEM).

7.6 Συμπεράσματα

Μια νέα μαθηματική έκφραση για τη διαρροή παρήχθη. Αυτή η έκφραση περιγράφει τη διαρροή από την άποψη ενός ολοκληρώματος όγκου που εφαρμόζεται στον όγκο του μαγνητικού υλικού που βρίσκεται μέσα στη μηχανή. Με μια τέτοια διατύπωση, σε κάθε στοιχείο όγκου d_v μέσα σε μια γεννήτρια δίνει μια ορισμένη συμβολή στη συνολική εν κενώ πεπλεγμένη ροή.

Η μέθοδος της διαμόρφωσης του όγκου των μονίμων μαγνητών είναι ευεργετικότερη στην περίπτωση μιας μηχανής με μικρό πολικό βήμα, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης στις παρυφές του πεδίου. Στη συμβατική σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών, η διαμόρφωση μπορεί μόνο να βελτιώσει τη συνολική μάζα ή το κόστος κατά λίγο, λόγω του μεγάλου πολικού βήματος. Με τη μέθοδο που αναπτύσσεται σε αυτό το κεφάλαιο, το πρόβλημα αντιμετωπίζεται από την άποψη της συμβολής των στοιχείων των μαγνητών d_v στη πεπλεγμένη ροή κατά τη λειτουργία εν κενώ. Συνολικά, οδηγεί σε μια χαμηλότερη διαρροή για έναν δεδομένο όγκο μαγνητών κατά τη λειτουργία εν κενώ.

Κεφάλαιο 8



Συμπεράσματα

Η μελέτη εξετάζει το ζήτημα της μείωσης του κόστους των γεννητριών άμεσης κίνησης για εφαρμογή σε α/γ. Ο συνδυασμός: «Μέση ταχύτητα (1000-2000 rpm) + Επαγωγική γεννήτρια + Κιβώτιο ταχυτήτων» κυριαρχεί κατά ένα μεγάλο μέρος στην αγορά MW-κλίμακας α/γ. Αυτό οφείλεται στο χαμηλότερο κόστος της επιλογής ενός κιβωτίου ταχυτήτων έναντι του κόστους των συστημάτων που δεν χρησιμοποιούν κιβώτιο ταχυτήτων. Ωστόσο, υπάρχει ένα οξύ ενδιαφέρον μεταξύ των ερευνητών και των προμηθευτών α/γ για τη δυνατότητα αφαίρεσης του κιβωτίου ταχυτήτων και των δακτυλιδιών επαφής ψήκτρας από τη μηχανή. Τα κύρια πλεονεκτήματα της γεννήτριας άμεσης κίνησης είναι οι μεταβλητές ταχύτητες, η λιγότερη συντήρηση (δεν απαιτείται λιπαντικό και τα δακτυλίδια επαφής ψήκτρας μπορούν να αποφευχθούν) και η σχετικά υψηλότερη αξιοπιστία λόγω της απουσίας της φθοράς μεταξύ των ταχυτήτων του κιβωτίου. Η κατεύθυνση που ακολούθησε η μελέτη, είναι η σύγκριση διάφορων τοπολογιών μηχανών που χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες.

Οι τοπολογίες που ερευνήθηκαν ήταν:

- ◇ Η συμβατική σύγχρονη μηχανή μόνιμων μαγνητών.
- ◇ Η συμβατική σύγχρονη μηχανή M.M. με συγκέντρωση ροής.
- ◇ Η μηχανή αξονικής ροής M.M, με εγκοπές.
- ◇ Η TORUS.
- ◇ Η μηχανή εγκάρσιας ροής επιφανειακής τοποθέτησης M.M..
- ◇ Η μηχανή εγκάρσιας ροής M.M. με συγκέντρωση ροής.

Η τρέχουσα επιστημονική βιβλιογραφία δείχνει ότι τα μικρά πολικά βήματα μειώνουν τη μάζα και το κόστος του 'ενεργού υλικού' των στατών και των δρομέων. Μια σύγκριση έγινε στη μελέτη μεταξύ της ηλεκτρικής διέγερσης και της μαγνητικής διέγερσης. Διαπιστώθηκε ότι η μαγνητική διέγερση είναι οικονομικώς πιά αποδοτική για πολικά βήματα μικρότερα από 10-20 cm περίπου. Επίσης, οι μαγνητικοί δρομείς έχουν χαμηλότερες απώλειες λόγω της απουσίας απωλειών χαλκού στο δρομέα. Επίσης, έγινε μια ευρεία βιβλιογραφική έρευνα, όσο αναφορά τα υπάρχοντα σχέδια μηχανών M.M. που κατασκευάστηκαν και που προτείνονται, στην επιστημονική βιβλιογραφία. Μελετήθηκε η μέθοδος βελτιστοποίησης της αναλογίας της διαμέτρου του δρομέα σε σχέση με τη διάμετρο του στάτη, για μια συμβατική σύγχρονη μηχανής M.M. και εφαρμόστηκε για δύο κατηγορίες M.M. με χρήση του λογισμικού *Mat Lab*.

Η εργασία ερευνήσε τη συμβολή κάθε ενός μαγνητικού στοιχείου όγκου στη συνολική ροή στα τυλίγματα του στάτη. Μια νέα μαθηματική παρουσίαστικε, που περιγραφή τη πεπλεγμένη ροή από την άποψη ενός ολοκληρώματος όγκου που εφαρμόζεται στον όγκο του μαγνητικού υλικού. Για κάθε ένα μαγνητικό στοιχείο όγκου d , δώθηκε μια ορισμένη συμβολή, κατά την εν κενώ λειτουργία πεπλεγμένη ροή. Κατόπιν, αναπτύχθηκε μια μέθοδος για την ελαχιστοποίηση του όγκου του μαγνητικού υλικού μέσα στις μηχανές.

Κεφάλαιο 9



Παραρτήματα

Παράρτημα Α*

Α. Διαστάσεις των πηνίων του δρομέα και των Μ.Μ. στις συμβατικές σύγχρονες μηχανές

Διατυπώνεται η σχέση μεταξύ του ύψους h_{PM} των Μ.Μ. και η εν κενώ μαγνητική επαγωγή B_g στο διάκενο. Η καταστατική σχέση της μαγνητικής επαγωγής ενός μόνιμου μαγνήτη δίνεται από:

$$\vec{B} = m_0 \vec{H}_{PM} + \vec{B}_r \quad (A-1)$$

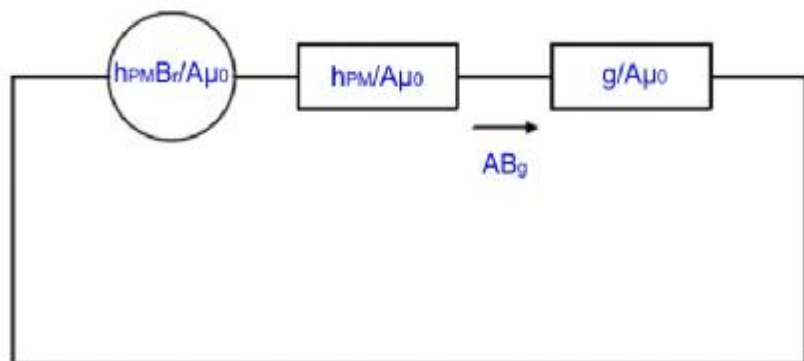
Υποθέτοντας τη μεταλλική επιφάνεια απείρως διαπερατή, οι Μ.Μ. και το διάκενο μπορούν να διαμορφωθούν από το ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα που παρουσιάζεται στην εικόνα (A-1). Από την επίλυση του μαγνητικού κυκλώματος της εικόνας (A-1), λαμβάνουμε τη μαγν. επαγωγή στο διάκενο:

$$B_g = B_r \frac{h_{PM}}{h_{PM} + g} \quad (A-2)$$

Μπορούμε επίσης να εκφράσουμε το πάχος των μαγνητών ως συνάρτηση της μαγν. επαγωγής στο διάκενο:

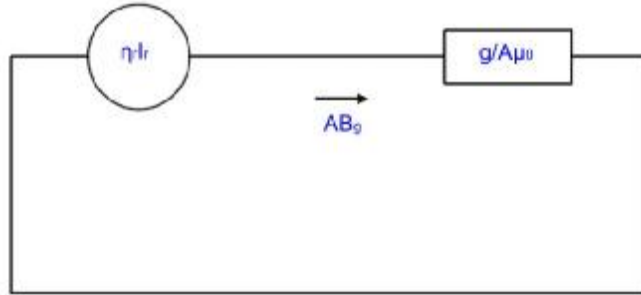
$$h_{PM} = g \frac{B_g}{B_r - B_g} \quad (A-3)$$

Η διέγερση του δρομέα μπορεί να αντικατασταθεί από ένα πηνίο τυλιγμένο γύρω από έναν πυρήνα σιδήρου.



ΕΙΚΟΝΑ Α-1: Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα 1 Μ.Μ. και 1 διακένου

Αυτή το πηνίο τροφοδοτείται με μια μαγνητεγερτική δύναμη $n_r I_r$, η οποία δημιουργεί μια μαγνητική επαγωγή B_g στο διάκενο. Πάλι υποθέτοντας απείρως διαπερατό το μεταλλικό τμήμα της γεννήτριας, σχεδιάζουμε το μαγνητικό κύκλωμα της εικόνας (A-2):



ΕΙΚΟΝΑ A-2: Μαγνητικό ισοδύναμο κύκλωμα 1 δρομέα και 1 διακένου σε μια περιελιγμένου δρομέα σύγχρονη μηχανή

Από την επίλυση του μαγνητικού κυκλώματος της εικόνας (A-2), λαμβάνουμε τη μαγν. επαγωγή στο διάκενο:

$$B_g = h_r I_r \frac{m_0}{g} \quad (\text{A-4})$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη $n_r I_r$ μπορεί επίσης να εκφραστεί ως συνάρτηση των διαστάσεων της περιοχής των τυλιγμάτων του δρομέα:

$$h_r I_r = J_r A_{Cur} = J_r (h_{Cur} W_{Cur} k_{rfill}) \quad (\text{A-5})$$

Το πλάτος των πηνίων W_{Cur} εξαρτάται από την μαγν. επαγωγή κορεσμού B_{Fesat} του πυρήνα των δρομέων και την μαγν. επαγωγή B_g στο διάκενο. Στην εικόνα (A-2), η μαγν. επαγωγή είναι υψηλότερη στο κεντρικό μέρος του πόλου του δρομέα, απ'ό,τι μέσα στο πέδιλο του πόλου. Μπορούμε να εκφράσουμε το πλάτος του πηνίου ως συνάρτηση της μαγν. επαγωγής στο διάκενο και ως συνάρτηση της μαγν. επαγωγής κορεσμού από τις ελασματοποιήσεις χάλυβα :

$$W_{Cur} = \frac{t_p}{2} \left(\frac{B_{Fesat} - B_g}{B_{Fesat}} \right) \quad (\text{A-6})$$

Με την παρεμβολή της εξίσωσης (A-4) και της εξίσωσης (A-5) στην εξίσωση (A-6), μπορούμε να γράψουμε:

$$B_g = \frac{m_0 J_r k_{rfill} t_p h_{Cur}}{2g} \left(\frac{B_{Fesat} - B_g}{B_{Fesat}} \right) \quad (\text{A-7})$$

Λύνοντας ως προς h_{Cur} :

$$h_{Cur} = \frac{2g B_g B_{Fesat}}{m_0 J_r k_{rfill} t_p (B_{Fesat} - B_g)} \quad (\text{A-8})$$

Η εξίσωση (A-8) παρέχει το πάχος του τυλίγματος του χαλκού στο πηνίο του δρομέα, προκειμένου να δοθεί μια μαγνητική επαγωγή B_g στο διάκενο. Σε αυτό το σημείο, μπορούμε να γράψουμε την αναλογία του πάχους μεταξύ του τυλίγματος του χαλκού και του μόνιμου

μαγνήτη που δημιουργεί μια ισοδύναμη μαγνητική επαγωγή στο διάκενο. Αυτή η αναλογία λαμβάνεται με τη διαίρεση της εξίσωσης (A-8) από την εξίσωση (A-3):

$$\frac{h_{Cur}}{h_{PM}} = \frac{2B_{Fesat}(B_r - B_g)}{m_0 J_r k_{rfill} t_p (B_{Fesat} - B_g)} \quad (A-9)$$

Παράρτημα Β*

Β. Περισσότερες πληροφορίες για τους Nd-Fe-B (Neodymium) μαγνήτες

Β.1 Γενικά



ΕΙΚΟΝΑ Β-1: Μερικά σχήματα Nd-Fe-B μαγνητών

Οι μόνιμοι μαγνήτες Nd-Fe-B αποτελούνται από νεοδύμιο (neodymium), σίδηρο (iron), βόριο (boron) και μερικά μεταβατικά μέταλλα. Αυτοί οι μαγνήτες είναι εξαιρετικά ισχυροί παρά το σχετικά μικρό μέγεθός τους, μεταλλικοί στην εμφάνιση και βρίσκονται σε απλές μορφές όπως δακτυλίδια, πλάκες και δίσκοι. Περισσότερες πληροφορίες στην ιστοσελίδα: **Πηγή:* <http://www.allmagnetics.com/index.htm>

Β.2 Ιδιότητες του neodymium

- ◇ Πολύ υψηλή αντίσταση στην απομαγνήτιση.
- ◇ Υψηλή μαγνητική ενέργεια σε σχέση με το μέγεθος τους.
- ◇ Σταθεροί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- ◇ Σχετικά φθηνοί.

- ◊ Το υλικό διαβρώνεται σχετικά εύκολα για αυτό πρέπει να επικαλυφθεί με κάποιο μονωτικό υλικό για τη μακροπρόθεσμη μέγιστη ενεργειακή παραγωγή.

Παράρτημα Γ*

Γ. Σχέδια μηχανών Μ.Μ. που αναφέρονται στη βιβλιογραφία

Γ.1 Χαρακτηριστικά σχέδια συμβατικής Μ.Μ. σύγχρονης μηχανής αναφερόμενα σε δημοσιεύσεις

ΠΙΝΑΚΑΣ Γ-1: Χαρακτηριστικά σχέδια της συμβατικής σύγχρονης μηχανής Μ.Μ.

ΠΗΓΗ	Εξωτ. Διάμετρος (m)	Ροπή (kNm)	Ταχύτητα (rpm)	Συνολική Ενεργή Μάζα (kg)	Μάζα Μ.Μ. (kg)	Απόδοση (%)	Κόστος Ενεργού Υλικού (Euro)	Κόστος/Ροπή (Euro/kNm)	Ροπή/Μάζα (Nm/kg)
Zha 1996	0.16	0.03	750	17.2	0.73	86	128	4022	1.9
Mit 2002	0.21	0.23	10500	52	N/A	97	N/A	N/A	4.4
Lan 2000	0.41	1.16	616	79	4.04	94	634	545	14.7
Mit 2002	0.46	2.27	1050	128	N/A	95	N/A	N/A	17.8
Mit 2002	0.54	2.27	1050	201	N/A	97	N/A	N/A	11.3
Gra 1997	1.00	2.55	75	610	N/A	89	N/A	N/A	4.2

ΠΗΓΗ	Εξωτ. Διάμετρος (m)	Ροπή (kNm)	Ταχύτητα (rpm)	Συνολική Ενεργή Μάζα (kg)	Μάζα Μ.Μ. (kg)	Απόδοση (%)	Κόστος Ενεργού Υλικού (Euro)	Κόστος/Ροπή (Euro/kNm)	Ροπή/Μάζα (Nm/kg)
Gra 1996b	1.60	20.6	46	750	40	93	5860	285	27.5
Spo 1992a	1.65	43	46	1600	N/A	94	N/A	N/A	26.9
Gra 1996b	2.00	48	40	1200	55	93	9070	189	40.0
Gra 1996b	2.40	113	34	2100	110	94	16340	145	53.8
Spo 1992a	2.64	180	28	4100	N/A	94	N/A	N/A	43.8
Lam 1996	2.67	119	40	3300	150	95	24900	209	36.2
Spo 1992a	3.30	347	23	6400	N/A	94	N/A	N/A	54.2
Gra 1996b	3.30	244	29	4000	190	95	30460	125	61.0
Gra 1996b	3.60	348	27	5100	270	95	39780	114	68.2

Γ.2 Χαρακτηριστικά σχέδια συμβατικής σύγχρονης μηχανής M.M. με συγκέντρωση ροής που αναφέρονται σε δημοσιεύσεις

ΠΙΝΑΚΑΣ Γ-2: Χαρακτηριστικά σχέδια της συμβατικής σύγχρονης μηχανής M.M. με συγκέντρωση ροής

ΠΗΓΗ	Εξωτ. Διάμετρος (m)	Ροπή (kNm)	Ταχύτητα (rpm)	Συνολική Ενεργή Μάζα (kg)	Μάζα M.M. (kg)	Απόδοση (%)	Κόστος Ενεργού Υλικού (Euro)	Κόστος/Ροπή (Euro/kNm)	Ροπή/Μάζα (Nm/kg)
Spo 1992a	1.65	43	46	2300	N/A	95	13800	321	18.7
Spo 1996	2.16	106.1	36	5600	650	91	55700	525	19.0
Spo 1992a	2.64	179.5	28	6000	N/A	95	36000	201	29.9
Spo 1992a	3.30	346.5	23	9000	N/A	95	54000	156	38.5

Γ.3 Χαρακτηριστικά σχέδια TORUS μηχανής αναφερόμενα σε δημοσιεύσεις

ΠΙΝΑΚΑΣ Γ-4: Χαρακτηριστικά σχέδια μηχανής TORUS

ΠΗΓΗ	Εξωτ. Διάμετρος (m)	Ροπή (kNm)	Ταχύτητα (rpm)	Συνολική Ενεργή Μάζα (kg)	Μάζα Μ.Μ. (kg)	Απόδοση (%)	Κόστος Ενεργού Υλικού (Euro)	Κόστος/Ροπή (Euro/kNm)	Ροπή/Μάζα (Nm/kg)
Car 1994	0.15	0.030	500	14	2.0	90	152	5069	2.1
Spo 1992b	0.16	0.008	3000	6.4	0.8	75	66	8330	1.2
Spo 1992b	0.17	0.008	3000	7.7	0.9	69	76	9523	1.0
Cha 1997	0.21	0.023	3300	7.1	2.0	84	111	4777	3.3
Cha 1997	0.22	0.029	750	6.8	1.0	84	75	2611	4.2
Car 1997	0.22	0.023	750	8.4	1.0	N/A	84	3683	2.7
DiN 1991	0.24	0.033	375	8.6	0.95	82	84	2536	3.8
Bro 2002	0.29	0.054	3000	29	1.8	90	235	4347	1.9
Cha 1997	0.32	0.22	1100	26.8	8.5	93	450	2089	8.0
Cha 1997	0.40	0.23	750	42	6.5	90	473	2064	5.5
Car 1999a	0.46	0.19	256	60	11.9	90	765	4100	3.1
Cha 1999	0.47	0.24	200	98.5	15.8	81	1128	4726	2.4
Sti 1992	0.50	0.09	300	35	N/A	86	N/A	N/A	2.5
Car 1999b	3.10	372.2	195	7320	1080	98	80640	217	50.8
LoB 1997	3.20	260.4	22	5325	1116	94	69894	268	48.9
Hon 1991	3.46	95.5	100	3000	N/A	97	N/A	N/A	31.8
LoB 1997	3.60	260.4	22	4900	1002	95	63468	244	53.2
Car 1999b	3.80	685.6	195	13640	1920	98	147120	215	50.2
LoB 1997	4.50	260.4	22	4198	817	96	52966	203	62.0

Γ.4 Χαρακτηριστικά σχέδια των μηχανών Μ.Μ., εγκάρσιας ροής αναφερόμενα μέσα σε δημοσιεύσεις

ΠΙΝΑΚΑΣ Γ-3: Χαρακτηριστικά σχέδια των μηχανών Μ.Μ., εγκάρσιας ροής

ΠΗΓΗ	Εξωτ. Διάμετρος (m)	Ροπή (kNm)	Ταχύτητα (rpm)	Συνολική Ενεργή Μάζα (kg)	Μάζα Μ.Μ. (kg)	Απόδοση (%)	Κόστος Ενεργού Υλικού (Euro)	Κόστος/Ροπή (Euro/kNm)	Ροπή/Μάζα (Nm/kg)
Har 1998	0.17	0.07	N/A	9.3	1.2	N/A	97	1361	7.6
Hen 1997	0.28	0.30	1200	25	1.8	90	211	704	12
Mad 1998	0.34	0.54	N/A	20.8	2.1	N/A	195	361	25.9
Har 1998	0.36	0.26	N/A	22.7	1.2	N/A	178	695	11.3
Har 1998	0.36	2.27	N/A	201	1.2	N/A	178	695	14.3
Mec 1996	0.36	0.31	N/A	22.7	1.2	N/A	178	695	13.8
Lan 2000	0.37	1.26	570	73	11.5	98	829	660	17.2
Bli 2000	0.39	2.50	600	110	N/A	N/A	N/A	N/A	22.7
Weh 1988a	0.50	0.28	195	27.2	2.0	91	231	814	10.4
Weh 1988a	1.00	6.73	78	176	14.0	94	1532	228	38.3

Παράρτημα Δ*

Δ.1 Η αντίδραση οπλισμού και η απομαγνήτιση

Το ρεύμα που ρέει στο στάτη τείνει να διαστρεβλώσει το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τον μόνιμο μαγνήτη. Όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα στο στατή, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση του πεδίου. Στις μηχανές συνεχούς ρεύματος, αυτή η επίδραση είναι γνωστή ως αντίδραση οπλισμού. Στις μηχανές μονίμων μαγνητών όπου οι μαγνήτες είναι επιφανειακού τύπου (*surface type*), δηλ. τοποθετούνται πάνω στην επιφάνεια του δρομέα, το φαινόμενο είναι ασθενές επειδή οι μαγνήτες παρουσιάζουν χαμηλή διαπερατότητα στην μαγνητεγερτική δύναμη του ρεύματος στο στάτη. Η σημαντικότερη επίδραση της αντίδρασης οπλισμού στις μηχανές μονίμων μαγνητών είναι η δυνατότητα να απομαγνήτισει μερικώς ή και συνολικά τους μαγνήτες. Η επίδραση της αντίδρασης οπλισμού ή η επίδραση φορτίου πρέπει να μελετηθεί τουλάχιστον με τις χειρότερες συνθήκες λειτουργίας φορτίου και η σχεδίαση πρέπει να αλλάξει εάν η επίδραση της είναι έντονη.

Δ.2 Η οδοντωτή/απαιτούμενη ροπή

Η οδοντωτή/απαιτούμενη ροπή είναι μια ταλαντούμενη ροπή που προκαλείται από την τάση του δρομέα να ευθυγραμμίζεται με το στάτη σε μια ιδιαίτερη κατεύθυνση όπου η αντίσταση της μαγν. ροής του μαγνητικού κυκλώματος, που δημιουργείται από τους μόνιμους μαγνήτες μεγιστοποιείται. Η οδοντωτή/απαιτούμενη ροπή υπάρχει ακόμα και όταν δεν ρέει ρεύμα στους στάτες. Όταν η μηχανή λειτουργεί, η πρόσθετη ταλάντωση ροπής μπορεί να προκύψει από την αλληλεπίδραση του μαγνήτη με τις αρμονικές, του σχεδίου, των τυλιγμάτων και του ρεύματος. Αυτά τα πρόσθετα τμήματα ταλαντώσεων ροπής είναι ηλεκτρομαγνητικά και αναφέρονται γενικά ως κυματισμός ροπής, ενώ ο όρος οδοντωτή/απαιτούμενη διατηρείται κατά την λειτουργία μηδενικού ρεύματος.

Σε μια καλά σχεδιασμένη μηχανή, ο κυματισμός ροπής και η οδοντωτή/απαιτούμενη, θα είναι και οι δύο αμελητέες, αλλά είναι δυνατόν ο κυματισμός ροπής να ξεπεράσει την οδοντωτή/απαιτούμενη ροπή, εάν η μηχανή έχει ένα ακατάλληλο σχέδιο τυλιγμάτων, ρεύματος και γεωμετρίας. Στην πραγματικότητα, ο συντελεστής αντίστασης μαγν. ροής μπορεί να θεωρηθεί ότι συγκεντρώνεται στις άκρες του μαγνήτη. Ένα μικρό ποσό ασυμμετρίας είναι συνήθως επαρκές για να αποβάλει το μεγαλύτερο μέρος της οδοντωτής/απαιτούμενης. Όταν ο αριθμός των αυλακώσεων ανά πόλο ισούται με τη μονάδα, η γεωμετρία των εγκοπών γίνεται

σημαντικότερη και τα πλάτη των δοντιών μπορούν να ρυθμιστούν για να ελαχιστοποιήσουν το φαινόμενο της οδοντωτής/απαιτούμενης ροπής.

Δ.2.1 Οι προσεγγιστικοί υπολογισμοί της απαιτούμενης ροπής

Οι τεχνικές υπολογισμών της απαιτούμενης ροπής χωρίζονται σε δύο αρχικές κατηγορίες [Deo 1996]:

- Ø Αριθμητικές.
- Ø Αναλυτικές.

Οι αριθμητικές προσεγγίσεις αρχίζουν χαρακτηριστικά με τον υπολογισμό της κατανομής της μαγν. επαγωγής στο διάκενο B_g όπως αναφέρονται σε δημοσιεύσεις όπως [Zhu 1992], [Gie 2004]. Αυτοί οι υπολογισμοί απαιτούν μια σειρά από απλουστεύσεις και προσεγγίσεις προκειμένου να κατασταθεί το πρόβλημα πιο ευκολο, τέτοιες υποθέσεις όπως: άπειρη διαπερατότητα, ή/και μηδενική μαγν. επαγωγή στις εγκοπές του στάτη.

Η απαιτούμενη ροπή προέρχεται από την κατανομή της μαγν. επαγωγής είτε με παραγωγή της σχετικής όμο ενέργειας, είτε με το άθροισμα της πλευρικής μαγνητικής δύναμης κατά μήκος των πλευρών των δοντιών του στάτη. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είναι η δημοφιλέστερη προσέγγιση για τον αναλυτικό υπολογισμό της απαιτούμενης ροπής [Li 1988], [Ish 1993]. Εντούτοις, πιά προσεκτική εξέταση δείχνει ότι υπάρχουν πολλές παραλλαγές στο πώς η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται. Αν και η πλειοψηφία των αναφερόμενων δημοσιεύσεων χρησιμοποιεί μια καθιερωμένη 2-διαστατη (2-D) πεπερασμένη ανάλυση στοιχείων, πιά πρόσφατη έρευνα έχει χρησιμοποιήσει 3-διαστατες (3-D) διατυπώσεις στην προσπάθεια να διαμορφωθούν τα αποτελέσματα και η δομή των μηχανών με περισσότερη ακρίβεια. Η ροπή λαμβάνεται χαρακτηριστικά από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας δύο προσεγγίσεις:

- Ø Η ενεργειακή μέθοδος με την οποία η ροπή υπολογίζεται από τις διαφορές του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού στις διάφορες επαυξητικές γωνιακές θέσεις.
- Ø Αμεσότερος υπολογισμός της ροπής με την ενσωμάτωση του αποτελέσματος του τανυστή εντάσεως *Maxwell* στην επιφάνεια του διακένου της μηχανής.

Τα αναφερόμενα αποτελέσματα προτείνουν ότι καμία από αυτές τις μεθόδους υπολογισμού της απαιτούμενης ροπής δεν μπορούν να θεωρηθούν ανώτερες από άλλες σε οποιαδήποτε περίπτωση. Αν και οι τεχνικές ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων είναι πιο ακριβείς σε υπολογισμούς πεδίων από τις αριθμητικές προσεγγίσεις, οι οποίες βασίζονται σε απλουστεύσεις των γεωμετριών, υποβάλλονται επίσης σε λάθη. Λαμβάνοντας υπόψη την περίπλοκη γεωμετρία που έχουν ορισμένες μηχανές και τις μη γραμμικές ιδιότητες των υλικών, υπάρχει μια γενική ανταλλαγή μεταξύ της πολυπλοκότητας υπολογισμού και της απαραίτητης

ακρίβειας στην πρόβλεψη της ροπής, οι οποίες πρέπει να κριθούν σε κάθε περίπτωση χωριστά.

Παράρτημα Ε*

Ε. Οι εκφράσεις της επαγόμενης τάσης E και της μαγνητικής ροής Φ

Από τον νόμο του *Faraday*, η τάση E μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$E = K \omega_m \Phi_g \quad (\text{E-1})$$

Όπου:

- ◊ Φ_g : Μαγνητική επαγωγή στο διάκενο.
- ◊ ω_m : Περιστροφική ταχύτητα της μηχανής
- ◊ K : Σταθερά της μηχανής, η οποία είναι συγκεκριμένη για κάθε τοπολογία.

∅ Η σταθερά K

Η σταθερά K ισούται με:

$$K = \frac{N_{Cu}}{\sqrt{2}} \quad (\text{E-2})$$

Όπου:

- ◊ N_{Cu} : Αριθμός του χαλκού ανά σπείρα.

Από τις υποθέσεις της παραγράφου 6.3, η μηχανή είναι τριφασική ($m=3$). Συνεπώς οι σπείρες του χαλκού θα είναι 3. Επιπρόσθετα, ο στάτης αποτελείται από 36 εγκοπές, 12 σε κάθε φάση και οι στροφές των τυλιγμάτων ανα εγκοπή είναι 60. Επομένως ο αριθμός του χαλκού ανά σπείρα N_{Cu} θα ισούται με:

$$N_{Cu} = 60 \times 12 = 720 \text{speireV}$$

Άρα η σταθερά της μηχανής K θα ισούται:

$$K = \frac{720}{\sqrt{2}} = 509.12$$

Ø Η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο Φ_g

Η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\Phi_g = B_g t_p L_a \quad (E-3)$$

Όπου:

- ◇ B_g : Μαγνητική επαγωγή του διακένου
- ◇ t_p : Πολικό βήμα
- ◇ L_a : Μήκος της μηχανής

Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων για τους δύο τύπους της μηχανής έχουν υπολογιστεί στο κεφάλαιο 5 από το *Mat Lab*. Ο παρακάτω πίνακας (E-1) παρουσιάζει τις τιμές των παραμέτρων.

ΠΙΝΑΚΑΣ E-1: Τιμές των παραμέτρων προσδιορισμού της μαγνητικής ροής του διακένου

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΦΕΡΡΙΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	Nd-Fe-B ΣΥΣΤΗΜΑ
Μαγνητική επαγωγή διακένου B_g (T)	0.35874	0.35874
Μήκος της μηχανής L_a (m)	0.136	0.136
Πολικό βήμα t_p (m)	0.0057	0.0041

Από όπου λαμβάνεται η μαγνητική ροή του διακένου για τα δύο συστήματα μαγνητών, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στον πίνακα (E-2):

ΠΙΝΑΚΑΣ E-2: Τιμές της μαγνητικής ροής του διακένου

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΦΕΡΡΙΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	Nd-Fe-B ΣΥΣΤΗΜΑ
Μαγνητική ροή διακένου Φ_g (Wb)	0.0278	0.0555

∅ Η περιστροφική ταχύτητα της μηχανής ω_m

Η περιστροφική ταχύτητα της μηχανής από τα δεδομένα ισούται με $\omega_m=1500$ rpm. Δηλαδή

$$\omega_m = \frac{2p}{60} 1500$$

Συνεπώς η επαγόμενη τάση E για τα δύο μαγνητικά συστήματα από αντικατάσταση των παραπάνω τιμών στην εξίσωση (E-1):

ΠΙΝΑΚΑΣ E-3: Επαγόμενη τάση για του δύο τύπους μηχανών

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΦΕΡΡΙΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	Nd-Fe-B ΣΥΣΤΗΜΑ
Επαγόμενη τάση E (V)	353.6	909.7

Παράρτημα Z*

Z. Ο κώδικας MatLab

∅ Κώδικας MatLab

```
ΚΩΔΙΚΑΣ

cle;

clear all;

%Magnet Parameters

ur=;

Br=;

%Motor Parameters

p=;

Do=;

Ns=;
```

```

kp=;
rho=;
Pc=;%The total losses of a machine are taken to be 10%
      %of the total output power of the machine which is 300W
      %Therefore, the total power losses=30 W
      %So, the copper losses as 20W since the core losses and other
      % losses constitute a low percentatge of the total losses
      %at rated values.

```

```
La=;
```

```
Bmax=;
```

```
%Material Costs
```

```
CCU=;%Copper
```

```
CST=;%Iron
```

```
Cmag=;%Magnet
```

```
% Inital Conditions
```

```
lm=;% Magnet Length
```

```
lg=;% Air Gap Length
```

```
%Calculating Optimum
```

```
Bg=Br/(1+ur*lg/lm);
```

```
a=(Bg/Bmax)^2*((pi/p)^2+2*pi/p)+2*Bg/Bmax-1;
```

```
b=-Bg/Bmax*(2*pi/p+2);
```

```
c=1;
```

```
a1=2*a;
```

```
b1=3/2*b;
```

```
ratio=(-b1-(b1^2-4*a1*c)^0.5)/(2*a1);
```

```
Dr=ratio*Do;
```

```
tp=pi*(Dr+2*lg)/Ns;
```

```
Wt=Bg*tp/Bmax;
```


$$db=Wt*Ns/(2*p);$$

$$d1=Do-2*db;$$

$$d2=Dr+2*lg;$$

$$ab=pi*d1/Ns-Wt;$$

$$cd=pi*d2/Ns-Wt;$$

$$Sd=(d1-d2)/2;$$

$$As=Sd*(ab+cd)/2;$$

$$Acu=As*kp*Ns;$$

$$T=((La*Bg^2*Dr^2*Pc*Acu)/(4*rho))^0.5;$$

$$J=(Pc/(Acu*La*rho))^0.5;$$

$$A=J*Acu/(pi*Dr);$$

$$SSA=pi/4*(Do+d2)*(Do-d2)-As*Ns;$$

$$RSA=pi/4*(Dr-2*lm)^2;$$

$$SA=SSA+RSA;$$

$$Vm=pi*lm*La*(Dr-lm);$$

$$VCC=La*Acu;$$

$$VS=SA*La;$$

Κεφάλαιο 10



Βιβλιογραφία

10.1 Πηγές:

- Ø www.ieee.org
- Ø www.sciencedirect.com
- Ø www.google.com

10.2 Αναφορές:

[Aca 1997]:

- ◇ P.P. Acarnley, B.C. Mecrow, J.S. Burdess, J.N. Fawcett και P.G. Dickinson: “An integrated flywheel/machine energy store for road vehicles”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1997 IEE Colloquium on New Topologies for Perm. Mag. Mach.*, pp. 9/1-9/6.

[Ack 1992]:

- ◇ B. Ackermann, J.H.H. Janssen, R. Sottek και R.I. Van Steen: “New technique for reducing cogging torque in a class of brushless DC motors”
- ◇ Πηγή: *IEE Proceedings-B*, vol. 139, No. 4, July 1992, pp.315-320.

[Ark 1992]:

- ◇ A.A. Arkadan, R. Vyas, J.G. Vaidya και M.J. Shah: “Effect of toothless stator design on core and stator conductors eddy current losses in PM generators”
- ◇ Πηγή: *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 7, pp. 231-237, March 1992.

[Bir 1991]:

- ◇ M.J. Birks: “Directly Coupled, Slow Speed Wind Turbine Alternators”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1991 Symposium Electr. Syst. for Wind Turbines with Constant and Variable Speed, Göteborg*, pp. 15-24.

[Böh 1997]:

- ◇ G. Böhmeke, R. Boldt και H. Beneke: “Geared Drive Intermediate Solutions-Comparisons of Design Features and Operating Economics”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1997Europ. Wind Energy Conf.*, pp. 664-667.

[Böh 2003]:

- ◇ G. Böhmeke: “Development and operational experience of the wind energy converter WWD-1”
- ◇ Πηγή: *Proc. 2003 Europ. Wind Energy Conf.*

[Bor 1996]:

- ◇ M. Bork and G. Henneberger: “New Transverse Flux Concept for an Electric Vehicle Drive System”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1996 Int. Conf. on Elec. Mach., pp. 308- 313.*

[Bro 1962]:

- ◇ W. F. Brown: “Magnetostatic Principles in Ferromagnetism”
- ◇ Πηγή: *Amsterdam: North-Holland, 1962.*

[Bro 2002]:

- ◇ P. Brooking και J.R. Bumby: “An Integrated Engine-Generator set with Power Electronic Interface for Hybrid Electric Vehicle Applications”
- ◇ Πηγή: *Proc. 2002 Power Electronics, Machines & Drives Conf., pp. 153-158.*

[Bli 2000]:

- ◇ R. Blissenbach, G. Henneberger, U. Schäfer και W. Hackmann: “Development of a transverse flux traction motor in a direct drive system”
- ◇ Πηγή: *Proc. 2000 Int. Conf. on Elec. Mach., pp. 1457-1460.*

[BTM 2001]:

- ◇ BTM Consult: “International Wind Energy Development. World Market Update 2000”

[Car 1959]:

- ◇ C.J. Carpenter: “Surface-Integral Methods of Calculating Forces on Magnetized Iron Parts”
- ◇ Πηγή: *IEE Monograph no. 342, pp. 19-28, Aug. 1959.*

[Car 1994]:

- ◇ F. Caricchi, F. Crescimbin, O. Honorati και R. Vivarelli: “Prototype of a Wind-Turbine Directly-Coupled Axial-Flux PM Generator”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1994 Europ. Wind Energy Conf., pp. 492-499.*

[Car 1997]:

- ◇ F. Caricchi, F. Crescimbin, E. Santini και C. Santucci: “Influence of the Radial Variation of the Magnet Pitch in Slotless Permanent Magnets Axial Flux Motors”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1997 IEEE Conf. Ind. Appl. Soc., pp. 18-23.*

[Car 1999a]:

- ◇ F. Caricchi, V. Callea, F. Crescimbin, L. Solero και M. Falchetta: “Prototype of Variable-Speed, Direct-Drive generator for wind power exploitation in extremely cold climates”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1999 European Wind Energy Conf., pp. 821- 824.*

[Car 1999b]:

- ◇ F. Caricchi, F. Crescimbin, και O. Honorati: “Modular Axial-Flux Permanent-Magnet for Ship propulsion drives”
- ◇ Πηγή: *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 14, no. 3, pp. 673-679, Sept. 1999.

[Car 1995]:

- ◇ R. Cardenas, W.F. Ray και G.M. Asher: “Switched Reluctance Generators for Wind Energy Applications”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1995 Power Elec. Specialist Conf.*, pp. 559-564.

[Car 1996]:

- ◇ O. Carlson, J. Hylander και K. Thorborg: “Survey of Variable Speed Operations of Wind Turbines”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1996 Europ. Wind Energy Conf.*, pp. 406-409.

[Car 1999b]:

- ◇ F. Caricchi, F. Crescimbin και O. Honorati: “Modular Axial-Flux Permanent-Magnet for Ship propulsion drives”
- ◇ Πηγή: *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 14, no. 3, pp. 673-679, Sept. 1999.

[Cha 1997]:

- ◇ B.J. Chalmers, E. Spooner, O. Honorati, F. Crescimbin, F. Caricchi: “Compact PM Machines”
- ◇ Πηγή: *Electric Machines and Power Systems*, vol. 25, pp.635-648, 1997.

[Cha 1993]:

- ◇ J. Chaaban: “ Determination of the optimum Rotor/Stator diameter ratio of a permanent magnet machines
- ◇ Πηγή: *IEEE Trans.*, pp 521-530

[Cha 1999]:

- ◇ B.J. Chalmers, W. Wu, και E. Spooner: “An Axial-Flux PM Generator for a Gearless Wind Energy System”
- ◇ Πηγή: *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 14, no.2, pp. 251- 257, June 1999.

[Car 1994]:

- ◇ F. Caricchi, F. Crescimbin, O. Honorati και R. Vivarelli: “Prototype of a Wind-Turbine Directly-Coupled Axial-Flux PM Generator”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1994 Europ. Wind Energy Conf.*, pp. 492-499.

[Che 1996]:

- ◇ Z. Chen and E. Spooner: “Grid Interface for a Variable-Speed, Permanent-Magnet, Wind Turbine Generator”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1996 Int. Conf. on Elec. Mach.*, pp. 347-352.

[Coe 1996]:

- ◇ J. M. D. Coey: "Rare-earth iron permanent magnets"
- ◇ Πηγή: *Oxford, Clarendon Press, 1996.*

[deM 1999]:

- ◇ L.H. de Medeiros, G. Reyne, και G. Meunier: "About the distribution of forces in permanent magnets"
- ◇ Πηγή: *IEEE Trans. on Magnetics, vol. 35, no. 3, pp. 1215-1218, May 1999.*

[deH 1994]:

- ◇ S.W.H. de Haan, T.G. van Engelen, C.F.A. Frumau, A.T. Veltman, E.J. Wildenbeest, S.E. Childs, και D.A. Torrey: "Development of a Gearless Drive with Variable Reluctance Generator for Variable Speed Wind Turbines"
- ◇ Πηγή: *Proc. 1994 Europ. Wind Energy Conf., pp.1-4.*

[deH 1995]:

- ◇ S.W.H. de Haan, A.T. Veltman, J. Janousek, Z. Cerovsky, J. Mericka, J. Pavelka, J. Perina, και F. Petrasek: "A High Efficiency Electrical Conversion System with Variable Reluctance Generator for Variable Speed Wind Turbines"
- ◇ Πηγή: *ECN, The Netherlands, Tech. Rep. ECN-C--95-033, May 1995.*

[Dex 2002]:

- ◇ Dexter Magnetics: "Magnetic material specification data sheets, 2002"

[Deo 1996]:

- ◇ R. P. Deodhar, D. A. Staton, T. M. Jahns και T. J. Miller: "Prediction of cogging torque using the flux-MMF diagram technique"
- ◇ Πηγή: *IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 32, no. 3, pp. 569-576, 1996.*

[Dit 2003]:

- ◇ Dittrich, και A. Stoev: "Grid Voltage Fault Proof Doubly-Fed Induction Generator System"
- ◇ Πηγή: *Proc. 2003 Europ. Pow. Electronics Conf., paper 363.*

[DiN 1991]:

- ◇ Di Napoli, F. Caricchi, F. Crescimbin και G. Noia: "Design Criteria of a Low-Speed Axial-Flux PM Synchronous Machines"
- ◇ Πηγή: *Proc. 1991 Intern. Conf. on Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines, pp. 1119- 1123.*

[Dub 2000]:

- ◇ M.R. Dubois, H. Polinder και J.A. Ferreira: "Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines"
- ◇ Πηγή: *Proc. 2000 Nordic Countries Pow. and Indust. Elec., pp. 22-26.*

[Dub 2001a]:

- ◇ M.R. Dubois, H. Polinder και J.A. Ferreira: “Axial and Radial-Flux PM Generators for Direct-Drive Wind Turbines”
- ◇ Πηγή: [Proc. 2001 Europ. Wind Energy Conf., pp. 1112-1115.](#)

[Dub 2001b]:

- ◇ M.R. Dubois, H. Polinder και J.A. Ferreira: “Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbines, an adapted Technology for Turbines running in Cold Climate”
- ◇ Πηγή: <http://ee.its.tudelft.nl/EPP>

[Dub 2002a]:

- ◇ M.R. Dubois, H. Polinder και J.A. Ferreira: “Influence of Air Gap Thickness in Transverse Flux Permanent Magnet (TFPM) Generators for Wind Turbine Application”
- ◇ Πηγή: [Proc. 2002 IEEE PELS Soc. Young Researcher Symp., Leuven, Belgium.](#)

[EWE 1999]:

- ◇ “Wind energy - The Facts”
- ◇ Πηγή: [European Wind Energy Association, Brussels, Belgium, 1999.](#)

[Fan 1960]:

- ◇ R.M. Fano, L. J. Chu, και R. B. Adler: “Electromagnetic Fields, Energy and Forces”
- ◇ Πηγή: [New-York: John Wiley & Sons, 1960, pp. 520.](#)

[Fic 2001]:

- ◇ R.L. Ficheux, F. Caricchi, F. Crescimbinì, και O. Honorati: “Axial-Flux Permanent-Magnet Motor for Direct-Drive Elevator Systems without Machine Room”
- ◇ Πηγή: [IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 37, no. 6, pp. 1693-1701, Nov. /Dec. 2001.](#)

[Fil 1998]:

- ◇ E.R.B. Filho και A.M.N. Lima: “Reducing cogging torque in interior permanent magnet machines without skewing”
- ◇ Πηγή: [IEEE Trans. on Magnetics, vol. 34, No. 5, September 1998, pp.3652-3655.](#)

[Gra 1996a]:

- ◇ Grauers: “Efficiency of three wind energy generator systems”
- ◇ Πηγή: [IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 11, pp. 650-657, Sept. 1996.](#)

[Gra 1996b]:

- ◇ Grauers: “Design of Direct-driven Permanent-magnet Generators for Wind Turbines”
- ◇ Πηγή: [Ph. D. dissertation, School Elect. and Computer Eng., Chalmers Univ. Tech., Göteborg, Sweden, 1996.](#)

[Gra 1997]:

- ◇ Grauers, O. Carlson, A. Hogberg, P. Lundmark, M. Johnsson και S. Svenning: “Test and Design Evaluation of a 20 kW Direct Driven PM Generator with a Frequency Converter”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1997 European Wind Energy Conference*, pp. 686-689.

[Gie 2004]:

- ◇ J. F. Gieras: “Analytical approach to cogging torque calculation of permanent magnet motors”
- ◇ Πηγή: *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 40, no. 5, pp.1310-1316, September 2004.

[Had 1999]:

- ◇ J.R. Hadji-Minaglou και G. Henneberger: “Comparison of different motor types for electric vehicle application”
- ◇ Πηγή: *EPE Journal*, vol. 8, pp. 46-55, Sept.1999.

[Hal 1980]:

- ◇ K. Halbach: “Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth Cobalt material”
- ◇ Πηγή: *Nuclear Instruments and Methods*, vol. 169, pp. 1-10, 1980.

[Har 1989]:

- ◇ M.R. Harris και T.J.E. Miller: “Comparison of Design and Performance Parameters in Switched Reluctance and Induction Motors”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1989 IEE Conf. Elec. Mach. and Drives*, pp. 303-307.

[Hen 1997]:

- ◇ G. Henneberger και Bork M.: “Development of a new Transverse flux motor”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1997 IEE Colloquium on New Topologies for PM Machines*, pp. 1/1-1/6.

[Har 1998]:

- ◇ M. R. Harris, G.H. Pajooman, S.M. Abu Sharkh, B.C. Mecrow: “Comparison of Flux-Concentrated and Surface-Magnet Configurations of the VRPM (Transverse-Flux) machine”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1998 Int. Conf. on Elec. Mach.*, pp. 1119-1122.

[Hon 1991]:

- ◇ O. Honorati, F. Caricchi, F. Crescimbin και G. Noia: “Gear-Less WindEnergy Conversion System Using an Axial Flux PM Synchronous Machine”
- ◇ Πηγή: *1991 Proc. European Wind Energy Conference*, pp. 814-818.

[Hao 1997]:

- ◇ Haouara, A. Tounzi και F. Piriou: “Study of a Variable Reluctance Generator for Wind Power Conversion”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1997 Europ. Pow. Elec. Conf.*, vol. 2, pp. 631-636.

[Har 1997]:

- ◇ T. Hartkopf, M. Hofmann και S. Jöckel: “Direct-drive Generators for Megawatt Wind Turbines”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1997 Europ. Wind Energy Conf.*, pp. 668-671.

[Har 1993]:

- ◇ M.R. Harris και B.C. Mecrow: “Variable reluctance permanent magnet motors for high specific output”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1993 IEE Conf. Elec. Mach. and Drives*, pp. 437-442.

[Har 1996]:

- ◇ M.R. Harris, G.H. Pajooman, και S.M. Abu Sharkh: “Performance and design optimization of electric motors with heteropolar surface magnets and homopolar windings”
- ◇ Πηγή: *IEE Proc. - Electr. Power Appl.*, vol. 143, no. 6, pp.429-436, Nov. 1996.

[Hei 1989]:

- ◇ S. Heier: “Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems”
- ◇ Πηγή: *New York: John Wiley & Sons, 1998.*

[Hen 1994]:

- ◇ J. Hendershot και T. Miller: “Design of brushless permanent-magnet motors”
- ◇ Πηγή: *Oxford, Clarendon Press, 1994.*

[Hen 1997]:

- ◇ G. Henneberger και Bork M.: “Development of a new Transverse flux motor”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1997 IEE Colloquium on New Topologies for PM Machines*, pp.1/1-1/6.

[Hol 2002]:

- ◇ S.R. Holm, H. Polinder, J.A. Ferreira, P. van Gelder και R. Dill: “Analytical calculation of the Magnetic Field in Electrical Machines due to the Current Density in an Airgap Winding”
- ◇ Πηγή: *Proc. 2002 Int. Conf. on Elec. Mach.*, paper 486.

[Hua 1999]:

- ◇ S. Huang, J. Luo, F. Leonardi, και T.A. Lipo: “A Comparison of Power Density for Axial Flux Machines Based on General Purpose Sizing Equations”
- ◇ Πηγή: *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 14, no.2, June 1999, pp.185-192.

[Hwa 1994]:

- ◇ S. Hwang και D. Lieu: “Design techniques for reduction of reluctance torque in brushless permanent magnet motors”
- ◇ Πηγή: *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 30, No. 6, November 1994, pp. 4287-4289.

[Ish 1993]:

- ◇ T. Ishikawa και G. Slemon: “A method of reducing ripple torque in permanent magnet motors without skewing”
- ◇ Πηγή: *IEEE Trans. Magnetics, vol. 29, no. 2, pp.2028-2031, Mar. 1993.*

[Jöc 1996]:

- ◇ S. Jöckel: “Gearless wind energy converters with permanent magnet generators- an option for the future?”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1996 Europ. Union Wind Energy Conf., pp. 414-417.*

[Lai 1971]:

- ◇ E.R. Laithwaite, J.F. Eastham, H.R. Bolton και T.G. Fellows: “Linear motors with transverse flux”
- ◇ Πηγή: *IEE Proc., vol. 118, no. 12, pp. 1761-1767, Dec. 1971.*

[Lam 1996]:

- ◇ P. Lampola, J. Perho and J. Vaananen: “Analysis of a low speed PM Wind Generator connected to a frequency converter”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1996 International Conference on Electrical Machines, pp. 393-398.*

[LoB 1997]:

- ◇ G. Lo Bianco, F. Caricchi, F. Crescimbinι και O. Honorati: “Design of Gearless Wind Generator for Off-Shore Applications”
- ◇ Πηγή: *1997 Proc. OWEMES, pp. 365-374.*

[Lam 1997]:

- ◇ P. Lampola, J. Saari και J. Perho: “Electromagnetic Design of a Low-Speed Surface-Mounted Permanent-Magnet Wind Generator”
- ◇ Πηγή: *Electromotion, vol. 4, no. 4, pp. 147-154, 1997.*

[Lam 2000]:

- ◇ P. Lampola: “Directly Driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications”
- ◇ Πηγή: *Ph. D. dissertation, Lab. Electromechanics, Helsinki Univ. Tech., Finland, 2000.*

[Lan 2000a]:

- ◇ Lange, W.-R. Canders, F. Laube και H. Mosebach: “Comparison of different drive systems for a 75 kW electrical vehicle drive”
- ◇ Πηγή: *Proc. 2000 Int. Conf. on Elec. Mach., pp. 1308-1312.*

[Law 1980]:

- ◇ P.J. Lawrenson, J.M. Stephenson, P.T. Blenkinsop, J. Corda και N.N. Fulton: “Variable-speed switched reluctance motors”
- ◇ Πηγή: *IEE Proc.- B, vol. 127, no. 4, pp. 253-265, July 1980.*

[Let 1997]:

- ◇ P. Letellier: “High power permanent magnet machines for electric propulsion drives”
- ◇ Πηγή: *Proc. 2000 All Elec. Ship Conf.*, pp. 126-133.

[Li 1988]:

- ◇ T. Li και G. Slemon: “Reduction of cogging torque in permanent magnet motors”
- ◇ Πηγή: *IEEE Trans. on Magnetics.*, vol. 24, no. 6, pp. 2901-2903, Nov. 1988.

[Liu 1998]:

- ◇ K. Liu, M. Stiebler και S. Güngör: “Design of a Switched Reluctance Generator for Direct-Driven Wind Energy System”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1998 Universities Pow. Eng. Conf.*, pp. 411-414.

[Mat 1998]:

- ◇ P.C. Matthews: “Vector Calculus”
- ◇ Πηγή: *London: Springer-Verlag, 1998.*

[Mad 1998]:

- ◇ C.P. Maddison, B.C. Mecrow και A.G. Jack: “Claw Pole Geometries For High Performance Transverse Flux Machines”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1998 Int. Conf. on Elec. Mach.*, pp. 340-345.

[Maw 1957]:

- ◇ O. K. Mawardi: “On the concept of coenergy”
- ◇ Πηγή: *Journ. of Franklin Institute*, vol. 264, no. 1, pp. 313-332, 1957.

[Mec 1996]:

- ◇ B.C. Mecrow, A.G. Jack και C.P. Maddison: “Permanent Magnet Machines for High Torque, Low Speed Applications”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1996 Int. Conf. on Elec. Mach.*, pp. 461-466.

[Mil 1989]:

- ◇ T.J.E. Miller: “Brushless permanent-magnet and reluctance motor drives”
- ◇ Πηγή: *Oxford: Clarendon, 1989.*

[Mil 1985]:

- ◇ T.J.E. Miller: “Converter volt-ampere requirements of the switched reluctance motor drive”
- ◇ Πηγή: *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 21, no. 5, pp. 1136-1144, 1985.

[Mil 1993]:

- ◇ T.J.E. Miller: “Switched Reluctance Motors and their Controls”
- ◇ Πηγή: *Oxford:Clarendon, 1993.*

[Mil 2001]:

- ◇ D. Millborow: "Looking More Competitive than Ever"
- ◇ Πηγή: *WindPower Monthly pp. 32-33, Jan. 2001.*

[Mit 1995]:

- ◇ J. Mitcham και J.J.A. Cullen: "Motors and drives for surface ship propulsion: comparison of technologies"
- ◇ Πηγή: *Proc. 1995 Electric Propulsion Conf., paper 4.*

[Mit 2002]:

- ◇ J. Mitcham και J.J.A. Cullen: "Permanent Magnet Generator Options for the More Electric Aircraft"
- ◇ Πηγή: *Proc. 2002 Power Electronics Machines & Drives Conf., pp. 241-245.*

[Mue 1999]:

- ◇ M.A. Mueller: "Design of Low Speed Switched Reluctance Machines for Wind Energy Converters"
- ◇ Πηγή: *Proc. 1999 IEE Elec. Mach. and Drives Conf., pp. 60-64.*

[Pen 1996]:

- ◇ R. Pena, J. C. Clare και G. M. Asher: "A doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine"
- ◇ Πηγή: *IEE Proc.- Electr. Power Appl., vol. 143, no. 5, pp. 380-387, Sept. 1996.*

[Pol 1998]:

- ◇ H. Polinder: "On the losses in a high-speed permanent-magnet generator with rectifier"
- ◇ Πηγή: *Ph. D. dissertation, Delft Univ. Tech., Delft, The Netherlands, 1998.*

[Pol 2000]:

- ◇ H. Polinder, F. Gardner και B. Vriesema: "Linear PM generator for wave energy conversion in the AWS"
- ◇ Πηγή: *Proc. 2000 Int. Conf. on Elec. Mach., pp. 309-313.*

[Pol 2001]:

- ◇ H. Polinder και J.G. Slootweg: "Design optimization of a synchronous generator for a direct-drive wind turbine"
- ◇ Πηγή: *Proc. 2001 Europ. Wind Energy Conf., pp. 1067-1070.*

[Pro 2000]:

- ◇ F. Profumo, A. Tenconi, Z. Zhang, και A. Cavagnino: "Design and Realization of a Novel Axial Flux Interior PM Synchronous Motor for Wheel-Motors Applications"
- ◇ Πηγή: *Elec. Mach. and Power Syst., vol. 28, pp. 637-649, 2000.*

[Ric 1967]:

- ◇ R. Richter: “Elektrische Maschinen, erster Band. (3rd ed.) ”
- ◇ Πηγή: *Basel: Birkhäuser, 1967. [Στα Γερμανικά]*

[Sah 2001]:

- ◇ F. Sahin: “Design and development of a high-speed axial-flux permanent magnet machine”
- ◇ Πηγή: *Ph. D. dissertation, Eindhoven Univ. Tech., Eindhoven, The Netherlands, 2001.*

[Sit 2000]:

- ◇ K. Sitapati και R. Krishnan: “Performance Comparisons of Radial and Axial Field, Permanent Magnet, Brushless Machines”

Πηγή: *Proc. 2000 IEEE Conf. Ind. Appl. Soc., pp. 228-234.*

[Seb 1987]:

- ◇ T. Sebastian, και G. Slemon: “Transient Torque and Short Circuit Capabilities of Variable Speed Permanent Magnet Motors”
- ◇ Πηγή: *IEEE Trans. Mag., vol. MAG-23, no. 5, Sept. 1987, pp. 3619-3621.*

[Sen 1997]:

- ◇ P.C. Sen: “Principles of Electric Machines and Power Electronics. (2nd Ed.)”
- ◇ Πηγή: *New York: Wiley, 1997, p. 355.*

[Sle 1992]:

- ◇ G.R. Slemon και X. Liu: “Modeling and design optimization of permanent magnet motors”
- ◇ Πηγή: *Elec. Mach. And Power Syst., vol. 20, pp. 71-92, 1992.*

[Söd 1997]:

- ◇ L. Söderlund, A. Koski, H. Vihriala, J.-T. Eriksson και R. Perala: “Design of an Axial-Flux Permanent Magnet Wind Power Generator”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1997 IEE Conf. Elec. Mach. and Drives, pp. 224-228.*

[Slo 2003]:

- ◇ J.G. Slootweg: “Wind Power Modelling and Impact on Power System Dynamics”
- ◇ Πηγή: *Ph. D. dissertation, Delft Univ. Tech., Delft, The Netherlands, 2003.*

[Smi 1981]:

- ◇ G.A. Smith και K.A. Nigim: “Wind-energy recovery by a static Scherbius induction generator”
- ◇ Πηγή: *IEE Proc. - C, vol. 128, no. 6, pp. 317-324, Nov. 1981.*

[Spo 1992a]:

- ◇ E. Spooner και A.C. Williamson: “Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1992 Int. Conf. on Elec. Mach., pp. 1048-1052.*

[Spo 1992b]:

- ◇ E. Spooner, και B.J. Chalmers: “TORUS“: A slotless, toroidal-stator, permanent-magnet generator”
- ◇ Πηγή: *IEE Proc.- B, vol. 139, no. 6, pp. 497-506, Nov. 1992.*

[Spo 1996]:

- ◇ E. Spooner και A.C. Williamson: “Direct coupled, Permanent Magnet Generators for Wind Turbines”
- ◇ Πηγή: *IEE Proc.- Electr. Power Appl., vol. 143, no.1, pp. 1- 8, Jan. 1996.*

[Sti 1992]:

- ◇ M. Stiebler και O. Okla: “A Permanent-Magnet Toroid Wind-Generator”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1992 Int. Conf. on Elec. Mach., pp. 1043-1047.*

[Str 1998]:

- ◇ R.J. Strahan: “Energy conversion by nonlinear permanent magnet machines”
- ◇ Πηγή: *IEE Proc.- Electr. Power Appl., vol. 145, no. 3, pp. 193- 198, May 1998.*

[Tor 1993]:

- ◇ D.A. Torrey: “Variable-Reluctance Generators in Wind-Energy Systems”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1993 Pow. Electr. Specialists Conf., pp. 561-567.*

[Tor 1993]:

- ◇ D.A. Torrey: “Variable-Reluctance Generators in Wind-Energy Systems”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1993 Pow. Electr. Specialists Conf., pp. 561-567.*

[UDRI 1998]:

- ◇ Πηγή: www.udri.udayton.edu/UDRI_Extranet/News/news0696.htm

[Weh 1986]:

- ◇ H. Weh και H. May: “Achievable Force Densities for Permanent Magnet Excited Machines in New Configurations”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1986 Int. Conf. on Elec. Mach., pp. 1107-1111.*

[Weh 1988a]:

- ◇ H. Weh, H. Hoffmann, J. Landrath, H. Mosebach και J. Poschadel: “Directly-Driven Permanent-Magnet Excited Synchronous Generator for Variable Speed Operation”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1988 Europ. Wind Energy Conf., pp. 566-572.*

[Weh 1995]:

- ◇ H. Weh: “Transverse Flux Machines in Drive and Generator Application”
- ◇ Πηγή: *Proc. 1995 Stockholm Power Tech. Conf., pp. 75-80.*

[Zha 1996]:

◇ Z. Zhang, F. Profumo και A. Tenconi: “Axial-Flux versus Radial-Flux permanent-magnet motors”

◇ Πηγή: *Electromotion*, vol. 3, p.134, 1996.

[Zhu 1992]:

◇ Z. Q. Zhu και D. Howe: “Analytical prediction of the cogging torque in radial field permanent magnet brushless motors”

◇ Πηγή: *IEEE Trans. on Magntics.*, vol. 28, no.2, pp.1371-1374, March, 1992.

[Zin 1997]:

◇ D.S. Zinger και E. Muljadi: “Annualized Wind Energy Improvement Using Variable Speeds”

◇ Πηγή: *IEEE Trans. Industry Application*, vol. 33, pp. 1444-1447, No. 1997.

Σημειώσεις



