

Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνείο Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος

# ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ

# ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Κιμουλάκη Μ. Νικόλαου

Αθήνα, Μάρτιος 2010

.....

Κιμουλάκης Μ. Νικόλαος

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

### Copyright © Κιμουλάκης Μ. Νικόλαος, 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος Εργαστηρίο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος

# ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ

### ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Κιμουλάκη Μ. Νικόλαου

Συμβουλευτική Επιτροπή : Κλαδάς Γ. Αντώνιος

Μανιάς Ν. Στέφανος

Γιαννοπούλου – Λασκαράτου Πολυξένη

Κλαδάς Αντώνιος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σταθόπουλος Ιωάννης Καθηγητής ΕΜΠ

Μανιάς Ν. Στέφανος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χατζηαργυρίου Νικόλαος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεωργιλάκης Παύλος

Γεωργιλάκης Παύλος Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2010

# 1. Francordan

Γιαννοπούλου – Λασκαράτου Πολυξένη Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Σταύρακάκης Γεώργιος Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

στη μνήμη

του πατέρα μου Μιχάλη

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ПЕРІЛНҰН	. v
ABSTRACT	vi
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	vii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	
ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ	2
1.1.1. Εναλλακτικές διαμορφώσεις του συζευγμένου ηλεκτρομηχανικού συστήματος	2
1.1.2. Μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας	3
1.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	3
1.3 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ	3
1.3.1. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	3
1.3.1.1. Μεικτές τεχνικές με χρήση πεπερασμένων στοιχείων	4
1.3.1.2. Μεικτή τεχνική πεπερασμένων στοιχείων αναλυτικών λύσεων	5
1.3.2. Ηλεκτρικές μηχανές μονίμων μαγνητών	5
Γραμμικές γεννήτριες μονίμων μαγνητών	6
1.3.3. Υδροδυναμική –Πλωτά σώματα	6
1.4 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	7
1.5 ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΑΓΩΓΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ	8
1.6 ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	9
1.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	9

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:ΘΑΛΑΣΣΙΟΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΣ – ΠΛΩΤΑ ΣΩΜΑΤΑ

2.1 АПЛА АРМОНІКА КҮМАТА	13
2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	14
2.2.2. Ολική ανάκλαση κύματος σε κατακόρυφο τοίχο	15
2.3 ΠΛΩΤΑ ΣΩΜΑΤΑ	
2.3.1. Γραμμικό μοντέλο πλωτήρα	
2.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
2.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	23

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	26
3.1.1. Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης	26
3.1.2. Γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών	26
3.1.3. Μοντέλα προσομοίωσης λειτουργίας	26
3.1.3.1. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	27
3.1.3.1.1. Μαγνητοστατικά προβλήματα	28
3.1.3.1.2. Οριακές συνθήκες	28
3.2 ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΞΕΝΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ	29
3.2.2. Μελέτη μαγνητικού πεδίου γεννήτριας Συνεχούς Ρεύματος ξένης διέγερσης.	30
3.2.2.2. Πεδίο διέγερσης	32
3.2.2.3. Αντίδραση δρομέα	34
3.2.2.4. Μαγνητικό πεδίο γεννήτριας σε κανονική λειτουργία	36
3.2.3. Προσομοίωση δυναμικής λειτουργίας γεννήτριας συνεχούς ρεύματος	39
3.2.3.2. Μελέτη συμπεριφοράς για λειτουργία υπό φορτίο	41

3.2.3.3. Προσομοίωση συμπεριφοράς λειτουργίας σε απότομη αλλαγή φορτίου.	43
3.2.3.4. Προσομοίωση συμπεριφοράς για βραχυκύκλωση της εξόδου	46
3.3 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ	50
3.3.1. Σχεδίαση πρότυπης γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών	50
3.3.1.2. Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης γεννήτριας	51
3.3.1.3. Υπολογισμός και διαστασιολόγηση πρότυπης γραμμικής γεννήτριας	52
3.3.1.3.1. Σχεδιαστικές παραδοχές	52
3.3.1.3.2. Υπολογισμοί χαρακτηριστικών μεγεθών	52
3.3.1.3.3. Υπολογισμός ειδικών φορτίσεων	55
3.3.1.3.4. Προσδιορισμός χαρακτηριστικών δρομέα	55
3.3.1.3.5. Διαστασιολόγηση γεννήτριας	57
3.3.2. Προσδιορισμός των παραμέτρων της γραμμικής μηχανής	58
3.3.2.1. Σχεδίαση γεωμετρίας της μηχανής - διαμόρφωση πλέγματος	59
3.3.2.2. Ανάλυση μαγνητικού πεδίου	61
3.3.2.2.1. Μαγνητικό πεδίο εξαιτίας των μονίμων μαγνητών του δρομέα	61
3.3.2.2.2. Μαγνητικό πεδίο εξαιτίας ρεύματος στα τυλίγματα στάτη	63
3.3.2.2.3. Λειτουργία υπό φορτίο	65
3.3.2.3. Υπολογισμός μεταβολής της αυτεπαγωγής των τυλιγμάτων	67
3.3.2.4. Προσομοίωση λειτουργίας γραμμικής γεννήτριας	69
3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	70
3.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	72

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΑΣ "ΜΕΙΚΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ" ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	76
4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ	
ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	76
4.2.1. Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών	77
4.2.2. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	77
4.2.3. Μέθοδος οριακών στοιχείων	77
4.2.4. Μεικτές μέθοδοι ανάλυσης μαγνητικών πεδίων	78
4.3 ΜΕΙΚΤΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ	
ΛΥΣΕΩΝ	78
4.3.1. Δομή πινάκων ειδικού μακροστοιχείου στο διάκενο για εφαρμογή σε σύστημα	ι
κυλινδρικών συντεταγμένων	79
4.3.2. Δομή δισδιάστατου ειδικού μακροστοιχείου σε σύστημα καρτεσιανών	~ ~
συντεταγμένων για εφαρμογή σε γραμμικές ηλεκτρικές μηχανές	80
4.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΙΚΤΗ ΤΕΧΝΙΙ	KH
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ	83
4.4.1. Μοντελοποίηση συζευγμένης πεδιακής – κυκλωματικής λειτουργίας σε γραμ	μική
γεννήτρια μονίμων μαγνητών	84
4.4.2. Βελτιστοποίηση γεωμετρίας γραμμικής γεννήτριας για ελαχιστοποίηση δύναμ	ης
ευθυγραμμισης	85
4.4.2.1. Μαγνητης ορθογωνικης διατομης	8/
4.4.2.2. Μαγνητης τραπεζοειδους διατομης	89
4.4.3. Νεο δισδιαστατο μοντελο μεικτης τεχνικης για την θεωρηση κεκλιμενών	01
μαγνητων σε γραμμικες γεννητριες	91
4.4.3.1. Εφαρμογη μεικτης τεχνικης σε γραμμικη γεννητρια με κεκλιμενους μαγν	ητες ορ
Λ 5 ΣΥΜΠΕΡΔΣΜΔΤΔ	<u>کر</u> ۵۸
4.0 ΒΙΒΛΙΟΙ ΡΑΨΙΑ	95

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	
ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΟΥ_ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ-ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ-ΗΛΕΚΤΡΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	KOY
5.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΠΛΩΤΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ	99
5.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	
ΑΠΟ ΤΟΝ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ	100
5.2.1. Ανθιστάμενη δύναμη γεννήτριας	101
5.2.1.1. Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης:	101
5.2.1.2. Γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών:	101
5.2.2. Προσομοίωση κίνησης πλωτήρα	101
5.2.3. Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς	102
5.2.3.1. Ημιτονοειδής βραδύς θαλάσσιος κυματισμός ( $T_{\kappa}$ = 6 sec)	103
5.2.3.2. Ημιτονοειδής ταχύς θαλάσσιος κυματισμός ( $T_{\kappa}$ = 2.3 sec)	104
5.3 ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ-ΜΗΧΑΝΙΚΟ-ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	106
5.3.1. Μηχανικό μοντέλο με περιστρεφόμενο δίσκο	106
5.3.1.1. Ανάλυση της κίνησης του μηχανικού συστήματος	107
5.3.1.2. Προσομοίωση λειτουργίας του μηχανισμού	108
5.3.1.2.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης	109
5.3.2. Μηχανικό σύστημα με διπαράλληλο ζυγό	112
5.3.3. Μηχανικό μοντέλο για κίνηση γραμμικής γεννήτριας	116
5.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΡΗΜΕΝΩΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ	118
5.5 ΣҮМПЕРАΣМАТА	121
5.6 ВІВЛІОГРАФІА	121

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	123
6.2 КАТА ΣКЕ УА ΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ	124
6.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ	125
6.3.1. Ηλεκτρική εγκατάσταση	125
6.4 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	127
6.4.1. Σύστημα ελέγχου διέγερσης γεννητριών συνεχούς ρεύματος	128
6.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	130
6.5.1. Περιγραφή συστήματος μετρήσεων	130
6.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	132
6.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	133

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	135
7.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	135
7.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΑΤΑΓΕΓΡΑΜΜΕΝΟΥ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ	
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ	136
7.3.1. Μετρήσεις κύματος	136
7.3.1.2. Μέγιστες τιμές	137
7.3.2. Μονάδα 1 – Ταχύτητα περιστροφής	138
7.3.2.1. Μέγιστες τιμές ταχύτητας	139
7.3.3. Μονάδα 1 – Παραγόμενη ισχύς	140

7.3.3.1. Μέγιστες τιμές παραγόμενης ισχύος	141
7.3.4. Παρατηρήσεις	141
7.3.5. Μονάδα 2 – Ταχύτητα περιστροφής	
7.3.5.1. Μέγιστες τιμές ταχύτητας	143
7.3.6. Μονάδα 2 – Παραγόμενη ισχύς	144
7.3.6.1. Μέγιστες τιμές παραγόμενης ισχύος	
7.3.7. Παρατηρήσεις	
7.3.8. Μονάδα 3 – Ταχύτητα περιστροφής	146
7.3.8.2. Μέγιστες τιμές ταχύτητας	147
7.3.9. Μονάδα 3 – Παραγόμενη ισχύς	
7.3.9.2. Μέγιστες τιμές παραγόμενης ισχύος	149
7.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
7.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8:ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

8.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	153
8.2 ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΑΓΩΓΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ	155
8.3 ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	155

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διερευνήθηκαν οι πιθανές εναλλακτικές διαμορφώσεις συζευγμένων ηλεκτρομηχανικών συστημάτων, κατάλληλων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον θαλάσσιο κυματισμό. Επίσης αναπτύχθηκαν κατάλληλα αριθμητικά μοντέλα για την προσομοίωση της λειτουργίας των απαιτούμενων συζευγμένων υποσυστημάτων (υδραυλικού – μηχανικού – ηλεκτρικού), για την σύνθεση μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής με εκμετάλλευση την ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού.

Τα μοντέλα εφαρμόστηκαν σε επιδεικτικό πειραματικό σταθμό μετατροπής της ενέργειας των θαλάσσιών κυμάτων σε ηλεκτρική, που κατασκευάστηκε στην Ψυτάλλεια στα πλαίσια του ερευνητικού έργου ΠΑΒΕΤ 00BE142, με τίτλο «Πειραματικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από θαλάσσιο κυματισμό».

Ως εναλλακτικοί τύποι γεννητριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ηλεκτροπαραγωγή από θαλάσσιο κυματισμό, εξετάστηκαν η γεννήτρια συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης και η γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών.

Τα δύο είδη γεννητριών, απαιτούν πλήρη ανάλυση της κατανομής του μαγνητικού τους πεδίου, καθώς ο εφαρμοζόμενος έλεγχος με στόχο την βελτιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας ακόμη και από κυματισμό χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου, μπορεί να οδηγήσει σε βραχυχρόνια εμφάνιση φαινομένων τοπικού κορεσμού στο μαγνητικό υλικό των γεννητριών.

Για την ανάλυση της κατανομής του μαγνητικού πεδίου γραμμικών γεννητριών μονίμων μαγνητών, αναπτύχθηκε μια νέα μεικτή τεχνική πεπερασμένων στοιχείων αναλυτικών λύσεων. Με την νέα αυτή μεικτή τεχνική, είναι δυνατή η θεώρηση μαγνητών υπό κλίση στον δρομέα της γραμμικής γεννήτριας και η ανάλυση, σε καρτεσιανές συντεταγμένες, της κατανομής του μαγνητικού πεδίου στο επίπεδο διάκενο της γεννήτριας.

#### Λέξεις – Κλειδιά

Ηλεκτροπαραγωγή από θαλάσσιο κυματισμό, Συζευγμένα μοντέλα προσομοίωσης, Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, μεικτή τεχνική, γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών, κλίση μαγνητών

### ABSTRACT

The present thesis, concerns the design procedure, modeling and implementation of the optimal configuration of the electric part of an experimental power plant, as well as the study of alternative generating unit configurations in the case of power generation from sea waves.

An experimental power plant for power generation from sea waves was constructed on Psitalia in the frame of the research project PAVET 00BE142 entitled "Experimental Plant for Power Generation from Sea Waves". The entire plant consisted of three similar units, each one involving a coupled hydraulic – mechanical – electrical system for wave energy extraction.

Moreover, the case of linear synchronous generator with permanent magnets (LPMSG), as alternative unit for electric power generation from sea waves, has been studied. A particular, linear generator with permanent magnets was designed, accounting the features of the sea wave and the behaviour of the floating buoy.

Appropriate coupled electromagnetic-mechanical-hydraulic models incorporating Finite Element Analysis (FEA) have been developed, enabling a dynamic simulation of the whole system performance involving a detailed field analysis of the permanent magnet linear generator.

Also, a new hybrid simulation model, incorporating finite elements (FE) combined with analytical solution (macroelement) in the air gap area accounting for skewed magnets in linear generators (LPMSG) have been developed.

The results of simulation of performance combined with the experimental measurements, illustrate the suitability of the developed models in applications for power generation from sea waves.

#### Keywords

Power generation from sea waves, Wave energy extraction, Coupled simulation models, finite element method, special air gap macroelement, linear permanent magnet generator, magnet skew

### ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία, εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Κεντρικός άξονας της διδακτορικής μου διατριβής, είναι η σε βάθος διερεύνηση των παραγόντων που αφορούν την αξιοποίηση της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού με την μετατροπή της σε ηλεκτρική, οδηγώντας τελικά στην «Ανάπτυξη και Σύγκριση Εναλλακτικών Συζευγμένων Ηλεκτρομηχανικών Συστημάτων για Ηλεκτροπαραγωγή από Θαλάσσιο Κυματισμό».

Στην προσπάθεια ολοκλήρωσης της διδακτορικής μου διατριβής, αμέριστη υπήρξε η συμπαράσταση αφενός από τον επιβλέποντα την εργασία μου Καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά, και αφετέρου από τα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής Καθηγητή κ. Στέφανο Μανιά και Επίκουρη Καθηγήτρια κα. Γιαννοπούλου-Λασκαράτου Πολυξένη. Αισθάνομαι την ανάγκη να τους ευχαριστήσω τόσο για την θετική τους διάθεση όσο και για την επιστημονική τους συνδρομή.

Πλήθος συναδέλφων και συνεργατών συνέβαλλαν ποικιλοτρόπως στην εκπόνηση της εργασίας μου. Παράλληλες ήταν οι διαδρομές μας με τον συνάδελφο και φίλο Ροβολή Παναγιώτη και συνεπώς ουσιαστική και η συνδρομή του στην προσπάθεια μου. Επιθυμώ να εκφράσω τις ευχαριστίες μου για την απρόσκοπτη συνεργασία μας, στους συνάδελφους Διδάκτορες Τσίλη Μαρίνα, Τάτη Κώστα, Χανιώτη Αντώνη και Κεφάλα Θέμη, καθώς και στους Υποψήφιους Διδάκτορες Χάρη Πάτσιο, Μπενακιάρ Μίνωα, Λάζαρη Βασίλη, Τσαμπούρη Βαγγέλη, Ιάκωβο Μανωλά, Παρασκευαδάκη Εύα, Λάσκαρη Κώστα και Κακοσίμο Παναγιώτη.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζω στον Παναγιώτη Ζάννη για την πολυδιάστατη βοήθεια του, στον Κώστα Παύλου για την εκτίμησή του και συνολικά στο προσωπικό με το οποίο συνεργάστηκα από τον Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π.

Τέλος σημαντικό μερίδιο στην επίτευξη των στόχων μου, κατέχει η οικογένεια μου, που με την ευκαιρία της ολοκλήρωσης της παρούσας διδακτορικής διατριβής, την ευχαριστώ θερμά.

Κιμουλάκης Μ. Νικόλαος Μάρτιος 2010

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, διερευνώνται οι πιθανές εναλλακτικές διαμορφώσεις συζευγμένων ηλεκτρομηχανικών συστημάτων, κατάλληλων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον θαλάσσιο κυματισμό.

Αναπτύσσονται κατάλληλα αριθμητικά μοντέλα για την ανάλυση και τον σχεδιασμό του ελέγχου των συστημάτων αυτών και εφαρμόζονται σε επιδεικτικό πειραματικό σταθμό αυτού του τύπου.

Αρχικά μελετάται η ενέργεια των θαλασσίων κυμάτων. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους είναι η διαφοροποίηση που παρουσιάζουν ως προς το πλάτος, την φάση και τη κατεύθυνση, που εμφανίζουν. Τυπικές περίοδοι των θαλάσσιων κυμάτων σε θάλασσες μεγάλου βάθους, είναι από 2 έως 10 δευτερόλεπτα που αντιστοιχούν σε ταχύτητες διάδοσης από 1,3 έως 6,5m/s και μήκη κύματος από 2,5 έως 65m αντίστοιχα. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των θαλασσίων κυμάτων, κάνουν αρκετά σύνθετη τόσο την προσπάθεια μελέτης και μοντελοποίησης τους, όσο και την σχεδίαση ενός συστήματος μετατροπής της ενέργειας τους, σε ηλεκτρική.

Η μετατροπή της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού σε ηλεκτρική, πραγματοποιείται μέσω της σύζευξης ενός υδραυλικού συστήματος για την απορρόφηση της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού, ενός μηχανικού συστήματος για την μετάδοση της κίνησης και ενός ηλεκτρικού συστήματος για την ηλεκτροπαραγωγή. Η θεώρηση της σύζευξης αυτής, είναι απολύτως απαραίτητη καθώς τον δεσπόζοντα ρόλο στην αποδοτική λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος δεν παίζουν οι δυνάμεις άνωσης αλλά οι υδροδυναμικές δυνάμεις στον πλωτήρα.

Η σχεδίαση και επιλογή των επιμέρους υποσυστημάτων, ο τρόπος σύζευξης τους και η θεώρηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους, αποτελούν ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία, καθώς πλήθος παραγόντων θα πρέπει να ληφθούν υπόψη με στόχο την βέλτιστη λειτουργία του συνολικού συστήματος και την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

#### 1.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ

Τα προαναφερθέντα μοντέλα που αναπτύχθηκαν, επιβεβαιώθηκαν σε επιδεικτικό πειραματικό σταθμό συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 48kW που κατασκευάστηκε στην Ψυτάλλεια, στα πλαίσια του έργου ΠΑΒΕΤ 00ΒΕ142, με τίτλο «Πειραματικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από θαλάσσιο κυματισμό». Ο σταθμός λειτούργησε πειραματικά, σε απομονωμένη λειτουργία από το δίκτυο, ενώ λόγω βλάβης στην προβλήτα, δεν ολοκληρώθηκε η διασυνδεδεμένη λειτουργία όπως αρχικά είχε προβλεφθεί.

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας έγινε με την χρήση στρεφόμενης γεννήτριας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Βασικά κριτήρια της επιλογής του συγκεκριμένου είδους μηχανής ήταν η απλότητα της κατασκευής καθώς και η αξιοπιστία και η ευελιξία στον έλεγχο της, παράγοντες που εξυπηρέτησαν την λεπτομερή προσέγγιση και μοντελοποίηση του κατά τα άλλα πολύ σύνθετου συζευγμένου ηλεκτρομηχανικού συστήματος.

Η λειτουργία του σταθμού, μελετήθηκε πειραματικά, μέσω μετρήσεων που έγιναν κατά την λειτουργία του, σχετικά με τα χαρακτηριστικά μεγέθη που αφορούσαν το υδραυλικό, το μηχανικό και το ηλεκτρικό υποσύστημα. Η συλλογή και καταγραφή των μετρήσεων έγινε με την βοήθεια μετρητικής διάταξης ελεγχόμενης από Η/Υ, με κατάλληλο για αυτό τον σκοπό λογισμικό.

Για την μελέτη του συστήματος, αναπτύχθηκαν ειδικά υπολογιστικά μοντέλα προσομοίωσης της συνολικής συμπεριφοράς του συνόλου του πειραματικού σταθμού, καθώς και των επιμέρους συζευγμένων υδραυλικών-μηχανικών-ηλεκτρικών υποσυστημάτων του.

#### 1.1.1. Εναλλακτικές διαμορφώσεις του συζευγμένου ηλεκτρομηχανικού συστήματος

Με κεντρικό άξονα τον πειραματικό σταθμό, εξετάσθηκαν εναλλακτικές διαμορφώσεις του συζευγμένου υδραυλικού-μηχανικού-ηλεκτρικού συστήματος μετατροπής της ενέργειας.

Σαν εναλλακτικό είδος γεννήτριας που προσφέρεται για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής από τον θαλάσσιο κυματισμό, σχεδιάστηκε και μελετήθηκε μια ειδική γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών.

Βασικό πλεονέκτημα αυτού του είδους των γεννητριών στην περίπτωση εκτός θαλάσσης εγκατάστασης σε παράκτιους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, είναι η απλοποίηση του απαιτούμενου μηχανικού μέρους για την μετάδοση της κίνησης και την βέλτιστη εκμετάλλευση της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού.

Σχεδιαστική απαίτηση για την συγκεκριμένη ειδική γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών, ήταν να λειτουργεί υπό συνθήκες ελεγχόμενης βραχυχρόνιας υπερφόρτισης, με σκοπό την μεγιστοποίηση της απορροφούμενης ενέργειας ακόμη και από κυματισμό χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου.

#### 1.1.2. Μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

Στην περίπτωση που ένα πλωτό σώμα χρησιμοποιείται ως μέσο απορρόφησης ενέργειας από τον θαλάσσιο κυματισμό, η απόδοση του μεγιστοποιείται, όταν η κίνηση του συντονίζεται με αυτή της ελεύθερης επιφάνειας του προσπίπτοντος κυματισμού.

Συνεπώς, υπό αυτή την συνθήκη επιτυγχάνεται η μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η επίτευξη της συνθήκης αυτής, αποτελεί και τον κύριο στόχο της διαδικασίας ελέγχου και βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συζευγμένου συστήματος ηλεκτροπαραγωγής.

Σχεδιαστική απαίτηση της διάταξης ελέγχου είναι η συνεχής προσαρμογή της ανθιστάμενης στην κίνηση του πλωτήρα δύναμης της γεννήτριας, ώστε η κίνηση του συνολικού μηχανισμού να είναι σε συντονισμό με αυτή του προσπίπτοντος κυματισμού.

#### 1.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Για την μελέτη και ανάλυση της βέλτιστης αλληλεπίδρασης ηλεκτρικού, μηχανικού και υδραυλικού μέρους, αναπτύχθηκε κατάλληλο συζευγμένο μοντέλο πεδιακής ανάλυσης και δυναμικής προσομοίωσης της λειτουργίας της ηλεκτρογεννήτριας.

Το νέο μοντέλο που αναπτύχθηκε, ενσωματώνει κώδικα με χρήση μεικτής τεχνικής πεπερασμένων στοιχείων-αναλυτικής λύσης για τον υπολογισμό του αναπτυσσόμενου μαγνητικού πεδίου στην γραμμική γεννήτρια.

Καινοτόμο στοιχείο του νέου μοντέλου που αναπτύχθηκε είναι η δυνατότητα θεώρησης και ανάλυσης σε σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων, της περίπτωσης χρήσης κεκλιμένων μαγνητών επί του δρομέα της γραμμικής γεννήτριας.

Αναπτύχθηκε επίσης, μοντέλο δυναμικής προσομοίωσης της λειτουργίας της γραμμικής γεννήτριας για διάφορες συνθήκες φόρτισης. Το δυναμικό μοντέλο προσομοιώνει την συμπεριφορά της μηχανής σε απότομες μεταβολές φορτίου και βραχυχρόνιες υπερφορτίσεις, καταστάσεις που σε πολλές περιπτώσεις είναι αναγκαίες για την βέλτιστη απορρόφηση εκμετάλλευση ακόμη και θαλάσσιου κυματισμού με χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο.

#### 1.3 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

#### 1.3.1. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Μ.Π.Σ.) διατυπώνεται από τον Silvester το 1969, για την επίλυση προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων [1.90, 1.91]. Ο ίδιος συγγραφέας μαζί με τον Ferrari στην αναφορά [1.93] παρουσιάζουν εφαρμογές των πεπερασμένων στοιχείων σε πραγματικά προβλήματα, ξεκινώντας εισαγωγικά από την περίπτωση μιας απλής μονοδιάστατης γραμμής μεταφοράς συνεχούς ρεύματος και καταλήγοντας στην παρουσίαση της δισδιάστατης και τρισδιάστατης διατύπωσης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Παράλληλα με την ανάπτυξη της Μ.Π.Σ., εμφανίζονται βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με την ανάπτυξη ολοκληρωμένων πακέτων λογισμικού που ενσωματώνουν την συγκεκριμένη μέθοδο, όπως αυτή του Ν. Ida [1.67] για την επίλυση γενικών πεδιακών προβλημάτων ή των Nehl, Pawlak, και Boules [1.107] σχετικά με τον σχεδιασμό και την ανάλυση ηλεκτρομηχανικών διατάξεων για εφαρμογές αυτοκίνησης. Κώδικα που ενσωματώνει αλγόριθμο με δυνατότητα μετεπεξεργασίας των αποτελεσματων ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου, προτείνει ο C. S. Biddlecombe [1.10], ενώ οι W. Mai, G. Henneberger [1.111] παρουσιάζουν λογισμικό αντικειμενοστραφούς σχεδιασμού για την θεώρηση συζευγμένων προβλημάτων με μη γραμμικά υλικά.

Για την εφαρμογή της Μ.Π.Σ. ο L. Paul Chew [1.50] παρουσιάζει τεχνική ανάπτυξης δισδιάστατου πλέγματος τριγωνικών στοιχείων, για περιοχές που ορίζονται από ευθείες αλλά και καμπύλες γραμμές. Η τεχνική του Chew επεκτείνεται από τον Jim Ruppert [1.38], ώστε τα δημιουργούμενα τρίγωνα να διαφοροποιούνται σε μέγεθος. Την τεχνική των Chew και Ruppert χρησιμοποιεί ο Shewchuk για την ανάπτυξη του λογισμικού Triangle [1.41] ο αλγόριθμος του οποίου παρουσιάζεται αναλυτικά από τον ίδιο στην αναφορά [1.40].

Με εφαρμογές της Μ.Π.Σ. σε ηλεκτρικές διατάξεις χαμηλής συχνότητας ασχολούνται οι J. Bastos, Nelson Sadowski στην αναφορά [1.28], όπου εξετάζονται φαινόμενα μη γραμμικότητας, ανάπτυξης μηχανικών δυνάμεων και σύζευξης των λύσεων του πεδίου με εξωτερικά ηλεκτρικά κυκλώματα. Τόσο οι Α. Β. J. Reece, Τ. W. Preston [1.2] όσο και ο Nicola Bianchi [1.78] παρουσιάζουν εφαρμογές της Μ.Π.Σ. και μεθοδολογίες για την ανάλυση των περισσότερων ειδών ηλεκτρικών μηχανών όπως μετασχηματιστές, κινητήρες επαγωγής, σύγχρονες μηχανές και μηχανές συνεχούς ρεύματος. Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς, για τον υπολογισμό των απωλειών δινορρευμάτων, όπως από τους Κλαδά και Razek [1.4], ενώ οι οι Γκόλιας και Τσιμπούκης χρησιμοποιούν αυτοβελτιούμενες τεχνικές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση τρισδιάστατων προβλημάτων δινορρευμάτων στις αναφορές [1.68] και [1.69].

Σημαντικό πρόβλημα στην εφαρμογή της μεθόδου σε τρείς διαστάσεις με χρήση του διανυσματικού δυναμικού, είναι η μεγάλη απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ. Ο Zienkiewicz το 1970, [1.81] εισάγει το βαθμωτό διανυσματικό δυναμικό για την επίλυση προβλημάτων σε τρεις διαστάσεις με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Χρήση του βαθμωτού δυναμικού γίνεται από τους P. Campbell, M.V.K. Chari, J. D'Angelo [1.86], για την θεώρηση μονίμων μαγνητών σε στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές, ενώ οι T. Yamaguchi, Y. Kawase, και S. Sano [1.108], χρησιμοποιούν τρισδιάστατη ανάλυση με Μ.Π.Σ. για την μελέτη κινητήρα επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Επίσης εμφανίζονται στην βιβλιογραφία μεικτές μέθοδοι με χρήση διανυσματικού και βαθμωτού δυναμικού, όπως στην αναφορά [1.52] όπου γίνεται χρήση της προτεινόμενης μεικτής μεθόδου για την ανάλυση μηχανής συνεχούς ρεύματος με κεκλιμένους μόνιμους μαγνήτες. Μια κατάλληλη τροποποίηση του βαθμωτού δυναμικού ώστε να μην απαιτείται ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τις πηγές ρεύματος, και συνεπώς να επιτυγχάνεται μεγάλη οικονομία σε υπολογιστική ισχύ, προτάθηκε από τους Κλαδά και Τεγόπουλο [1.3]. Η συγκεκριμένη πρόταση επεκτάθηκε περαιτέρω και χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό δινορρευμάτων πάλι από τους Κλαδά και Τεγόπουλο [1.99].

#### 1.3.1.1. Μεικτές τεχνικές με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Στην βιβλιογραφία παρουσιάζονται αρκετές αναφορές σχετικά με την ανάπτυξη μεικτών τεχνικών ανάλυσης μαγνητικού πεδίου, όπου για συγκεκριμένες εφαρμογές, η Μ.Π.Σ. συνδυάζεται με άλλη αριθμητική μέθοδο επίλυσης ή αναλυτική λύση των εξισώσεων του πεδίου, με στόχο την επίτευξη μεγάλου βαθμού ακρίβειας υπολογισμών σε συνδυασμό με μειωμένη υπολογιστική επιβάρυνση.

Οι S. J. Salon, J. P. Peng, παρουσιάζουν εφαρμογή της μεθόδου σε προβλήματα βαθμωτού δυναμικού στην αναφορά [1.100], η οποία επεκτείνεται από τους Salon και D'Angelo σε επιπλέον εφαρμογές ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων, σε απλοποιημένες γεωμετρίες, [1.63 1.104]. Επίσης η Τσίλη Μ. στις αναφορές [1.120] και [1.60] παρουσιάζει μεικτές αριθμητικές τεχνικές πεπερασμένων στοιχείων – οριακών στοιχείων για τη σχεδίαση μετασχηματιστών ισχύος.

#### 1.3.1.2. Μεικτή τεχνική πεπερασμένων στοιχείων αναλυτικών λύσεων

Η μεικτή τεχνική πεπερασμένων στοιχείων – αναλυτικών λύσεων, ενσωματώνει ένα ειδικό στοιχείο - μακροστοιχείο στο διάκενο βασισμένο στην αναλυτική λύση της εξίσωσης Laplace, σε συνδυασμό με τις τυποποιημένες δισδιάστατες τεχνικές πεπερασμένων στοιχείων για τον υπόλοιπο εκτός διακένου χώρο.

Προτάθηκε αρχικά στην αναφορά [1.1] από τους Α. Α. Abdel-Razek, J. L. Coulomb, για εφαρμογή του σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων με σκοπό την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών, ενώ οι ίδιοι συγγραφείς με νέα εργασία τους [1.5], βελτίωσαν το μακροστοιχείο.

Στην αναφορά [1.23], οι F. Piriou and A. Razek παρουσιάζουν μεικτή τεχνική πεπερασμένων στοιχείων αναλυτικών λύσεων, με χρήση ειδικού μακροστοιχείου σε κυλινδρικές συντεταγμένες, για την θεώρηση κεκλιμένων αυλάκων στον στάτη στρεφόμενων

ηλεκτρικών μηχανών. Επίσης οι Θ.Κεφάλας και Γ. Καλοκύρης σε δύο εργασίες τους [1.109] και [1.26], χρησιμοποιούν την ίδια μεικτή τεχνική για την θεώρηση μαγνητών υπό κλίση στο δρομέα στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών.

Ειδική προσαρμογή του μακροστοιχείου εφαρμογής αναλυτικής λύσης στο διάκενο, για την περίπτωση στρεφόμενων αξονικών μηχανών γίνεται από τους R. Wang, H. Mohellebi κ.α., στην αναφορά [1.98]

#### 1.3.2. Ηλεκτρικές μηχανές μονίμων μαγνητών

Σημαντικοί παράγοντες για την εξάπλωση των ηλεκτρικών μηχανών που ενσωματώνουν μόνιμους μαγνήτες σε αντικατάσταση του τυλίγματος διέγερσης τους και την διεύρυνση του πεδίου εφαρμογών τους, αποτελούν αφενός η ανάπτυξη μονίμων μαγνητών υψηλής μαγνήτισης και αφετέρου η επίτευξη χαμηλών απωλειών. Ιδιαίτερα πλούσια παρουσιάζεται συνεπώς η βιβλιογραφία σχετικά με τις ηλεκτρικές μηχανές μονίμων μαγνητών.

Το βιβλίο των Jacek F. Gieras, Michell Wing [1.36] αποτελεί κλασσικό σύγγραμμα σχετικά με τον σχεδιασμό και τις εφαρμογές των κινητήρων μονίμων μαγνητών. Χρήση των ηλεκτρικών μηχανών μονίμων μαγνητών μπορεί να γίνει σε πλήθος εφαρμογών όπως για παράδειγμα σε ανεμογεννήτριες όπως προτείνει ο Α. Χανιώτης στην αναφορά [1.116]. Οι Τ. F. Chan, L. L. Lai και Lie-Tong Yan μελετούν την απόδοση τριφασικών γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος με ενσωματωμένους στον δρομέα μαγνήτες NdFeB [1.105], ενώ ο Ε. Lovelace κ.α. [1.19], παρουσιάζει εναλλακτικούς μηχανολογικούς σχεδιασμούς για την ενσωμάτωση μονίμων μαγνητών σε ηλεκτρικές μηχανές υψηλής ταχύτητας,

Σημαντικό ζήτημα αποτελεί η ελαχιστοποίηση του όγκου μιας μηχανής μέσω της γεωμετρικής βελτιστοποίησης των χρησιμοποιούμενων μονίμων μαγνητών, θέμα με το οποίο ασχολούνται οι Μ. R. Dubois H. Polinder και J. A. Ferreira σε τρείς εργασίες τους [1.58-1.59]. Με την γεωμετρική βελτιστοποίηση επιφανειακών μαγνητών σε σύγχρονες γεννήτριες, ασχολείται επίσης ο Τ. Higuchi κ.α. [1.106], ενώ οι Ε. Lovelace, Τ. Jahns και J. Lang [1.18], προτείνουν μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων για την θεώρηση φαινομένων κορεσμού στις σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών.

Οι D. Zarko, D. Ban και T.A. Lipo [1.15], παρουσιάζουν τον αναλυτικό υπολογισμό της αναπτυσσόμενης ροπής ευθυγράμμισης σε κινητήρες μονίμων μαγνητών, ενώ τους παράγοντες που μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση της ροπής ευθυγράμμισης μελετούν οι L. Dosiek και P. Pillay [1.47]. Επίσης οι Z.Q. Zhu και D. Howe [1.114], αναλύουν την επίδραση που έχουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας μηχανής μονίμων μαγνητών στην αναπτυσσόμενη ροπή ευθυγράμμισης. Με το ζήτημα της μείωσης της ροπής ευθυγράμμισης ασχολείται και ο Υ. Yang κ.α [1.112], προτείνοντας εναλλακτικές γεωμετρικές διαμορφώσεις των οδόντων του στάτη, ενώ για το ίδιο θέμα οι M. Lukaniszyn, M. Jagiela, και R. Wrobel [1.56], προτείνουν διαφορετικές διαμορφώσεις του σχήματος του χρησιμοποιούμενου μαγνήτη. Τεχνικές μείωσης της ροπής ευθυγράμμισης προτείνονται επίσης και από τους Nicola Bianchi και Silverio Bolognani [1.77], για την περίπτωση κινήτήρων με επιφανειακούς μαγνήτες στον δρομέα, ενώ η παρίπτωση των χωνευτών μαγνητών και η γεωμετρική βελτιστοποίηση τους με χρήση Μ.Π.Σ., παρουσιάζεται τους Marchand C., Ren Z. και Razek, Α. στην αναφορά [1.63]. Στην αναφορά [1.16] ο D.A. Gonzalez κ.α. καθώς και στην αναφορά [1.21], ο F. Caricchi κ.α., προτείνουν μεθόδους και τεχνικές μείωσης της ροπής ευθυγράμμισης, ειδικά για την περίπτωση αξονικών στρεφόμενων μηγανών μονίμων μαγητών. Ο R. Lateb κ.α. [1.95], εξετάζουν την επίδραση στην ροπή ευθυγράμμισης που μπορεί να έχει η κατάτμηση των χρησιμοποιούμενων επιφανειακών μαγνητών σε ένα κινητήρα.

#### Γραμμικές γεννήτριες μονίμων μαγνητών

Οι γραμμικές γεννήτριες μονίμων μαγνητών αποτελούν υποκατηγορία των σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών. Βασική διαφοροποίηση τους είναι η παλινδρομική κίνηση του δρομέα τους σε σχέση με την αντίστοιχη περιστροφική των συμβατικών στρεφόμενων σύγχρονων γεννητριών μονίμων μαγνητών.

Οι Jacek F. Gieras και Zbigniew J. Riech, στην αναφορά [1.37], παρουσιάζουν τις εφαρμογές γραμμικών κινητήρων σε συστήματα κίνησης και μεταφοράς καθώς και σε συστήματα βιομηχανικών αυτοματισμών. Στην αναφορά [1.82], οι Ο. Danielson, M. Leijon και Ε. Sjostedt, παρουσιάζουν ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος μιας γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών. Επίσης στην αναφορά [1.46] προσομοιώνεται με Μ.Π.Σ., η λειτουργία μιας γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητικών και παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή των μαγνητικών χαρακτηριστικών της για διάφορες θέσεις του δρομέα της.

Η περίπτωση της χρήσης γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής από θαλάσσιο κυματισμό εμφανίζεται στην βιβλιογραφία. Ειδικότερα οι Mats Leijon κ.α. [1.65], προτείνουν συγκεκριμένη διαμόρφωση γραμμικής μηχανής μονίμων μαγνητών και μελετούν με Μ.Π.Σ. την μεταβολή του μαγνητικού πεδίου της γεννήτριας για ημιτονοειδούς μορφής μετακίνηση του δρομέα. Επίσης η K. Rhinefrank κ.α. στην αναφορά [1.45] καθώς και ο Nicholas Jon Baker [1.76], προτείνουν ειδική γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών για υποθαλάσσια εγκατάσταση στη ανοικτή θάλασσα της Βαλτικής και εξετάζουν την διαμόρφωση του απαιτούμενου μηχανικού μέρους της διάταξης για την δημιουργία σταθμού ηλεκτροπαραγωγής από θαλάσσιο κυματισμό.

#### 1.3.3. Υδροδυναμική –Πλωτά σώματα

Η προσπάθεια για ηλεκτροπαραγωγή με εκμετάλλευση του θαλάσσιου δυναμικού, απαιτεί την μελέτη της φύσης του θαλάσσιου κυματισμού και της αλληλεπίδρασης μεταξύ του θαλάσσιου κύματος και του πλωτού σώματος που θα αποτελέσει την βάση του μηχανισμού απορρόφησης της ενέργειας του κύματος. Το βιβλίο των R. G. Dean και R.A. Dalrymple [1.94], αναφέρεται στις βασικές αρχές της ρευστομηχανικής καθώς και την διαφοροποίηση του κυματισμού σε συνάρτηση με το βάθος του πυθμένα της θάλασσας. Επίσης αναπτύσσονται οι σχετικές με τον σχηματισμό θαλασσίων κυμάτων θεωρίες, ενώ παρατίθενται και στατιστικά στοιχεία που αφορούν τα κύματα ανοικτών θαλασσών και ωκεανών. Στο βιβλίο του L. M. Milne-Thomson [1.48], αναπτύσσεται η μαθηματική θεώρηση της κίνησης των ρευστών, που εφαρμόζεται σε προβλήματα υδροδυναμικής, ενώ το βιβλίο του Johannes Falnes [1.39], εστιάζει στην γραμμική ανάλυση κυμάτων χαμηλού ύψους και στην δυναμική ανάλυση των πλωτών σωμάτων που χρησιμοποιούνται για απορρόφηση της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού.

Οι D. D. Bhatta και M. Rahman [1.12], αναλύουν τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις σε κύλινδρο που κινείται κατακόρυφα εξαιτίας του προσπίπτοντος κυματισμού. Ο R. W. Yeung, στην αναφορά [1.97], ορίζει τον συντελεστή απόσβεσης καθώς και τον συντελεστή πρόσθετης μάζας, που χρησιμοποιούνται στην διατύπωση της εξίσωσης κίνησης ενός πλωτού σώματος. O D. J. Pizer [1.14], μελετά τις συνθήκες μεγιστοποίησης της απορροφούμενης ενέργειας από τον θαλάσσιο κυματισμό, ενώ οι S.A. Mavrakos, and A. Kalofonos [1.103], προτείνουν μεθόδους βελτιστοποίησης της παραγόμενης από τον θαλάσσιο κυματισμό ενέργειας, με την χρήση συστοιχίας κατακόρυφων διατάξεων απορρόφησης της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού.

#### 1.4 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η παρούσα εργασία αναπτύσσεται σε οκτώ κεφάλαια ως εξής:

Στο **Κεφάλαιο 1**, παρουσιάζεται το υπό μελέτη πρόβλημα καθώς και οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν για την εξέταση του.

Στο **Κεφάλαιο 2**, αναλύονται τα χαρακτηριστικά των θαλασσίων κυμάτων. Επίσης μελετώνται οι δυνάμεις που ασκούνται επί ενός πλωτού σώματος εξαιτίας του προσπίπτοντος κυματισμού. Με βάση την θεωρητική ανάλυση, εξάγεται η εξίσωση κίνησης κυλινδρικού πλωτήρα που αποτελεί τη βάση του μηχανισμού απορρόφησης της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού, που έχει επιλεχθεί για την περίπτωση του πειραματικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, προκειμένου να διαμορφωθεί το μοντέλο αναπαράστασης του μηχανικού και υδραυλικού μέρους της διάταξης.

Στο **Κεφάλαιο 3**, μελετάται η μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης, η οποία επιλέχθηκε ως ηλεκτρογεννήτρια για τον πειραματικό σταθμό, καθώς και η βελτιστοποίηση μέσω κατάλληλου ελέγχου της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από την διάταξη.

Επίσης παρουσιάζεται αναλυτικά η σχεδίαση μιας ειδικής γραμμικής γεννήτριας με μόνιμους μαγνήτες, η οποία επιτρέπει σημαντική απλούστευση του μηχανικού μέρους. Η σχεδίαση βασίστηκε στα δεδομένα που προέκυψαν από την προσομοίωση και ανάλυση της συμπεριφοράς του απαιτούμενου συζευγμένου υδραυλικού-μηχανικού συστήματος, σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του θαλάσσιου κυματισμού.

Με την χρήση κατάλληλων κατά περίπτωση μοντέλων, αναλύεται η πεδιακή συμπεριφορά των δύο ειδών γεννητριών και προσομοιώνεται η λειτουργία τους για διάφορες συνθήκες φόρτισης.

Στο **Κεφάλαιο 4** προτείνεται για την θεώρηση της κλίσης των μαγνητών της γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών, ένα νέο συζευγμένο υβριδικό μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας της μηχανής υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης.

Το νέο μοντέλο ενσωματώνει κώδικα για την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου της μηχανής με την χρήση της μεικτής τεχνικής πεπερασμένων στοιχείων – αναλυτικών λύσεων.

Καινοτόμο στοιχείο του υβριδικού μοντέλου που αναπτύχθηκε είναι η δυνατότητα θεώρησης της κλίσης των μαγνητών, χρησιμοποιώντας δισδιάστατη αναπαράσταση σε σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων. Στον κώδικα που αναπτύχθηκε, περιλαμβάνεται η ταυτόχρονη, με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων επίλυση των εξισώσεων του πεδίου, με τις κυκλωματικές εξισώσεις της ηλεκτρογεννήτριας για την θεώρηση διαφόρων συνθηκών φόρτισης.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα νέα μοντέλα προσομοίωσης που αναπτύχθηκαν για τις εναλλακτικές περιπτώσεις διαμόρφωσης του συζευγμένου υδραυλικού- μηχανικούηλεκτρικού συστήματος μετατροπής της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού σε ηλεκτρική.

Τα μοντέλα αυτά αξιοποιήθηκαν ώστε υπό συνθήκες ελεγχόμενης βραχυχρόνιας υπερφόρτισης των γεννητριών συνεχούς ρεύματος, να επιτευχθεί βελτιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας με την εκμετάλλευση ακόμη και κύματος χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου.

Επίσης, για την απλούστευση των υπολογισμών, μετά από επεξεργασία των πειραματικών χρονοσειρών κυματισμού, προτείνονται εναλλακτικές χρονοσειρές ίσου ενεργειακού περιεχομένου στην δεσπόζουσα συχνότητα. Στο **Κεφάλαιο 6**, γίνεται παρουσίαση του «Πειραματικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής από θαλάσσιο κυματισμό» που κατασκευάστηκε στην Ψυτάλλεια. Παρουσιάζεται η χωροταξική διαμόρφωσή του και αναλύονται τα κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των επιμέρους υποσυστημάτων του.

Στο **Κεφάλαιο** 7 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έγιναν στον πειραματικό σταθμό, γίνεται ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και πειραματική επιβεβαίωση των μοντέλων προσομοίωσης που αναπτύχθηκαν. Παρατίθενται τόσο τα μετρημένα μεγέθη όσο και τα αντίστοιχα προσομοιωμένα, με βάση τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την μελέτη της λειτουργίας και απόδοσης του συνολικού αλλά και των επιμέρους συστημάτων του σταθμού. Τέλος με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, προτείνεται στρατηγική ελέγχου, που επιτυγχάνει βέλτιστη αξιοποίηση του κυματικού δυναμικού.

Στο **Κεφάλαιο 8** ανακεφαλαιώνονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας, επισημαίνονται τα σημεία συμβολής της στην προαγωγή της επιστήμης και υποδεικνύονται θέματα που αξίζουν να αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω έρευνας.

#### 1.5 ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΑΓΩΓΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

Τα κύρια σημεία στα οποία έχει συμβάλλει η παρούσα διδακτορική διατριβή στην προαγωγή της επιστήμης είναι τα παρακάτω:

- Η ανάπτυξη ειδικού μοντέλου το οποίο επιτρέπει την συζευγμένη θεώρηση των υδραυλικών, μηχανικών και ηλεκτρικών φαινομένων, μιας διάταξης ηλεκτροπαραγωγής από τον θαλάσσιο κυματισμό.
- Η ανάπτυξη νέας μεικτής τεχνικής πεπερασμένων στοιχείων αναλυτικής λύσης με δυνατότητα θεώρησης κεκλιμένων μαγνητών στον δρομέα γραμμικών γεννητριών, για την μελέτη της επίδρασης της κλίσης στα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μηχανής με στόχο την γεωμετρική βελτιστοποίηση της.
- Η ανάπτυξη προσεγγιστικού μοντέλου εκτίμησης της παραγόμενης ενέργειας που βασίζεται σε προσέγγιση της πραγματικής χρονοσειράς θαλάσσιου κυματισμού, από αντίστοιχη ενεργειακά ισοδύναμη χρονοσειρά, η οποία αποτελείται από διαδοχικά ημίτονα με βάση την δεσπόζουσα συχνότητα.
- Η ανάπτυξη μεθόδου πρόβλεψης με βάση την καταγεγραμμένη προϊστορία του κύματος, με αποτέλεσμα την βελτιστοποίηση του ελέγχου της γεννήτριας και την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η σχεδίαση ειδικής γραμμικής γεννήτριας μόνιμων μαγνητών, κατάλληλης για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής από θαλάσσιο κυματισμό σε παράκτιους σταθμούς.

#### 1.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] P. Silvester, "A General High-Order Finite-Element Waveguide Analysis Program," IEEE Tran. MTT, Vol. 17, No 4, pp. 204-210, 1969.
- [1.2] P. Silvester, "High-Order Polynomial Triangular Finite Elements for Potential Problems," Int. J. Engng. Sci., Vol. 7, pp. 849-861, 1969.
- [1.3] Peter P. Silvester, Ronald L. Ferrari, "Finite Elements for Electrical Engineers", Cambridge University Press, 1983
- [1.4] N. Ida, "PCNDT An Electromagnetic Finite Element Package for Personal Computers,", IEEE Trans. Magn., Vol. 24, No 1, pp. 366-369, Jan. 1988.
- [1.5] T. W. Nehl, A. M. Pawlak, N. Mikhaeil Boules, "ANTIC85: A General Purpose Finite Element Package for Computer Aided Design and Analysis of Electromagnetic Devices," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 24, No 1, pp. 358-361, Jan. 1988.
- [1.6] C. S. Biddlecombe, J. K. Sykulski, S. C. Taylor, "Design Environment Modules for Non-Specialist Users of EM Software," IEEE Trans. Magn., Vol. 30, No 5, pp. 3625-3628, Sept. 1994.
- [1.7] W. Mai, G. Henneberger, "Object-Oriented Design of Finite Element Calculations with Respect to Coupled Problems," IEEE Trans. Magn., Vol. 36, No 4, pp. 1677-1681, Jul. 2000.
- [1.8] L. Paul Chew, "Guaranteed-Quality Mesh Generation for Curved Surfaces", Proceedings of the Ninth Annual Symposium on Computational Geometry (San Diego, California), pages 274-280, Association for Computing Machinery, May 1993
- [1.9] Jim Ruppert, "A Delaunay Refinement Algorithm for Quality 2-Dimensional Mesh Generation", Journal of Algorithms 18(3), p-p 548-585, May 1995.
- [1.10] Jonathan Richard Shewchuk, "Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator", Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering, volume 1148 of Lecture Notes in Computer Science, pages 203-222, Springer-Verlag, Berlin, May 1996.
- [1.11] Jonathan Richard Shewchuk, "Delaunay Refinement Algorithms for Triangular Mesh Generation", Computational Geometry: Theory and Applications 22(1-3), 21-74, May 2002
- [1.12] J. Bastos, "Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods". Marcel Dekker, April 2003.
- [1.13] A. B. J. Reece, T. W. Preston, "Finite Element Methods in Electrical Power Engineering". Oxford University Press, May 2000.
- [1.14] A. Kladas and A. Razek, "Eddy currents modeling in synchronous machines during starting accounting for the nature of damper end connections," IEEE Trans. Magn., vol. 24, no. 1, pp. 186 189, Jan. 1988.
- [1.15] N.A. Golias, T.D. Tsiboukis, "Adaptive refinement strategies in three dimensions," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 29, No 2, pp. 1886 – 1889, Mar. 1993.
- [1.16] N.A. Golias, T.D. Tsiboukis, "Three-dimensional automatic adaptive mesh generation," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 28, No 2, pp. 1700-1703, Mar. 1992.
- [1.17] O C. Zienkiewicz, "The finite element method-from intuition to generality," Appl. Mech. Rev. Vol. 23, pp. 249-56, 1970.

- [1.18] P. Campbell, M.V.K. Chari, J. D'Angelo, "Three-dimensional finite element solution of permanent magnet machines", IEEE Transactions on Magnetics, vol. Mag-17, no. 6, pp. 2997-2999, 1981.
- [1.19] T. Yamaguchi, Y. Kawase, and S. Sano, "3-D finite-element analysis of skewed squirrel-cage induction motor," IEEE Trans. Magn., vol. 40, no. 2, pp. 969–972, Mar. 2004.
- [1.20] M. A. Alhamadi and N. A. Demerdash, "Three dimensional magnetic field computation by a coupled vector-scalar potential method in brushless dc motors with skewed permanent magnet mounts – The no load and load results", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9, no. 1, pp. 15-25, 1994.
- [1.21] A. G. Kladas, J. A. Tegopoulos, "A new scalar potential formulation for 3D Magnetostatics necessitating no source field calculation". IEEE Trans. on Magn., Vol. 28, No.2, March 1992, pp. 1103-1106.
- [1.22] A. G. Kladas and J. A. Tegopoulos, "3D eddy currents modelling by means of a particular reduced scalar potential technique," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 33, no. 2, pp. 1350-1353, Mar. 1997.
- [1.23] S. J. Salon, J. P. Peng, "Hybrid Finite Element Boundary Element Solutions to Axisymmetric Scalar Potential Problems," Computational Electromagnetics. Elsevier Science Publishers, B. V. (North Holland) IMACS 1986, Z. J. Cendes (editor), pp.251-261.
- [1.24] Marchand C., Ren Z., Razek, A., "Torque optimization of a buried permanent magnet synchronous machine by geometric modification using FEM", EMF'94 International Conference, Leuven, Belgium, 1994, pp. 53-56.
- [1.25] S.J. Salon, J. D'Angelo, "Applications of the hybrid finite element boundary element method in electromagnetics", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 24, Nr. 1, Jan. 1988, pp. 80-85.
- [1.26] Μαρίνα Α. Τσίλη, "Ανάπτυξη μεικτών αριθμητικών τεχνικών πεπερασμένων στοιχείων – οριακών στοιχείων για τη σχεδίαση μετασχηματιστών ισχύος", Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Ιούνιος 2005.
- [1.27] M.A. Tsili, A.G. Kladas, P.S. Georgilakis, A.T. Souflaris, C.P. Pitsilis, J.A. Bakopoulos, D.G. Paparigas, "Hybrid Numerical Techniques for Power Transformer Modeling: A Comparative Analysis Validated by Measurements," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No 2, pp. 842-845, Mar. 2004
- [1.28] A. A. Abdel-Razek, J. L. Coulomb, M. Feliachi, and J. C. Sabonnadiere, "The calculation of electromagnetic torque in saturated electric machines within combined numerical and analytical solution in the field equations," IEEE Trans. Magn., vol. 17, pp. 3250–3252, Nov. 1981.
- [1.29] A. Razek, J. Coulomb, M. Feliachi, and J. Sabonnadiere, "Conception of an air-gap element for the dynamic analysis of the electromagnetic field in electric machines," IEEE Trans. Magn., vol. MAG-18, no. 2, pp. 655–659, Mar. 1982.
- [1.30] F. Piriou and A. Razek, "A model for coupled magnetic-electric circuits in electric machines with skewed slots," IEEE Trans. Magn., vol. 26, no. 2, pp. 1096–1100, Mar. 1990.
- [1.31] Themistoklis Kefalas, George Kalokiris, Antonios Kladas and John Tegopoulos, "Design of skewed mounted permanent magnet synchronous generators based on 2D and 3D finite element techniques", Journal of Materials Processing Technology, Volume 161, Issues 1-2, 10 April 2005, Pages 288-293
- [1.32] G. D. Kalokiris, T. D. Kefalas, A. G. Kladas and J. A. Tegopoulos, "Special Air-Gap Element for 2-D FEM Analysis of Electrical Machines Accounting for Rotor Skew", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 5, pp.2020-2023, 2005.
- [1.33] R. Wang, H. Mohellebi, T. J. Flack, M. J. Kamper, J. D. Buys, and M. Feliachi, "Two-dimensional Cartesian air-gap element (CAGE) for dynamic finite-element modeling of electrical machines with a flat air gap," IEEE Trans. Magn., vol. 38, no. 2, pp. 1357–1360, Mar. 2002.

- [1.34] Jacek F. Gieras, Michell Wing, "Permanent Magnet Motor Technology-Design and Applications", Marcel Dekker Inc., New York, 1997
- [1.35] Αντώνιος Χανιώτης, "Ανάπτυξη, προσομοίωση και κατασκευή συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια μονίμων μαγνητών για απομονωμένη και διασυνδεδεμένη λειτουργία", Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π. Ιανουάριος 2007.
- [1.36] T. F. Chan, L. L. Lai and Lie-Tong Yan, "Performance of a Three-Phase AC Generator With Inset NdFeB Permanent-Magnet Rotor", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no. 1, pp. 88-94, 2004.
- [1.37] E. Lovelace, T. Jahns, T. Keim and J. Lang, "Mechanical Design Considerations for Conventionally Laminated, High-Speed, Interior PM Synchronous Machine Rotors", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, no. 3, pp. 806-812, 2004.
- [1.38] M. R. Dubois, H. Polinder and J. A. Ferreira, "Contribution of permanent magnet volume elements to no load voltage in machines", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 39, no. 3, pp. 1784-1792, 2003.
- [1.39] M. R. Dubois, H. Polinder and J. A. Ferreira, "Varying magnetization orientation for permanent magnet volume reduction in machines", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 39, no. 3, pp. 1793-1799, 2003.
- T. Higuchi, J. Oyama, E. Yamada, E. Chiricozzi, F. Parasiliti, M. Villani,
   "Optimization procedure of surface permanent magnet synchronous motors", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 33, no 2, March 1997, pp. 1943-6.
- [1.41] E. Lovelace, T. Jahns and J. Lang, "A Saturating Lumped-Parameter Model for an Interior PM Synchronous Machine", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 3, pp. 645-650, 2002.
- [1.42] D. Zarko, D. Ban and T.A. Lipo, "Analytical Solution for Cogging Torque in Surface Permanent-Magnet Motors Using Conformal Mapping", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 1, January 2008, pp 52-65.
- [1.43] L. Dosiek, P. Pillay, "Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, No 6, November/December 2007, pp 1565-1571.
- Z.Q. Zhu, D. Howe, "Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 15, No 4, December 2000, pp 407-412.
- [1.45] Y. Yang, X. Wang, R. Zhang, T. Ding, and R. Tang, "The Optimization of Pole Arc Coefficient to Reduce Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent Magnet Motors", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, No 4, April 2006, pp 1135-1138.
- [1.46] M. Lukaniszyn, M. Jagiela, and R. Wrobel, "Optimization of Permanent Magnet Shape for Minimum Cogging Torque Using a Genetic Algorithm", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 40, No 2, March 2004, pp 1228-1231.
- [1.47] Nicola Bianchi and Silverio Bolognani "Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, No 5, September/Octromber 2002, pp 1259-1265.
- [1.48] D.A. Gonzalez, J. A. Tapia, and A. L. Bettancourt, "Design Consideration to Reduce Cogging Torque in Axial Flux Permanent-Magnet Machines", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43, No 8, August 2007, pp 3435-3440.
- [1.49] F. Caricchi, G. Capponi, F. Crescimbini and L. Solero, "Experimental Study on Reducing Cogging Torque and No-Load Power Loss in Axial-Flux Permanent-Magnet Machines with Slotted Winding", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 40, No 4, July/August 2004, pp 1066-75.
- [1.50] R. Lateb, N. Takorabet, and F. Meibody-Tabar, "Effect of Magnet Segmentation on the Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent-Magnet Motors", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, No 3, March 2006, pp 442-445.
- [1.51] Jacek F. Gieras, Zbigniew J. Riech, "Linear Synchronous Motors-Transportation and Automation Systems", CRC Press, New York, 2000

- [1.52] O. Danielson, M. Leijon, E. Sjostedt, «Detailed study of the magnetic circuit in a longitudinal flux permanent-magnet synchronous linear generator», IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no 9, pp. 2490-2495, September 2005.
- [1.53] Karin Thorburn, Karl-Erik Karlsson, Arne Wolfbrandt, Mikael Eriksson, Mats Leijon, «Time stepping finite element analysis of a variable speed synchronous generator with rectifier», Applied Energy 83 (2006), pp 371-386.
- [1.54] Mats Leijon, Hans Bernhoff, Olov Agren, Jan Isberg, Jan Sundberg, Marcus Berg, Karl Erik Karlsson, and Arne Wolfbrandt, «Multiphysics simulation of wave energy to electric energy conversion by permanent magnet linear generator», IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no1, pp. 219-224, March 2005.
- [1.55] K. Rhinefrank, E.B.Agamloh, A. von Jouanne et al. «Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy», Renewable Energy 31 (2006), pp 1279-1298.
- [1.56] Nicholas Jon Baker, "Linear Generators for Direct Drive Marine Renewable Energy Converters", PhD thesis, School of Engineering University of Durham 2003
- [1.57] R. G. Dean, R.A. Dalrymple "Water wave mechanics for Engineers and Scientists" World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., London, 1984
- [1.58] L. M. Milne-Thomson, "Theoretical Hydrodynamics", Dover Publications, New York, 1996.
- [1.59] Johannes Falnes, "Ocean Waves and Oscillating Systems:Linear Interactions including Wave Energy Extraction", Cambridge University Press, 2002.
- [1.60] D. D. Bhatta and M. Rahman, "Wave loadings on a vertical cylinder due to heave motion", International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences, Volume 18, Issue 1, 1995, pages 151-170.
- [1.61] R. W. Yeung, "Added mass and damping of a vertical cylinder in finite-depth waters" Applied Ocean Research, Vol. 3, Issue 3, 1981, pp. 119-133.
- [1.62] D. J. Pizer, "Maximum wave-power absorption of point absorbers under motion constrains" Applied Ocean Research, Vol. 15, Issue 4, 1993, pp. 227-234.
- [1.63] S.A. Mavrakos, and A. Kalofonos, «Optimum Power Absorption by Arrays of Interacting Vertical Axisymmetric Wave-Energy Devices», Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 119, pp. 244–251, 1997.
- [1.64] Nicola Bianchi, "Electrical Machine Analysis Using Finite Elements", CRC Press, 2005

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ΘΑΛΑΣΣΙΟΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΣ – ΠΛΩΤΑ ΣΩΜΑΤΑ

#### 2.1 ΑΠΛΑ ΑΡΜΟΝΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Τα βασικά χαρακτηριστικά των απλών αρμονικών κυμάτων όπως φαίνονται στο Σχήμα2.1, είναι τα παρακάτω:

- Το ύψος του κύματος (H)
- Το μήκος του κύματος (L)
- Η περίοδος του κύματος (T)
- Η ταχύτητα διαδόσεως του κύματος c = L/T



Σχήμα 2.1: Βασικά χαρακτηριστικά αρμονικών κυμάτων

Η καμπύλη της ελεύθερης επιφάνειας  $\eta$  του κύματος σε σύστημα αξόνων x, z όπου ο άξονας z θεωρείται θετικός προς τα πάνω, δίνεται από την εξίσωση:

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2}\sin(kx - \omega t)$$
(2.1)

όπου 
$$k = \frac{2\pi}{L}$$
 ο κυματικός αριθμός (rad/m)  
 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κύματος (rad/s)

#### 2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Στην περίπτωση των θαλάσσιων κυμάτων, τα χαρακτηριστικά διαφοροποιούνται ανάλογα με το βάθος *h* της θάλασσας, από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι τον πυθμένα.

Σε νερά μικρού βάθους h< L/20 ισχύει [2.1]:</li>

$$L = T\sqrt{gh}$$

$$\omega = k\sqrt{gh}$$

$$c = \sqrt{gh}$$
(2.2)

Σε νερά μεγάλου βάθους h>L/2 ισχύει :

$$L = \frac{g}{2\pi} T^{2}$$

$$\omega = \sqrt{kg}$$

$$c = \sqrt{\frac{g}{k}}$$
(2.3)

Από την σχέση (2.3), προκύπτει ότι για την ταχύτητα μετάδοσης ισχύει ότι  $c = \frac{g}{2\pi}$  T ίσο δηλαδή με c=0,64T, ενώ για το μήκος κύματος στην περίπτωση θάλασσας μεγάλου βάθους ισχύει ότι  $L = \frac{g}{2\pi}$  T<sup>2</sup> = 0,64T<sup>2</sup>.

Τα χαρακτηριστικά των θαλασσίων κυμάτων σε συνάρτηση με το βάθος της θάλασσας, συνοψίζονται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Βασικά χαρακτηριστικά θαλασσίων κυμάτων σε σχέση με το βάθος της θάλασσας

Σύμφωνα με την γραμμική θεωρία οι μοριακές κινήσεις του υγρού θεωρούνται απλές αρμονικές συναρτήσεις του χρόνου. Παρακάτω δίνονται οι συνιστώσες u και w της τροχιακής ταχύτητας των μορίων που κινούνται στο κατακόρυφο επίπεδο xz, καθώς και η κατανομή της πίεσης σε βάθος z από το επίπεδο ηρεμίας και ανάλογα με το βάθος h της θάλασσας [2.1].

Σε νερά μικρού βάθους h< L/20 ισχύει:</li>

Οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας:

$$u = \frac{H}{2}\omega \frac{\cosh[k(h+z)]}{\sinh(kh)}\sin(kx - \omega t)$$
(2.4)

Κατακόρυφη συνιστώσα ταχύτητας:

$$w = \frac{H}{2}\omega \frac{\sinh[k(h+z)]}{\sinh(kh)}\cos(kx - \omega t)$$
(2.5)

$$p = -\rho gz + \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t)$$
(2.6)

Σε νερά μεγάλου βάθους h>L/2 ισχύει :

Οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας:

$$u = \frac{H}{2}\omega e^{kz}\sin(kx - \omega t)$$
(2.7)

Κατακόρυφη συνιστώσα ταχύτητας:

$$w = \frac{H}{2}\omega e^{kz}\cos(kx - \omega t)$$
(2.8)

Πίεση σε βάθος z:

$$p = -\rho gz + \rho g \frac{H}{2} e^{kz} \sin(kx - \omega t)$$
(2.9)

όπου  $\rho$  η πυκνότητα θαλασσινού νερού (~ 1025 Kg/m<sup>3</sup>)

#### 2.2.2. Ολική ανάκλαση κύματος σε κατακόρυφο τοίχο

Όταν ένα αρμονικό κύμα προσπίπτει σε κατακόρυφο τοίχο κάθετα στην διεύθυνση του, τότε ανακλάται πάλι προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η επιφάνεια του νερού κοντά στον τοίχο εμφανίζεται να κινείται προς τα πάνω και κάτω με διπλάσιο ύψος από αυτό του προσπίπτοντος κυματισμού. Πρόκειται για την περίπτωση στάσιμων κυμάτων, τα οποία προκύπτουν από την συμβολή δύο αρμονικών κυμάτων κινουμένων σε αντίθετες διευθύνσεις.



Σχήμα 2.3: Ανάκλαση προσπίπτοντος κύματος σε κατακόρυφο τοίχο

Η καμπύλη της ελεύθερης επιφάνειας περιγράφεται στην περίπτωση αυτή από την σχέση: (2.10)

 $\eta = H\cos(kx)\sin(\omega t)$ 

Οι ταχύτητες των μορίων, καθώς και η πίεση για πεπερασμένο βάθος βυθού, δίνονται από τις επόμενες σχέσεις (2.11), (2.12) και (2.13) [2.1], [2.2]:

Οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας:  $\cosh[k(h+z)]$ 

$$u = H\omega \frac{\operatorname{sech}(k(t+2))}{\sinh(kh)} \sin(kx) \cos(\omega t)$$
(2.11)

Κατακόρυφη συνιστώσα ταχύτητας:

$$w = -H\omega \frac{\sinh[k(h+z)]}{\sinh(kh)} \cos(\omega t)$$
(2.12)

$$p = -\rho gz + H\rho g \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(kx) \sin(\omega t)$$
(2.13)

#### 2.3 ΠΛΩΤΑ ΣΩΜΑΤΑ

#### 2.3.1. Γραμμικό μοντέλο πλωτήρα

Ένας πλωτήρας στην απλούστερη μορφή του, αποτελείται από ένα κύλινδρο διαμέτρου D και βάρους P, ο οποίος σε κατάσταση ηρεμίας είναι βυθισμένος κατά ύψος l στο θαλασσινό νερό, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4. Για την μοντελοποίηση της κατακόρυφης κατά τον άξονα z κίνησης του πλωτήρα, θεωρούμε ένα απλουστευμένο γραμμικό μοντέλο προσομοίωσης [2.12], [2.5], [2.8].



Σχήμα 2.4: Κυλινδρικός πλωτήρας

Η εξίσωση κίνησης του απολύτως στερεού σε σχέση με ένα σταθερό σύστημα συντεταγμένων θα είναι με βάση το νόμο του Νεύτωνα:

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{u}) \tag{2.14}$$

όπου F είναι η συνολική δύναμη στο κέντρο βάρους G του σώματος

**u** η ταχύτητα του κέντρου βάρους του σώματος

Η κατακόρυφη κίνηση του βυθισμένου σώματος με βάση την εξίσωση (2.14) θα είναι:

$$m\ddot{z} = \rho V \ddot{z} = F_t \tag{2.15}$$

όπου m είναι η μάζα του σώματος

ρ η πυκνότητα του θαλασσινού νερού (1025 Kg/m<sup>3</sup>)

V ο όγκος του βυθισμένου σώματος

 $F_t$ η συνολικά εξωτερικά εφαρμοζόμενη δύναμη κατά τον άξονα z

Με βάση την αρχή του Αρχιμήδη, στην κατάσταση ισορροπίας σε ακίνητο ρευστό θα ισχύει η ισορροπία δυνάμενων του βάρους του σώματος *P* και της άνωσης *A* του εκτοπιζόμενου όγκου του ρευστού, δηλαδή θα ισχύει:

$$|P| = |A| \Leftrightarrow mg = \rho g V = \rho g A_s l \tag{2.16}$$

όπου  $A_s = \frac{\pi D^2}{4}$ η διατομή του κυλίνδρου με διάμετρο D

l το ύψος του βυθισμένου μέρους του πλωτήρα σε κατάσταση ισορροπίας

Η συνολική εξωτερική δύναμη  $F_t$  αποτελείται από το άθροισμα των υδροδυναμικών δυνάμεων  $F_h$  και της δύναμης διέγερσης του προσπίπτοντος κυματισμού  $F_w$ .

Η συνολική δύναμη επί του πλωτήρα, και κατά συνέπεια και η εξίσωση κίνησης του, μπορεί να εκτιμηθεί με υπέρθεση της κατάστασης κατά την οποία ο πλωτήρας παλινδρομεί σε ακίνητο ρευστό, με μια δεύτερη όπου κυματισμός προσπίπτει σε ακλόνητα στερεωμένο πλωτήρα.[2.2], [2.3], [2.4]. Τελικά για την συνολική δύναμη θα ισχύει:  $F_t = F_h + F_w$  [2.1].

Οι υδροδυναμικές δυνάμεις αποτελούν τις συνολικές δυνάμεις αντίδρασης του ρευστού κατά την κίνηση του κυλίνδρου μέσα σε ακίνητο ρευστό. Η εξίσωση κίνησης είναι [2.1], [2.2]:

$$m\ddot{z} = F_h = -a\ddot{z} - b\ddot{z} - cz \tag{2.17}$$

όπου α: συντελεστής πρόσθετης μάζας (kgr) b: συντελεστής υδροδυναμικής απόσβεσης σε (Ns/m) c= $\rho g A_s$ : συντελεστής συσσώρευσης ενέργειας (N/m) m= η μάζα του πλωτήρα Η εξίσωση αυτή προκύπτει από την κίνηση ταλαντώσεων του πλωτήρα σε ακίνητο ρευστό, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Ταλαντώσεις πλωτήρα σε ακίνητο ρευστό

Mε βάση το σχήμα 2.5, προκύπτει η εξίσωση:  

$$m\ddot{z} = -P + pA_s - b\dot{z} - a\ddot{z}$$

$$= -P + \rho g(l-z)A_s - b\dot{z} - a\ddot{z}$$
(2.18)

από όπου υπολογίζεται ο συντελεστής c.

Ο συντελεστής απόσβεσης b(ω) οφείλεται στην παραγωγή κυμάτων λόγω της κατακόρυφης κίνησης του πλωτήρα, τα οποία μεταδίδονται ακτινικά και σχετίζονται με απώλεια ενέργειας [2.4], [2.7], [2.9], [2.10]. Επίσης ένα μέρος απωλειών οφείλεται σε τριβές.



Σχήμα 2.6: Μεταβολή του συντελεστή απόσβεσης b(ω) σε συνάρτηση με την ταχύτητα παλινδρόμησης του πλωτήρα.

Ο συντελεστής πρόσθετης μάζας α είναι ανάλογος της κατακόρυφης επιτάχυνσης του πλωτήρα σε ένα γραμμικό σύστημα [2.4], [2.7], [2.9], [2.10]. Οι δυνάμεις που σχετίζονται με τον συντελεστή α, αναπτύσσονται από την επιτάχυνση των μορίων του νερού κοντά στον κυλινδρικό πλωτήρα.



**Σχήμα 2.7:** Μεταβολή του συντελεστή πρόσθετης μάζας α σε συνάρτηση με την γωνιακή ταχύτητα παλινδρόμησης του πλωτήρα.

Στο σχήμα 2.7 παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα, ο συντελεστής πρόσθετης μάζας τείνει προς μια σταθερή τιμή.

Η πίεση που ασκείται στον πυθμένα του κυλίνδρου για z=-l και x=l=1m απόσταση από τον κατακόρυφο τοίχο, σύμφωνα με την εξίσωση (2.13), θα είναι [2.11]:

$$p = \rho g l + H \rho g \frac{\cosh[k(h-l)]}{\cosh(kh)} \cos(kx) \sin(\omega t)$$
(2.19)

Με την παραδοχή ότι η διάμετρος του κυλίνδρου είναι μικρή σε σχέση με το μήκος κύματος, η πίεση στην επιφάνεια του κυλίνδρου μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη, οπότε η σχέση (2.19) γίνεται [2.11], [2.13]:

$$p = \rho g l + H \rho g \frac{\cosh[k(h-l)]}{\cosh(kh)} \sin(\omega t)$$
(2.20)

Η κάθετη δύναμη στην βάση του κυλίνδρου, στην περίπτωση που αυτός θεωρηθεί ακλόνητος [2.11], [2.13], δίνεται από την σχέση (2.21):

$$F = \left\{ \rho g l + H \rho g \frac{\cosh[k(h-l)]}{\cosh(kh)} \sin(\omega t) \right\} A_s$$
(2.21)

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.16) έως (2.20) και θέτοντας:

$$\eta' = H \frac{\cosh[k(h-l)]}{\cosh(kh)} \sin(\omega t) \qquad c = \rho h A_s$$

προκύπτει η σχέση (2.22):

$$F = cl + c\eta' \tag{2.22}$$

όπου A=cl είναι η άνωση και  $F_w'=c\eta'$  είναι η δύναμη γνωστή ως Froude – Krilov [2.1]



Σχήμα 2.8: Δύναμη προσπίπτοντος κύματος σε ακλόνητο κύλινδρο

Σύμφωνα με την υπόθεση του γραμμικού μοντέλου και με δεδομένο ότι ένα μέρος του προσπίπτοντος κύματος διαθλάται, η συνολική δύναμη του προσπίπτοντος κύματος θα δίνεται από σχέση (2.23) η οποία αποτελεί διόρθωση της δύναμης Froude – Krilov  $F_w$ ' [2.1], [2.15], [2.16].

$$F_{w} = a\ddot{\eta}' + b\dot{\eta}' + c\eta'$$
(2.23)

όπου  $\alpha$ ο συντελεστής πρόσθετης μάζας και bο συντελεστής απόσβεσης.



Σχήμα 2.9: Κυματομορφή εφαρμοζόμενης δύναμης σε ακλόνητο πλωτήρα, από ημιτονοειδή προσπίπτοντα κυματισμό.

Σύμφωνα με τις εξισώσεις (2.17) και (2.23) η συνολική εξίσωση κίνησης του κυλινδρικού πλωτήρα κατά τον άξονα z, θα δίνεται από την σχέση (2.24):

$$(m+a)\ddot{z} + b\dot{z} + cz = a\ddot{\eta}' + b\dot{\eta}' + c\eta'$$
  
ή ισοδύναμα  

$$m\ddot{z} = a(\ddot{\eta}' - \ddot{z}) + b(\dot{\eta}' - \dot{z}) + c(\eta' - z)$$
(2.24)

Eπίσης από την εξίσωση (2.22) προκύπτουν:  $\dot{\eta}' = H\omega \frac{\cosh[k(h-l)]}{\cosh(kh)} \cos(\omega t)$   $\ddot{\eta}' = -H\omega^2 \frac{\cosh[k(h-l)]}{\cosh(kh)} \sin(\omega t)$ (2.25)

Με βάση την σχέση (2.24), θεωρούμε ότι η απόκριση κίνησης του πλωτήρα δίνεται από μία σχέση της μορφής [2.2] :

$$z = Z\cos(\omega t + \varphi) \tag{2.26}$$

όπου Ζ το πλάτος της κίνησης και φ η διαφορά φάσης

Επίσης θα ισχύει:

$$\dot{z} = -Z\omega\sin(\omega t + \varphi)$$
  
$$\ddot{z} = -Z\omega^2\cos(\omega t + \varphi)$$
(2.27)

Οπότε προκύπτει ο λόγος του πλάτους της ταλάντωσης Z προς το ύψος H του προσπίπτοντος κύματος, σε συνάρτηση με την γωνιακή ταχύτητα του κύματος  $\omega$  (rad/sec) [2.6], [2.15]:

$$\frac{Z}{H} = \frac{\cosh[k(h-l)]}{\cosh(kh)} \sqrt{\frac{(c-a\omega^2)^2 + (b\omega)^2}{[c-(m+a)\omega^2]^2 + (b\omega)^2}}$$
(2.28)



Σχήμα 2.10: Ανάλυση κίνησης κυλίνδρου σε συνάρτηση με την συχνότητα προσπίπτοντος κύματος

Με βάση το σχήμα 2.10 για θαλάσσια κύματα με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ ~2.75rad/s δηλαδή για περίοδο κύματος  $T_{\kappa}$ ~2.3s παρατηρείται μεγιστοποίηση του λόγου Z/H [2.14].

#### 2.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύθηκαν τα χαρακτηριστικά των θαλασσίων κυμάτων και μελετήθηκαν οι δυνάμεις που ασκούνται επί ενός πλωτού σώματος εξαιτίας του προσπίπτοντος κυματισμού.

Με βάση την ανάλυση των θαλασσίων κυμάτων, προκύπτει ότι τα κύρια χαρακτηριστικά τους όπως η ταχύτητα μετάδοσης c και το μήκος κύματος L, εξαρτώνται από το βάθος h της θάλασσας καθώς και τον χρόνο διάρκειας μιας περιόδου του θαλάσσιου κυματισμού. Ειδικά στην περίπτωση κυμάτων σε θάλασσα με μεγάλο βάθος, προκύπτει ότι η ταχύτητα μετάδοσης ενός θαλάσσιου κύματος είναι c=0,64T ενώ το μήκος του θαλάσσιου κύματος είναι ίσο με L=0,64T<sup>2</sup>, με T τον χρόνο διάρκειας μιας περιόδου του κύματος. Για τα τυπικά θαλάσσια κύματα με περιόδους από 2 έως 10 δευτερόλεπτα που εμφανίζονται σε θάλασσες μεγάλου βάθους, αντιστοιχούν ταχύτητες διάδοσης από 1,3 έως 6,5m/s και μήκη κύματος από 2,5 έως 65m.

Η μελέτη των εφαρμοζόμενων δυνάμεων επί ενός πλωτού σώματος όταν αυτό χρησιμοποιείται για την απορρόφηση της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού, απέδειξε ότι δεσπόζοντα ρόλου σε αυτού του είδους τις εφαρμογές δεν παίζουν οι δυνάμεις άνωσης αλλά οι δρώσες επί του πλωτού σώματος υδροδυναμικές δυνάμεις. Αυτό το συμπέρασμα επιβάλει την συζευγμένη θεώρηση των υποσυστημάτων (υδραυλικό – μηχανικό –ηλεκτρικό) που συνθέτουν το συνολικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής από θαλάσσιο κυματισμό.

Επίσης η ανάλυση της κίνησης του κυλινδρικού πλωτήρα που επιλέχθηκε ως το μέσο απορρόφησης της ενέργειας από το θαλάσσιο κυματισμό, απέδειξε ότι συντονισμός με την κίνηση του προσπίπτοντος κύματος και άρα μεγιστοποίηση της ενέργειας που απορροφάται από το κύμα, επιτυγχάνεται για περίοδο κύματος T~2.3s.

#### 2.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] Johannes Falnes, "Ocean Waves and Oscillating Systems:Linear Interactions including Wave Energy Extraction", Cambridge University Press, 2002.
- [2.2] R. G. Dean, R.A. Dalrymple "Water wave mechanics for Engineers and Scientists" World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., London, 1984
- [2.3] S. K. Chakrabarti, "The theory and practice of Hydrodynamics and Vibration", Advanced Series on Ocean Engineering, Vol 20, World Scientific Publishing Co., London, 2002
- [2.4] W. E. Cummins, "The impulse response function and ship motion", Dept. of the Navy, David Taylor Model Basin, pp.101-109, 1962.
- [2.5] Z. Yu and J. Falnes, "State-space modeling of a vertical cylinder in heave" Applied Ocean Research Vol.17, Issue 5, 1995, pp. 265-275.
- [2.6] D. J. Pizer, "Maximum wave-power absorption of point absorbers under motion constrains" Applied Ocean Research, Vol. 15, Issue 4, 1993, pp. 227-234.
- [2.7] E.R. Jefferys, "Simulation of wave power devices" Applied Ocean Research, Vol 6, Issuel, 1984, pp. 31-39
- [2.8] E. Kristiansen, A. Hjulstad and O. Egeland, "State-space representation of radiation forces in time-domain vessel models" Ocean Engineering, Vol. 32, Issues 17-18, 2005, pp. 2195-2216
- [2.9] D. D. Bhatta and M. Rahman, "Wave loadings on a vertical cylinder due to heave motion", International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences, Volume 18, Issue 1, 1995, pages 151-170.
- [2.10] R. W. Yeung, "Added mass and damping of a vertical cylinder in finite-depth waters" Applied Ocean Research, Vol. 3, Issue 3, 1981, pp. 119-133.
- [2.11] J. N. Newman, "Marine Hydrodynamics", 1977 MIT Press.
- [2.12] O. M. Faltinsen, "Sea loads on ships and offshore structures", Cambridge University Press, 1998.
- [2.13] L. M. Milne-Thomson, "Theoretical Hydrodynamics", Dover Publications, New York, 1996.
- [2.14] C. M. Pournaras, N. M. Kimoulakis, A.G. Kladas and J. Tegopoulos, "Dynamic Modeling of an Experimental Power Plant from Sea Waves", Proceedings of 17th International Conference on Electrical Machines – ICEM2006, 2-5 September 2006, Chania, Greece.
- [2.15] S.A. Mavrakos, and A. Kalofonos, «Optimum Power Absorption by Arrays of Interacting Vertical Axisymmetric Wave-Energy Devices», Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 119, pp. 244–251, 1997.
- [2.16] D. E. Newland " An introduction to random vibrations, spectral and wavelet analysis" Pearson third edition
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την μετατροπή της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική, μελετήθηκαν η περίπτωση της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης, καθώς και η περίπτωση μιας ειδικού σχεδιασμού πρότυπης γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών.

#### 3.1.1. Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος ζένης διέγερσης

Ο συγκεκριμένος τύπος ηλεκτρικής μηχανής, χρησιμοποιήθηκε ως γεννήτρια, στον «Πειραματικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από θαλάσσιο κυματισμό» που κατασκευάστηκε στα πλαίσια του έργου ΠΑΒΕΤ 00ΒΕ142.

Βασικά κριτήρια της επιλογής του συγκεκριμένου είδους μηχανής ήταν η απλή κατασκευή καθώς και η αξιοπιστία αλλά και η ευελιξία στον έλεγχο του όλου συστήματος.

Η συγκεκριμένη επιλογή απαιτεί απλούστερες διατάξεις για τον έλεγχο της ροπής και της ταχύτητας, σε σχέση με άλλα είδη περιστρεφόμενων μηχανών όπως για παράδειγμα ασύγχρονες ή σύγχρονες γεννήτριες.

#### 3.1.2. Γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών

Σαν εναλλακτικό είδος γεννήτριας που προσφέρεται για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής από τον θαλάσσιο κυματισμό προτείνεται μια ειδικού σχεδιασμού γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών [3.47]-[3.49].

Βασικό πλεονέκτημα αυτού του είδους των γεννητριών είναι η απλοποίηση του απαιτούμενου μηχανικού μέρους για τη μετάδοση της κίνησης και την εκμετάλλευση της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού [3.52], [3.53].

Η ειδική γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών σχεδιάστηκε με βάση:

- τα ειδικά χαρακτηριστικά του θαλάσσιου κυματισμού.
- τα κατασκευαστικά στοιχεία του πλωτήρα που ενσωματώθηκε στην μηχανική διάταξη απορρόφησης της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού.

 τα δεδομένα από την ανάλυση της σύζευξης του υδραυλικού–μηχανικού– ηλεκτρικού υποσυστήματος που συνθέτουν την συνολική διάταξη μετατροπής της κυματικής σε ηλεκτρική ενέργεια.

# 3.1.3. Μοντέλα προσομοίωσης λειτουργίας

26

Για την μελέτη της λειτουργίας των δύο τύπων ηλεκτρικών μηχανών, αναπτύχθηκαν:

- μοντέλα ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου για την μελέτη της μεταβολής των χαρακτηριστικών του μαγνητικού κυκλώματος, υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας.
- συζευγμένα μοντέλα μαγνητικής και κυκλωματικής ανάλυσης για την δυναμική προσομοίωση της συμπεριφοράς των ηλεκτρικών μηχανών υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης

#### 3.1.3.1. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Μεγάλος αριθμός εμπορικών πακέτων λογισμικού που χρησιμοποιεί την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) είναι διαθέσιμος στην αγορά με σημαντικές δυνατότητες σε υπολογισμό και μοντελοποίηση. Η χρήση τους σε εφαρμογές μελέτης και ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, απαιτεί συχνά βαθειά γνώση της αντίστοιχης θεωρίας και εξοικείωση με περίπλοκες λεπτομέρειες των αριθμητικών μεθόδων [ 3.10].

Για να αποφευχθούν αυτά τα μειονεκτήματα, ένα μεγάλο μέρος της ερευνητικής δραστηριότητας στο πεδίο των πεπερασμένων στοιχείων δίνει έμφαση στην ανάπτυξη περιβάλλοντος λειτουργίας φιλικού προς το χρήστη και εξειδικευμένων προγραμμάτων σε συγκεκριμένες εφαρμογές.

Η τεχνική βιβλιογραφία περιλαμβάνει διάφορες προσεγγίσεις οι οποίες επικεντρώνονται σε ειδικές λειτουργίες της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, όπως την υλοποίηση εργαλείων μετεπεξεργασίας με τη βοήθεια γραφικών υπολογιστή [3.11] ή ο αντικειμενοστραφείς προγραμματισμός [3.12]. Η δισδιάστατη και τρισδιάστατη σχεδίαση εργαλείων μετεπεξεργασίας συναντάται στις αναφορές [3.13], [3.14] και [3.15], ενώ στην [3.16], ο αντικειμενοστραφής προγραμματισμός χρησιμοποιείται για την προ-επεξεργασία και επίλυση συζευγμένων προβλημάτων. Η παραμετροποίηση υφιστάμενων εμπορικών πακέτων λογισμικού ΜΠΣ υιοθετείται επίσης ως μέθοδος απλοποίησής τους για μη εξειδικευμένους χρήστες [3.17], [3.18].

Η σχεδίαση μη εμπορικών ολοκληρωμένων πακέτων λογισμικού ΜΠΣ συναντάται λιγότερο συχνά και εμπλέκει κυρίως δισδιάστατη μοντελοποίηση: στην αναφορά [3.19], αναπτύσσεται δισδιάστατο πακέτο ΜΠΣ για την επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων και προβλημάτων με δινορρεύματα, το οποίο απαιτεί αλληλεπίδραση του χρήστη κατά την εισαγωγή των γεωμετρικών δεδομένων του προβλήματος και στην αναφορά [3.20] παρουσιάζεται πακέτο ΜΠΣ, κατάλληλο για βιομηχανική χρήση, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης συζευγμένων προβλημάτων.

Η παραγωγή κατάλληλου πλέγματος για την επίλυση ενός προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μια αρκετά σύνθετη και δύσκολη διαδικασία [3.35], [3.44]. Έχουν εμφανιστεί κατά καιρούς και εξακολουθούν να γίνονται πολλές προσπάθειες για αυτοματοποίηση της διαδικασίας παραγωγής πλέγματος [3.21–3.26]. Στις αναφορές [3.27, 3.28] προτείνεται η λύση των αυτοβελτιούμενων αλγορίθμων, οι οποίοι αυτοματοποιούν τη διαδικασία πλεγματοποίησης, παράγοντας ταυτόχρονα βέλτιστο πλέγμα.

Η επίλυση των εξισώσεων του πεδίου με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ΠΣ) επιτρέπει την ανάλυση προβλημάτων χωρίς τους περιορισμούς στους οποίους

υπόκεινται οι αναλυτικές τεχνικές (απλές γεωμετρίες - γραμμικά μέσα) [3.8], [3.9]. Η λύση όμως που επιτυγχάνεται με την μέθοδο των ΠΣ δεν είναι η ακριβής αλλά μια προσεγγιστική λύση. Η διαφορά προκύπτει επειδή δεν λύνεται το συνεχές πρόβλημα που εκφράζεται από τις διαφορικές εξισώσεις αλλά κάποιο αντίστοιχο διακριτό πρόβλημα [3.7]. Έτσι δεν υπολογίζεται η άγνωστη ποσότητα (συνήθως βαθμωτό ή διανυσματικό δυναμικό) σε όλα τα σημεία του πεδίου ορισμού αλλά σε ένα αριθμό επιλεγμένων σημείων (κόμβων). Με την μέθοδο ΠΣ οι διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων με αγνώστους τις τιμές του δυναμικού στους κόμβους που επιλέχθηκαν. Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων παρέχει την προσεγγιστική λύση. Η τιμή του δυναμικού για τα υπόλοιπα σημεία του χώρου προκύπτει με την βοήθεια κατάλληλων συναρτήσεων παρεμβολής [3.43].

#### 3.1.3.1.1. Μαγνητοστατικά προβλήματα

Μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα όπου τα πεδία είναι χρονικά ανεξάρτητα. Σε αυτή την περίπτωση η ένταση του μαγνητικού πεδίου (Η) και η μαγνητική επαγωγή (B) δίνονται από τις σχέσεις (3.1), [3.2].

$$\nabla \times H = J \tag{3.1}$$
$$\nabla \cdot B = 0$$

όπου η σχέση ανάμεσα στην ένταση του μαγνητικού πεδίου (Η) και τη μαγνητική επαγωγή (B) για κάθε υλικό είναι

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\mu} \mathbf{H} \tag{3.2}$$

Εάν ένα υλικό είναι μη γραμμικό (πχ κορεσμένος σίδηρος ή μαγνήτες alnico), η διαπερατότητα  $\mu$  είναι μια συνάρτηση της μαγνητικής επαγωγής B :

$$\mu = B / H(B) \tag{3.3}$$

Με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (Π.Σ.), το πεδίο που ικανοποιεί τις προηγούμενες εξισώσεις, υπολογίζεται μέσω του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού Α. Η μαγνητική επαγωγή Β υπολογίζεται από το διανυσματικό δυναμικό με βάση τη σχέση (3.4) :

 $B = \nabla \times \mathbf{A} \tag{3.4}$ 

Οπότε προκύπτει ότι:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)}\nabla \times A\right) = J$$
 (3.5)

Για ένα γραμμικό ισοτροπικό υλικό ισχύει η σχέση:

$$-\frac{1}{\mu}\nabla^2 \mathbf{A} = \mathbf{J} \tag{3.6}$$

Στην γενική περίπτωση των τριών διαστάσεων (3-D), το διανυσματικό δυναμικό Α είναι ένα διάνυσμα τριών συνιστωσών. Στα προβλήματα δύο διαστάσεων, οι δύο από τις τρεις συνιστώσες είναι μηδέν μένοντας μόνο η συνιστώσα με διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο απεικόνισης του μαγνητικού πεδίου [3.5], [3.6]. Το πλεονέκτημα της χρήσης της εξίσωσης του διανυσματικού δυναμικού είναι ότι όλες οι συνθήκες που ικανοποιούνται έχουν συνδυαστεί σε μια μόνο εξίσωση. Εάν υπολογισθεί το Α, μπορούν στην συνέχεια να υπολογιστούν τα μεγέθη της μαγνητικής επαγωγής Β καθώς και της έντασης Η του μαγνητικού πεδίου.

#### 3.1.3.1.2. Οριακές συνθήκες

28

Για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου, με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, απαιτείται ο καθορισμός ειδικών οριακών συνθηκών, κατά μήκος συγκεκριμένων ορίων της γεωμετρίας που εξετάζεται. Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται είναι οι παρακάτω [3.34]:

<u>Dirichlet</u>. Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, η τιμή του Α είναι σαφώς καθορισμένη πάνω στο όριο, πχ A=0. Η πιο κοινή χρήση της οριακής συνθήκης Dirichlet είναι να καθορίσει A=0 κατά μήκος ενός ορίου εμποδίζοντας τη ροή να περάσει το όριο.

<u>Neumann</u>. Αυτή η οριακή συνθήκη καθορίζει τη φυσική παράγωγο του Α κατά μήκος του ορίου. Συνήθως,  $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$  ορίζεται κατά μήκος ενός ορίου για να εμποδίσει τη ροή να περάσει το όριο σε γωνία 90°.

**<u>Robin</u>**. Αυτό το είδος οριακής συνθήκης είναι ένα μείγμα ανάμεσα στην οριακή συνθήκη Dirichlet και στην οριακή συνθήκη Neumann, ορίζοντας μια σχέση ανάμεσα στην τιμή του Α και στις φυσικές παραγώγους του ορίου. Ένα παράδειγμα αυτής της οριακής συνθήκης είναι :

$$\frac{\partial A}{\partial n} + cA = 0$$

Αυτή η οριακή συνθήκη χρησιμοποιείται συχνά σε προβλήματα με ρεύματα αυτεπαγωγής (δινορρεύματα).

# 3.2 ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΞΕΝΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

Οι εξισώσεις με τις οποίες εκφράζεται η λειτουργία των μηχανών συνεχούς ρεύματος είναι οι παρακάτω [3.1], [3.2]:

$$\begin{bmatrix} u_f \\ u_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_f + pL_{FF} & 0 \\ \omega_r L_{AF} & r_a + pL_{AA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_a \end{bmatrix}$$
(3.7)

όπου  $L_{FF}$  και  $L_{AA}$  είναι οι αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα και  $r_f$  και  $r_a$  οι ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα. Η ταχύτητα του δρομέα συμβολίζεται με το ωr και η αμοιβαία αυτεπαγωγή μεταξύ των πηνίων του στάτη και του δρομέα συμβολίζεται με το LAF. Με p συμβολίζεται ο παράγοντας d/dt.

Στις εξισώσεις (3.7) εμφανίζεται ο παράγοντας  $L_{AF}$  i<sub>f</sub>. Στην μελέτη των ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς ρεύματος, συνηθίζεται να χρησιμοποιείται η μεταβλητή  $k_u=L_{AF}$  i<sub>f</sub> [3.2].

Η ροπή της ηλεκτρικής μηχανής συνεχούς ρεύματος δίνεται από την σχέση: $T_e = L_{AF} i_f i_a = k_u i_a \tag{3.8}$ 

Η ροπή με την ταχύτητα της μηχανής συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \omega_r + T_L \tag{3.9}$$

όπου J είναι η ροπή αδράνειας του δρομέα με μονάδες kgm<sup>2</sup>. Η ροπή φορτίου θεωρείται θετική όταν εφαρμόζεται στον άξονα του δρομέα της μηχανής. Η σταθερά  $B_m$  εκφράζει ένα συντελεστή απόσβεσης που σχετίζεται με το μηχανικό περιστρεφόμενο σύστημα της μηχανής, έχει μονάδες Nms και συνήθως θεωρείται αμελητέος καθώς έχει πολύ χαμηλή τιμή.

Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται με αυτό του τυμπάνου, διαμορφώνονται και οι τύποι των μηχανών συνεχούς ρεύματος, όπως η γεννήτρια ξένης διέγερσης και οι μηχανές παράλληλης διέγερσης, διέγερσης σειράς και σύνθετης διέγερσης.

<u>Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης</u>, έχουμε στην περίπτωση όπου η τάση που εφαρμόζεται στο τύλιγμα διέγερσης είναι ανεξάρτητη από αυτή του τυλίγματος του δρομέα.

Οι εξισώσεις που ισχύουν για τη μόνιμη κατάσταση της μηχανής είναι:

$$V_f = R_f I_f$$

$$V_a = r_a I_a + \omega_r L_{AF} I_f$$
(3.10)

ópou  $R_f$  =  $r_{fx}$  +  $r_f\,$  me  $r_{fx}$  thn antistash tou roostáth rúbmish tou reúmatoz diégershz kai  $r_f\,$  thn antistash tou tuligmatoz dégershz.

Από τις εξισώσεις (3.10) φαίνεται ότι για σταθερό ρεύμα διέγερσης και σταθερή ταχύτητα περιστροφής η οποία εξασφαλίζεται από την κινητήρια μηχανή, η τάση εξόδου Va της γεννήτριας μειώνεται καθώς το ρεύμα Ia αυξάνει (το ρεύμα Ia θεωρείται αρνητικό στην περίπτωση της γεννήτριας).

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την λειτουργία της γεννήτριας ξένης προκύπτουν από τις γενικές σχέσεις που φαίνονται στην εξίσωση (3.7). Εάν σαν αντίσταση του τυλίγματος διέγερσης χρησιμοποιήσουμε την  $R_f = r_{fx} + r_f$ , και κάνουμε και την αντικατάσταση  $k_u = L_{AF} i_f$ , τότε προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις (3.11) έως (3.13):

$$u_f = \frac{R_f}{L_{AF}} (k_u + \tau_f p k_u) \tag{3.11}$$

$$u_a = k_u \omega_r + r_a i_a + r_a \tau_a p i_a \tag{3.12}$$

$$T_e = k_u i_a \tag{3.13}$$

ópou  $\tau_f = L_{FF}/R_f$  kai  $\tau_a = L_{AA}/r_a$  είναι οι σταθερές χρόνου του τυλίγματος διέγερσης και του τυλίγματος του δρομέα αντίστοιχα και με p συμβολίζεται ο παράγοντας d/dt.

Λύνοντας την εξίσωση (3.11) ως προς  $k_u$  προκύπτει:

$$k_u = \frac{L_{AF} / R_f}{\tau_f p + 1} u_f \tag{3.14}$$

Επίσης ο παράγοντας  $k_u \omega_r$  αντιστοιχεί στην ΗΕΔ που αναπτύσσεται στον δρομέα της γεννήτριας, οπότε ισχύουν οι σχέσεις (3.15) και (3.16).

$$E_a = k_u \omega_r \tag{3.15}$$

$$u_{ra} = r_a i_a \tag{3.16}$$

όπου  $u_{ra}$ είναι η πτώση τάσης που εμφανίζεται στα άκρα της αντίστασης  $r_a$ του τυλίγματος του δρομέα.

Η σχέση (3.12) μπορεί με την βοήθεια των (3.15) και (3.16) να γραφεί:

$$u_a = E_a + u_{ra} + r_a \tau_a p i_a \tag{3.17}$$

#### 3.2.2. Μελέτη μαγνητικού πεδίου γεννήτριας Συνεχούς Ρεύματος ξένης διέγερσης.

Για την πεδιακή ανάλυση της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος, αναπτύχθηκε μοντέλο προσομοίωσης του μαγνητικού πεδίου, με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων [3.34]. Η ορθότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης επιβεβαιώθηκε με σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες θεωρητικά αναμενόμενες κατανομές του μαγνητικού πεδίου [3.1], [3.58], για την περίπτωση γεννήτριας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης, τα τεχνικά χαρακτηριστικά της οποίας φαίνονται στον Πίνακα 3.1.

Τεχνικό χαρακτηριστικό	Τιμή
Ισχύς	100kW
Τάση τυμπάνου	380V
Ρεύμα τυμπάνου	290A
Τάση διέγερσης	220V
Ταχύτητα περιστροφής	1400r/min (n=23,3 rad/s)
Διάκενο κύριου πόλου/δρομέα	4mm
Διάμετρος δρομέα	0,40m
Μήκος δρομέα	0,17m
Ενεργό μήκος μηχανής	0,9x0,17=0,153m
Βήμα συλλέκτη	71
Αριθμός τομέων συλλέκτη	144
Αριθμός αυλακιών στο δρομέα	48
Αριθμός πηνίων δρομέα	144 πηνία μιας σπείρας
Αριθμός πόλων	4
Εύρος πέλματος κύριου πόλου	0,210m
Πλάτος κορμού κύριου πόλου	0,125m
Εύρος πέλματος βοηθητικού πόλου	45mm
Διάκενο δρομέα/βοηθητικού πόλου	7mm
Σπείρες πηνίου βοηθητικού πόλου	28

Πίνακας 3.1:Κατασκευαστικά στοιχεία γεννήτριας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης

Το είδος του τυλίγματος που χρησιμοποιείται στον δρομέα, είναι απλό κυματοτύλιγμα με δύο παράλληλους κλάδους. Το ρεύμα ανά κλάδο είναι  $I_a=290/2=145A$ . Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται για τα τυλίγματα του δρομέα είναι μπάρες χαλκού διατομής  $25mm^2$ .

Το πηνίο του κύριου πόλου έχει 2210 σπείρες, διαρρέεται από ρεύμα 2,4A και οι σπείρες του είναι κατασκευασμένες από χάλκινες ταινίες διατομής 2,5x45mm.

Για την λειτουργία του μοντέλου, απαιτείται η δημιουργία πλέγματος τριγώνων σε όλη την σχεδιασμένη γεωμετρία της υπό μελέτη μηχανής Σ.Ρ. Η πλεγματοποίηση της γεωμετρίας έγινε με την χρήση του λογισμικού "Triangle: A Two-Dimensional Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator" [3.32], [3.33], [3.35], [3.36].

Πρέπει να επισημανθεί ότι με την εφαρμογή κατάλληλων οριακών συνθηκών και με βάση τις υπάρχουσες γεωμετρικές συμμετρίες, αρκεί η σχεδίαση του ενός τετάρτου της συνολικής γεωμετρίας γεννήτριας για την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου της.

Η γεωμετρία που σχεδιάστηκε, με το πλέγμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση φαίνεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Γεωμετρία και πλέγμα, για την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

# 3.2.2.2. Πεδίο διέγερσης

Αρχικά μελετήθηκε το μαγνητικό πεδίο της μηχανής όπως αυτό δημιουργείται από τη διέγερση χωρίς την ύπαρξη φορτίου.

Εάν θεωρούσαμε το δρομέα ως λεία επιφάνεια, τότε η γραφική παράσταση της μαγνητικής επαγωγής θα είχε την μορφή που φαίνεται στο σχήμα 3.2 [3.1].



Σχήμα 3.2: Μαγνητική επαγωγή στο διάκενο, μόνο εξαιτίας της διέγερσης για λείο δρομέα

32

Στην πραγματικότητα όμως τα αυλάκια και οι οδοντώσεις του δρομέα επηρεάζουν και την μορφή της γραφικής παράστασης της μαγνητικής επαγωγής B. Οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου φαίνονται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Μαγνητικές γραμμές από το πεδίο διέγερσης χωρίς φορτίο

Από το σχήμα 3.3, παρατηρούμε ότι το σύνολο των μαγνητικών γραμμών διέρχεται από τον κύριο πόλο και περνά στο δρομέα της μηχανής. Το μαγνητικό κύκλωμα κλείνει μέσω των άλλων κύριων πόλων που βρίσκονται εκατέρωθεν του πόλου που έχει σχεδιαστεί.

Το πεδίο διέγερσης δημιουργείται από το πηνίο με 2210 σπείρες το οποίο διαρρέεται από ρεύμα 2,4 Α. Είναι δηλαδή 2,4x2210=5,3kA-t/pole.

Στα σχήματα 3.4 και 3.5 φαίνονται το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής σε ένα πόλο όταν στην μηχανή υπάρχει μόνο το πεδίο διέγερσης.



Σχήμα 3.4: Μέτρο μαγνητικής επαγωγής



Σχήμα 3.5: Μέτρο μαγνητικής επαγωγής

Από τα σχήματα 3.4 και 3.5 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η μαγνητική επαγωγή στην έκταση ενός πολικού βήματος έχει «τραπεζοειδή μορφή».
- Η κυμάτωση που παρουσιάζει η γραφική παράσταση της μαγνητικής επαγωγής **B**, οφείλεται στην διαδοχή οδόντων – αυλακώσεων, στον δρομέα της γεννήτριας Συνεχούς Ρεύματος.

## 3.2.2.3. Αντίδραση δρομέα

Στην περίπτωση που υπάρχει φορτίο στη γεννήτρια, ο δρομέας της διαρρέεται από ρεύμα, και επιπλέον του μαγνητικού πεδίου της διέγερσης θα εμφανιστεί και αυτό που δημιουργούν οι αγωγοί του τυλίγματος του δρομέα.

Εάν θεωρούσαμε το δρομέα ως λεία επιφάνεια με ομοιόμορφα κατανεμημένη την πυκνότητα ρεύματος στην επιφάνειά του, τότε η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο η οποία θα προέρχονταν μόνο από τον δρομέα, θα είχε την μορφή του σχήματος 3.6.



Σχήμα 3.6: Μαγνητική επαγωγή στο διάκενο εξαιτίας λείου δρομέα

34

Μπορούμε να παρατηρήσουμε τη μορφή του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ο δρομέας, αν μηδενίσουμε το πεδίο διέγερσης και θεωρήσουμε ότι ο δρομέας της γεννήτριας διαρρέεται από ρεύμα. Αυτή είναι μια κατάσταση που δεν μπορεί να υπάρξει στην πραγματικότητα, αλλά καταχρηστικά την υλοποιούμε για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η έννοια «αντίδραση του δρομέα». Η κατάσταση αυτή απεικονίζεται στο σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Μαγνητικές γραμμές του πεδίου που δημιουργεί το ρεύμα του δρομέα

Η μορφή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο εξαιτίας μόνο της αντίδρασης του δρομέα έχει την μορφή που φαίνεται στο σχήμα 3.8:



Σχήμα 3.8: Μαγνητική επαγωγή Β, του πεδίου που θα δημιουργούσε το ρεύμα στα αυλάκια του δρομέα σε απουσία του πεδίου διέγερσης.

#### 3.2.2.4. Μαγνητικό πεδίο γεννήτριας σε κανονική λειτουργία

Το μαγνητικό πεδίο το οποίο εγκαθίσταται στην κανονική υπό φορτίο λειτουργία της μηχανής, προκύπτει με υπέρθεση των δύο επιμέρους πεδίων που δημιουργούν η διέγερση και τα τυλίγματα του δρομέα αντίστοιχα.

- Παρατηρώντας προσεκτικά τα δύο επιμέρους πεδία, αναμένουμε ότι η υπέρθεσή τους θα δημιουργήσει ένα συνιστάμενο πεδίο το οποίο θα εμφανίζεται ενισχυμένο στη μια άκρη του κύριου πόλου και αντίστοιχα εξασθενημένο στην άλλη άκρη.
- Η πλευρά του κύριου πόλου που θα εμφανιστεί ενισχυμένη εξαρτάται από τη φορά του ρεύματος στο δρομέα, καθώς και από το αν ο κύριος πόλος είναι Βόρειος ή Νότιος.

Εάν θεωρούσαμε το δρομέα ως λεία επιφάνεια με ομοιόμορφα κατανεμημένη την πυκνότητα ρεύματος στην επιφάνειά ου και θεωρώντας επίσης ότι η κινητήρια μηχανή επιβάλλει δεξιόστροφη φορά περιστροφής, τότε η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο η οποία θα προέρχονταν μόνο από τον δρομέα και το πεδίο διέγερσης θα είχε την μορφή του σχήματος 3.9.



Σχήμα 3.9: Μαγνητικό πεδίο γεννήτριας σε κανονική λειτουργία για λείο δρομέα

Στην προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου που έγινε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, απεικονίστηκε ένας κύριος πόλος, ο οποίος με βάση την φορά του ρεύματος που θεωρήθηκε για τα πηνία διέγερσης είναι νότιος. Με βάση αυτή την παρατήρηση, προκύπτει ότι το ρεύμα στα αυλάκια του δρομέα, εξέρχεται από την σελίδα. Οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου που διαμορφώνεται ως υπέρθεση αυτών του δρομέα και του στάτη, φαίνονται στο σχήμα 3.10.



36

**Σχήμα 3.10:** Συνιστάμενο πεδίο από την δράση του πεδίου διέγερσης και της αντίδρασης του δρομέα.

Από το σχήμα 3.10, παρατηρούμε ότι υπάρχει παραμόρφωση του συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου, με αποτέλεσμα αυτό να εμφανίζεται ενισχυμένο στο δεξί άκρο του κύριου πόλου και ασθενέστερο στο αριστερό άκρο.

Η κάθετη συνιστώσα καθώς και το μέτρο της μαγνητικής επαγωγή στο διάκενο σαν αποτέλεσμα της δράσης του πεδίου διέγερσης και της αντίδρασης του δρομέα, έχει την μορφή των σχημάτων 3.11 και 3.12 αντίστοιχα.



**Σχήμα 3.11:** Κάθετη συνιστώσα  $B_n$  της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο σαν αποτέλεσμα της δράσης του πεδίου διέγερσης και της αντίδρασης του δρομέα



Σχήμα 3.12: Μέτρο της μαγνητικής επαγωγής Β στο διάκενο σαν αποτέλεσμα της δράσης του πεδίου διέγερσης και της αντίδρασης του δρομέα

Η παραμόρφωση που παρουσιάζεται στο μαγνητικό πεδίο της γεννήτριας, μεταφράζεται ως μετατόπιση της ουδέτερης ζώνης προς την κατεύθυνση της φοράς περιστροφής. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι να εμφανίζονται σπινθηρισμοί στις ψήκτρες, καθώς οι τομείς του συλλέκτη που στιγμιαία βραχυκυκλώνονται εμφανίζουν μεταξύ τους μεγάλη διαφορά δυναμικού.

Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται είτε με περιστροφή του ψηκτροφορέα προς το μέρος της παραμόρφωσης, έτσι ώστε οι ψήκτρες να έρθουν στην θέση της νέας ουδέτερης ζώνης, είτε με διόρθωση του μετατοπισμένου πεδίου χρησιμοποιώντας βοηθητικούς πόλους. Τα πηνία των βοηθητικών πόλων διαρρέονται από το ρεύμα του δρομέα.

Στο σχήμα 3.13 φαίνονται οι μαγνητικές γραμμές του συνιστάμενου πεδίου όταν είναι ενεργοποιημένοι οι βοηθητικοί πόλοι και στο σχήμα 3.14 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής Β.



Σχήμα 3.13: Μαγνητικές γραμμές του πεδίου όταν επενεργεί και ο βοηθητικός πόλος.





Μελετώντας την γραφική παράσταση του σχήματος 3.14 με τους βοηθητικούς πόλους ενεργοποιημένους, σε σχέση με αυτή του σχήματος 3.11 όπου δεν υπάρχει συμβολή βοηθητικών πόλων στο συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο, γίνεται φανερό ότι οι βοηθητικοί πόλοι δρουν αντισταθμιστικά στην παραμόρφωση του πεδίου που προκαλείται από την περιστροφή του δρομέα.

# 3.2.3. Προσομοίωση δυναμικής λειτουργίας γεννήτριας συνεχούς ρεύματος

Για την μελέτη της συμπεριφοράς της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης,, αναπτύχθηκε ειδικό μοντέλο δυναμικής προσομοίωσης της λειτουργίας της [3.4], [3.46]. Η καταλληλότητα του μοντέλου επιβεβαιώθηκε για την περίπτωση γεννήτριας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης τα χαρακτηριστικά της οποίας φαίνονται στον Πίνακα 3.2.

Παράμετρος	Τιμή
Ον. Ισχύς	$P_{\rm N} = 1492 {\rm W} (2 {\rm HP})$
Ον. Τάση τυμπάνου	$U_{AN} = 125V$
Ον. Ρεύμα τυμπάνου	$I_{AN} = 12A$
Ον. Ταχύτητα περιστροφής	$n_N = 1750 \text{ rpm} (183,25 \text{ rad/s})$
Ρεύμα διέγερσης	$I_{FN} = 0,7 A$
Αντίσταση τυλίγματος δρομέα	$R_a=0,5 \Omega$
Αντίσταση τυλίγματος διέγερσης	$R_{ff} = 167 \text{ Ohm}$
Αυτεπαγωγή διέγερσης	$L_{FF} = 30 \text{ H}$
Αυτεπαγωγή τυλίγματος δρομέα	L <sub>AA</sub> =0,018 H
Αυτεπαγωγή τυλίγματος διέγερσης	L <sub>ff</sub> =90 H
Αμοιβαία αυτεπαγωγή στάτη-δρομέα	L <sub>AF</sub> =1,03 H
Ροπή αδράνειας	J=0,3 Kgm <sup>2</sup>

Πίνακας 3.2:Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννήτριας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης για προσομοίωση δυναμικής συμπεριφοράς λειτουργίας. Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, η προσομοίωση της λειτουργίας της μηχανής γίνεται έχοντας ως δεδομένη και σταθερή τη μηχανική ροπή T<sub>m</sub> που εφαρμόζεται στον άξονα της γεννήτριας από την κινητήρια μηχανή [3.59].

Μέσω της επιλογής μιας μεταβλητής ελέγχου, το μοντέλο παρέχει την δυνατότητα προσομοίωσης της λειτουργίας υπό φορτίο, της λειτουργίας για απότομη μεταβολή του φορτίου και της συμπεριφοράς της γεννήτριας στην περίπτωση βραχυκύκλωσης των ακροδεκτών εξόδου της.

Για την εγκατάσταση του πεδίου διέγερσης της γεννήτριας, το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται με τάση  $U_f$ =140V, ενώ η αντίσταση του ροοστάτη εκκίνησης ρυθμίζεται στην τιμή  $R_{\rm rh}$ =80Ω.

Εποπτικό διάγραμμα του δυναμικού μοντέλου που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της λειτουργίας της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης, παρουσιάζεται στο σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15: Διάγραμμα μοντέλου δυναμικής προσομοίωσης της λειτουργίας της γεννήτριας Συνεχούς Ρεύματος ξένης διέγερσης για διάφορες συνθήκες φόρτισης.

#### 3.2.3.2. Μελέτη συμπεριφοράς για λειτουργία υπό φορτίο

Από την μελέτη της προσομοίωσης της λειτουργίας της γεννήτριας υπό φορτίο, προέκυψαν οι γραφικές παραστάσεις των σχημάτων 3.16 και 3.17 που αφορούν τις χρονικές μεταβολές του ρεύματος διέγερσης  $I_t(A)$ , της ηλεκτρεγερτικής δύναμης  $E_a(V)$ , της τάσης ακροδεκτών  $V_a(V)$ , του ρεύματος τυμπάνου  $I_a(A)$ , της ηλεκτρομαγνητικής ροπής  $T_e(Nm)$  και της ταχύτητας περιστροφής w(rad/s).



Σχήμα 3.16: Προσομοίωση της χρονικής μεταβολής των μεγεθών I<sub>f</sub>, E<sub>a</sub> και V<sub>a</sub> για λειτουργία της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος υπό φορτίο.



χρόνος [S]

**Σχήμα 3.17:** Προσομοίωση της χρονικής μεταβολής των μεγεθών  $I_a$ ,  $T_e$  και w για λειτουργία της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος υπό φορτίο.

Από τα σχήματα 3.16 και 3.17 προκύπτουν τα ακόλουθα:

Για τάση τροφοδότησης του τυλίγματος διέγερσης με U<sub>f</sub>= 240V και θεωρώντας R<sub>f</sub> = R<sub>ff</sub>+R<sub>rh</sub>=120+80=200Ω, από την ανάλυση στην μόνιμη

κατάσταση προκύπτει ότι το ρεύμα διέγερσης θα είναι  $I_i=0,7A$ , γεγονός το οποίο επαληθεύεται και από την γραφική παράσταση του If.

Η εξίσωση που περιγράφει το κύκλωμα διέγερσης είναι [3.1]:

$$U_{f} = i_{f}(R_{f} + pL_{ff}) \Rightarrow i_{f} = \frac{U_{f}}{R_{f}} \frac{1}{(\frac{L_{ff}}{R_{f}}p + 1)} \Rightarrow i_{f}(s) = \frac{U_{f}}{R_{f}} \frac{1}{(\frac{L_{ff}}{R_{f}}s + 1)} \Rightarrow i_{f}(t) = \frac{U_{f}}{R_{f}} (1 - e^{-\frac{1}{\tau_{f}}})$$
(3.18)

όπου τ<sub>f</sub>=  $L_{\rm ff}/R_{\rm f} = 90/200=0,45$  η σταθερά χρόνου του κυκλώματος διέγερσης. Από τη σχέση (3.18) παρατηρούμε ότι το ρεύμα διέγερσης μεταβάλλεται εκθετικά με ρυθμό  $1/\tau_{\rm f}=1/0,45=2.22$  sec. Ο χρόνος αυτός επαληθεύεται και από την καμπύλη του ρεύματος διέγερσης.

- Η ΗΕΔ Ε<sub>a</sub>, η τάση εξόδου V<sub>a</sub>, η ροπή Τ<sub>e</sub> και οι στροφές w αυξάνονται μέχρι να αποκτήσουν τις τιμές μόνιμης κατάστασης.
- Η ταχύτητα αύξησης των μεγεθών E<sub>a</sub>(V), V<sub>a</sub>(V), I<sub>a</sub>(A), T<sub>e</sub>(Nm) και w(rad/sec), εξαρτάται από τη σταθερά χρόνου τ<sub>a</sub>=L<sub>AA</sub>/R<sub>a</sub>=0,018/0,5=0,036 sec του κυκλώματος του δρομέα, τη σταθερά χρόνου τ<sub>f</sub>= L<sub>ff</sub>/R<sub>f</sub> = 90/200=0,45 του κυκλώματος διέγερσης αλλά και τη μηχανική σταθερά χρόνου τ<sub>m</sub>=Jr<sub>a</sub>/K<sub>f</sub><sup>2</sup>=3\*(0,5)/(L<sub>ff</sub>i<sub>f</sub>)=0,15/(1,03x0,7)<sup>2</sup>=0,289.

#### 3.2.3.3. Προσομοίωση συμπεριφοράς λειτουργίας γεννήτριας σε απότομη αλλαγή φορτίου

Από την μελέτη της προσομοίωσης της λειτουργίας της γεννήτριας σε απότομη αλλαγή φορτίου από τιμή  $R_{L1}$  σε τιμή  $2R_{L1}$ , προέκυψαν οι γραφικές παραστάσεις των σχημάτων 3.18 και 3.19 που αφορούν τις χρονικές μεταβολές του ρεύματος διέγερσης  $I_f(A)$ , της ηλεκτρεγερτικής δύναμης  $E_a(V)$ , της τάσης ακροδεκτών  $V_a(V)$ , του ρεύματος τυμπάνου  $I_a(A)$ , της ηλεκτρομαγνητικής ροπής  $T_e(Nm)$  και της ταχύτητας περιστροφής w(rad/s). Η απότομη αλλαγή του φορτίου γίνεται στην χρονική στιγμή 55s μετά την έναρξη της προσομοίωσης, όταν δηλαδή η μηχανή βρεθεί σε μόνιμη κατάσταση. Από τα σχήματα 3.18 και 3.19 προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Για τάση τροφοδότησης του τυλίγματος διέγερσης με 240V και θεωρώντας R<sub>f</sub>=R<sub>ff</sub>+R<sub>rh</sub>=120+80=200Ω, από την ανάλυση στη μόνιμη κατάσταση προκύπτει ότι το ρεύμα διέγερσης θα είναι I<sub>f</sub>=0,7A.
- Ακριβώς τη στιγμή της απότομης μεταβολής του φορτίου παρατηρείται κατακόρυφη μείωση του ρεύματος I<sub>a</sub> και της ροπής T<sub>e</sub>.
- Στην τάση V<sub>a</sub> παρατηρείται στιγμιαία υπέρταση ακριβώς τη στιγμή της μεταβολής του φορτίου, η οποία οφείλεται στην αντίδραση του τυλίγματος του δρομέα, λόγω του επαγωγικού του χαρακτήρα.
- Το συνολικό φορτίο της γεννήτριας αυξάνεται από R<sub>L1</sub> σε 2R<sub>L1</sub> με συνέπεια το ρεύμα I<sub>a</sub> να μειώνεται
- Η μείωση του ρεύματος Ι<sub>a</sub> προκαλεί ανάλογη μείωση της Τ<sub>e</sub>, οπότε δικαιολογείται η αύξηση των στροφών της μηχανής που παρατηρείται στην γραφική παράσταση του w.

42

#### **ΚΕΦ.3** ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ



**Σχήμα 3.18:** Προσομοίωση της χρονικής μεταβολής των μεγεθών  $I_f$ ,  $E_a$  και  $V_a$  στην περίπτωση απότομης μεταβολής του φορτίου της γεννήτριας.



**Σχήμα 3.19:** Προσομοίωση της χρονικής μεταβολής των μεγεθών  $I_a$ ,  $T_e$  και w στην περίπτωση απότομης μεταβολής του φορτίου της γεννήτριας.

#### 3.2.3.4. Προσομοίωση συμπεριφοράς για βραχυκύκλωση της εξόδου της γεννήτριας

Από την μελέτη της προσομοίωσης της λειτουργίας για βραχυκύκλωση των ακροδεκτών εξόδου της γεννήτριας, προέκυψαν οι γραφικές παραστάσεις των σχημάτων 3.20 και 3.21 που αφορούν τις χρονικές μεταβολές του ρεύματος διέγερσης  $I_f(A)$ , της ηλεκτρεγερτικής δύναμης  $E_a(V)$ , της τάσης ακροδεκτών  $V_a(V)$ , του ρεύματος τυμπάνου  $I_a(A)$ , της ηλεκτρομαγνητικής ροπής  $T_e(Nm)$  και της ταχύτητας περιστροφής w(rad/s).



Σχήμα 3.20: Χρονική μεταβολή των μεγεθών Ι<sub>f</sub>, E<sub>a</sub> και V<sub>a</sub> για προσομοίωση της κατάστασης βραχυκύκλωσης των ακροδεκτών εξόδου της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος.



**Σχήμα 3.21:** Χρονική μεταβολή των μεγεθών I<sub>a</sub>, T<sub>e</sub> και w για προσομοίωση της κατάστασης βραχυκύκλωσης των ακροδεκτών εξόδου της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος.

Από τα σχήματα 3.20 και 3.21 και με δεδομένο ότι η μηχανική ροπή  $T_m$  και το ρεύμα διέγερσης  $I_f$  παραμένουν σταθερά ενώ η βραχυκύκλωση έγινε στη χρονική στιγμή 55sec με την μηχανή να βρίσκεται σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, προκύπτουν τα ακόλουθα:

 Η τάση εξόδου V<sub>a</sub> μειώνεται κατακόρυφα και μηδενίζεται όπως ήταν αναμενόμενο.

46

- Το ρεύμα Ι<sub>a</sub> αυξάνεται κατακόρυφα πλησιάζοντας την τιμή των 180Α και στην συνέχεια μειώνεται αλλά δεν μηδενίζεται. Αποτέλεσμα της αύξησης του ρεύματος Ι<sub>a</sub> είναι η επίσης κατακόρυφη στιγμιαία αύξηση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής T<sub>e</sub>.
- Οι στροφές της μηχανής μειώνονται κατακόρυφα εξαιτίας της απότομης αύξησης της Τ<sub>e</sub>. Οι ελάχιστες στροφές που εντέλει καταφέρνει να συντηρήσει η εξωτερικά εφαρμοζόμενη σταθερή T<sub>m</sub> στην γεννήτρια σε συνδυασμό με την ύπαρξη του σταθερού και ανεπηρέαστου I<sub>f</sub>, έχουν σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη ΗΕΔ E<sub>a</sub> η οποία στο κύκλωμα που περιλαμβάνει μόνο την αντίσταση του τυλίγματος δρομέα R<sub>a</sub>, δημιουργεί ένα ρεύμα I<sub>a</sub>. Έτσι δικαιολογείται και το γεγονός ότι παρόλο τον μηδενισμό του V<sub>a</sub> το ρεύμα I<sub>a</sub> και η ροπή T<sub>e</sub> δεν μηδενίζονται.

Για την πληρέστερη απόδοση της εικόνας της μεταβατικής λειτουργίας της μηχανής κατά την βραχυκύκλωση της τάσης εξόδου  $V_a$ , αναπτύχθηκε και ένα δεύτερο μοντέλο προσομοίωσης της κατάστασης βραχυκύκλωσης των ακροδεκτών εξόδου της γεννήτριας. Στο νέο αυτό μοντέλο διατηρήθηκε σταθερή η ταχύτητα περιστροφής που εφαρμόζεται από την κινητήρια μηχανή στην γεννήτρια.

Εποπτικό διάγραμμα του νέου δυναμικού μοντέλου που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της δοκιμής βραχυκύκλωσης της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης, παρουσιάζεται στο σχήμα 3.22.



Σχήμα 3.22: Μοντέλο δυναμικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος υπό συνθήκες βραχυκύκλωσης των ακροδεκτών εξόδου, για σταθερή εξωτερικά εφαρμοζόμενη ταχύτητα περιστροφής w.

**48** 

Από το σχήμα 3.23 προκύπτει ότι τη χρονική στιγμή της βραχυκύκλωσης μηδενίζεται η τάση εξόδου  $V_a$  της γεννήτριας ενώ ταυτόχρονα υπάρχει κατακόρυφη αύξηση του ρεύματος  $I_a$  αλλά και της ροπής  $T_e$ . Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η HEΔ  $E_a$  παραμένει ανεπηρέαστη καθώς οι στροφές της μηχανής είναι σταθερές και επίσης το ρεύμα διέγερσης  $I_f$  παραμένει σταθερό καθώς πρόκειται για μηχανή ξένης διέγερσης.



**Σχήμα 3.23:** Χρονική μεταβολή των μεγεθών  $I_f$ ,  $E_a$ ,  $V_a$ ,  $I_a$  και  $T_e$  για προσομοίωση της κατάστασης βραχυκύκλωσης των ακροδεκτών εξόδου της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος, υπό σταθερή εξωτερικά εφαρμοζόμενη ταχύτητα περιστροφής w.

# 3.3 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

Σε μια γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών, ο δρομέας της μηχανής κινείται ή παλινδρομεί σε ευθεία διεύθυνση. η σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τον στάτη, επάγει στα τυλίγματα του στάτη ηλεκτρεγερτική δύναμη, τα χαρακτηριστικά της οποίας εξαρτώνται από την διαμόρφωση των μαγνητών, των αυλακώσεων του στάτη, της περιέλιξης των πηνίων του στάτη, την διαμόρφωση του διακένου και από την σχετική ταχύτητα μεταξύ δρομέα και στάτη [3.37], [3.52], [3.54].

## 3.3.1. Σχεδίαση πρότυπης γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών

Σχεδιάστηκε ειδική τετράπλευρη γραμμική μηχανή μονίμων μαγνητών. Ο δρομέας της μηχανής είναι κατασκευασμένος από κοιλοδοκό τετραγωνικής διατομής, σε κάθε πλευρά του οποίου στηρίζονται μόνιμοι μαγνήτες οι οποίοι δημιουργούν το απαραίτητο μαγνητικό πεδίο για τη διέγερση των τυλιγμάτων του στάτη [3.53], [3.54].

Ο στάτης της μηχανής είναι κατασκευασμένος από ελασματοποιημένο σιδηρομαγνητικό υλικό για την αποφυγή ανάπτυξης διννορευμάτων. Στον στάτη υπάρχουν αύλακες για την τοποθέτηση τριφασικού τυλίγματος κυματοειδούς περιέλιξης.

Η δομή της ειδικής γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών που σχεδιάστηκε, παρουσιάζεται στο σχέδιο του σχήματος 3.24.



Σχήμα 3.24: Δομή πρότυπης τετράπλευρης γραμμικής μηχανής μονίμων μαγνητών

Με βάση την ανάλυση του υδραυλικού συστήματος της διάταξης ηλεκτροπαραγωγής από τον θαλάσσιο κυματισμό, προκύπτει ότι για ημιτονοειδές κύμα με γωνιακή ταχύτητα ω=2,8rad/s, η κίνηση του πλωτήρα συντονίζεται με αυτήν της ελεύθερης επιφάνειας του θαλάσσιου κυματισμού. Υπό αυτές τις συνθήκες συντονισμού επιτυγχάνεται και η μέγιστη μετάδοση ενέργειας από το θαλάσσιο κυματισμό προς το σύστημα μετατροπής της ενέργειας.

Συνεπώς ο σχεδιασμός της ειδικής γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών, γίνεται έχοντας ως αναφορά τη γωνιακή ταχύτητα ω=2,8rad/s η οποία για την περίπτωση κύματος ύψους  $h_w$ =1m αντιστοιχεί σε γραμμική ταχύτητα u= 0.9m/sec.

Η ονομαστική ισχύς της γραμμικής γεννήτριας που σχεδιάστηκε είναι 16kW με ενεργό τιμή φασικής τάσης  $V_{\rm rms}$ =188 Volt και συχνότητα f=10Hz.

#### 3.3.1.2. Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης γεννήτριας

Η διαστασιολόγηση της γεννήτριας γίνεται ελέγχοντας τις τιμές βασικών μαγνητικών, ηλεκτρικών και θερμικών μεγεθών [3.39], [3.3]. Ειδικότερα είναι:

<u>Ειδική μαγνητική φόρτιση</u> B που συνδέει τον αριθμό των πόλων p με τη ροή ανά πόλο Φ και την επιφάνεια του διακένου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\overline{B} = \frac{p * \Phi i}{A} \tag{3.19}$$

όπου Α η η συνολική επιφάνεια του διακένου.

Τυπικές τιμές αυτής της παραμέτρου είναι 0,5 T  $\div$  0,6T, οι οποίες περιορίζονται από το φαινόμενο του κορεσμού και τις σκεδάσεις οδόντων [3.38].

<u>Ειδική ηλεκτρική φόρτιση</u> ac προσδιορίζεται από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας του διακένου, από τη σχέση (3.20):  $ac = \frac{3*2*N_s*I}{A}$ (3.20)

όπου  $N_s$ ο συνολικός αριθμός ελιγμάτων ανά φάση και Ι η φασική ενεργός τιμή της έντασης του ρεύματος.

Τυπικές τιμές είναι 15000 ως 45000 ΑΕ/m για τις σύγχρονες μηχανές, οι οποίες επιδρούν στις απώλειες των αγωγών και στην επαγωγική αντίδραση των τυλιγμάτων [3.38].

H ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης E δίνεται από τη σχέση (3.21) :  

$$E = 4,44 * k_w * f * N_s * \Phi_i$$
(3.21)

όπου  $k_w$ ο συντελεστής τυλίγματος, f η ηλεκτρική συχνότητα,  $N_s$ ο συνολικός αριθμός ελιγμάτων ανά φάση,  $\Phi$  η θεμελιώδης ροή ανά πόλο.

Η φαινόμενη ισχύς της μηχανής δίνεται από τη σχέση : 
$$S = 3 * E * I \tag{3.22}$$

όπου Ι είναι το ρεύμα μιας φάσης.

Η ηλεκτρική συχνότητα f συνδέεται με την γραμμική ταχύτητα u του δρομέα, μέσω της σχέσης (3.23):

$$f = \frac{u}{2\tau} = \frac{D}{p}u$$
(3.23)

όπου τ είναι το μήκος του πολικού βήματος των τυλιγμάτων του στάτη, D είναι το συνολικό μήκος της γραμμικής μηχανής και p είναι ο αριθμός πόλων των τυλιγμάτων του στάτη.

Με συνδυασμό των σχέσεων (3.19) έως (3.23),, προκύπτει ότι:  

$$S = 1,11 * \overline{B} * A * L * ac * k_w * u$$
(3.24)

Η σχέση (3.24) συνδέει τα δύο βασικά μεγέθη της διαστασιολόγησης - ειδική ηλεκτρική και ειδική μαγνητική φόρτιση - με την ονομαστική φαινόμενη ισχύ της μηχανής.

#### 3.3.1.3. Υπολογισμός μεγεθών και διαστασιολόγηση πρότυπης γραμμικής γεννήτριας

#### 3.3.1.3.1. Σχεδιαστικές παραδοχές

Η ισχύς της γραμμικής γεννήτριας που σχεδιάστηκε είναι 16kW με ενεργό τιμή φασικής τάσης  $V_{\rm rms}$ =188 Volt και συχνότητα f=10Hz.

Η γραμμική μηχανή θα είναι όπως αναφέρθηκε παραπάνω τετράπλευρη, με τα 4 τυλίγματα κάθε φάσης (ένα από κάθε πλευρά) συνδεδεμένα σε σειρά. Οι τρεις φάσεις της μηχανής είναι συνδεσμολογημένες κατά αστέρα.

#### 3.3.1.3.2. Υπολογισμοί χαρακτηριστικών μεγεθών

Η σχεδίαση της γεννήτριας με βάση τα μαγνητικά μεγέθη περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα :

- Προσδιορισμό της επιφάνειας του διακένου, που θα εξασφαλίζει την απαραίτητη ηλεκτρομαγνητική δύναμη σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας.
- Προσδιορισμό των διαμορφώσεων του δρομέα και του στάτη, που επιτρέπουν τη δημιουργία κατάλληλου μαγνητικού πεδίου στο διάκενο.
- Έλεγχος των μαγνητικών και ηλεκτρικών ειδικών φορτίσεων.

Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη στο διάκενο της γραμμικής μηχανής, επιθυμούμε να έχει μόνο εφαπτομενική συνιστώσα  $F_{emt}$ , ώστε να ελαχιστοποιούνται οι αναπτυσσόμενες ελκτικές ή απωστικές δυνάμεις μεταξύ του δρομέα και του στάτη [3.58]. Για να ικανοποιείται αυτή η συνθήκη θα πρέπει να ισχύει η σχέση (3.25).

$$B_n = B_t \neq 0 \tag{3.25}$$

όπου  $B_n$  και  $B_t$  η κάθετη και εφαπτομενική συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής αντίστοιχα και με βέλτιστη γωνία κατεύθυνσης σε όλο το διάκενο 45°.

Επίσης θεωρούμε ότι η μέση επαγωγή διακένου θα είναι 0,6 Tesla με βέλτιστη γωνία κατεύθυνσης σε όλο το διάκενο  $45^{\circ}$ .

Με βάση την επιθυμητή ισχύ των 16 kW και για γραμμική ταχύτητα u= 0.9m/sec, υπολογίζεται η απαιτούμενη εφαπτομενική συνιστώσα της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης  $F_{emt}$  στο διάκενο:

$$P_e = F_{emt} * u \Longrightarrow F_{emt} = 17,8kN \tag{3.26}$$

Για την αναπτυσσόμενη μέση εφαπτομενική πίεση των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο  $P_t$  θα ισχύει:

$$P_t = \frac{F_{emt}}{A} \tag{3.27}$$

όπου Α είναι εμβαδόν του διακένου:

$$A = D * L \tag{3.28}$$

με D το αξονικό μήκος της γραμμικής μηχανής και L το ενεργό μήκος της.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η επιθυμητή συχνότητα της παραγόμενης τάσης από την γεννήτρια για κίνηση με ταχύτητα u= 0.9m/sec, είναι f=10Hz. Για να ικανοποιηθεί αυτή η σχεδιαστική απαίτηση, θα πρέπει το πολικό βήμα των τυλιγμάτων του στάτη, να έχει μήκος  $\tau=45$ mm.

Για τον σχεδιασμό της τετράπλευρης γραμμικής μηχανής, θα πρέπει να θεωρήσουμε ένα άρτιο αριθμό πόλων κατανεμημένων σε κάθε πλευρά της. Θεωρώντας λοιπόν 40 πόλους ανά πλευρά, έχουμε σχετικά με τον συνολικό αριθμό πόλων *p* και το ελάχιστο απαιτούμενο αξονικό μήκος D της μηχανής:

$$p = 4 * 40 = 160 \quad \pi \acute{o} \lambda oi$$

$$D = 40 * 45 = 1800 mm = 1.8m$$
(3.29)

Η εφαπτομενική συνιστώσα  $F_{emt}$  της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης, δίνεται από την σχέση (3.30) [3.39], [3.58] :

$$F_{\text{emt}} = L \oint_{c} B_{n} H_{t} dc = \frac{L}{\mu_{o}} \oint_{c} B_{n} B_{t} dc$$
(3.30)

όπου  $B_n$ ,  $B_t$  η κάθετη και η εφαπτομενική συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο αντίστοιχα και L το ενεργό μήκος της γραμμικής μηχανής.

Λαμβάνοντας υπόψη τις μέσες τιμές της εφαπτομενικής και της κάθετης συνιστώσας  $B_n \approx B_t \approx 0.6 \sqrt{2}/2$  Tesla - λόγω της βέλτιστης κατεύθυνσης στο διάκενο – με συνδυασμό των σχέσεων (3.27) και (3.30) προκύπτει:

$$P_{t} = \frac{1}{D} \oint_{c} B_{n} H_{t} dc = \frac{1}{D\mu_{o}} \oint_{c} B_{n} B_{t} dc = 80 kN / m^{2}$$
(3.31)

Για να εξασφαλιστεί εφαπτομενική ηλεκτρομαγνητική δύναμη  $F_{emt}$ =17,8kN στο διάκενο πρέπει:

$$L = \frac{F_{emt}}{P_t * D} = 0,123m \tag{3.32}$$

Λαμβάνοντας υπόψη την ανομοιομορφία της κατανομής στο διάκενο και τις σκεδάσεις της μαγνητικής ροής, η προτεινόμενη τιμή του ενεργού μήκους της μηχανής είναι ίση με :

$$L = 0,2m$$

Το πλάτος του διακένου επιλέγεται να είναι:

$$L_{\delta} = 2mm$$

Η μαγνητική ροή ανά πόλο και πλευρά της μηχανής, υπολογίζεται σε σχέση με τη μέση τιμή της επαγωγής του διακένου από τη σχέση (3.33).

$$\Phi_i = \frac{\mathbf{B} * \mathbf{A}}{p} = 0,0054Wb \tag{3.33}$$

όπου Α η συνολική επιφάνεια του διακένου σε μια πλευρά της μηχανής.

Το τύλιγμα της γεννήτριας είναι συνδεδεμένο κατά αστέρα, όλα τα πηνία είναι εν σειρά συνδεδεμένα και έχουμε μία αύλακα ανά πόλο και φάση. Η ενεργός τιμή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης ανά φάση για μια πλευρά της μηχανής είναι  $E_{side} = 188/4 = 47V$ .

Οι συνολικές απαιτούμενες σπείρες της μιας φάσης ανά πλευρά θα είναι:

$$N_{s} = \frac{E_{side}}{4,44*1*10*0,0054} = \frac{47}{4,44*1*10*0,0054} = 196 \ \sigma\pi si\rho\varepsilon\varsigma$$
(3.34)

Οι σπείρες για κάθε πηνίο υπολογίζονται από τη σχέση (3.35).

$$N_{i} = \frac{2 * N_{s}}{p} \approx 10 \ \sigma \pi i \rho \varepsilon \varsigma \tag{3.35}$$

Η ενεργός τιμή του ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της μηχανής υπολογίζεται από την σχέση (3.36).

$$I = \frac{P_e}{3V\cos\phi} \tag{3.36}$$

όπου  $P_e$ η ονομαστική πραγματική ισχύς, Vη ονομαστική φασική τάση και cosφ ο συντελεστής ισχύος.

Αν θεωρηθεί ότι ο συντελεστής ισχύος είναι 0,95, η ονομαστική φασική τάση 188V και η αντίστοιχη πραγματική ισχύς 16kW, τότε το ρεύμα φάσης είναι ίσο με:

$$I_i = 29,86A$$

Η συνολική ενεργός μαγνητεγερτική δύναμη δίνεται από τη σχέση (3.37).  

$$ME\Delta = N_1 * I = 10 * 29,86 \approx 300 AE$$
 (3.37)

Θεωρώντας ότι η επιτρεπτή πυκνότητα ρεύματος J είναι ίση με 4 A/mm<sup>2</sup> προκύπτει ότι η απαιτούμενη διατομή του χαλκού ανά αύλακα θα είναι:

$$A_{Cu} = \frac{\text{ME}\Delta}{J} = \frac{300}{4} = 75mm^2$$
(3.38)

Η προτεινόμενη ειδική γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών, πρόκειται για βραχυχρόνια διαστήματα να υποβάλλεται σε ελεγχόμενη υπερφόρτωση, με στόχο την βελτιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Υπό αυτές τις συνθήκες συνεπώς, το ρεύμα που θα

διαρρέει τα τυλίγματα θα είναι πολλαπλάσιο του ονομαστικού, με συνέπεια να απαιτείται μεγαλύτερη επιφάνεια χαλκού για την διέλευση του.

Προτεινόμενη επιφάνεια χαλκού A<sub>Cu</sub>=200mm<sup>2</sup>.

Επίσης επισημαίνεται ότι στο δόντι της αύλακας η τιμή της μαγνητικής επαγωγής δεν πρέπει να ξεπερνά το 1,5T για να αποφεύγεται ο κορεσμός του σιδηρομαγνητικού υλικού του στάτη.

#### 3.3.1.3.3. Υπολογισμός ειδικών φορτίσεων

Η ειδική μαγνητική φόρτιση - δηλαδή η μέση τιμή της επαγωγής στο διάκενο είναι ίση με :

$$\overline{B} = \frac{p * \Phi i}{A} = \frac{160 * 0,0054}{1,44} \approx 0,6$$
 Tesla

η οποία είναι εντός των προδιαγεγραμμέων ορίων.

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση - δηλαδή η ενεργός τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο μήκους διακένου είναι ίση με :

$$ac = \frac{3*2*N_s*I}{A} = \frac{3*2*196*29,86}{1,44} = 24,5kA/m$$

Η υπολογιζόμενη τιμή της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης είναι εντός του φάσματος τιμών από 15000 ως 45000 ΑΕ/m που υιοθετείται για τις σύγχρονες μηχανές [3.39].

#### 3.3.1.3.4. Προσδιορισμός χαρακτηριστικών δρομέα

Βασικό κριτήριο για τη βέλτιστη αξιοποίηση του μόνιμου μαγνήτη, είναι η λειτουργία σε κάποιο σημείο M της χαρακτηριστικής απομαγνήτισης, πριν το γόνατο της καμπύλης όπως φαίνεται στο σχήμα 3.25. Σε αντίθετη περίπτωση, όπου η λειτουργία μετατοπιστεί για παράδειγμα στο σημείο N της καμπύλης, έχουμε απομαγνήτιση του υλικού, δηλαδή μετά την απομάκρυνση του εξωτερικού πεδίου η χαρακτηριστική απομαγνήτισης διαφοροποιείται και ακολουθεί την διακεκομμένη γραμμή [3.41].



Σχήμα 3.25: Τυπική Χαρακτηριστική Απομαγνήτισης Μόνιμου Μαγνήτη

54

Αν αλλάξει η καμπύλη απομαγνήτισης, τότε θα μεταβληθεί και η συμπεριφορά της γεννήτριας λόγω μεταβολής της μαγνητικής ροής.

Για να εξασφαλισθεί η αναγκαία μαγνητική ροή στο διάκενο είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν τα ακόλουθα μαγνητικά υλικά [3.38], [3.3]:

**α.** <u>Μαγνητικά υλικά υψηλής μαγνήτισης</u> (όπως κράματα Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου) για επιφανειακή τοποθέτηση στο δρομέα. Έχουν μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση – φθάνει τα 1,2 Tesla - και υψηλή συνέχουσα δύναμη - H<sub>c</sub>=1000kA/m στους 20°C. Παρουσιάζουν το μειονέκτημα της ευαισθησίας στη θερμοκρασία. Για τον λόγο αυτό η θερμοκρασίας τους πρέπει να διατηρείται κάτω από τους 150 °C.

**β.** <u>Μαγνητικά υλικά χαμηλής μαγνήτισης</u> (φερρίτες) που τοποθετούνται εγκάρσια στο δρομέα, με παραμένουσα μαγνήτιση 0,35 Tesla και συνέχουσα δύναμη H<sub>c</sub>=150kA/m για το φερρίτη 22/15. Δεν είναι τόσο ευαίσθητοι στις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Επίσης υπάρχουν και οι μόνιμοι μαγνήτες τύπου Alnico που δεν επηρεάζονται από τη θερμοκρασία, με υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση, αλλά πολύ χαμηλή συνέχουσα δύναμη. Η καμπύλη απομαγνήτισής τους είναι μη γραμμική και είναι αρκετά ακριβοί.

Από τις χαρακτηριστικές των κατασκευαστών του σχήματος 3.26, προκύπτει ότι το γόνατο της χαρακτηριστικής στο υλικό Neofer 230/80 είναι στα 0,4T και στο φερρίτη 22/15 είναι 0,15T.





Στην περίπτωση του επιφανειακού μαγνήτη προκύπτει ότι, όταν είναι σε άμεση επαφή με το σίδηρο της μηχανής - δηλαδή  $L_m=L_o$  -, τότε η ροή δίνεται από τη σχέση (3.39).

$$\Phi_{\rm r} = B_r * S_1 = {\rm ME}\Delta * \frac{\mu S_1}{L_m}$$
(3.39)

Αν σχηματιστεί διάκενο, τότε -με την προϋπόθεση ότι η μαγνητεγερτική δύναμη παραμένει σταθερή – προκύπτει [3.58]:

$$\Phi_{\delta} = B_{\delta} * S_1 = \text{ME}\Delta * \frac{\mu S_1}{L_o}$$
(3.40)

$$B_{\delta} = B_r * \frac{L_m}{L_o} \tag{3.41}$$

όπου  $L_m$  είναι η διάσταση του μαγνήτη κατά μήκος του διακένου,  $L_o$  είναι το μέγιστο μήκος του διακένου.





Οπότε αν επιθυμούμε η μαγνητική επαγωγή διακένου  $B_{\delta}$ να κυμαίνεται γύρω στο 80% της παραμένουσας μαγνήτισης  $B_r$ , τότε προκύπτει ότι :

$$L_{m} = 0.8 L_{o}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι :

$$L_{\delta} = L_{o} - L_{m}$$

όπου  $L_{\delta}$  είναι η απόσταση μεταξύ του μαγνήτη και του σιδηροπυρήνα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.27, τότε :

$$L_{\delta} = 0,2 L_{o}$$

Συνεπώς με μήκος διακένου 2 χιλιοστά προκύπτει ότι το πάχος των επιφανειακών μαγνητών είναι περίπου :

 $L_m = 8 \text{ mm}$ 

Αν η ροή στο διάκενο  $Φ_{\delta}$  είναι ίση με 0,0054 Wb και η μαγνητική επαγωγή διακένου είναι ίση με 0,85 T, τότε με δεδομένο το ενεργό μήκος της μηχανής προκύπτει ότι το μήκος του μαγνήτη ανά πόλο είναι ίσο με :

$$L_{\mu\alpha\gamma\nu\eta\tau\eta} = \frac{\Phi_{\delta}}{B_{\delta} * L} = \frac{0,0054}{0,85 * 0,2} = 0,031m$$
(3.42)

# 3.3.1.3.5. Διαστασιολόγηση γεννήτριας

Σύμφωνα με του υπολογισμούς που ήδη αναφέρθηκαν, προκύπτει η τελική διαστασιολόγηση της γραμμικής γεννήτριας. Λεπτομέρειες των τελικών διαστάσεων φαίνονται στο σχήμα 3.28.

56

Παράμετρος	Τιμή
Ισχύς	16 kW
Ονομ. φασική τάση (rms)	U <sub>N</sub> =188V
Ονομ. Ρεύμα	I <sub>AN</sub> =29,86A
Συχνότητα	10Hz
Πόλοι ανά πλευρά	40
Πλευρές	4
Πολικό βήμα	w <sub>p</sub> =45mm
Πλάτος διάκενου	2mm
Πλάτος μαγνήτη	31mm
Ύψος μαγνήτη	8mm
Μήκος στάτη	1808 mm
Μήκος δρομέα	2900 mm

Στον Πίνακα 3.3 φαίνονται τα ονομαστικά χαρακτηριστικά της ειδικής γραμμικής γεννήτριας μόνιμων μαγνητών που σχεδιάστηκε [3.54].

Πίνακας 3.3: Βασικές παράμετροι γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών



Σχήμα 3.28: Διαστάσεις γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών

# 3.3.2. Προσδιορισμός των παραμέτρων της γραμμικής μηχανής

Χρησιμοποιώντας κατάλληλα μοντέλα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, έγινε ανάλυση του μαγνητικού πεδίου για την συγκεκριμένη γεωμετρία της ειδικής γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών. Οι αναλύσεις του μαγνητικού πεδίου με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στόχο είχαν αφενός τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών του μαγνητικού κυκλώματος, και αφετέρου την εκτίμηση και εποπτική παρουσίαση των επιπέδων του τοπικού κορεσμού στο σιδηομαγνητικό υλικό του στάτη.

#### 3.3.2.1. Σχεδίαση γεωμετρίας της μηχανής - διαμόρφωση πλέγματος

Εκμεταλλευόμενοι την συμμετρία της γραμμική μηχανής μονίμων μαγνητών, σχεδιάστηκε μόνο ένα διπλό πολικό βήμα μιας πλευράς της μηχανής και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του πεδίου, γενικεύτηκαν για το σύνολο της έκτασης της γραμμικής γεννήτριας [3.51].

Η πλεγματοποίηση της γεωμετρίας έγινε με την χρήση του λογισμικού "Triangle: A Two-Dimensional Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator" και παρουσιάζεται στο σχήμα 3.29, [3.22]-[3.26].



Σχήμα 3.29: Καθορισμός πλέγματος – κόμβων για την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου

Απαραίτητα επίσης στάδια στην σχεδίαση και τον ορισμό του προς επίλυση προβλήματος με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Π.Σ), είναι:

- ο καθορισμός των συνοριακών συνθηκών για κάθε εξωτερικό όριο της σχεδιασμένης γεωμετρίας
- η επιλογή του σιδηρομαγνητικού υλικού του στάτη και του δρομέα, καθώς και ο ορισμός των χαρακτηριστικών B-H για τα υλικά αυτά
- ο ορισμός των κατάλληλων κατά περίπτωση ρευμάτων που θα διαρρέουν τα τυλίγματα των τριών φάσεων της μηχανής.

58

Μετά την ολοκλήρωση του ορισμού όλων των απαραίτητων παραμέτρων, γίνεται επίλυση του προβλήματος και υπολογίζεται το διανυσματικό δυναμικό Α, σε κάθε κόμβο του προκαθορισμένου πλέγματος [3.40].

Στο σχήμα 3.30 φαίνεται η χαρακτηριστική B-H του σιδηρομαγνητικού υλικού του στάτη, η οποία θεωρήθηκε για την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου της μηχανής με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ στο σχήμα 3.31 φαίνεται η αντίστοιχη χαρακτηριστική του μόνιμου μαγνήτη Neofer 230/120 που επιλέχθηκε για επιφανειακή στήριξη στον στάτη της γραμμικής μηχανής [3.41]..



Σχήμα 3.30: Χαρακτηριστική Β-Η του σιδηρομαγνητικού υλικού του στάτη



Σχήμα 3.31: Χαρακτηριστική B-Η του μόνιμου μαγνήτη Neofer230/120

#### 3.3.2.2. Ανάλυση μαγνητικού πεδίου

#### 3.3.2.2.1. Μαγνητικό πεδίο εξαιτίας των μονίμων μαγνητών του δρομέα

Η ύπαρξη των επιφανειακά στηριγμένων μονίμων μαγνητών στον δρομέα της γραμμικής μηχανής, δημιουργεί μαγνητικό πεδίο οι μαγνητικές γραμμές του οποίου, κλείνουν μέσω των σιδηρομαγνητικών υλικών του στάτη και του δρομέα. Στο σχήμα 3.32, φαίνεται η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής *B*<sub>PM</sub> εξαιτίας των μονίμων μαγνητών, κατά μήκος ενός διπλού πολικού βήματος, στο διάκενο της γραμμικής μηχανής όπως αυτή υπολογίστηκε από το μοντέλο προσομοίωσης του μαγνητικού πεδίου.





Οι μαγνητικές γραμμές που διέρχονται από τα τυλίγματα των φάσεων του στάτη, εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται μόνο από την ύπαρξη του μαγνήτη στον δρομέα της γραμμική γεννήτριας, απεικονίζονται στο σχήμα 3.33.



Σχήμα 3.33: Ροή που προκαλεί το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν οι μόνιμοι μαγνήτες του δρομέα
Αναλύοντας το μαγνητικό πεδίο της γραμμικής μηχανής με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, μπορεί να γίνει εκτίμηση της χρονικής μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής  $B_{PM}$ , ως προς ένα σταθερό σημείο του διάκενου, όταν ο δρομέας κινείται σε σχέση με τον στάτη.

Η γραφική παράσταση μεταβολής της  $B_{PM}$  σε συνάρτηση με τον χρόνο για κίνηση του δρομέα με σταθερή γραμμική ταχύτητα 0,9m/sec φαίνεται στο σχήμα 3.34, όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε την απόκλιση που έχει η χρονική μεταβολή του  $B_{PM}$  σε σχέση με την ημιτονική θεμελιώδη συχνότητα των 10Hz.



**Σχήμα 3.34:** Χρονική μεταβολή της Β<sub>PM</sub> ως προς σταθερό σημείο στο διάκενο, για σταθερή γραμμική ταχύτητα του δρομέα 0,9m/sec.

Θεωρητικά μέγιστη διερχόμενη ροή από ένα πηνίο μιας φάσης, έχουμε στη περίπτωση που ο εγκάρσιος άξονας συμμετρίας του μαγνήτη, συμπίπτει με τον εγκάρσιο άξονα συμμετρίας του πηνίου της φάσης.

Στο στιγμιότυπο του σχήματος 3.33 ένας μόνιμος μαγνήτης είναι κεντραρισμένος με ένα από τα πηνία της φάσης *a*. Με βάση την κατασκευαστική συμμετρία της γραμμικής γεννήτριας, το ίδιο συμβαίνει και με τα υπόλοιπα πηνία που συνθέτουν την φάση *a*.

Συνεπώς το σχήμα 3.33 απεικονίζει το μαγνητικό πεδίο στην γραμμική μηχανή όπως αυτό έχει υπολογιστεί με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEA), την χρονική στιγμή κατά την οποία, θεωρητικά από την φάση a θα πρέπει να διέρχεται μέγιστη ροή  $\Phi_{PM}$ , εξαιτίας των μόνιμων μαγνητών του δρομέα.

Η μεταβολή της διερχόμενης από ένα πηνίο ροής  $Φ_{PM}$  που οφείλεται μόνο στον μαγνήτη, είναι εναλλασσόμενη σε σχέση με τον χρόνο, καθώς ο δρομέας της γραμμικής μηχανής αλλάζει θέση. Ειδικότερα η ροή  $Φ_{PM}$  θα πρέπει να έχει ημιτονοειδή μορφή, εφόσον και η μαγνητική επαγωγή  $B_{PM}$  είχε καθαρά ημιτονοειδή μορφή. Όπως όμως ήδη φάνηκε από το σχήμα 3.34 για την περίπτωση που ο δρομέας κινείται με σταθερή γραμμική ταχύτητα προς μια κατεύθυνση, η μορφή της  $B_{PM}$  δεν είναι ημιτονοειδής.

Χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και με επαναλαμβανόμενους υπολογισμούς για διαδοχικές θέσεις του δρομέα σε σχέση με τον στάτη, μπορεί να γίνει εκτίμηση της διερχόμενης από μια φάση της μηχανής ροής  $Φ_{PM}$ , σε συνάρτηση με την θέση του δρομέα.

Στο σχήμα 3.35 φαίνεται η διερχόμενη ροή  $Φ_{PM}$  από ένα πηνίο μιας φάσης της γραμμικής γεννήτριας, σαν συνάρτηση της μετατόπισης του δρομέα.



# Σχήμα 3.35: Ροή ανά πηνίο της φάσης *a* σε σχέση με την μετατόπιση του δρομέα, η οποία οφείλεται μόνο στο μαγνητικό πεδίο που προέρχεται από τους μόνιμους μαγνήτες του δρομέα

Η απόκλιση της  $\Phi_{PM}$  από την ημιτονοειδή μορφή, οφείλεται αφενός στην μορφή της  $B_{PM}$  και αφετέρου στην κατεύθυνση της σχετικής κίνησης μεταξύ του δρομέα και του στάτη της γραμμικής μηχανής.

Η συνολική διερχόμενη ροή από την φάση *a*, προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τις τιμές της γραφικής παράστασης του προηγούμενου σχήματος με τον συνολικό αριθμό των πηνίων που συνθέτουν την φάση *a*, δηλαδή με επί 20πηνία/πλευρά και επί 4 πλευρές.

Οι ανάλογες παρατηρήσεις ισχύουν και για τις δύο άλλες φάσεις *b*,*c*, της τριφασικής τετράπλευρης γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών.

#### 3.3.2.2.2. Μαγνητικό πεδίο εξαιτίας ρεύματος στα τυλίγματα στάτη

Αντίστοιχα με την προηγούμενη παράγραφο, στο σχήμα 3.36 εμφανίζεται το μαγνητικό πεδίο που εγκαθίσταται μόνο εξαιτίας του γεγονότος ότι τα τυλίγματα μιας φάσης του στάτη, διαρρέονται από ρεύμα, χωρίς ταυτόχρονα να υπάρχουν μαγνήτες στον δρομέα. Η συγκεκριμένη προσομοίωση λειτουργίας, μπορούμε να πούμε ότι αντιστοιχεί στην δοκιμή κενού φορτίου, στην περίπτωση που η γραμμική μηχανή λειτουργούσε ως κινητήρας.

Με την συγκεκριμένη προσομοίωση μπορεί να γίνει εκτίμηση της συγκεντρωμένης αυτεπαγωγής των τυλιγμάτων  $L_{self}$  για κάθε μια από τις φάσεις i=a,b,c.

Για τον σκοπό αυτό, τροφοδοτείται μόνο το πηνίο της φάσης a με ονομαστικό ρεύμα  $I_a$  ενώ οι περιοχές του μαγνήτη αντικαθίστανται με αέρα.

Λύνοντας το πρόβλημα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, προσδιορίζεται η κατανομή του διανυσματικού δυναμικού A σε όλο τον σχεδιασμένο χώρο. Στην συνέχεια υπολογίζεται η τιμή της αυτεπαγωγής του ενός πηνίου της φάσης a η οποία είναι ίση με 2,23\*10<sup>-4</sup> Η.

Η φάση *a*, αποτελείται συνολικά από 20 πηνία σε κάθε μια από τις 4 πλευρές της μηχανής και όλα αυτά είναι συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους. Συνεπώς η συνολική συγκεντρωμένη αυτεπαγωγή της φάσης *a* είναι ίση με:

$$L_{self} = 20x4x2,23*10^{-4} = 17,83\text{mH}.$$
(3.43)

Προφανώς λόγω κατασκευαστικής συμμετρίας της μηχανής, την ίδια τιμή αυτεπαγωγής εμφανίζουν και οι άλλες δύο φάσεις της τριφασικής γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών.



Σχήμα 3.36: Μαγνητικό πεδίο δημιουργούμενο από το ρεύμα ενός πηνίου της φάσης a.

Από την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για διαφορετικές τιμές του ρεύματος του πηνίου, προκύπτει ότι η μεταβολή της τιμής της  $L_{self}$  σε σχέση με το ρεύμα της φάσης είναι αμελητέα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.37.



**Σχήμα 3.37:** Μεταβολή του  $L_{self}$  των τυλιγμάτων του στάτη στην εν κενώ λειτουργία, σαν συνάρτηση του ρεύματος

Η συγκεκριμένη ειδική γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών, πρόκειται να δουλέψει σε συνθήκες ελεγχόμενης υπερφόρτισης σε ρεύμα πολλαπλάσιο του ονομαστικού, με σκοπό την επίτευξη βελτιστοποίησης της απορροφούμενης ενέργειας ακόμη και από κυματισμό χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου. Σχεδιαστική λοιπόν απαίτηση, είναι η ύπαρξη μεγάλου περιθωρίου από άποψη μαγνητικού κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού για την εν κενώ λειτουργία, καθώς η προσθήκη των μαγνητών στον δρομέα αφενός και η λειτουργία υπό συνθήκες βραχυχρόνιας ελεγχόμενης υπερφόρτισης αφετέρου, θα οδηγήσουν ούτως ή άλλως το υλικό σε κατάσταση έντονου τοπικού μαγνητικού κορεσμού.

Η συμπεριφορά του μαγνητικού υλικού του στάτη από άποψη μαγνητικού κορεσμού φαίνεται στο σχήμα 3.38, όπου δίνεται η γραφική παράσταση της συνολικής ροής  $Φ_a$  στην φάση a της γραμμικής μηχανής, σε σχέση με την τιμή του ρεύματος που την διαρρέει.

Στο ίδιο σχήμα έχει χαραχθεί η ευθεία y=0,01783x για να εντοπισθεί το σημείο στο οποίο το μαγνητικό υλικό υπό την επίδραση μόνο του πεδίου που προέρχεται από το ρεύμα σε μια φάση του στάτη, σταματά να έχει γραμμική συμπεριφορά.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η κλίση της ευθείας είναι αριθμητικά ίση με την τιμή της συγκεντρωμένης αυτεπαγωγής  $L_{self}$  που προσδιορίστηκε παραπάνω.



**Σχήμα 3.38:** Συνολική ροή  $Φ_a$  σε συνάρτηση με το ρεύμα *Ia* που διαρρέει την φάση *a* της μηχανής.

Από το σχήμα 3.38 προκύπτει ότι για ρεύμα φάσης  $I_a$  μεγαλύτερο των 85A p-p (60A rms) περίπου, αρχίζει να εμφανίζεται μαγνητικός κορεσμός στο σιδηρομαγνητικό υλικό του στάτη και η συνολικά διερχόμενη ροή από μια φάση της γραμμικής μηχανής παύει να είναι γραμμική συνάρτηση του ρεύματος που διαρρέει την φάση αυτή.

#### 3.3.2.2.3. Λειτουργία υπό φορτίο

64

Υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας της γραμμικής μηχανής, το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν οι τοποθετημένοι επί του κινούμενου δρομέα μόνιμοι μαγνήτες, επάγει ηλεκτρεγερτική δύναμη *E* επί των τυλιγμάτων των φάσεων της τριφασικής γραμμικής γεννήτριας.

Συνέπεια της ανάπτυξης ηλεκτρεγερτικής δύναμης *E*, είναι η κυκλοφορία ρεύματος στα τυλίγματα κάθε φάσης, μέσω του φορτίου που αυτή τροφοδοτεί.

Η συνολικά διερχόμενη ροή  $Φ_{itot}$  από τα πηνία μιας εκ των φάσεων i=a,b,c της τριφασικής γραμμικής μηχανής, μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα των παρακάτω επί μέρους όρων [3.53].

$$\Phi_{itot} = \Phi_{\rm PM} + \Phi_{ia} + \Phi_{ib} + \Phi_{ic} \tag{3.44}$$

όπου  $\Phi_{PM}$  είναι η ροή που προέρχεται από το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν οι μόνιμοι μαγνήτες του δρομέα, ενώ  $\Phi_{ia}$ ,  $\Phi_{ib}$ ,  $\Phi_{ic}$  είναι οι ροές που οφείλονται στα μαγνητικά πεδία που δημιουργούν τα πηνία των φάσεων *a,b,c*, επειδή διαρρέονται από τα επαγόμενα σε αυτά ρεύματα.

Τα πηνία των τριών φάσεων i=a,b,c στον στάτη της γραμμικής μηχανής, έχουν τοποθετηθεί με τρόπο ώστε, τα επαγόμενα ρεύματα εξαιτίας της κίνησης του δρομέα, να συμβάλλουν στην ανάπτυξη ενός στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην προκείμενη περίπτωση, τον όρο "στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο" τον δανειζόμαστε από την θεωρία των στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, για να αποδώσουμε το φαινόμενο του "ευθύγραμμα κινούμενου" προς την κατεύθυνση της κίνησης, αναπτυσσόμενου μαγνητικού πεδίου στην περίπτωση της τριφασικής γραμμικής μηχανής μονίμων μαγνητών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διερχόμενη ροή  $\Phi_{PM}$  από ένα πηνίο μιας εκ των φάσεων a,b,c, μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την θέση του μαγνήτη ως προς το πηνίο.

Συνέπεια αυτού είναι να μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την θέση και η  $Φ_{itot}$  που διέρχεται από κάθε φάση της γραμμικής μηχανής.

Με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι δυνατός ο υπολογισμός της διερχόμενης από μια φάση της μηχανής μαγνητική ροής  $\Phi_{itot}$ , σε σχέση με την θέση των μόνιμων μαγνητών και σε συνάρτηση με το ρεύμα που διαρρέει τα πηνία της φάσης [3.53].



**Σχήμα 3.39:** Συνολική διερχόμενη ροή Φ<sub>itot</sub> από τα τυλίγματα μιας φάσης της γραμμικής μηχανής μονίμων μαγνητών, για μετατόπιση του μαγνήτη κατά ένα πολικό βήμα.

Στο σχήμα 3.39 είναι φανερή η επίδραση του κορεσμού του μαγνητικού υλικού του στάτη, καθώς το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα των φάσεων αυξάνεται. Ειδικότερα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για τιμές έντασης του ρεύματος μεγαλύτερες των 45App σταματά η συμπεριφορά του μαγνητικού υλικού παύει να είναι γραμμική.



Σχήμα 3.40: Μεταβολή της ροής Φ<sub>itot</sub> για διάφορες τιμές του ρεύματος, σε συνάρτηση με την μετατόπιση του μαγνήτη κατά μήκος ενός πολικού βήματος της γραμμικής μηχανής

Στο σχήμα 3.40 παρουσιάζεται η μεταβολή της συνολικά διερχόμενης ροής ΦΡΜ από τα τυλίγματα μιας φάσης, σε συνάρτηση με την μετατόπιση του δρομέα και για διάφορες τιμές του ρεύματος φορτίου που διαρρέει τα τυλίγματα της φάσης. Ειδικά η περίπτωση για ρεύμα 0Α αντιστοιχεί στην συνολική ροή  $Φ_{PM}$  που διέρχεται από τα πηνία της μιας φάσης στον στάτη της μηχανής, μόνο εξαιτίας της ύπαρξης των μονίμων μαγνητών στον δρομέα της γραμμικής μηχανής.

#### 3.3.2.3. Υπολογισμός μεταβολής της αυτεπαγωγής των τυλιγμάτων

Έχει ήδη αναφερθεί ότι η συγκεκριμένη ειδική γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών, πρόκειται να δουλέψει σε συνθήκες ελεγχόμενης βραχυχρόνιας υπερφόρτισης, με στόχο την βελτιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας ακόμη και στην περίπτωση που η εξωτερική διέγερση (θαλάσσιος κυματισμός), είναι χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου.

Η κατάσταση της υπερφόρτισης σε συνδυασμό με την ύπαρξη των μόνιμων μαγνητών επί του δρομέα της γραμμικής γεννήτριας, οδηγούν σε συνθήκες έντονου τοπικού κορεσμού στο μαγνητικό υλικό του στάτη, ανάλογα με την σχετική θέση των μαγνητών ως προς τα πηνία των φάσεων της μηχανής [3.45].

Συνέπεια αυτού του γεγονότος, είναι η διαφοροποίηση του λόγου  $Φ_{itot}$  /Ι αφενός σε σχέση με το ρεύμα και αφετέρου σε σχέση με την στιγμιαία θέση του μαγνήτη ως προς τα πηνία των φάσεων.

66

Στο σχήμα 3.41 παρατηρούμε ότι ο λόγος  $Φ_{itot}$  /Ι με την συμβολή και του μαγνήτη στην συνολική ροή, παρουσιάζει μικρότερη μεταβολή όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα της φάσης ή με άλλα λόγια όσο περισσότερο κορεσμένο είναι το μαγνητικό υλικό της μηχανής.



**Σχήμα 3.41:** Μεταβολή του λόγου  $Φ_{itot}$  /Ι σε συνάρτηση με την θέση του μαγνήτη και την τιμή της έντασης του ρεύματος

Έχοντας προσδιορίσει με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, την  $Φ_{PM}$  και την  $Φ_{itot}$ , είναι δυνατός ο υπολογισμός της συνολικής πεπλεγμένης ροής  $Φ'_{itot}$  μέσω των πηνίων μιας φάσης χωρίς την συμμετοχή του μαγνήτη, και περαιτέρω μπορεί να προσδιοριστεί όπως φαίνεται στο σχήμα 3.42, η μεταβολή της κατά μήκος ενός διπλού πολικού βήματος, σε συνάρτηση με το ρεύμα φορτίου [3.56].

$$\Phi'_{itot} = \Phi_{ia} + \Phi_{ib} + \Phi_{ic} = \Phi_{itot} - \Phi_{PM}$$
(3.45)



**Σχήμα 3.42:** Μεταβολή της ροής  $Φ'_{itot}$  χωρίς συμμετοχή του μόνιμου μαγνήτη

#### 3.3.2.4. Προσομοίωση λειτουργίας γραμμικής γεννήτριας

68

Η αναπτυσσόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη  $E_i$  στα τυλίγματα μιας φάσης εξαιτίας της κίνησης του μαγνήτη δίνεται από την σχέση (3.46) [3.42], [3.47], [3.50].

$$E_{i} = \frac{d\lambda_{im}}{dt} = \frac{d\lambda_{im}}{dz}\frac{dz}{dt} \qquad i = a, b, c$$
(3.46)

όπου  $\lambda_{im}$  είναι η πεπλεγμένη ροή μέσω των τυλιγμάτων της φάσης i, που εξαρτάται από το μήκος του πολικού βήματος  $\tau$  καθώς και από την μετατόπιση z του δρομέα της γραμμικής μηχανής.

Η πεπλεγμένη ροή λ<sub>im</sub> ορίζεται από την σχέση (3.47).

$$\lambda_{im} = N_i \phi_i = N_i \Phi_i \cos(\omega t) = N_i \Phi_{i\max} \cos(\frac{\pi}{\tau}z)$$
(3.47)

όπου  $N_i$  είναι ο αριθμός σπειρών ανά φάση i της γεννήτριας και  $\Phi_{imax}$  είναι η μέγιστη τιμή της ροής η οποία υπολογίζεται από την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Με βάση τις σχέσεις (3.46) και (3.47), προκύπτει:

$$E_a = \frac{d\lambda_{am}}{dz}\frac{dz}{dt} = -N_a \Phi_a \frac{\pi}{w_p} \sin(\frac{\pi}{w_p}z)\frac{dz}{dt} = ku$$
(3.48)

όπου *u* είναι η γραμμική ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας μόνιμων μαγνητών.

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη emf της φάσης b είναι μετατοπισμένη κατά  $120^{\circ}$  σε σχέση με αυτήν της φάσης a και η emf της φάσης c είναι επίσης μετατοπισμένη κατά  $120^{\circ}$  σε σχέση με την φάση b. Η τάση  $V_a$  και το ρεύμα  $I_a$  της φάσης a, δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις (3.49) και (3.50).

$$V_a = -r_a i_a + L_{self} \frac{di_a}{dt} + L_{mu} \left(\frac{di_b}{dt} + \frac{di_c}{dt}\right) + E_a$$
(3.49)

$$\frac{di_{a}}{dt} = \frac{1}{L_{self}} (V_{a} + r_{a}i_{a} - L_{mu}(\frac{di_{b}}{dt} + \frac{di_{c}}{dt}) - E_{a})$$
(3.50)

Η δύναμη ώθησης της γεννήτριας δίνεται από την εξίσωση (3.51).

$$F_{thrust} = ki_a \tag{3.51}$$

όπου ο συντελεστής k ορίζεται στην εξίσωση (3.48).

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης λειτουργίας για την περίπτωση της κίνησης του δρομέα της μηχανής με σταθερή ταχύτητα u=0.9m/sec φαίνονται στα σχήματα 3.43 και 3.44 [3.55], [3.57].

Σημειώνεται ότι η τιμή 0,9m/sec είναι η μέση γραμμική ταχύτητα του δρομέα της μηχανής, θεωρώντας ότι αυτός υποβάλλεται σε κίνηση από ημιτονοειδές κύμα ύψους H=1m και γωνιακής ταχύτητας w=2.8rad/sec.



Σχήμα 3.43: Παραγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη Emf εν κενώ



Σχήμα 3.44: Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς υπό συνθήκες ονομαστικής φόρτισης

#### 3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι περιπτώσεις των δύο εναλλακτικών τύπων γεννητριών, συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης και γραμμικής μονίμων μαγνητών, για ηλεκτροπαραγωγή από θαλάσσιο κυματισμό που μελετώνται στο παρόν κεφάλαιο, απαιτούν πλήρη ανάλυση της κατανομής του μαγνητικού τους πεδίου με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, καθώς ο εφαρμοζόμενος έλεγχος με στόχο την βελτιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας ακόμη και από κυματισμό χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου, μπορεί να οδηγήσει σε βραχυχρόνια εμφάνιση φαινομένων τοπικού κορεσμού στο μαγνητικό υλικό των γεννητριών.

70

Για την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου των δύο τύπων ηλεκτρογεννητριών που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο, αλλά και για την μελέτη της συμπεριφοράς τους σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας, αναπτύχθηκαν μοντέλα προσομοίωσης με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων καθώς και μοντέλα δυναμικής προσομοίωσης της λειτουργίας τους, αντίστοιχα. Η εφαρμογή των μοντέλων σε γεννήτριες γνωστών μαγνητικών και κυκλωματικών χαρακτηριστικών, απέδειξε την καταλληλότητα τους και επιβεβαίωσε την ακρίβεια των αποτελεσμάτων τους

Η προσομοίωση της κατανομής του μαγνητικού πεδίου στην περίπτωση της γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών, απέδειξε ότι η αλληλεπίδραση των μαγνητών του δρομέα με τις αυλακώσεις του στάτη επηρεάζει την μορφή της παραγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (H.E.Δ.).

Σημαντικό επίσης συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου της γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών, είναι η διαφοροποίηση της αυτεπαγωγής των τυλιγμάτων της γεννήτριας, αφενός σε συνάρτηση με την θέση του δρομέα ως προς το στάτη και αφετέρου σε σχέση με το ρεύμα φορτίου. Ειδικότερα, παρουσιάζεται διακύμανση της αυτεπαγωγής από 0.015 έως 0.025Η που αντιστοιχεί σε μεταβολή 40% για μετατόπιση του δρομέα κατά ένα πολικό βήμα. Επίσης στην περίπτωση υπερφόρτισης της γεννήτριας κατά 25% του ονομαστικού της ρεύματος, παρατηρείται διακύμανση της τιμής της αυτεπαγωγής από 0.025 σε 0.018Η (μείωση της τάξης του 28%).

#### 3.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] M.G.Say, E.Openshaw Taylor, "Direct Current Machines", Pitman Publishing Limited, London, 1986
- [3.2] Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw Hill Inc. 1986.
- [3.3] E.S. Hamdi, "Design of small electrical machines", John Wiley and Sons Ltd., New York, 1994.
- [3.4] K. J. Binns, P. J. Lawrenson, C. W. Trowbridge, "The analytical and numerical solution of electric and magnetic fields", Wiley, Chichester, 2002.
- [3.5] P. Silvester, "High-Order Polynomial Triangular Finite Elements for Potential Problems," Int. J. Engng. Sci., Vol. 7, pp. 849-861, 1969.
- [3.6] P. Silvester, "A General High-Order Finite-Element Waveguide Analysis Program," IEEE Tran. MTT, Vol. 17, No 4, pp. 204-210, 1969.
- [3.7] O C. Zienkiewicz, "The finite element method-from intuition to generality," Appl. Mech. Rev. Vol. 23, pp. 249-56, 1970.
- [3.8] A. B. J. Reece, T. W. Preston, "Finite Element Methods in Electrical Power Engineering". Oxford University Press, May 2000.
- [3.9] J. Bastos, "Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods". Marcel Dekker, April 2003.
- [3.10] Μαρίνα Α. Τσίλη, "Ανάπτυξη μεικτών αριθμητικών τεχνικών πεπερασμένων στοιχείων – οριακών στοιχείων για τη σχεδίαση μετασχηματιστών ισχύος", Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Ιούνιος 2005.
- [3.11] K. Preis, I. Bardi, O. Biro, R. Hoschek, M. Mayr, U. Peterlini, K. R. Richter, "Computer Animation of Electromagnetic Phenomena," IEEE Trans. Magn., Vol. 31, No 3, pp. 1714-1717, May 1995.
- [3.12] H. De Gersem, U. Pahner, K. Hameyer, "Object-Oriented Implementation of an Interactive and Automatic Field-Processing Surface," IEEE Trans. Magn., Vol. 36, No 4, pp. 1653-1658, Jul. 2000.
- [3.13] F. Schmoellebeck, H. Haas, "3-Dimensional, adaptive FE-preprocessing using a programmable CAD system," IEEE Trans. Magn., Vol. 24, No 1, pp. 370-373, Jan. 1988.
- [3.14] N. Bamps, H. Hedia, A. Genon, W. Legros, A. Nicolet, M. Ume, "Graphical Language Interpreter and Meshing Tool for Electromagnetic Computations," IEEE Trans. Magn., Vol. 28, No 2, pp. 1771-1773, Mar. 1992.
- [3.15] F. G. Uler, O. A. Mohammed, "A 3-D Finite Element Mesh Generator for Complex Volumes," IEEE Trans. Magn., Vol. 30, No 5, pp. 3539-3542, Sept. 1994.
- [3.16] W. Mai, G. Henneberger, "Object-Oriented Design of Finite Element Calculations with Respect to Coupled Problems," IEEE Trans. Magn., Vol. 36, No 4, pp. 1677-1681, Jul. 2000.
- [3.17] C. F. Parker, J. K. Sykulski, S. C. Taylor, "Parametric Environment for EM Computer Aided Design," IEEE Trans. Magn., Vol. 32, No 3, pp. 1433-1436, May 1996.
- [3.18] C. S. Biddlecombe, J. K. Sykulski, S. C. Taylor, "Design Environment Modules for Non-Specialist Users of EM Software," IEEE Trans. Magn., Vol. 30, No 5, pp. 3625-3628, Sept. 1994.
- [3.19] N. Ida, "PCNDT An Electromagnetic Finite Element Package for Personal Computers,", IEEE Trans. Magn., Vol. 24, No 1, pp. 366-369, Jan. 1988.

- [3.20] T. W. Nehl, A. M. Pawlak, N. Mikhaeil Boules, "ANTIC85: A General Purpose Finite Element Package for Computer Aided Design and Analysis of Electromagnetic Devices," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 24, No 1, pp. 358-361, Jan. 1988.
- [3.21] J. C. Cavendish, D. A. Field, W. H. Frey, "An approach to automatic threedimensional finite element mesh generation," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 21, pp. 329-347, 1985.
- [3.22] L. P. George, F. Hecht, E. Saltel, "Automatic mesh generator with specified boundary," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, pp. 269-288, 1991.
- [3.23] B. A. Lewis, J. S. Robinson, "Triangulation of planar regions with applications," *Computer J.*, Vol. 21, o 4, pp.324-332, 1980.
- [3.24] S. H. Lo, "Delaunay triangulation of non-convex planar domains," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 28, pp. 2695-2707, 1989.
- [3.25] R. Perucchio, M. Saxena, A. Kela, "Automatic mesh generation from solid models based on recursive spatial decompositions," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 28, pp. 2469-2501, 1989.
- [3.26] J. Z. Cendes, N. D. Shenton, "Three-dimensional finite element mesh generation using Delaunay tesselation," IEEE Trans. Magn., Vol. 21, No 6, pp. 2535-2538, 1985.
- [3.27] N.A. Golias, T.D. Tsiboukis, "Adaptive refinement strategies in three dimensions," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 29, No 2, pp. 1886 – 1889, Mar. 1993.
- [3.28] N.A. Golias, T.D. Tsiboukis, "Three-dimensional automatic adaptive mesh generation," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 28, No 2, pp. 1700-1703, Mar. 1992.
- [3.29] P. S. Georgilakis, N. D. Hatziargyriou, S. S. Elefsiniotis, D. G. Paparigas, J. A. Bakopoulos, "Creation of an efficient computer-based environment for the reduction of transformer industrial cycle," Proc. IEE MEDPOWER '98, Nicosia, Cyprus, Nov. 1998.
- [3.30] M. A. Tsili, A. G. Kladas, P. S. Georgilakis, A. T. Souflaris and D. G. Paparigas, "Wound Core Power Transformer Design: Classical Methodology and Advanced Magnetic Field Analysis Techniques," *Proc. ARWTR'2004*, Vigo, Spain, October 2004.
- [3.31] M. A. Tsili, A. G. Kladas, P. S. Georgilakis, A. T. Souflaris and D. G. Paparigas, "Incorporation of Advanced Numerical Field Analysis Techniques in the Industrial Transformer Design Process," *Proc. IEE MEDOWER'2004*, Lemesos, Cyprus, November 2004.
- [3.32] Jonathan Richard Shewchuk, "Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator", Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering, volume 1148 of Lecture Notes in Computer Science, pages 203-222, Springer-Verlag, Berlin, May 1996.
- [3.33] Jonathan Richard Shewchuk, "Delaunay Refinement Algorithms for Triangular Mesh Generation", Computational Geometry: Theory and Applications 22(1-3), 21-74, May 2002
- [3.34] Peter P. Silvester, Ronald L. Ferrari, "Finite Elements for Electrical Engineers", Cambridge University Press, 1996
- [3.35] L. Paul Chew, "Guaranteed-Quality Mesh Generation for Curved Surfaces", Proceedings of the Ninth Annual Symposium on Computational Geometry (San Diego, California), pages 274-280, Association for Computing Machinery, May 1993

72

- [3.36] Jim Ruppert, "A Delaunay Refinement Algorithm for Quality 2-Dimensional Mesh Generation", Journal of Algorithms 18(3), p-p 548-585, May 1995.
- [3.37] Jacek F. Gieras, Zbigniew J. Riech, "Linear Synchronous Motors-Transportation and Automation Systems", CRC Press, New York, 2000
- [3.38] Jacek F. Gieras, Michell Wing, "Permanent Magnet Motor Technology-Design and Applications", Marcel Dekker Inc., New York, 1997
- [3.39] M.G.Say, "The Performance and Design of Alternating Current Machines", Sir Isaac Pitman & Sons, London, 1961
- [3.40] M. Enokizono and N. Soda, "Direct iron loss analysis for transformer by improved finite element method," Proceedings of the 1998 International Conference on Electrical Machines, pp. 988-993, September 2-4, 1998, Istanbul, Turkey
- [3.41] G. D. Kalokiris, A. G. Kladas, "High speed machines using advanced magnetic materials analyzed by appropriate finite element models", Proceedings of WSEAS 2004, 12-13 July 2004, Athens, Greece, published in Journal of IASME Transactions, vol. 1, no 2, pp. 355-359, 2004.
- [3.42] J. P. Peng, "Solution of Two and Three Dimensional Electromagnetics Problems Using Numerical Methods", PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, N.Y., 1984.
- [3.43] P. Hunter, A. Pullan, "*FEM / BEM Notes*". Dept. of Engineering Science, Univ. of Auckland, N. Zealand, February 2001.
- [3.44] Marshall Bern, David Eppstein, and John R. Gilbert, Provably Good Mesh Generation, Journal of Computer and System Sciences 48(3):384-409, June 1994.
- [3.45] S. Kiartzis and A. Kladas, "Deterministic and artificial intelligence approaches in optimizing permanent magnet generators for wind power applications," Proceedings of the 1<sup>st</sup> Japanese-Greek Workshop on Superconductivity and Magnetic Materials, Athens, May 1999.
- [3.46] K. Hameyer, R. Belmans, "Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices". WIT Press, 1999.
- [3.47] K. Rhinefrank, E.B.Agamloh, A. von Jouanne et al. «Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy», Renewable Energy 31 (2006), pp 1279-1298.
- [3.48] Nicholas Jon Baker, "Linear Generators for Direct Drive Marine Renewable Energy Converters", PhD thesis, School of Engineering University of Durham 2003
- [3.49] Oskar Danielsson, "Design of a linear generator for Wave energy plant", Master's degree project, Uppsala University School of Engineering, 2003
- [3.50] Karin Thorburn, Karl-Erik Karlsson, Arne Wolfbrandt, Mikael Eriksson, Mats Leijon, «Time stepping finite element analysis of a variable speed synchronous generator with rectifier», Applied Energy 83 (2006), pp 371-386.
- [3.51] O. Danielson, M. Leijon, E. Sjostedt, «Detailed study of the magnetic circuit in a longitudinal flux permanent-magnet synchronous linear generator», IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no 9, pp. 2490-2495, September 2005.
- [3.52] Mats Leijon, Hans Bernhoff, Olov Agren, Jan Isberg, Jan Sundberg, Marcus Berg, Karl Erik Karlsson, and Arne Wolfbrandt, «Multiphysics simulation of wave energy to electric energy conversion by permanent magnet linear generator», IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no1, pp. 219-224, March 2005.
- [3.53] N.M. Kimoulakis, A.G. Kladas, and J.A. Tegopoulos, "Power Generation Optimization from Sea Waves by using a Permanent Magnet Linear Generator Drive", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, Issue 6, June 2008, pp1530-1533.

- [3.54] N. M. Kimoulakis, A. G. Kladas and J. A. Tegopoulos, "Dynamic performance simulation of a four sided linear permanent magnet machine for power generation from sea waves", Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 10 ISS.5-2008, printed date May 14 2008, pp. 1268-1271.
- [3.55] Nikolaos M. Kimoulakis and Antonios Kladas, "Time Variation of Operational Characteristics for a Linear Permanent Magnet Synchronous Generator under Various Load Conditions", Proceedings of the 6th Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano Materials JAPMED'6, 27-29 July 2009, Bucharest, Romania.
- [3.56] Nikolaos M. Kimoulakis, Antonios G. Kladas "Operational Parameters Variation of an Electromechanical Coupled System Exploiting Vertical Motion of Sea Waves", Proceedings of the 6th Mediterranean Conference on Power Generation Transmission and Distribution MedPower 2008, November 2-5, 2008, Thessaloniki, Greece.
- [3.57] N. M. Kimoulakis, A. G. Kladas "Modeling and Control of a Coupled Electromechanical System Exploiting Heave Motion, for Energy Conversion from Sea Waves", Proceedings of the IEEE 39th Power Electronics Specialists Conference PESC'08, June 15-19, 2008, Rhodes, Greece.
- [3.58] Nicola Bianchi, "Electrical Machine Analysis Using Finite Elements", CRC Press, 2005
- [3.59] N. M. Kimoulakis, S. A. Papathanassiou and A. G. Kladas, « Design and Modeling of the Electric Part of an Experimental Power Plant from Sea Waves», Proceedings of the 16th International Conference on Electrical Machines, 5-8 September 2004, Cracow, Poland, pp. 467-472.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΑΣ "ΜΕΙΚΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΑΥΣΕΩΝ" ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

#### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων και συστημάτων ηλεκτρομηχανικής μετατροπής της ενέργειας, απαιτεί μεταξύ άλλων την ακριβή γνώση της διαμόρφωσης και της χωρικής κατανομής του μαγνητικού πεδίου σε ένα μαγνητικό κύκλωμα.

Η διαδικασία του ακριβούς προσδιορισμού ενός μαγνητικού πεδίου μέσω της αναλυτικής λύσης των εξισώσεων Maxwell που το περιγράφουν, προϋποθέτει την υιοθέτηση παραδοχών και απλοποιήσεων σχετικά με την πολυπλοκότητα της μελετώμενης γεωμετρίας και τα χαρακτηριστικά των υλικών που την συνθέτουν, έτσι ώστε η λύση αφενός να είναι επιτεύξιμη και αφετέρου να προκύπτει με την λιγότερη δυνατή υπολογιστική ισχύ.

Αποτέλεσμα αυτών των συμβάσεων, είναι να περιορίζεται σημαντικά το πεδίο εφαρμογών των μεθόδων χρήσης αμιγώς αναλυτικών τεχνικών για την μελέτη μαγνητικών πεδίων, ενώ σε πολλές περιπτώσεις σχεδίασης ηλεκτρομηχανικών συστημάτων είναι επιπλέον αναγκαία και η χρήση απλών εμπειρικών κανόνων [4.1].

#### 4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων του μαγνητικού πεδίου [4.17], επιτρέπει την ανάλυση προβλημάτων και την περιγραφή της συμπεριφοράς ηλεκτρομηχανικών συστημάτων μετατροπής της ενέργειας, χωρίς τους περιορισμούς στους οποίους υπόκεινται οι αναλυτικές τεχνικές επίλυσης των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η χρήση αριθμητικών τεχνικών, βρίσκει εφαρμογή στην επίλυση στατικών, μη στατικών, γραμμικών, μη γραμμικών προβλημάτων, ορισμένα σε γεωμετρικό χώρο μίας, δύο ή τριών διαστάσεων [4.18].

Μια αριθμητική μέθοδος ανάλυσης, υπολείπεται σε ακρίβεια σε σχέση με την αντίστοιχη αναλυτική λύση του ίδιου προβλήματος, καθώς η λύση που παρέχει είναι προσεγγιστική. Η σημαντική όμως αύξηση της απόδοσης των ηλεκτρονικών υπολογιστών, σε συνδυασμό με την εξέλιξη των αριθμητικών τεχνικών ανάλυσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, επιτυγχάνει σήμερα, βέλτιστη ανάλυση και ελαχιστοποίηση του εισερχόμενου σφάλματος στον προσδιορισμό και την απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου ηλεκτρομηχανικών διατάξεων και συστημάτων [4.2].

Το έλλειμμα σε ακρίβεια σε σχέση με την αναλυτική μέθοδο λύσης, οφείλεται στο ότι μια αριθμητική μέθοδος, δεν επιλύει το συνεχές πρόβλημα όπως αυτό εκφράζεται από τις διαφορικές εξισώσεις του πεδίου, αλλά κάποιο αντίστοιχο διακριτό πρόβλημα. Έτσι, για την περίπτωση της μελέτης ενός μαγνητικού πεδίου, δεν υπολογίζεται το ζητούμενο μέγεθος (συνήθως διανυσματικό ή βαθμωτό δυναμικό) στο συνεχές πεδίο ορισμού της συνάρτησης, αλλά σε ένα αριθμό "κατάλληλα" επιλεγμένων διακριτών σημείων του πεδίου ορισμού.

Με την βοήθεια των αριθμητικών μεθόδων επίλυσης, οι διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, με αγνώστους τις τιμές του δυναμικού στα προεπιλεγμένα σημεία. Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων παρέχει την τιμή του δυναμικού επί αυτών των σημείων, ενώ η τιμή επί των υπολοίπων σημείων του γεωμετρικού χώρου, προκύπτει αναγωγικά με την βοήθεια κατάλληλων συναρτήσεων παρεμβολής.

Είναι φανερό ότι ο τρόπος και η διαδικασία επιλογής των διακριτών σημείων για την εφαρμογή μιας αριθμητικής τεχνικής επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων, επικουρεί στην επίτευξη βέλτιστης λύσης, όταν καταφέρει να ισοσταθμίζονται αφενός ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός σημείων που μπορεί να εξασφαλίσει λύση με ικανοποιητική ακρίβεια με τον μέγιστο δυνατό αριθμό σημείων που επιτρέπει την επίτευξη λύσης εντός εύλογου χρόνου και με την ελάχιστη δυνατή υπολογιστική ισχύ. Το υπεισερχόμενο σφάλμα δεν εξαρτάται μόνο από την διακριτοποίηση του χώρου, αλλά και από την ίδια την αριθμητική μέθοδο που επιλέγεται για την επίλυση του προβλήματος.

Οι σημαντικότερες αριθμητικές μέθοδοι μπορούν να καταταχθούν σε τρία κυρίως είδη, αυτό της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών, της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και της μεθόδου των οριακών στοιχείων.

#### 4.2.1. Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών βασίζεται στην διακριτοποίηση της προς επίλυση διαφορικής εξισώσεως. Σε εφαρμογές πεδιακής ανάλυσης, οι παράγωγοι προσεγγίζονται με τη βοήθεια διαφόρων αλγορίθμων, σαν λόγοι διαφορών του δυναμικού των κόμβων προς τις αντίστοιχες αποστάσεις μεταξύ τους. Η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί ένα ομοιόμορφο πλέγμα, όπου οι κόμβοι τοποθετούνται σε γραμμές που τέμνονται ορθογωνικά. Αυτή η προϋπόθεση χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή όταν οι οριακές συνθήκες είναι του τύπου Neumann ή του τύπου Cauchy, περιλαμβάνουν δηλαδή την κάθετη παράγωγο.

#### 4.2.2. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες αριθμητικές τεχνικές για την πεδιακή ανάλυση διατάξεων δισδιάστατης ή τρισδιάστατης γεωμετρίας που περιλαμβάνουν υλικά με μη γραμμικά χαρακτηριστικά, όπως είναι οι πάσης φύσης ηλεκτρικές μηχανές [4.3].

Η συγκεκριμένη μέθοδος, δεν διακριτοποιεί την διαφορική εξίσωση αλλά κάποια ολοκληρωτική μορφή που προκύπτει από αυτήν. Από φυσική άποψη η ολοκληρωτική εξίσωση αντιστοιχεί στην αναζήτηση του ακρότατου της ενέργειας.

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το εξεταζόμενο πεδίο αναπαρίσταται από μια ομάδα πεπερασμένου αριθμού στοιχείων [4.19]. Η διακριτοποίηση του χώρου πραγματοποιείται με τρίγωνα ή τετράεδρα, εάν το πρόβλημα είναι δισδιάστατο ή τρισδιάστατο, αντίστοιχα. Έτσι, ένα συνεχές φυσικό πρόβλημα μετατρέπεται σε διακριτό πρόβλημα πεπερασμένων στοιχείων με αγνώστους, τις τιμές του δυναμικού (διανυσματικού ή βαθμωτού), στους κόμβους των κορυφών τους όπως ήδη έχει αναφερθεί στην παράγραφο §3.1.3.1.

Σύμφωνα με την μέθοδο, το διακριτό πρόβλημα προκύπτει χωρίζοντας τον χώρο σε υποχώρους (στοιχεία) και οι τιμές του πεδίου στο εσωτερικό των στοιχείων (τριγώνων ή τετράεδρων), μπορούν να προσεγγιστούν με την βοήθεια των τιμών στις κορυφές (κόμβους) και κατάλληλων συναρτήσεων παρεμβολής (συναρτήσεις μορφής). Η μέθοδος αυτή προσαρμόζεται εύκολα σε περιπτώσεις που παρουσιάζουν πολύπλοκη γεωμετρία γι' αυτό και είναι η επικρατέστερη.

#### 4.2.3. Μέθοδος οριακών στοιχείων

Η μέθοδος των οριακών στοιχείων προκύπτει από διακριτοποίηση της ολοκληρωτικής εξίσωσης η οποία είναι μαθηματικά ισοδύναμη με την αρχική μερική διαφορική εξίσωση (MΔE) που περιγράφει το εξεταζόμενο πρόβλημα. Ο μετασχηματισμός αυτής της διαφορικής εξίσωσης οδηγεί σε διατύπωση μίας ολοκληρωτικής εξίσωσης πάνω στο σύνορο του εξεταζόμενου χώρου και ενός ολοκληρώματος το οποίο συσχετίζει τη λύση στο σύνορο με τη λύση στα υπόλοιπα σημεία του χώρου. Ο μετασχηματισμός αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο για συγκεκριμένες κατηγορίες ΜΔΕ. Έτσι, η μέθοδος των οριακών στοιχείων (ΟΣ) δε μπορεί να εφαρμοστεί σε τόσο ευρύ φάσμα εφαρμογών, όσο η μέθοδος των οριακών στοιχείων μπορεί να εφαρμοστεί, αποτελεί συνήθως μία αριθμητική μέθοδο πιο εύχρηστη και υπολογιστικά αποδοτική από τη ΜΠΣ [4.7], [4.8], [4,11].

Τα προτερήματα της μεθόδου οριακών στοιχείων συνίστανται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι απαιτεί διακριτοποίηση μόνο του συνόρου (ή των συνόρων) του πεδίου ορισμού της ΜΔΕ (ενώ στην περίπτωση της ΜΠΣ απαιτείται διακριτοποίηση όλου του πεδίου ορισμού της ΜΔΕ). Έτσι, το εξεταζόμενο πρόβλημα μειώνεται αποδοτικά κατά μία διάσταση: για παράδειγμα, μία εξίσωση που περιγράφει ένα τρισδιάστατο πρόβλημα μετασχηματίζεται σε ολοκληρωτική εξίσωση πάνω στην εξωτερική του επιφάνεια, μετατρέποντας έτσι το πρόβλημα σε δισδιάστατο. Σε περιπτώσεις που το εξεταζόμενο πεδίο είναι εξωτερικό του συνόρου, η έκταση του πεδίου είναι άπειρη και τα πλεονεκτήματα της χρήσης οριακών στοιχείων γίνονται ακόμη πιο εμφανή, καθώς η εξίσωση που περιγράφει τον άπειρο χώρο μετασχηματίζεται σε εξίσωση πάνω στο πεπερασμένο σύνορο [4.9], [4.10].

#### 4.2.4. Μεικτές μέθοδοι ανάλυσης μαγνητικών πεδίων

Σε πολλές περιπτώσεις ανάλυσης σύνθετων προβλημάτων με ιδιαιτερότητες που μπορεί να οφείλονται, σε πολύπλοκη γεωμετρία, στην έντονη παρουσία αρμονικών αλλά και την μεταβολή των μαγνητικών χαρακτηριστικών των υλικών εξαιτίας κυματομορφών PWM, στην παρουσία υλικών που εκτείνονται στο άπειρο, ή ακόμη στην μελέτη συζευγμένων προβλημάτων πεδιακής και δυναμικής ανάλυσης, βέλτιστη λύση μπορεί να προκύψει με την χρήση αλγορίθμων που ενσωματώνουν μεικτές τεχνικές ανάλυσης.

Είναι δυνατή η κατασκευή αλγόριθμων οι οποίοι να συνδυάζουν περισσότερες τις μιας αριθμητικές τεχνικές αλλά και αναλυτικές λύσεις σε υποχώρους του πεδίου ορισμού του προβλήματος, με αποτέλεσμα την αύξηση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου και επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας υπολογισμών.

Οι συχνότερα απαντώμενες στην βιβλιογραφία μεικτές-υβριδικές τεχνικές ανάλυσης αφορούν το συνδυασμό μεθόδου πεπερασμένων και οριακών στοιχείων [4.15], [4.16], καθώς και της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με αναλυτικές λύσεις [4.20], [4.23], [4.21].

#### 4.3 ΜΕΙΚΤΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ

Η μεικτή τεχνική πεπερασμένων στοιχείων – αναλυτικών λύσεων, ενσωματώνει ένα ειδικό στοιχείο - μακροστοιχείο στο διάκενο βασισμένο στην αναλυτική λύση της εξίσωσης Laplace, σε συνδυασμό με τις τυποποιημένες δισδιάστατες τεχνικές πεπερασμένων στοιχείων για τον υπόλοιπο εκτός διακένου χώρο.

Προτάθηκε αρχικά στην αναφορά [4.20] για εφαρμογή του σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων με σκοπό την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών, ενώ ακολούθησαν και άλλες ερευνητικές εργασίες στις οποίες χρησιμοποιήθηκε και βελτιώθηκε το μακροστοιχείο [4.21], [4.22].

Ακόμη, έχει ήδη παρουσιαστεί μεικτή τεχνική πεπερασμένων στοιχείων αναλυτικών λύσεων, με χρήση του ειδικού μακροστοιχείου στο διάκενο για υλοποίηση σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων, κατάλληλη για την προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου σύγχρονων στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών με κεκλιμένους επιφανειακούς μαγνήτες στον δρομέα [4.12], [4.23 – 4.25]. Ειδική προσαρμογή του μακροστοιχείου εφαρμογής αναλυτικής λύσης στο διάκενο, για την περίπτωση στρεφόμενων αξονικών μηχανών γίνεται στην αναφορά [4.26]

#### 4.3.1. Δομή πινάκων ειδικού μακροστοιχείου στο διάκενο για εφαρμογή σε σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων

Στο διάκενο των ηλεκτρικών μηχανών, έχοντας ως δεδομένο ότι η μαγνητική διαπερατότητα είναι σταθερή και επίσης ότι δεν υπάρχουν πηγές ρεύματος, η κατανομή του μαγνητικού πεδίου περιγράφεται από την εξίσωση Laplace (μ $\nabla^2 \overline{A} = 0$ ). Έτσι, στην περίπτωση δισδιάστατου κυλινδρικού συστήματος συντεταγμένων η γενική λύση για το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό, χρησιμοποιώντας την μέθοδο χωρισμού των μεταβλητών μπορεί να διατυπωθεί σύμφωνα με την σχέση (4.1) [4.23], [4.17], [4.4}, [4.5].

$$A_{(r,\theta)} = \sum_{\lambda = -\infty}^{\infty} R_{\lambda}(r) \cdot \Theta_{\lambda}(\theta)$$
(4.1)

όπου λ είναι μια αυθαίρετη σταθερά και μπορεί να πάρει ακέραιες τιμές σύμφωνα με την σχέση (4.2) [4.25].

$$A(r,\theta) = (B_0 \ln(r) + C_0)(D_0\theta + E_0) + \int_{-\infty}^{+\infty} (B_\lambda r^\lambda + C_\lambda r^{-\lambda})(D_\lambda \cos(\lambda\theta) + E_\lambda \sin(\lambda\theta)) d\lambda$$
(4.2)

όπου B0, C0, D0, E0, Bλ, Cλ, Dλ, Ελ είναι σταθερές οι οποίες θα προσδιοριστούν από τις οριακές συνθήκες. Η περιοδική συνάρτηση  $A(r,\theta)$ , χρησιμοποιώντας όρους της σειράς Fourier από την σχέση (4.2) μπορεί να εκφραστεί από την σχέση (4.3).

$$A(r,\theta) = \sum_{i=1}^{ntot} \alpha_i(r,\theta) A_i$$
(4.3)

όπου  $\alpha_i(r,\theta)$  είναι συναρτήσεις του r και θ, A<sub>i</sub> είναι οι κομβικές τιμές του A στο διάκενο και *ntot* είναι ο συνολικός αριθμός κόμβων που τοποθετούνται στα όρια του διακένου. Ο υπολογισμός των σταθερών της εξίσωσης (4.1) μπορεί να γίνει με τη χρησιμοποίηση της συμβατότητας μεταξύ των συναρτήσεων  $\alpha_i(r,\theta)$  και της σταθερής μορφής που έχουν οι συναρτήσεις πεπερασμένων στοιχείων κατά μήκος των ορίων στο διάκενο, [4.27- 4.31]. Η συνάρτηση της εξίσωσης ελαχιστοποίησης της ενέργειας στο διάκενο καθορίζεται από την σχέση (4.4) [4.25].

$$\frac{\partial F^{g}}{\partial A_{i}} = \frac{1}{\mu_{0}} \sum_{j=1}^{\text{ntot}} A_{j}^{g} \iint_{\Omega_{\epsilon}} \overline{\nabla} \alpha_{i} \cdot \overline{\nabla} \alpha_{j} d\Omega_{g} = \frac{1}{\mu_{0}} \sum_{j=1}^{\text{ntot}} A_{j}^{g} \int_{\Gamma_{g}} \alpha_{i} \frac{\partial \alpha_{j}}{\partial n} d\Gamma_{g}$$
(4.4)

όπου  $\mu_0$  είναι η διαπερατότητα αέρα,  $\Omega_g$  είναι η περιοχή διακένου και  $\Gamma_g$  είναι το εξωτερικό όριο του κενού αέρος. Τελικά το σύστημα των εξισώσεων που λύνονται μπορεί να γραφτεί σε μορφή πινάκων σύμφωνα με την σχέση (4.5).

$$[S] [A] = [F]$$
(4.5)

όπου [S] είναι ο πίνακας δυσκαμψίας, Α είναι ο πίνακας κομβικών τιμών του άγνωστου διανύσματος δυναμικού και [F] ο πίνακας πηγής. Ο σταθερός πίνακας δυσκαμψίας πεπερασμένων στοιχείων είναι ορισμένος ενώ οι κόμβοι που περιβάλλουν το διάκενο (μέρος μακροστοιχείου) διαμορφώνουν τοπικά έναν πλήρη υποπίνακα με όρους της μορφής που δίνει η σχέση (4.6).

$$\mathbf{s}_{ij}^{g} = \frac{1}{\mu_{0}} \int_{\Gamma_{g}} \alpha_{i} \frac{\partial \alpha_{j}}{\partial n} d\Gamma_{g}$$
(4.6)

#### 4.3.2. Δομή δισδιάστατου ειδικού μακροστοιχείου σε σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων για εφαρμογή σε γραμμικές ηλεκτρικές μηχανές

Η ενσωμάτωση της μεικτής τεχνικής πεπερασμένων στοιχείων - αναλυτικών λύσεων σε υπολογιστικούς κώδικες με σκοπό την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου ειδικών τύπων μη στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών όπως είναι οι γραμμικές μηχανές μονίμων μαγνητών, απαιτεί την κατάλληλη προσαρμογή των δομικών πινάκων της μεικτής τεχνικής, ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή τους σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

Στην περίπτωση του δισδιάστατου συστήματος καρτεσιανών συντεταγμένων, η κατανομή στο διάκενο μιας γραμμικής ηλεκτρικής μηχανής, θεωρώντας την μαγνητική διαπερατότητα σταθερή και εφόσον στο διάκενο δεν υπάρχουν πηγές ρεύματος, η κατανομή του μαγνητικού πεδίου περιγράφεται από την σχέση (4.7) [4.6], [4.32].

$$\frac{\partial^2 A(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x,y)}{\partial y^2} = 0$$
(4.7)

όπου το A(x,y) είναι η συνιστώσα κατά την διεύθυνση z του διανυσματικού δυναμικού A.

Κατά αναλογία με τις στρεφόμενες, μπορούν και στις γραμμικές ηλεκτρικές μηχανές να αναζητηθούν κατασκευαστικές συμμετρίες, οι οποίες οδηγούν σε περιοδικότητα της κατανομής του μαγνητικού πεδίου που μπορεί να περιγραφεί από μια εξίσωση που έχει την μορφή της σχέσης (4.8).

$$A(x, y) = A(x + x_0, y)$$
(4.8)

Σε αντιστοιχία με την σχέση (4.2) που ισχύει για τις κυλινδρικές συντεταγμένες, μπορεί να διατυπωθεί η σχέση (4.9) η οποία αποτελεί λύση της σχέσης (4.7) έχοντας λάβει υπόψη και τις συνοριακές συνθήκες που περιγράφει η σχέση (4.8) [4.26].

$$A(x,y) = F_o \cdot y + G_o + \sum_{n=1}^{\infty} (F_n \cdot e^{\lambda_n y} + G_n \cdot e^{-\lambda_n y}) \cdot (H_n \cos \lambda_n x + K_n \sin \lambda_n x)$$
(4.9)

όπου  $\lambda_n=\pm 2n\pi/x_o$  και  $F_o$ ,  $G_o$ ,  $F_n$ ,  $G_n$ ,  $H_n$ ,  $K_n$  είναι σταθερές οι οποίες θα προσδιοριστούν από τις οριακές συνθήκες.

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η γεωμετρία ενός πολικού βήματος της ειδικής γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών που σχεδιάστηκε [4.33 – 4.36], για της οποίας την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε η "νέα μεικτή τεχνική πεπερασμένων στοιχείων αναλυτικών λύσεων".

Η γεωμετρία παρουσιάζει περιοδικότητα του μαγνητικού πεδίου σύμφωνα με την σχέση (4.8) για μήκος πολικού βήματος x<sub>0</sub>=45mm, με βάση τα αναλυτικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής, όπως αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3 του κεφαλαίου 3.

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζονται οι κόμβοι και το πλέγμα στοιχείων που έχει δημιουργηθεί σε όλη την γεωμετρία εκτός του χώρου του διακένου, για την χρησιμοποίηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου της μηχανής. Στην μεγέθυνση  $M_1$  του σχήματος, εστιάζεται ο χώρος του διακένου, στον οποίο δρα το ειδικό μακροστοιχείο και όπου ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου γίνεται με αναλυτική λύση.



Σχήμα 4.1: Γεωμετρία ενός πολικού βήματος γραμμικής μηχανής μονίμων μαγνητών και διάταξη κόμβων πλέγματος στα όρια του διακένου, για εφαρμογή της "μεικτής τεχνικής πεπερασμένων στοιχείων - αναλυτικών λύσεων"

Για να επιτευχθεί συνέχεια της συνάρτησης A(x,y) που δίνεται από την σχέση (4.9) στα κοινά όρια των πεδίων εφαρμογής αναλυτικής λύσης και μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, με άλλα λόγια στις ευθείες y=a και y=b όπως εμφανίζονται στην μεγέθυνση M<sub>2</sub> του σχήματος 4.1, θα πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη που περιγράφει η σχέση (4.10).

$$A(x,c) = \sum_{i=k}^{l} a_i(x,c) \cdot A_i^b$$
(4.10)

όπου  $A_i^b$  είναι η τιμή του διανυσματικού δυναμικού στον κόμβο *i* στα όρια του μακροστοιχείου,  $a_i(x,c)$  είναι το πολυώνυμο Lagnange όπως ορίζεται από την συνάρτηση μορφής των τριγωνικών στοιχείων πρώτου βαθμού [4.22], {4.26] και ο συντελεστής *k* ορίζεται από την σχέση (4.11).

$$k = \begin{cases} 1 & \kappa \alpha i \ l = s & \gamma i \alpha & c = a \\ s + 1 & \kappa \alpha i \ l = t & \gamma i \alpha & c = b \end{cases}$$
(4.11)

Η συνάρτηση μορφής  $a_i(x,c)$  για τα τριγωνικά στοιχεία πρώτου βαθμού εκφράζεται από την σχέση (4.12) [4.4], [4.26].

$$a_{i}(x,c) = \begin{cases} \frac{x - x_{i-1}}{x_{i} - x_{i-1}} & \gamma_{i}\alpha & x_{i-1} \leq x \leq x_{i} \\ \frac{x - x_{i+1}}{x_{i} - x_{i+1}} & \gamma_{i}\alpha & x_{i} \leq x \leq x_{i+1} \\ 0 & \gamma_{i}\alpha & x_{1} \leq x \leq x_{i-1} \\ 0 & \gamma_{i}\alpha & x_{i+1} \leq x \leq x_{1} + x_{0} \end{cases}$$
(4.12)

Η σχέση (4.12), μπορεί να εκφραστεί σε σειρά Fourier από την σχέση (4.13).

$$a_i(x,c) = a_{0i} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_{ni} \cos \lambda_n x + b_{ni} \sin \lambda_n x]$$

$$(4.13)$$

όπου  $a_{0i}$ ,  $a_{ni}$  και  $b_{ni}$  μπορούν να υπολογιστούν από την σχέση (4.14).

$$a_{0i} = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{x_0}$$

$$a_{ni} = -\frac{4}{x_0} \cdot \frac{1}{\lambda_n^2} \left[ \frac{1}{x_i - x_{i-1}} \sin \frac{\lambda_n (x_i + x_{i-1})}{2} \sin \frac{\lambda_n (x_i - x_{i-1})}{2} + \frac{1}{x_i - x_{i+1}} \sin \frac{\lambda_n (x_{i+1} + x_i)}{2} \sin \frac{\lambda_n (x_{i+1} - x_i)}{2} \right]$$

$$b_{ni} = \frac{4}{x_0} \cdot \frac{1}{\lambda_n^2} \left[ \frac{1}{x_i - x_{i-1}} \sin \frac{\lambda_n (x_i - x_{i-1})}{2} \cos \frac{\lambda_n (x_i + x_{i-1})}{2} + \frac{1}{x_i - x_{i+1}} \sin \frac{\lambda_n (x_{i+1} - x_i)}{2} \cos \frac{\lambda_n (x_{i+1} + x_i)}{2} \right]$$

$$(4.14)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των συντελεστών  $a_{0i}$ ,  $a_{ni}$  και  $b_{ni}$  όπως αυτές υπολογίζονται από την σχέση (4.14), στην σχέση (4.13), μπορούν να υπολογιστούν τα  $a_i(x,a)$  και  $a_i(x,b)$  τα οποία με την σειρά τους αντικαθιστάμενα στην σχέση (4.10) μας δίνουν τα αντίστοιχα A(x,a)και A(x,b). Τα A(x,a) και A(x,b) μπορούν επίσης να υπολογιστούν από την σχέση (4.9), οπότε εξισώνοντας τα αποτελέσματα των σχέσεων (4.9) και (4.10), υπολογίζονται τελικά οι σταθερές  $F_o$ ,  $G_o$ ,  $F_n$ ,  $G_n$ ,  $H_n$ ,  $K_n$  της σχέσης (4.9). Η λύση τελικά για το διανυσματικό δυναμικό στο χώρο του διακένου καταλήγει να έχει την μορφή της σχέσης (4.15).

$$A(x, y) = \sum_{i=1}^{t} a_i^{\varepsilon}(x, y) A_i^{b}$$
(4.15)

όπου  $A_i^b$  είναι η τιμή του διανυσματικού δυναμικού στον κόμβο *i* και *t* είναι ο συνολικός αριθμός κόμβων που βρίσκονται στα σύνορα του διακένου. Επίσης το  $a_i^e(x,y,)$  υπολογίζεται για το άνω (y=b) και κάτω (y=a) σύνορο του διακένου και δίνεται από την σχέση (4.16).

$$a_{i}^{\varepsilon}(x,c) = \frac{y-c}{c'-c} \cdot \frac{a_{0i}}{2} + \sum_{1}^{\infty} \frac{e^{\lambda_{n}(y-c)} - e^{\lambda_{n}(c-y)}}{e^{\lambda_{n}(c'-c)} - e^{\lambda_{n}(c-c')}} \cdot (a_{ni}\cos\lambda_{n}x + b_{ni}\sin\lambda_{n}x)$$
(4.16)

όπου το c και c' ορίζονται στην σχέση (4.17).

$$c = \begin{cases} a \quad \kappa \alpha i \quad c' = b \qquad \acute{o} \tau \alpha v \quad i \in \{1, 2, ..., s\} \\ b \quad \kappa \alpha i \quad c' = a \qquad \acute{o} \tau \alpha v \quad i \in \{s + 1, ..., t\} \end{cases}$$
(4.17)

Η συνάρτηση της εξίσωσης ελαχιστοποίησης της ενέργειας στο διάκενο καθορίζεται από την σχέση (4.18) [4.12], [4.25].

$$\frac{\partial F^{g}}{\partial A_{i}} = \frac{1}{\mu_{0}} \sum_{j=1}^{\text{ntot}} A_{j}^{g} \iint_{\Omega_{\varepsilon}} \overline{\nabla} \alpha_{i} \cdot \overline{\nabla} \alpha_{j} d\Omega_{g} = \frac{1}{\mu_{0}} \sum_{j=1}^{\text{ntot}} A_{j}^{g} \int_{\Gamma_{g}} \alpha_{i} \frac{\partial \alpha_{j}}{\partial n} d\Gamma_{g}$$
(4.18)

όπου  $\mu_0$  είναι η διαπερατότητα αέρα,  $\Omega_g$  είναι η περιοχή διακένου και  $\Gamma_g$  είναι το εξωτερικό όριο του διακένου. Τελικά το σύστημα των εξισώσεων που λύνονται μπορεί να γραφτεί με την μορφή πινάκων όπως στην σχέση (4.19).

$$[\mathbf{S}] [\mathbf{A}] = [\mathbf{F}] \tag{4.19}$$

όπου [S] είναι ο πίνακας δυσκαμψίας, [A] είναι ο πίνακας κομβικών τιμών του άγνωστου διανυσματικού δυναμικού και [F] ο πίνακας πηγής.

Ο σταθερός πίνακας δυσκαμψίας πεπερασμένων στοιχείων είναι ορισμένος ενώ οι κόμβοι που περιβάλλουν το διάκενο (χώρος δράσης μακροστοιχείου) διαμορφώνουν τοπικά έναν πλήρη υποπίνακα με όρους ποτ δίνονται από την σχέση (4.20).

$$\mathbf{s}_{ij}^{g} = \frac{1}{\mu_{0}} \int_{\Gamma_{g}} \alpha_{i} \frac{\partial \alpha_{j}}{\partial \mathbf{n}} d\Gamma_{g}$$
(4.20)

#### 4.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΙΚΤΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ

Στην γενικότερη μορφή της η αριθμητική προσέγγιση των εξισώσεων ενός μαγνητικού πεδίου στηρίζεται στον προσδιορισμό των ακρότατων μιας εξίσωσης συναρτώμενης με την μαγνητική ενέργεια του συστήματος. Η ποσότητα που σχετίζεται με την ενέργεια του μαγνητικού πεδίου αποκαλείται συνήθως και συναρτησιακή (functional), επειδή είναι συνάρτηση τόσο του δυναμικού όσο και της παραγώγου του. Η απαιτούμενη λύση

λαμβάνεται όταν η κατανομή των δυναμικών στους κόμβους του πλέγματος είναι τέτοια ώστε ο ρυθμός μεταβολής της συναρτησιακής να είναι μηδέν για μικρές μεταβολές του δυναμικού.

Στην περίπτωση χρήσης της προτεινόμενης μεικτής τεχνικής πεπερασμένων στοιχείων αναλυτικών λύσεων σε καρτεσιανές συντεταγμένες για την μοντελοποίηση γραμμικών γεννητριών μόνιμου μαγνήτη, η συναρτώμενη με την ενέργεια συναρτησιακή μπορεί να αναλυθεί σε δύο επιμέρους συνιστώσες F<sup>fem</sup> και F<sup>g</sup> [4.26].

Η συνιστώσα  $F^g$  σχετίζεται με την αποθηκευμένη ενέργεια στον χώρο του διακένου όπου δρα το ειδικό μακροστοιχείο και όπου η ανάλυση του πεδίου γίνεται με αναλυτικό τρόπο. Η σχέση (4.18) εκφράζει την εξίσωσης ελαχιστοποίησης της συναρτησιακής  $F^g$  στο διάκενο της γραμμικής μηχανής.

Η συνιστώσα F<sup>fem</sup>, σχετίζεται με την ενέργεια στον χώρο που εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, και δίνεται από τη σχέση

$$F = \iint_{\Omega} \left[ \int_{0}^{B} v(b) b db - J_{s} A + \int_{0}^{A} \sigma \frac{\partial a}{\partial t} da \right] dx dy - \oint_{\Gamma} v \frac{\partial A}{\partial n} A d\Gamma$$
(4.21)

όπου Ω είναι ο χώρος επίλυσης και ∂Α/∂η είναι η κάθετη παράγωγος του Α στο σύνορο Γ.

Η ελαχιστοποίηση της συνιστάμενης συναρτησιακής F στην συνολική γεωμετρία εκφράζεται από την σχέση (4.22)

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial [\mathbf{A}_{k}]} = \sum_{k=1}^{\text{ntot}} \frac{\partial \mathbf{F}^{g}}{\partial [A]^{g}} + \frac{\partial \mathbf{F}^{\text{ferm}}}{\partial [A]^{fem}}$$
(4.22)

# 4.4.1. Μοντελοποίηση συζευγμένης πεδιακής – κυκλωματικής λειτουργίας σε γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών

Για την ανάλυση και προσομοίωση της συνολικής συμπεριφοράς της γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών, αναπτύχθηκε ένα νέο συζευγμένο μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας της μηχανής υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης.

Το νέο μοντέλο ενσωματώνει κώδικα, υλοποιημένο σε προγραμματιστικό περιβάλλον fortran, για την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου της μηχανής με την χρήση της μεικτής τεχνικής πεπερασμένων στοιχείων – αναλυτικών λύσεων.

Ένας δεύτερος κώδικας υλοποιημένος σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab, χρησιμοποιεί μεταξύ άλλων και τα αποτελέσματα της πεδιακής ανάλυσης για να προσομοιώσει τη δυναμική συμπεριφορά της γραμμικής γεννήτριας υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης.

Η υλοποίηση της σύζευξης μεταξύ των δύο επιμέρους ρουτίνων, πεδιακής και κυκλωματικής ανάλυσης γίνεται μέσω ενός τρίτου κώδικα, υλοποιημένου επίσης σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab, παρέχοντας έτσι την δυνατότητα της μελέτης και παράστασης των χρονικών μεταβολών τόσο των μαγνητικών όσο και των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της γραμμικής γεννήτριας.

Η δομή του συζευγμένου μοντέλου, για προσομοίωση της συμπεριφοράς της γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής από θαλάσσιο κυματισμό, φαίνεται στο σχήμα



Σχήμα 4.2: Δομή νέου συζευγμένου μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών, σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής από θαλάσσιο κυματισμό.

#### 4.4.2. Βελτιστοποίηση γεωμετρίας γραμμικής γεννήτριας για ελαχιστοποίηση δύναμης ευθυγράμμισης

Ειδικές εφαρμογές όπως είναι η ηλεκτροπαραγωγή από θαλάσσιο κυματισμό, απαιτούν ειδική σχεδίαση της γεννήτριας, ώστε η λειτουργία της να είναι προσαρμοσμένη στα χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος κυματισμού.

Το νέο συζευγμένο μοντέλο παρέχει την δυνατότητα βελτιστοποίησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της γεννήτριας με στόχο την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής από θαλάσσιο κυματισμό [4.36].

Ένα από τα κρίσιμα χαρακτηριστικά της γραμμικής γεννήτριας, το οποίο επηρεάζει την μέγιστη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας από τον προσπίπτοντα θαλάσσιο κυματισμό, είναι η ανθιστάμενη προς την κίνηση δύναμη που η γεννήτρια προβάλει, για λειτουργία χωρίς φορτίο. Το αντίστοιχο μέγεθος στην μελέτη των στρεφόμενων μηχανών, είναι η ροπή ευθυγράμμισης, οπότε για στην περίπτωση της ευθύγραμμης παλινδρόμησης της γραμμικής μηχανής, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον όρο "δύναμη ευθυγράμμισης" για να αναφερθούμε στην εφαπτομενική συνιστώσα της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης  $F_t$  που αναπτύσσεται στο διάκενο της γραμμικής γεννήτριας [4.27 – 4.31].

Η ανάπτυξη της δύναμης ευθυγράμμισης οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των επιφανειακών μαγνητών του δρομέα της γεννήτριας και των οδοντώσεων του στάτη [ 4.37], [4.38], [4.58].

Η κάθετη συνιστώσα  $F_n$  της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης  $F_{gap}$  στο διάκενο είναι ελκτική μεταξύ δρομέα και στάτη και είναι υπεύθυνη για την εμφάνιση φαινομένων εκκεντρότητας στις στρεφόμενες μηχανές και αντίστοιχα σε εμφάνιση διακυμάνσεων στο πάχος του διακένου στις γραμμικές μηχανές. Στην περίπτωση της υπό μελέτη τετράπλευρης γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών, οι κάθετες συνιστώσες  $F_n$  των ανά δύο απέναντι πλευρών αλληλοεξουδετερώνονται.

Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη στο διάκενο δίνεται από την σχέση (4.23) [4.5].

$$F_{gap} = \iint \frac{1}{2\mu_0} (B_n^2 - B_t^2) dS + \iint \frac{1}{\mu_0} B_n B_t dS$$
(4.23)

όπου ο πρώτος όρος του δεύτερου μέλους της σχέσης (4.23) αντιστοιχεί στην κάθετη συνιστώσα  $F_n$  και ο δεύτερος στην εφαπτομενική συνιστώσα  $F_t$  της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης  $F_{gap}$  και  $B_n$  και  $B_t$  είναι η κάθετη και εφαπτομενική συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής αντίστοιχα.

Στην περίπτωση ακέραιου αριθμού αυλάκων στάτη ανά πόλο, η δύναμη ευθυγράμμισης είναι ίση με *p* φορές την δύναμη ευθυγράμμισης που προβάλλεται από τον ένα πόλο [4.39].

Χρησιμοποιώντας το συζευγμένο μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας της γραμμικής γεννήτριας, εξετάστηκαν τέσσερις διαφορετικές διαμορφώσεις του μαγνήτη του δρομέα της μηχανής, με στόχο την γεωμετρική βελτιστοποίηση της γεννήτριας για να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση της εμφανιζόμενης δύναμης ευθυγράμμισης.



**Σχήμα 4.3:** Εναλλακτικές διαμορφώσεις μαγνήτη για την γραμμική γεννήτρια (a): ορθογωνικής διατομής (b): τραπεζοειδής άνω πλευρά

(c): τραπεζοειδής κάτω πλευρά (d): τραπεζοειδής χωνευτής τοποθέτησης

Στο σχήμα 4.3, παρουσιάζονται οι τέσσερις διαφορετικές γεωμετρίες μαγνήτη οι οποίες μελετήθηκαν. Σε όλες τις γεωμετρίες που εξετάστηκαν, η διατομή των μαγνητών θεωρήθηκε ίση με 160mm<sup>2</sup> όπως είχε υπολογιστεί κατά τον αρχικό σχεδιασμό της γραμμικής γεννήτριας. Επίσης στο σχήμα 4.4 παρουσιάζονται για τις αντίστοιχες περιπτώσεις, οι κατανομές του μαγνητικού πεδίου, όπως προσομοιώθηκα και απεικονίστηκαν με το μοντέλο μεικτής τεχνικής πεπερασμένων στοιχείων αναλυτικών λύσεων [4.36].





Σχήμα 4.4: Κατανομή του μαγνητικού πεδίου σε ένα πολικό βήμα της γραμμικής μηχανής, για διαφορετικές γεωμετρίες μαγνήτη με σταθερή διατομή 160mm<sup>2</sup>
 (a): ορθογωνικής διατομής
 (b): τραπεζοειδής άνω πλευρά
 (c): τραπεζοειδής κάτω πλευρά
 (d): τραπεζοειδής χωνευτής τοποθέτησης

#### 4.4.2.1. Μαγνήτης ορθογωνικής διατομής

Διάφορες γεωμετρίες μαγνητών ορθογωνικής διατομής εξετάστηκαν και μελετήθηκε η χρονική μεταβολή των συνιστωσών  $F_n$  και  $F_t$  σαν συνάρτηση του λόγου  $w/w_p$ , όπου w είναι το πλάτος του μαγνήτη και  $w_p$  είναι το μήκος ενός πολικού βήματος.

Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της κάθετης συνιστώσας  $F_n$  της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης στο διάκενο, η οποία είναι υπεύθυνη για ενδεχόμενα προβλήματα διακύμανσης της διάστασης του διακένου, κατά την κίνηση του δρομέα της γραμμικής μηχανής [4.36]. Στο ίδιο σχήμα, μπορούμε επίσης να παρατηρήσουμε ότι η αύξηση της τιμή του λόγου  $w/w_p$  επιδρά ανάλογα στην κάθετη συνιστώσα  $F_n$  της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης.

Στο σχήμα 4.6, παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της εφαπτομενικής συνιστώσας  $F_t$  της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης, δηλαδή η δύναμη ευθυγράμμισης, σαν συνάρτηση του λόγου  $w/w_p$ .

Η ανάλυση του πεδίου με την μεικτή τεχνική πεπερασμένων στοιχείων αναλυτικών λύσεων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η δύναμη ευθυγράμμισης ελαχιστοποιείται όταν ο λόγος  $w/w_p$  είναι ίσος με 0,7. Οι διαστάσεις του μαγνήτη που αντιστοιχούν σε αυτή την περίπτωση, είναι πλάτος 31,5 mm και ύψος 5,14 mm. Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζονται οι χρονικές μεταβολές της δύναμης F<sub>t</sub> για τις περιπτώσεις όπου ο λόγος  $w/w_p$  παίρνει τις τιμές 0,65, 0,68 και 0,7.



Σχήμα 4.5: Χρονική μεταβολή της κάθετης συνιστώσας F<sub>n</sub> της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης, για μετακίνηση του δρομέα κατά τρία πολικά βήματα με σταθερή ταχύτητα 0.9m/s.



Σχήμα 4.6: Χρονική μεταβολή της δύναμης ευθυγράμμισης σε συνάρτηση με την γεωμετρική διαμόρφωση ορθογωνικού μαγνήτη

Σε όλες τις περιπτώσεις διαφορετικών γεωμετριών που εξετάστηκαν για τους μαγνήτες, παρατηρήθηκε ότι η ανάπτυξη δύναμης ευθυγράμμισης εξαρτάται άμεσα από το ύψος του διακένου. Στο σχήμα 4.7, παρουσιάζεται για την περίπτωση μαγνητών ορθογωνικής διατομής, η μεταβολή της μέγιστης τιμής της εφαπτομενικής συνιστώσας  $F_t$  σαν συνάρτηση του λόγου  $w/w_p$  και του ύψους του διάκενου.



**Σχήμα 4.7:** Μεταβολή της μέγιστης τιμής της δύναμης ευθυγράμμισης για διάφορες γεωμετρίες ορθογωνικού μαγνήτη και διαφορετικά ύψη διακένου.

#### 4.4.2.2. Μαγνήτης τραπεζοειδούς διατομής

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην παράγραφο § 4.4.2, η ανάπτυξη της δύναμης ευθυγράμμισης οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των επιφανειακών μαγνητών του δρομέα της γεννήτριας και των οδοντώσεων του στάτη. Μια λύση για την μείωση της αναπτυσσόμενης δύναμης ευθυγράμμισης, θα μπορούσε να ενδεχομένως να προέλθει μέσω της βαθμιαίας αλληλεπίδρασης μεταξύ του μαγνήτη του δρομέα και των οδοντώσεων του στάτη [4.40], [4.41].

Η βαθμιαία αυτή αλληλεπίδραση μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλη γεωμετρική διαμόρφωση της διατομής του μαγνήτη ή με την τοποθέτηση κεκλιμένων μαγνητών επί του δρομέα [4.42], [4.43], [4.44].

Προκειμένου να διερευνηθούν οι πιθανές περιπτώσεις όπου με κατάλληλη γεωμετρική διαμόρφωση της διατομής του μαγνήτη θα μπορούσε να ελαχιστοποιηθεί η δύναμη ευθυγράμμισης, εξετάστηκαν αρκετές διαφορετικές διαμορφώσεις μαγνητών τραπεζοειδούς διατομής.

Ο λόγος  $w/w_p$  κρατήθηκε σταθερός και ίσος με 0,7, τιμή που εξασφαλίζει όπως ήδη αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, την ελαχιστοποίηση της εφαπτομενικής συνιστώσας της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης στην περίπτωση μαγνήτη με ορθογωνική διατομή.

Στην παραμετρική μελέτη της γεωμετρικής βελτιστοποίησης του επιφανειακού μαγνήτη, υιοθετήθηκε ο συντελεστής k/m, ο οποίος χαρακτηρίζει την κλίση των πλευρών του τραπεζίου όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3. Σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν το ύψος του διακένου, θεωρήθηκε ίσο με 2mm.

Η χρονικές μεταβολές της κάθετης συνιστώσας  $F_n$  της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης καθώς και της δύναμης ευθυγράμμισης  $F_t$ , παρουσιάζονται στα σχήματα 4.8 και 4.9 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.8: Χρονική μεταβολή της κάθετης συνιστώσας F<sub>n</sub> σε κενό φορτίο, για διαφορετικές διαμορφώσεις τραπεζοειδούς μαγνήτη και για κίνηση του δρομέα κατά ένα πολικό βήμα με ταχύτητα 0.9m/s



Σχήμα 4.9: Χρονική μεταβολή της δύναμης ευθυγράμμισης Ft σε κενό φορτίο, για διαφορετικές διαμορφώσεις τραπεζοειδούς μαγνήτη και για κίνηση του δρομέα κατά ένα πολικό βήμα με ταχύτητα 0.9m/s

Από τα σχήματα 4.5 έως 4.10 προκύπτει ότι η μικρότερη δύναμη ευθυγράμμισης εμφανίζεται στην περίπτωση του μαγνήτη ορθογωνικής διατομής με πλάτος το 70% του μήκους ενός πολικού βήματος. η περίπτωση αυτή όμως, παρουσιάζει την μεγαλύτερη εμφανιζόμενη κάθετη συνιστώσα  $F_n$  της αναπτυσσόμενης στο διάκενο ηλεκτρομαγνητικής δύναμης.

Η μικρότερη κάθετη συνιστώσα  $F_n$  εμφανίζεται στην περίπτωση του τραπεζοειδούς μαγνήτη με την μικρή του βάση σε επαφή με τον δρομέα της γραμμικής μηχανής. Πρόκειται για μια σημαντική παρατήρηση που αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σπουδαιότητα σε εφαρμογές που εμφανίζονται έντονα προβλήματα ευθυγράμμισης και εκκεντρότητας.

#### 4.4.3. Νέο δισδιάστατο μοντέλο μεικτής τεχνικής για την θεώρηση κεκλιμένων μαγνητών σε γραμμικές γεννήτριες

Η δισδιάστατη μελέτη και ανάλυση με αριθμητικές μεθόδους της κλίσης των αυλακώσεων για την περίπτωση των στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών, έχει ήδη αναφερθεί στην βιβλιογραφία [4.24], [4.45 – 4.48].

Επίσης εμφανίζεται στη βιβλιογραφία [4.12], [4.25], η περίπτωση χρήσης της μεικτής τεχνικής πεπερασμένων στοιχείων αναλυτικών λύσεων σε κυλινδρικές συντεταγμένες για την προσομοίωση κλίσης επιφανειακών μαγνητών σε στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές.

Μετά την προσαρμογή της μεθόδου της μεικτής τεχνικής για την περίπτωση καρτεσιανών συντεταγμένων για την εφαρμογή της σε ηλεκτρικές μηχανές με επίπεδο διάκενο όπως παρουσιάζεται στις παραγράφους §4.3.1 και §4.3.2, στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται ένα νέο μοντέλο χρήσης της συγκεκριμένης τεχνικής μοντελοποίησης για την θεώρηση κεκλιμένων μαγνητών στον δρομέα γραμμικών γεννητριών [4.33].

Η κλίση του μαγνήτη στο δρομέα της γραμμικής γεννήτριας, μπορεί να προσομοιωθεί κλιμακωτά, χρησιμοποιώντας την ταυτόχρονη συνδυασμένη λύση πολλαπλών στιγμιοτύπων με τον μαγνήτη σε διαφορετικές θέσεις, όπου όμως τα ρεύματα στα τυλίγματα του δρομέα επιβάλλονται ώστε να έχουν την ίδια τιμή.

Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζεται μια τρισδιάστατη άποψη της γραμμικής μηχανής με κεκλιμένους μαγνήτες στον δρομέα της. Στο τμήμα αριστερά του στάτη δίνεται μια ρεαλιστική άποψη των κεκλιμένων μαγνητών, ενώ στην δεξιά πλευρά του παρουσιάζεται παραστατικά ο τρόπος υλοποίησης της κλιμακωτής κλίσης που υιοθετείται για την μοντελοποίηση της λειτουργίας της γραμμικής γεννήτριας.



Σχήμα 4.10: Τρισδιάστατη αναπαράσταση των κεκλιμένων μαγνητών στο δρομέα της γραμμικής γεννήτριας

Προκειμένου να διαμορφώσουμε το ειδικό αναλυτικό στοιχείο (μακροστοιχείο) όπυ σύμφωνα με τις παραγράφους §4.3.1 και §4.3.2 δρα στην περιοχή του διακένου της γεννήτριας, προσομοιώνουμε κατ' αρχή την κλίση του μαγνήτη με δύο μόνο διατομές. Τα αντίστοιχα συστήματα εξισώσεων όπου με βάση την σχέση (4.19) πρέπει να επιλυθούν, μπορούν στην περίπτωση αυτή να γραφούν με την μορφή πινάκων και δίνονται από την σχέση (4.24).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}^{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F^{1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}^{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F^{2} \end{bmatrix}$$
(4.24)

Αθροίζοντας από την σχέση (4.24), προκύπτει ένα νέο σύστημα εξισώσεων. Με δεδομένο ότι οι όροι πεπερασμένων στοιχείων των πινάκων δυσκαμψίας και πηγών είναι ίδιοι για τις δύο διατομές, για έναν κόμβο *i* χωρίς την συμβολή κάποιου όρου από το αναλυτικό μακροστοιχείο, προκύπτει η σχέση (4.25).

$$\sum_{j=1}^{j \text{tot}} s_{ij} \left( A_{j}^{1} + A_{j}^{2} \right) = 2 f_{i}$$
(4.25)

όπου *jtot* είναι ο συνολικός αριθμός κόμβων που ανήκουν στο ίδιο στοιχείο με τον κόμβο *i*. Στην περίπτωση που για τον κόμβο *i* ληφθούν υπόψη και οι συνεισφορές του μακροστοιχείου οι όροι του πίνακα δυσκαμψίας δεν είναι ίδιοι για τις δύο διατομές και η αντίστοιχη εξίσωση δίνεται από την σχέση (4.26).

$$\sum_{j=1}^{\text{ntot}} s_{ij}^{g1} A_{j}^{1} + \sum_{j=1}^{\text{ntot}} s_{ij}^{g2} A_{j}^{2} = 0$$
(4.26)

όπου  $S_{ij}{}^{g1}$ ,  $S_{ij}{}^{g2}$  είναι οι όροι των υποπινάκων για τους κόμβους που περιβάλλουν το διάκενο (μέρος μακροστοιχείου) ενώ  $A_i{}^1$ ,  $A_i{}^2$  είναι οι τιμές του διανυσματικού δυναμικού στους κόμβους του διακένου για τις διατομές ένα και δύο αντίστοιχα.

Η σχέση (4.26) προκύπτει με άθροισμα από την σχέση (4.25) για τους κόμβους που περιλαμβάνουν τους όρους του μακροστοιχείου και δηλώνει ότι το άθροισμα των συνεισφορών των όρων του πίνακα δυσκαμψίας του μακροστοιχείου για τις δύο διατομές πρέπει να είναι μηδέν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η περιοχή διακένου δεν υπάρχουν πηγές ρεύματος και ο αντίστοιχος f<sub>i</sub> όρος πηγών μηδενίζεται.

Η διαδικασία οδηγεί στην θεώρηση ενός αγνώστου ανά κόμβο (που αναπαριστά το άθροισμα των κομβικών τιμών του διανυσματικού δυναμικού για τις δύο θεωρηθείσες διατομές) για όλους τους κόμβους που περιλαμβάνονται στον χώρο της γεωμετρίας που εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ εισάγει δύο αγνώστους ανά κόμβο για τους κόμβους στα σύνορα με το αναλυτικό μακροστοιχείο [4.49 – 4.57]. Οι πρόσθετες εξισώσεις που εισάγονται για τους κόμβους στα σύνορα του μακροστοιχείου θεωρούν τη διατήρηση της ενεργειακής ροής μεταξύ των γειτονικών κόμβων σε κάθε πλευρά του διακένου και έχουν την μορφή της σχέσης (4.27).

$$\sum_{j=1}^{\text{ntot}} s_{ij}^{\text{g1}} \mathbf{A}_{j}^{1} - \sum_{j=1}^{\text{ntot}} s_{ij}^{\text{g2}} \mathbf{A}_{j}^{2} - \sum_{j=1}^{\text{ntot}} s_{i+1j}^{\text{g1}} \mathbf{A}_{j}^{1} + \sum_{j=1}^{\text{ntot}} s_{i+1j}^{\text{g2}} \mathbf{A}_{j}^{2} = 0$$
(4.27)

Αυτή η τεχνική μπορεί να γενικευτεί στην περίπτωση των *n* διατομών περιλαμβάνοντας ένα άγνωστο ανά κόμβο για το μέρος με τα σταθερά πεπερασμένα στοιχεία και *n* αγνώστους ανά κόμβο για τους κόμβους στα όρια του μακροστοιχείου [4.33].

#### 4.4.3.1. Εφαρμογή μεικτής τεχνικής σε γραμμική γεννήτρια με κεκλιμένους μαγνήτες

Η διαδικασία που προαναφέρθηκε για την θεώρηση της κλίσης του δρομέα εφαρμόσθηκε στην προτεινόμενη στην παράγραφο §3.3 γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών.

Στο σχήμα 4.11 παρουσιάζονται οι κατανομές του μαγνητικού πεδίου όπως υπολογίστηκαν με την εφαρμογή της μεικτής τεχνικής πεπερασμένων στοιχείων αναλυτικών λύσεων, για την περίπτωση μαγνήτη ορθογωνικής διατομής, τόσο με κλίση όσο και χωρίς.



Σχήμα 4.11: Κατανομή του μαγνητικού πεδίου σε ένα πολικό βήμα της γραμμικής μηχανής, για μαγνήτη ορθογωνικής διατομής 160mm<sup>2</sup> (a): μαγνήτης χωρίς κλίση (b): μαγνήτης με κλίση

Με το μοντέλο που αναπτύχθηκε, εξετάστηκαν διάφορες κλίσεις για τους μαγνήτες του δρομέα της γραμμικής μηχανής. Στο σχήμα 4.12 φαίνεται η χρονική μεταβολή της δύναμης ευθυγράμμισης που αναπτύσσεται στο διάκενο της μηχανής.



Σχήμα 4.12: Αναπτυσσόμενη δύναμη ευθυγράμμισης στο διάκενο γραμμικής γεννήτριας σαν συνάρτηση της κλίσης των μαγνητών του δρομέα

Το νέο μοντέλο συζευγμένης πεδιακής – κυκλωματικής ανάλυσης που αναπτύχθηκε, χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της κατανομής του μαγνητικού πεδίου με την μεικτή τεχνική πεπερασμένων στοιχείων – αναλυτικών λύσεων, για την δυναμική πλέον προσομοίωση της λειτουργίας της γραμμικής γεννήτριας, όπως ήδη έχει αναφερθεί στην παράγραφο 4.4.1. Από την προσομοίωση της υπό φορτίο λειτουργίας της γραμμικής γεννήτριας, με κλίση των μαγνητών του δρομέα ίση με 0.25 μοίρες που αντιστοιχεί σε κλίση ενός βήματος αύλακος και για ημιτονοειδούς μορφής κίνηση του δρομέα της γεννήτριας, προκύπτει η χρονική μεταβολή της κυματομορφής ρεύματος που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.13.



Σχήμα 4.13: Ρεύμα μιας φάσης για ημιτονοειδή κίνηση του δρομέα της γραμμικής μηχανής, με κλίση μαγνητών 0.25 μοίρες

#### 4.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο, αναπτύχθηκε μια νέα μεικτή τεχνική πεπερασμένων στοιχείων αναλυτικών λύσεων για την ανάλυση της κατανομής του μαγνητικού πεδίου γραμμικών γεννητριών μονίμων μαγνητών. Με την νέα αυτή μεικτή τεχνική, είναι δυνατή η θεώρηση μαγνητών υπό κλίση στον δρομέα της γραμμικής γεννήτριας και η ανάλυση δύο διαστάσεων, σε καρτεσιανές συντεταγμένες, της κατανομής του μαγνητικού πεδίου στο επίπεδο διάκενο της γεννήτριας.

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο που ενσωματώνει την νέα μεικτή τεχνική ανάλυσης της κατανομής του μαγνητικού πεδίου, μελετήθηκε η επίδραση της γεωμετρικής διαμόρφωσης των μαγνητών, στην αναπτυσσόμενη στο διάκενο της γραμμικής γεννήτριας δύναμη ευθυγράμμισης. Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, έγινε γεωμετρική βελτιστοποίηση των μαγνητών της γραμμικής γεννήτριας, επιτυγχάνοντας ελαχιστοποίηση της αναπτυσσόμενης δύναμης ευθυγράμμισης. Ως βέλτιστη γεωμετρία των επιφανειακών μαγνητών αποδείχθηκε αυτή της ορθογωνικής διατομής, με πλάτος του μαγνήτη ίσο με το 70% του πλάτους ενός πολικού βήματος..

Επίσης, μελετήθηκε η επίδραση της κλίσης των μαγνητών, στην ανάπτυξη της συγραμμικής με την κίνηση της γεννήτριας, δύναμης ευθυγράμμισης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε αυτή την περίπτωση, απέδειξαν ότι για κλίση των μαγνητών ίση με ένα βήμα αύλακος, επιτυγχάνεται 20% βελτίωση στην κυμάτωση της δύναμης ευθυγράμμισης, σε σχέση με την περίπτωση μαγνητών χωρίς κλίση.

#### 4.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] K. Hameyer, R. Belmans, "Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices". WIT Press, 1999.
- [4.2] K. J. Binns, P. J. Lawrenson, C. W. Trowbridge, "The analytical and numerical solution of electric and magnetic fields". Wiley, Chichester, 2002.
- [4.3] J. P. Peng, "Solution of Two and Three Dimensional Electromagnetics Problems Using Numerical Methods," PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, N.Y., 1984.
- [4.4] Peter P. Silvester, Ronald L. Ferrari, "Finite Elements for Electrical Engineers", Cambridge University Press, 1996
- [4.5] Nicola Bianchi, "Electrical Machine Analysis Using Finite Elements", CRC Press, 2005
- [4.6] Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw Hill Inc. 1986.
- [4.7] C. A. Brebbia, "The Boundary Element Method for Engineers". Pentech Press, London, 1984.
- [4.8] S.J. Salon, J. D'Angelo, "Applications of the hybrid finite element boundary element method in electromagnetics", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 24, Nr. 1, Jan. 1988, pp. 80-85.
- [4.9] P. Hunter, A. Pullan, "FEM / BEM Notes". Dept. of Engineering Science, Univ. of Auckland, N. Zealand, February 2001.
- [4.10] C. A. Brebbia, "The Boundary Element Method for Engineers". Pentech Press, London, 1984.
- [4.11] B. H. McDonald, A. Wexler, "Finite Element Solution of Unbounded Field Problems," IEEE Transactions, Vol. MTT-20, No. 12, pp. 1267-1270, Dec. 1972.
- [4.12] Themistoklis Kefalas, George Kalokiris, Antonios Kladas and John Tegopoulos,
   "Design of skewed mounted permanent magnet synchronous generators based on 2D and 3D finite element techniques", Journal of Materials Processing Technology, Volume 161, Issues 1-2, 10 April 2005, Pages 288-293
- [4.13] S. J. Salon, J. P. Peng, "Hybrid Finite Element Boundary Element Solutions to Axisymmetric Scalar Potential Problems," Computational Electromagnetics. Elsevier Science Publishers, B. V. (North Holland) IMACS 1986, Z. J. Cendes (editor), pp.251-261.
- [4.14] J. P. Peng, S. J. Salon, "Hybrid Finite Element Boundary Element Solutions Using Half Space Green's Functions," Journal of Applied Physics, Vol. 55, No. 6, pp. 2198-2200, Mar. 1984.
- [4.15] M.A. Tsili, A.G. Kladas, P.S. Georgilakis, A.T. Souflaris, C.P. Pitsilis, J.A. Bakopoulos, D.G. Paparigas, "Hybrid Numerical Techniques for Power Transformer Modeling: A Comparative Analysis Validated by Measurements," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No 2, pp. 842-845, Mar. 2004
- [4.16] Μαρίνα Α. Τσίλη, "Ανάπτυξη μεικτών αριθμητικών τεχνικών πεπερασμένων στοιχείων – οριακών στοιχείων για τη σχεδίαση μετασχηματιστών ισχύος", Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Ιούνιος 2005.
- [4.17] Α. Κλαδάς, "Ανάλυση Πεδίων Χαμηλής Συχνότητας με την βοήθεια Η/Υ", Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος, ΕΜΠ, Αθήνα, 2002.
- [4.18] M. A. Tsili, A. G. Kladas, P. S. Georgilakis, A. T. Souflaris and D. G. Paparigas, "Incorporation of Advanced Numerical Field Analysis Techniques in the Industrial Transformer Design Process," Proc. IEE MEDOWER'2004, Lemesos, Cyprus, November 2004.
- [4.19] A. G. Kladas, J. A. Tegopoulos, "A new scalar potential formulation for 3D Magnetostatics necessitating no source field calculation". IEEE Trans. on Magn., Vol. 28, No.2, March 1992, pp. 1103-1106.

- [4.20] A. A. Abdel-Razek, J. L. Coulomb, M. Feliachi, and J. C. Sabonnadiere, "The calculation of electromagnetic torque in saturated electric machines within combined numerical and analytical solution in the field equations," IEEE Trans. Magn., vol. 17, pp. 3250–3252, Nov. 1981.
- [4.21] A. Razek, J. Coulomb, M. Feliachi, and J. Sabonnadiere, "Conception of an air-gap element for the dynamic analysis of the electromagnetic field in electric machines," IEEE Trans. Magn., vol. MAG-18, no. 2, pp. 655–659, Mar. 1982.
- [4.22] A. Kladas and A. Razek, "Eddy currents modeling in synchronous machines during starting accounting for the nature of damper end connections," IEEE Trans. Magn., vol. 24, no. 1, pp. 186 189, Jan. 1988.
- [4.23] Καλοκύρης Γεώργιος, "Καινοτομικά υλικά για συστήματα κίνησης μηδενικής εκπομπής ρύπων", Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π. 2006.
- [4.24] F. Piriou and A. Razek, "A model for coupled magnetic-electric circuits in electric machines with skewed slots," IEEE Trans. Magn., vol. 26, no. 2, pp. 1096–1100, Mar. 1990.
- [4.25] G. D. Kalokiris, T. D. Kefalas, A. G. Kladas and J. A. Tegopoulos, "Special Air-Gap Element for 2-D FEM Analysis of Electrical Machines Accounting for Rotor Skew", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 5, pp.2020-2023, 2005.
- [4.26] R. Wang, H. Mohellebi, T. J. Flack, M. J. Kamper, J. D. Buys, and M. Feliachi, "Two-dimensional Cartesian air-gap element (CAGE) for dynamic finite-element modeling of electrical machines with a flat air gap," IEEE Trans. Magn., vol. 38, no. 2, pp. 1357–1360, Mar. 2002.
- [4.27] T. Higuchi, J. Oyama, E. Yamada, E. Chiricozzi, F. Parasiliti, M. Villani,
   "Optimization procedure of surface permanent magnet synchronous motors", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 33, no 2, March 1997, pp. 1943-6.
- [4.28] E. Lovelace, T. Jahns and J. Lang, "A Saturating Lumped-Parameter Model for an Interior PM Synchronous Machine", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 3, pp. 645-650, 2002.
- [4.29] E. Lovelace, T. Jahns, T. Keim and J. Lang, "Mechanical Design Considerations for Conventionally Laminated, High-Speed, Interior PM Synchronous Machine Rotors", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, no. 3, pp. 806-812, 2004.
- [4.30] P. Campbell, M.V.K. Chari, J. D'Angelo, "Three-dimensional finite element solution of permanent magnet machines", IEEE Transactions on Magnetics, vol. Mag-17, no. 6, pp. 2997-2999, 1981.
- [4.31] T. F. Chan, L. L. Lai and Lie-Tong Yan, "Performance of a Three-Phase AC Generator With Inset NdFeB Permanent-Magnet Rotor", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no. 1, pp. 88-94, 2004.
- [4.32] M. G. Say, "The Performance and Design of Alternating Current Machines", Sir Isaac Pitman & Sons, London, 1961
- [4.33] Nikolaos M. Kimoulakis and Antonios Kladas, "Time Variation of Operational Characteristics for a Linear Permanent Magnet Synchronous Generator under Various Load Conditions", Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2010 (accepted).
- [4.34] N.M. Kimoulakis, A.G. Kladas, and J.A. Tegopoulos, "Power Generation Optimization from Sea Waves by using a Permanent Magnet Linear Generator Drive", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, Issue 6, June 2008, pp1530-1533.
- [4.35] N. M. Kimoulakis, A. G. Kladas and J. A. Tegopoulos, "Dynamic performance simulation of a four sided linear permanent magnet machine for power generation from sea waves", Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 10 ISS.5-2008, printed date May 14 2008, pp. 1268-1271.

- [4.36] N. M. Kimoulakis, A. G. Kladas and J. A. Tegopoulos, «Cogging Force Minimization in a Coupled Permanent Magnet Linear Generator for Sea Wave Energy Extraction Applications», IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, No3, March 2009, pp1246-1249.
- [4.37] D. Zarko, D. Ban and T.A. Lipo, "Analytical Solution for Cogging Torque in Surface Permanent-Magnet Motors Using Conformal Mapping", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 1, January 2008, pp 52-65.
- [4.38] Y. Yang, X. Wang, R. Zhang, T. Ding, and R. Tang, "The Optimization of Pole Arc Coefficient to Reduce Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent Magnet Motors", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, No 4, April 2006, pp 1135-1138.
- [4.39] R. Lateb, N. Takorabet, and F. Meibody-Tabar, "Effect of Magnet Segmentation on the Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent-Magnet Motors", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, No 3, March 2006, pp 442-445.
- [4.40] D.A. Gonzalez, J. A. Tapia, and A. L. Bettancourt, "Design Consideration to Reduce Cogging Torque in Axial Flux Permanent-Magnet Machines", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43, No 8, August 2007, pp 3435-3440.
- [4.41] M. Lukaniszyn, M. Jagiela, and R. Wrobel, "Optimization of Permanent Magnet Shape for Minimum Cogging Torque Using a Genetic Algorithm", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 40, No 2, March 2004, pp 1228-1231.
- [4.42] Z.Q. Zhu, D. Howe, "Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 15, No 4, December 2000, pp 407-412.
- [4.43] L. Dosiek, P. Pillay, "Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, No 6, November/December 2007, pp 1565-1571.
- [4.44] F. Caricchi, G. Capponi, F. Crescimbini and L. Solero, "Experimental Study on Reducing Cogging Torque and No-Load Power Loss in Axial-Flux Permanent-Magnet Machines with Slotted Winding", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 40, No 4, July/August 2004, pp 1066-75.
- [4.45] P. Dziwniel, B. Boualem, F. Piriou, J. P. Ducreux, and P. Thomas, "Comparison between two approaches to model induction machines with skewed slots," IEEE Trans. Magn., vol. 36, no. 4, pp. 1453–1457, Jul. 2000.
- [4.46] J. J. C. Gyselinck, L. Vandevelde, and J. A. A. Melkebeek, "Multi-slice FE modeling of electrical machines with skewed slots-the skew discretization error," IEEE Trans. Magn., vol. 37, no. 5, pp. 3233–3237, Sep. 2001.
- [4.47] T. Yamaguchi, Y. Kawase, and S. Sano, "3-D finite-element analysis of skewed squirrel-cage induction motor," IEEE Trans. Magn., vol. 40, no. 2, pp. 969–972, Mar. 2004.
- [4.48] H. De Gersem, K. Hameyer, and T.Weiland, "Skew interface conditions in 2-D finite-element machine models," IEEE Trans. Magn., vol. 39, no. 3, pp. 1452– 1455, May 2003.
- [4.49] Marchand C., Ren Z., Razek, A., "Torque optimization of a buried permanent magnet synchronous machine by geometric modification using FEM", EMF'94 International Conference, Leuven, Belgium, 1994, pp. 53-56.
- [4.50] M. A. Alhamadi and N. A. Demerdash, "Three dimensional magnetic field computation by a coupled vector-scalar potential method in brushless dc motors with skewed permanent magnet mounts – The formulation and FE grids", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9, no. 1, pp. 1-14, 1994.
- [4.51] M. A. Alhamadi and N. A. Demerdash, "Three dimensional magnetic field computation by a coupled vector-scalar potential method in brushless dc motors with skewed permanent magnet mounts – The no load and load results", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9, no. 1, pp. 15-25, 1994.
- [4.52] M. A. Alhamadi and N. A. Demerdash, "Modeling and experimental verification of the performance of a skew mounted permanent magnet brushless dc motor drive with parameters computed from 3D FE magnetic field solutions", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9, no. 1, pp. 26-35, 1994.
- [4.53] O. Ojo, J. Cox and Z. Wu, "DC Power Generation Using Interior Permanent-Magnet Machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 12, no. 4, pp. 351-356, 1997.
- [4.54] M. R. Dubois H. Polinder and J. A. Ferreira, "Magnet shaping for minimal magnet volume in machines", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 38, no. 5, pp. 2985-2987, 2002.
- [4.55] M. R. Dubois, H. Polinder and J. A. Ferreira, "Varying magnetization orientation for permanent magnet volume reduction in machines", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 39, no. 3, pp. 1793-1799, 2003.
- [4.56] M. R. Dubois, H. Polinder and J. A. Ferreira, "Contribution of permanent magnet volume elements to no load voltage in machines", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 39, no. 3, pp. 1784-1792, 2003.
- [4.57] J. Hur, S. B. Yoon, D. Yun and D. S. Hyum, "Analysis of PMLSM using three dimensional equivalent magnetic circuit network method", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 33, no. 5, pp. 4143-4145, 1997.
- [4.58] Nicola Bianchi and Silverio Bolognani "Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, No 5, September/Octromber 2002, pp 1259-1265.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΟΥ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ-ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ-ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

#### 5.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΠΛΩΤΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ

Όταν ένα πλωτό σώμα, το οποίο ισορροπεί στην επιφάνεια ενός ακίνητου υγρού, εκτραπεί από την θέση ηρεμίας, θα αρχίσει να ταλαντώνεται και να παράγει κύματα. Η εξίσωση κίνησης του σώματος δίνεται από την σχέση (5.1) [5.3], [5.7]:

$$F_{\rm h} = -\alpha \ddot{z} - b \dot{z} - c z \tag{5.1}$$

όπου:

- α, ο συντελεστής πρόσθετης μάζας (Kgr), που αντιστοιχεί στην αδρανειακή δύναμη που εφαρμόζεται στο σώμα
- b, ο συντελεστής υδροδυναμικής απόσβεσης (Ns/m=Kgr/s), που αντιστοιχεί στις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται μεταξύ του πλωτού σώματος και των εφαπτόμενων μορίων του νερού
- c, ο συντελεστής συσσώρευσης ενέργειας (N/m), που αντιστοιχεί στην δύναμη της άνωσης που εφαρμόζεται στο πλωτό σώμα

Θεωρώντας την ομογενή εξίσωση της σχέσης (5.2), που προκύπτει από την σχέση (5.1), προκύπτει ότι το πλωτό σώμα θα κάνει μια αποσβενούμενη ταλάντωση, ανάλογη με αυτή ενός σώματος αναρτημένου από ελατήριο.

$$\alpha \ddot{z} + b \dot{z} + c z = 0 \tag{5.2}$$

Βασική ιδιότητα σε μια ταλάντωση αυτού του είδους είναι το γεγονός ότι όταν η συχνότητα της ταλάντωσης ταυτιστεί με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος, επιτυγχάνεται συντονισμός και μέγιστο πλάτος ταλάντωσης

Η συχνότητα συντονισμού σε αυτή την περίπτωση δίνεται από την σχέση (5.3) [5.7].

$$f_{o} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{\alpha}}$$
(5.3)

#### 5.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ

Στην περίπτωση που ένα πλωτό σώμα χρησιμοποιείται ως μέσο απορρόφησης ενέργειας από τον θαλάσσιο κυματισμό, η απόδοση του θα μεγιστοποιείται όταν η συχνότητα του κύματος είναι ίση με την ιδιοσυχνότητα του πλωτού σώματος [5.7], [5.4].

Στην περίπτωση κυματισμού ημιτονοειδούς μορφής, η εξίσωση κίνησης με βάση την σχέση (2.17), δίνεται από την σχέση (5.4) [5.10].

$$m\ddot{z} = F_{\rm h} + F_{\rm w} = F_{\rm t} \tag{5.4}$$

Αντικαθιστώντας την σχέση (5.1) στην σχέση (5.4), προκύπτει η επόμενη σχέση (5.5).  $F_w = (m+a)\ddot{z} + b\dot{z} + cz$ (5.5)

όπου m είναι η συνολική αδρανειακή μάζα του πλωτού σώματος

Η δύναμη F<sub>w</sub> είναι η δύναμη του προσπίπτοντος κυματισμού και πρόκειται ουσιαστικά για την εφαρμοζόμενη δύναμη από το προσπίπτων κύμα, σε ένα ακίνητο σώμα.

Υπενθυμίζεται ότι τόσο ο συντελεστής υδροδυναμικής απόσβεσης b, όσο και ο συντελεστής πρόσθετης μάζας α, μεταβάλλονται σε συνάρτηση με την ταχύτητα (βλ.σχήματα 2.5 και 2.6 αντίστοιχα).

Η ιδιοσυχνότητα του ταλαντούμενου σώματος, η κίνηση του οποίου περιγράφεται από την σχέση (5.5), δίνεται από την σχέση (5.6).

$$f_{o} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m + \alpha(\omega)}}$$
(5.6)

Προφανώς, όταν η συχνότητα του κύματος ταυτιστεί με την τιμή που προκύπτει από την σχέση (5.6), τότε το πλωτό σώμα απορροφά την μέγιστη ποσότητα ενέργειας από το προσπίπτον κύμα.

Η εξίσωση κίνησης ενός πλωτού σώματος το οποίο είναι με μηχανικό τρόπο συζευγμένο με μια ηλεκτρογεννήτρια με σκοπό την ηλεκτροπαραγωγή από θαλάσσιο κυματισμό, δίνεται από την σχέση (5.7).

 $m\ddot{z} = F_t - F_G \tag{5.7}$ 

όπου  $F_G$  είναι η δύναμη που η συζευγμένη ηλεκτρική γεννήτρια ασκεί επί του πλωτήρα. Η δύναμη αυτή αντιτίθεται στην κίνηση του πλωτήρα.

Από την σχέση (5.7) προκύπτει ότι ελέγχοντας την δύναμη  $F_G$ , είναι δυνατή η προσαρμογή της ιδιοσυχνότητας  $f_o$  του ταλαντούμενου συζευγμένου υδραυλικού-μηχανικούηλεκτρικού συστήματος, έτσι ώστε αυτό να βρίσκεται διαρκώς σε κατάσταση συντονισμού με την συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος. Με τον τρόπο αυτό βελτιστοποιείται και η απορροφούμενη ενέργεια από τον θαλάσσιο κυματισμό και συνεπώς και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

#### 5.2.1. Ανθιστάμενη δύναμη γεννήτριας

Η δύναμη  $F_G$  για τους εναλλακτικούς προτεινόμενους τύπους ηλεκτρικών γεννητριών για ηλεκτροπαραγωγή από τον θαλάσσιο κυματισμό, δίνεται από τις σχέσεις (5.8) και (5.9).

#### 5.2.1.1. Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος ζένης διέγερσης:

Για σταθερή διέγερση στάτη και σταθερή τιμή αντίστασης φορτίου, η δύναμη  $F_G$  που θα ασκείται από την ηλεκτρογεννήτρια στον πλωτήρα, θα είναι ανάλογη με την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ω και δίνεται από την σχέση (5.8).

$$F_{\rm G} \sim T_{\rm e} \sim k\omega \tag{5.8}$$

όπου k μια σταθερά αναλογίας

#### 5.2.1.2. Γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών:

Για σταθερή αντίσταση φορτίου, η δύναμη που θα ασκείται από την ηλεκτρογεννήτρια  $F_G$  στον πλωτήρα, θα είναι ανάλογη με την γραμμική ταχύτητα του δρομέα u και δίνεται από την σχέση (5.9).:

$$F_{\rm G} \sim T_{\rm e} \sim ku \tag{5.9}$$

όπου k μια σταθερά αναλογίας

#### 5.2.2. Προσομοίωση κίνησης πλωτήρα

Παρακάτω εξετάζεται η προσομοίωση της κίνησης του πλωτήρα με βάση την σχέση (2.24). Το μήκος κύματος L υπολογίζεται με βάση την σχέση (2.2) . Χρησιμοποιούνται τα παρακάτω τυπικά δεδομένα :

- Ύψος κύματος Η=1m
- Περίοδος κύματος T = 6 sec
- Βάθος θάλασσας h=2m (από επιφάνεια ηρεμίας μέχρι πυθμένα)
- Διάμετρος κυλίνδρου D=1m
- Μήκος βυθίσματος *l*=1m
- Πυκνότητα θαλασσινού νερού ρ=1025 Kg/m<sup>3</sup>

Η μάζα του σώματος προκύπτει από την εξίσωση ισορροπίας αρχικά του κυλινδρικού πλωτήρα στην επιφάνεια ηρεμίας της θάλασσας και δίνεται από την σχέση (5.10). Στο σχήμα 5.1 φαίνεται η κίνηση του κυλινδρικού πλωτήρα σε σχέση με το ημιτονοειδές κύμα διέγερσης.

$$\mathbf{m} = \rho \, \mathbf{V} \sim 800 \, \mathrm{Kg} \tag{5.10}$$



Σχήμα 5.1: Σχετική κίνηση κύματος – πλωτήρα

#### 5.2.3. Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς

Η κίνηση του πλωτήρα μπορεί να ελεγχθεί μέσω της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος μεταβάλλοντας την ηλεκτρομαγνητική ροπή  $T_e$  μέσω του ρεύματος διεγέρσεως του στάτη, με στόχο την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Για σταθερή διέγερση στάτη και σταθερή τιμή αντίστασης φορτίου, η δύναμη που θα ασκείται από την ηλεκτρογεννήτρια στον πλωτήρα  $F_G$  θα είναι ανάλογη με την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα  $\omega$ , όπως αναφέρθηκε και παραπάνω [5.1] [5.2].

Θεωρούμε έλεγχο της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος με σταθερό ρεύμα διεγέρσεως. Η ανθιστάμενη στην κίνηση του πλωτήρα δύναμη από την γεννήτρια θα είναι:

$$F_{\rm G} = k\dot{z} = k\omega \tag{5.11}$$

Επίσης η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:  $\mathbf{P} = \left| \mathbf{F}_{\mathrm{G}} \right| * \left| \dot{\mathbf{z}} \right|$ (5.12)

Παρακάτω θα εξεταστεί η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από την γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, για ημιτονοειδή κυματισμό διέγερσης. Επίσης στην συγκεκριμένη διαδικασία, αμελούνται τα αδρανειακά χαρακτηριστικά από το μηχανικό μέρος του συζευγμένου υδραυλικού-μηχανικού-ηλεκτρικού συστήματος.

Ανάλογη διαδικασία προσομοίωσης της παραγόμενης ισχύος θα μπορούσαμε να εφαρμόσουμε και στην περίπτωση της γραμμικής γεννήτριας μαγνητών, αν θεωρούσαμε την μέση γραμμική ταχύτητα *u* που αντιστοιχεί σε ημιτονοειδές θαλάσσιο κύμα ύψους 1m.

#### 5.2.3.1. Ημιτονοειδής βραδύς θαλάσσιος κυματισμός ( $T_{\kappa}$ = 6 sec)

Μεταβάλλοντας την σταθερά k με βάση την σχέση (2.20), τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα 5.1, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την σχετική θέση του πλωτήρα, για την μέγιστη στιγμιαία παραγόμενη ισχύ  $P_{max}$ , και την μέση τιμή της παραγόμενης ισχύος  $\overline{P}$  στην μόνιμη κατάσταση. Η βέλτιστη τιμή της παραγόμενης ισχύος είναι 1.850 W και προκύπτει για τιμή k~7.500 όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2. Η μετατόπιση του πλωτήρα σε σχέση με το θαλάσσιο κύμα φαίνεται στο σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.2: Παραγόμενη στιγμιαία και μέση ισχύς σε Watt (k=7500)

k	Z <sub>max</sub> [m]	P <sub>max</sub> [W]	$\overline{P}$ [W]
30.000	0,3	1.600	850
15.000	0,5	3.000	1.400
10.000	0,6	3.500	1.750
8.000	0,7	4.000	1.800
7.500	0,7	4.000	1.850
7.000	0,7	3.900	1.800
5.000	0,9	3.850	1.800
2.500	1	2800	1.300

**Πίνακας 5.1:** Αποτελέσματα προσομοίωσης κυματισμού *T<sub>κ</sub>=6s* 



**Σχήμα 5.3:** Σχετική θέση κύματος – πλωτήρα (k=7.500)

#### 5.2.3.2. Ημιτονοειδής ταχύς θαλάσσιος κυματισμός ( $T_{\kappa}$ = 2.3 sec)

Θεωρούμε την περίπτωση περιόδου κύματος κοντά στον συντονισμό του κυλινδρικού πλωτήρα ( $T_{\kappa}$ = 2,3 sec)

Μεταβάλλοντας την σταθερά k, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα 5.2. Η βέλτιστη τιμή της παραγόμενης ισχύος είναι 4.250 W και προκύπτει για τιμή k~1.500 όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4. Η μετατόπιση του πλωτήρα σε σχέση με το θαλάσσιο κύμα φαίνεται στο σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.4: Παραγόμενη στιγμιαία και μέση ισχύς σε Watt (k=1500)



Σχήμα 5.5: Παραγόμενη στιγμιαία και μέση ισχύς σε Watt (k=1500)

Η βέλτιστη τιμή του ρεύματος διεγέρσεως εξαρτάται έντονα από τα χαρακτηριστικά του κυματισμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι για κύματα ίδιου ύψους (ενός μέτρου στην ανάλυση που προηγήθηκε) όταν η περίοδος μεταβάλλεται από 2.3 σε 6 δευτερόλεπτα, απαιτείται πενταπλασιασμός του ρεύματος διεγέρσεως. Επίσης στα πλαίσια των προσεγγίσεων της υδροδυναμικής αναπαράστασης, φαίνεται ότι για περίοδο κύματος 2.3 δευτερολέπτων οπότε παρατηρείται συντονισμός, η παραγόμενη μέση ισχύς είναι 4.250 W.

k	Z <sub>max</sub> [m]	P <sub>max</sub> [W]	$\overline{P}$ [W]
10.000	0,15	1.400	700
7.500	0,2	2.000	950
5.000	0,3	2.750	1.400
2.500	0,5	5.500	2.800
2.000	0,7	7.500	3.500
1.750	0,8	8.000	4.000
1.500	0,9	8.500	4.250
1.250	1	7.000	4.000
1.000	1	5.500	3.400
500	1	2.500	2.000

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης κυματισμού T<sub>κ</sub>=2,3s

### 5.3 ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ -ΜΗΧΑΝΙΚΟ- ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ- ΣΥΣΤΗΜΑ

Σχετικά με την διαμόρφωση του συζευγμένου συστήματος, μελετήθηκαν διάφορες διαμορφώσεις μηχανικών υποσυστημάτων, ενώ εναλλακτικά της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος, σχεδιάστηκε μια ειδική γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών και προσομοιώθηκε η λειτουργία της [5.6].

Για κάθε μια από αυτές τις επιμέρους περιπτώσεις, αναπτύχθηκαν ειδικά μοντέλα προσομοίωσης του πλήρους υδραυλικού-μηχανικού-ηλεκτρικού συστήματος.

#### 5.3.1. Μηχανικό μοντέλο με περιστρεφόμενο δίσκο

Το συνολικό μοντέλο το οποίο υλοποιήθηκε για την προσομοίωση της μετατροπής της ενέργειας του κύματος σε ηλεκτρική, θεωρεί ένα απλό μηχανισμό μετάδοσης της κατακόρυφης κίνησης του πλωτήρα, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.6: Απλοποιημένη μηχανική διάταξη μετάδοσης κίνησης στην γεννήτρια

#### 5.3.1.1. Ανάλυση της κίνησης του μηχανικού συστήματος

Για την ανάλυση της κίνησης του μηχανισμού, θεωρούμε κάθε σώμα ξεχωριστά και αναλύουμε τις δυνάμεις που εφαρμόζονται σε αυτό.



Σχήμα 5.7: Δυνάμεις επί των ανεξάρτητων σωμάτων που συνθέτουν τον μηχανισμό

Έστω η χρονική στιγμή κατά την οποία ο πλωτήρας βρίσκεται σε κάθοδο. Στον πλωτήρα ασκείται η συνολική δύναμη ΣF η οποία υπολογίζεται με τον τρόπο που αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Επίσης επί του πλωτήρα ασκείται από τον αβαρή κατακόρυφο άξονα η αντίθετη στην κίνηση δύναμη  $F_1$ .

Για την κίνηση του πλωτήρα ισχύει η σχέση (5.13).

$$\Sigma F - F_1 = m\gamma \tag{5.13}$$

Στο στρεφόμενο δίσκο ασκείται η δύναμη  $-F_1$  (αντίδραση της δύναμης  $F_1$ ) και η δύναμη  $F_2$  η οποία αποτελεί την αντίθετη στην κίνηση του πλωτήρα δύναμη, που προέρχεται από την ροπή  $T_e$  της γεννήτριας, οπότε ισχύει η σχέση (5.14).

$$\mathbf{F}_2 = \mathbf{T}_{\mathbf{e}}/\mathbf{r} \tag{5.14}$$

Για την εξίσωση κίνησης της γεννήτριας, ισχύει η σχέση (5.15) [5.12].

$$(F_1 - F_2)r = J(dw/dt)$$
 (5.15)

όπου:

r=4cm η απόσταση του σημείου άρθρωσης D από το κέντρο του δίσκου

 $T_e = η$  ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας

J= η ροπή αδράνειας της γεννήτριας

Ο συνδυασμός των προηγούμενων σχέσεων δίνει την εξίσωση κίνησης του συνολικού μηχανισμού στην περίπτωση μετάδοσης κίνησης από τον πλωτήρα στην γεννήτρια και περιγράφεται από την σχέση (5.16).

$$\Sigma F \times r - Te = (mr^2 + J)\frac{dw}{dt}$$
(5.16)

Στη περίπτωση που έχουμε απεμπλοκή του συστήματος μετάδοσης της κίνησης, ο πλωτήρας συνεχίζει να κινείται μόνο με την επίδραση της δύναμης ΣF, ενώ για την γεννήτρια ισχύει η εξίσωση κίνησης της σχέσης (5.17).

$$-Te = J\frac{dw}{dt}$$
(5.17)

#### 5.3.1.2. Προσομοίωση λειτουργίας του μηχανισμού

Για τις ανάγκες προσομοίωσης του συνολικού συστήματος έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές:

- Ο πλωτήρας διεγείρεται από θαλάσσιο κύμα ημιτονικής μορφής σταθερού πλάτους και συχνότητας
- Η κίνηση μετατρέπεται σε περιστροφή τόσο κατά την άνοδο όσο και κατά την κάθοδο του πλωτήρα, μέσω ενός δίσκου επί του οποίου αρθρώνεται ο κατακόρυφος άξονας μετάδοσης της κίνησης του πλωτήρα.. Το σημείο άρθρωσης του κατακόρυφου άξονα απέχει r= 4cm από το κέντρο του δίσκου μετατροπής της γραμμικής κίνησης του πλωτήρα σε περιστροφική. Για την ανάλυση του συγκεκριμένου μηχανισμού και τον προσδιορισμό της εξίσωσης κίνησης του, τόσο ο κατακόρυφος άξονας θεωρήθηκαν σώματα αμελητέας μάζας. Επίσης θεωρείται ότι το μήκος του κατακόρυφου άξονα είναι πάρα πολύ μεγάλο σε σχέση με την ακτίνα r, έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι η κίνηση του άξονα είναι μόνο κατακόρυφη.
- Τα δύο συστήματα, του πλωτήρα και της γεννήτριας, εμπλέκονται μέσω της μηχανικής ροπής Tm που το σύστημα του πλωτήρα υπό τις κατάλληλες συνθήκες προσφέρει στην γεννήτρια. Ειδικότερα θεωρήθηκε ότι μετάδοση κίνησης έχουμε στην περίπτωση που η συνολική εφαρμοζόμενη στον πλωτήρα δύναμη ΣF, είναι ομόσημη με την γραμμική ταχύτητα u του πλωτήρα (ΣF\*u>0). Με άλλα λόγια έχουμε μετάδοση κίνησης μόνο για το χρονικό διάστημα που η δύναμη ΣΕ δρα προς την κατεύθυνση της κίνησης. Επίσης ως δεύτερη απαίτηση που θα πρέπει να ικανοποιείται ταυτόχρονα με την ισχύ της πρώτης συνθήκης είναι η  $u \ge u_D$ . Δηλαδή υπάρχει εμπλοκή του μηχανισμού μετάδοσης κίνησης από τον πλωτήρα προς την γεννήτρια θα πρέπει η γραμμική ταχύτητα του πλωτήρα να είναι μεγαλύτερη ή ίση με την γραμμική ταχύτητα του σημείου D στο οποίο ο κατακόρυφος άξονας αρθρώνεται με τον δίσκο μετατροπής της κατακόρυφης σε περιστροφική κίνηση. Η γραμμική ταχύτητα του σημείου D συνδέεται με την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δίσκου (και συνεπώς και με την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας w στην φάση της εμπλοκής), μέσω της σχέσης  $u_D = w x r$ , όπου r=4cm η απόσταση του σημείου D από το κέντρο του δίσκου.
- Στην φάση της απεμπλοκής, όταν δηλαδή μια τουλάχιστον από τις παραπάνω συνθήκες πάψει να ισχύει, τα δύο επιμέρους συστήματα, πλωτήρας και γεννήτρια κινούνται με ανεξάρτητες μεταξύ τους ταχύτητες. Η μεν γεννήτρια συνεχίζει να κινείται με μια φθίνουσα εξ

αδρανείας ταχύτητα, ο δε πλωτήρας συνεχίζει να κινείται με ταχύτητα η οποία υποβάλλεται από τον κυματισμό.

#### 5.3.1.2.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης

#### 1. Κύμα ύψους 1 μέτρου και περιόδου 5sec



Σχήμα 5.8: Ταχύτητα περιστροφής γεννήτριας για If=constant



Σχήμα 5.9: Ταχύτητα περιστροφής γεννήτριας για If=variable



Σχήμα 5.10: Συνολική μηχανική ροπή στον άξονα της γεννήτριας για If=constant



Σχήμα 5.11: Συνολική μηχανική ροπή στον άξονα της γεννήτριας για If=variable



Σχήμα 5.12: Ηλεκτρική ροπή γεννήτριας για If=constant



Σχήμα 5.13: Ηλεκτρική ροπή γεννήτριας για If=variable

#### 5.3.2. Μηχανικό σύστημα με διπαράλληλο ζυγό

Η χρησιμοποιούμενη μηχανική διάταξη στόχο έχει την μετατροπή της κατακόρυφης κίνησης του πλωτήρα σε περιστροφική ώστε αυτή να εφαρμοστεί στον άξονα της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος. Επίσης μέσω της μηχανικής διάταξης, επιτυγχάνεται η σύζευξη μεταξύ του υδραυλικού υποσυστήματος με το αντίστοιχο ηλεκτρικό [5.5].

Στο επόμενο σχήμα 5.14 δίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα του μηχανικού συστήματος που χρησιμοποιήθηκε για την μετατροπή της κατακόρυφης κίνησης του πλωτήρα σε περιστροφική.



Σχήμα 5.14: Σχηματικό διάγραμμα μηχανικού συστήματος με διπαράλληλο ζυγό

Απλοποιώντας το διάγραμμα του σχήματος 5.14, προκύπτει το διάγραμμα του σχήματος 5.15 στο οποίο εμφανίζονται όλες οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις.





$$\left(M + \frac{J}{l_1^2} + J_T \frac{l_2^2}{(l_1 r_o)^2}\right) \ddot{z}(t) + cz(t) + \int_{-\infty}^t h_r(t-\tau) \dot{z} d\tau = f_e(t) - T_G^{'} \frac{l_2}{l_1 r_o}$$
(5.18)

Από την σχέση (5.18) σε συνδυασμό με την σχέση (5.6) προκύπτει ότι η ιδιοσυχνότητα συντονισμού του μηχανισμού θα δίνεται από την σχέση (5.19).

$$f_{o} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{\left(M + \frac{J}{l_{1}^{2}} + J_{T} \frac{l_{2}^{2}}{\left(l_{1}r_{o}\right)^{2}\right)}}$$
(5.19)

όπου  $J_T = J_r + J_1 + \frac{J_2}{n^2} + \frac{J_G}{n^2}$ είναι η συνολική αδράνεια του μηχανισμού, M η

μάζα του κυλίνδρου,  $l_1, l_2$  τα μήκη των ζυγών,  $T_G$  η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος, J η συνολική αδράνεια των ζυγών,  $J_r$  η αδράνεια της αλυσίδας,  $r_o$  η ακτίνα της τροχαλίας της αλυσίδας,  $J_1$  η αδράνεια του γραναζιού χαμηλής ταχύτητας,  $J_2$ είναι η αδράνεια του γραναζιού υψηλής ταχύτητας,  $J_G$  είναι η αδράνεια του δρομέα της γεννήτριας DC, και *n* είναι ο λόγος μετασχηματισμού του γραναζοκιβώτιου.

Το μοντέλο προσομοίωσης της διάταξης, εικονίζεται στο σχήμα 5.15. Περιλαμβάνει τα επί μέρους υποσυστήματα της γεννήτριας ΣΡ με τα φορτία και το γραμμικό μοντέλο του πλωτήρα.. Είσοδος του μοντέλου είναι η χρονοσειρά μεταβολής του κύματος και έξοδος οι χρονικές κυματομορφές των ηλεκτρικών μεγεθών (τάσεως, ρεύματος, ισχύος στο φορτίο) και των μηχανικών μεγεθών (μηχανική ροπή και ταχύτητα δρομέα της γεννήτριας) [5.14].

Ενδεικτικό αποτέλεσμα του μοντέλου σε μετρημένη χρονοσειρά κύματος φαίνεται στα σχήματα 5.18 και 5.19, στα οποία απεικονίζονται οι προσομοιωμένες χρονοσειρές της παραγόμενης ισχύος και της κινήσεως του πλωτήρα.



Σχήμα 5.16: Διάγραμμα ροής μοντέλου προσομοίωσης



Σχήμα 5.17: Μοντέλο Matlab/Simulink για την προσομοίωση του συνολικού συζευγμένου συστήματος



Σχήμα 5.18: Παραγόμενη στιγμιαία ισχύς σε Watt για μετρημένη χρονοσειρά κύματος

**ΚΕΦ. 5** ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΟΥ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ-ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ-ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ



Σχήμα 5.19: Σχετική θέση κύματος – πλωτήρα για μετρημένη χρονοσειρά κύματος



Σχήμα 5.20: Μετρημένη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε σχέση με το αντίστοιχο προσομοιωμένο μέγεθος

Στο σχήμα 5.20, έχει αναπαρασταθεί γραφικά η μετρημένη παραγόμενη από την διάταξη ηλεκτρική ενέργεια, σε σχέση με την αντίστοιχη ισχύ που παρέχει το μοντέλο προσομοίωσης. Από τις γραφικές παραστάσεις προκύπτει ότι προσομοίωση που επιτυγχάνεται με το μοντέλο που αναπτύχθηκε είναι πολύ ικανοποιητική. Η μέγιστη απόκλιση που εμφανίζεται σε σχέση με την αντίστοιχη μετρημένη ενέργεια είναι της τάξης των 1000Ws ή 0.28Wh, ενώ εμφανίζονται και σημεία σχεδόν μηδενικής απόκλισης.

#### 5.3.3. Μηχανικό μοντέλο για κίνηση γραμμικής γεννήτριας

Η διαμόρφωση του μηχανικού συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 5.21.



Σχήμα 5.21: Συζευγμένο σύστημα με γραμμική γεννήτρια

Η συνολικά εφαρμοζόμενη δύναμη ΣF αποτελείται από την υδραυλική δύναμη  $F_{h,}$  την δύναμη του προσπίπτοντος κύματος  $F_w$  και την ανθιστάμενη δύναμη από την γεννήτρια  $F_G$  και δίνεται από την σχέση (5.20) [5.15], [5.8].

$$M\ddot{z} = F_h + F_w + F_G \tag{5.20}$$

όπου M είναι μια ισοδύναμη μάζα που ενσωματώνει τα αδρανειακά χαρακτηριστικά του συνολικού μηχανισμού.



Σχήμα 5.22: Κυματομορφή ηλεκτρεγερτικής δύναμης εν κενώ, για ημιτονοειδή κυματισμό

Στο σχήμα 5.22 παρουσιάζεται η κυματομορφή της παραγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης από την γραμμική γεννήτρια, για ημιτονοειδή μορφή του προσπίπτοντος κυματισμού, ενώ στο σχήμα 5.23 παρουσιάζεται το ίδιο μέγεθος για πραγματική μετρημένη χρονοσειρά κυματισμού. Επίσης έγινε βελτιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω κατάλληλης ρύθμισης του ωμικού φορτίου της γεννήτριας και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο σχήμα 5.24.



Σχήμα 5.23: Κυματομορφή ηλεκτρεγερτικής δύναμης εν κενώ, για μετρημένη χρονοσειρά κυματισμού διάρκειας 10s.



Σχήμα 5.24: Προσομοίωση της μέσης ισχύος για κυματισμό διάρκειας 300s. Διακεκομμένη γραμμή: Λειτουργία με σταθερό φορτίο Συνεχής γραμμή: Λειτουργία με ρυθμιζόμενο φορτίο

#### 5.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΡΗΜΕΝΩΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ

Στόχος της μοντελοποίησης μιας πραγματικής χρονοσειράς θαλάσσιου κυματισμού, είναι η προσέγγιση και προσομοίωση της από μια ενεργειακά ισοδύναμη διαδοχή ημιτονοειδών κυμάτων, κατάλληλου πλάτους και συχνότητας [5.1].

Με βάση αυτή την μέθοδο, μπορεί να επιτευχθεί πρόβλεψη του αναμενόμενου τις επόμενες χρονικές στιγμές κυματισμού, με βάση την ήδη καταγεγραμμένη μορφή της χρονοσειράς του θαλάσσιου κυματισμού.

Η πρόβλεψη αυτή δίνει την δυνατότητα βελτιστοποίησης του ελέγχου της ηλεκτρικής γεννήτριας και μεγιστοποίησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι περίοδοι των θαλάσσιων κυμάτων κυμαίνονται από 2 έως 10 δευτερόλεπτα που αντιστοιχούν που αντιστοιχούν σε ταχύτητες διάδοσης από 1,3 έως 6,5m/s και μήκη κύματος από 2,5 έως 65m αντίστοιχα.

Από την φασματική ανάλυση (σχήμα 5.26) της μετρημένης χρονοσειράς κυματισμού του σχήματος 5.25, προκύπτει ότι η δεσπόζουσα συνιστώσα έχει μέση περίοδο κυματισμού 6,67sec (0,15 Hz) και η δευτερεύουσα έχει μέση περίοδο 4,3 sec (0,23 Hz) [5.9], [5.13].



Σχήμα 5.25: Μετρημένη χρονοσειρά κυματισμού διάρκειας 300 δευτερολέπτων



Σχήμα 5.26: Φάσμα μετρημένης χρονοσειράς κυματισμού του σχήματος 5.25

Θεωρούμε ότι εντός χρονικού διαστήματος ίσο με το δεκαπλάσιο της περιόδου του θαλάσσιου κυματισμού, δεν είναι πιθανό να εμφανιστούν τεράστιες μεταβολές στις επικρατούσες κυματικές συνθήκες.

Είναι συνεπώς δυνατή η αντικατάσταση ενός τμήματος της τυχαίας χρονοσειράς κυματισμού, από ένα αντίστοιχης διάρκειας ημιτονοειδές κύμα, κατάλληλου πλάτους και συχνότητας και ενεργειακά ισοδύναμου με το αντικαταστημένο τμήμα.

Η χρονοσειρά των 300s του σχήματος 5.25, χωρίζεται σε έξι ίσα διαστήματα, διάρκειας 50s το καθένα. Με βάση τον ρυθμό δειγματοληψίας των 20Hz, κάθε ένα από τα έξι τμήματα απαρτίζεται από 1000 σημεία. Για κάθε διάστημα η μετρημένη χρονοσειρά αναλύεται κατά Fourier και προκύπτουν οι φασματικές αναλύσεις του σχήματος 5.27.



Σχήμα 5.27: Φασματικές αναλύσεις των 6 επιμέρους διαστημάτων της μετρημένης χρονοσειράς κυματισμού

Η μέση ισχύς ενός ημιτονικού κύματος πλάτους Α, υπολογίζεται από την σχέση (5.21).

$$p = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} A^2 \sin^2(2\pi ft) d(2\pi f) = \frac{A^2}{2}$$
(5.21)

Επίσης η μέση ισχύς μιας μετρημένης χρονοσειράς κυματισμού υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (5.22).

$$p = 2\int_{0}^{\infty} S(f)df \approx 2\sum_{i} S_{i}(f)\Delta f$$
(5.22)

Το πλάτος του ενεργειακά ισοδύναμου ημιτονοειδούς κύματος δίνεται από την επόμενη σχέση (5.23).

$$A = \sqrt{4\sum_{i} S_{i}(f)\Delta f}$$
(5.23)

Με βάση τις φασματικές αναλύσεις των 6 διαστημάτων που παρουσιάζονται στο σχήμα 5.27, αλλά και τις σχέσεις (5.21), (5.22) και (5.23), υπολογίζονται η συχνότητες και τα αντίστοιχα πλάτη των 6 ημιτονοειδών κυμάτων που θα αντικαταστήσουν τα αντίστοιχα τμήματα της μετρημένης χρονοσειράς κυματισμού.

Τμήμα	fe [Hz]	A[m]
1	0.1563	0.3929
2	0.1172	0.2474
3	0.1367	0.2963
4	0.1367	0.3366
5	0.1172	0.2187
6	0.1563	0.2

Τα χαρακτηριστικά των ημιτονοειδών κυμάτων που είναι ενεργειακά ισοδύναμα με τα αντίστοιχα τμήματα της μετρημένης χρονοσειράς, συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Συχνότητα και πλάτος ενεργειακά ισοδύναμων ημιτονικών κυμάτων

Με βάση τα χαρακτηριστικά του προηγούμενου πίνακα συντίθεται η ισοδύναμη χρονοσειρά κυματισμού που φαίνεται στο επόμενο σχήμα 5.28, ενώ στο σχήμα 5.29 φαίνεται η ισοδύναμη χρονοσειρά σε παράθεση με την πραγματική χρονοσειρά κυματισμού.



Σχήμα 5.28: Χρονοσειρά διαδοχικών ημιτονικών κυμάτων, ενεργειακά ισοδύναμη με την μετρημένη χρονοσειρά κυματισμού



Σχήμα 5.29: Ισοδύναμη ημιτονική χρονοσειρά σε σχέση με την μετρημένη χρονοσειρά κυματισμού

Η ισοδύναμη χρονοσειρά του σχήματος 5.28, χρησιμοποιείται ως είσοδος στο μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας του συζευγμένου υδραυλικού-μηχανικού-ηλεκτρικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής από τον θαλάσσιο κυματισμό. Η προσομοιωμένη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια φαίνεται στο σχήμα 5.30.



Σχήμα 5.30: Προσομοίωση μετρημένης ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με το προσομοιωμένο μέγεθος. Διακεκομμένη γραμμή: Μετρημένη ηλεκτρική ενέργεια Συνεχής γραμμή: Προσομοιωμένη ηλεκτρική ενέργεια

#### 5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο, αναπτύχθηκε νέο μοντέλο συνολικής προσομοίωσης του συζευγμένου υδραυλικού – μηχανικού – ηλεκτρικού μέρους του πειραματικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής από θαλάσσιο κυματισμό.

Η συζευγμένη θεώρηση των επιμέρους συστημάτων του πειραματικού σταθμού είναι αναγκαία, καθώς υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ της μη γραμμικής συμπεριφοράς των μαγνητικών και ηλεκτρικών κυκλωμάτων της γεννήτριας, με τα δυναμικά χαρακτηριστικά των υδραυλικών φαινομένων.

Η καταλληλότητα του νέου μοντέλου που αναπτύχθηκε, επιβεβαιώθηκε με σύγκριση των αποτελεσμάτων για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, με το αντίστοιχο μετρημένο στον πειραματικό σταθμό μέγεθος. Η μέγιστη απόκλιση που εμφανίζει το προσομοιωμένο μέγεθος της παραγόμενης ενέργειας σε σχέση με την αντίστοιχη μετρημένη ποσότητα, είναι της τάξης των 1000Ws ή 0.28Wh, ενώ εμφανίζονται και σημεία σχεδόν μηδενικής απόκλισης.

Επίσης προτάθηκε μοντελοποίηση των μετρημένων χρονοσειρών κυματισμού με προσομοίωση τους από ενεργειακά ισοδύναμη διαδοχή ημιτονοειδών κυματομορφών συχνότητας ίσης με την δεσπόζουσα συχνότητα του μετρημένου κύματος. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με βάση την ισοδύναμη χρονοσειρά κυματισμού, εμφανίζουν 25% υπερεκτίμηση για την ισχύ και 3% υπερεκτίμηση για την ενέργεια, συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα μετρημένα στον πειραματικό σταθμό μεγέθη.

#### 5.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] Constantinos M. Pournaras, Nikolaos. M. Kimoulakis, Antonios G. Kladas and John A. Tegopoulos, « Dynamic Modeling of an Experimental Power Plant from Sea Waves», Proceedings of the 17th International Conference on Electrical Machines, 2-5 September 2006, Chania, Crete Island, Greece
- [5.2] K. J. Binns, P. J. Lawrenson, C. W. Trowbridge, "*The analytical and numerical solution of electric and magnetic fields*". Wiley, Chichester, 2002.
- [5.3] R. G. Dean, R.A. Dalrymple "Water wave mechanics for Engineers and Scientists" World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., London, 1984
- [5.4] S.A. Mavrakos, and A. Kalofonos, «Optimum Power Absorption by Arrays of Interacting Vertical Axisymmetric Wave-Energy Devices», Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 119, pp. 244–251, 1997
- [5.5] Chatzilakos, C., Lemonis, G., «Economically Efficient Floating Device for the Conversion of Wave Energy into Electricity», 4th European Wave Energy Conference, Aalborg-Denmark, 2000.
- [5.6] N. M. Kimoulakis, A. G. Kladas and J. A. Tegopoulos, «Coupled magneticelectric-mechanical model for alternative configurations comparison of electric power plant from sea waves», Twelfth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation CEFC 2006, April 30th - May 3rd 2006, Miami, USA
- [5.7] Johannes Falnes, "Ocean Waves and Oscillating Systems:Linear Interactions including Wave Energy Extraction", Cambridge University Press, 2002.
- [5.8] M. A. Alhamadi, N. Demerdash, "Modeling and experimental verification of the performance of a skew mounted permanent magnet brushless dc motor drive with parameters computed from 3D FE magnetic field solutions", *IEEE Transactions Energy Conversion*, vol. 9/1, 1994 pp. 26-35.
- [5.9] D. E. Newland "An introduction to random vibrations, spectral and wavelet analysis" Pearson, third edition
- [5.10] D. J. Pizer, "Maximum wave-power absorption of point absorbers under motion constrains" Applied Ocean Research, Vol. 15, Issue 4, 1993, pp. 227-234.
- [5.11] D. D. Bhatta and M. Rahman, "Wave loadings on a vertical cylinder due to heave motion", International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences, Volume 18, Issue 1, 1995, pages 151-170.
- [5.12] J. N. Newman, "Marine Hydrodynamics", 1977 MIT Press.
- [5.13] Z. Yu and J. Falnes, "State-space modeling of a vertical cylinder in heave" Applied Ocean Research Vol.17, Issue 5, 1995, pp. 265-275.
- [5.14] N.M. Kimoulakis, A.G. Kladas, and J.A. Tegopoulos, "Power Generation Optimization from Sea Waves by using a Permanent Magnet Linear Generator Drive", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, Issue 6, June 2008, pp1530-1533.
- [5.15] N. M. Kimoulakis, A. G. Kladas and J. A. Tegopoulos, "Dynamic performance simulation of a four sided linear permanent magnet machine for power generation from sea waves", Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 10 ISS.5-2008, printed date May 14 2008, pp. 1268-1271.

# КЕФАЛАІО 6

## ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ

#### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο πειραματικός σταθμός κατασκευάσθηκε στην Ψυτάλλεια, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ΠΑΒΕΤ 00ΒΕ142 με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 48kW.

Ο τύπος ηλεκτρογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε στον πειραματικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής ήταν γεννήτρια συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Βασικά κριτήρια της επιλογής του συγκεκριμένου είδους μηχανής, ήταν η απλή κατασκευή καθώς και η αξιοπιστία αλλά και η ευελιξία στον έλεγχο του όλου συστήματος. Η συγκεκριμένη επιλογή απαιτεί απλούστερες διατάξεις για τον έλεγχο της ροπής και της ταχύτητας, σε σχέση με άλλα είδη περιστρεφόμενων μηχανών όπως για παράδειγμα ασύγχρονες ή σύγχρονες γεννήτριες.

Ο σταθμός αποτελείται από τρεις επιμέρους μηχανικές διατάξεις, καθεμία από τις οποίες παρέχει κινητήρια ροπή στην αντίστοιχη ηλεκτρική γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Στο σχήμα 6.1 απεικονίζεται μια γενική άποψη του πειραματικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής από θαλάσσιο κυματισμό, όπου διακρίνονται η προβλήτα, ο οικίσκος ελέγχου, καθώς και η διάταξη των τριών επιμέρους ηλεκτρομηχανικών μονάδων απορρόφησης και μετατροπής της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού σε ηλεκτρική



(a)

(b)

Σχήμα 6.1: Χωροταξική διευθέτηση του πειραματικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από θαλάσσιο κυματισμό στην Ψυτάλλεια

a. Πανοραμική άποψη της προβλήτας και του οικίσκου ελέγχου

b. Χωροθέτηση των τριών όμοιων ηλεκτρομηχανικών διατάξεων ηλεκτροπαραγωγής

Η διαμόρφωση του μηχανισμού μετατροπής της κατακόρυφης κίνησης του κυλινδρικού πλωτήρα που αποτέλεσε το μέσο απορρόφησης της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού σε περιστροφική, βασίστηκε σε κατοχυρωμένη ευρεσιτεχνία [6.2] Η μετάδοση της κίνησης γίνεται μέσω κιβωτίου ταχυτήτων, για τον μετασχηματισμό του αριθμού των στροφών που εφαρμόζονται από το μηχανικό σύστημα στον άξονα της ηλεκτρογεννήτριας [6.8].

#### 6.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Το μηχανικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για την απορρόφηση της ενέργειας από τον θαλάσσιο κυματισμό και την μετάδοση κίνησης στην ηλεκτρογεννήτρια, φαίνεται στο σχήμα 6.2 [6.1].



Σχήμα 6.2: Σχηματικό διάγραμμα μηχανικού συστήματος μετατροπής της κατακόρυφης κίνησης του πλωτήρα σε περιστροφική

Ο πλωτήρας (1) είναι στερεωμένος στο άκρο διπαράλληλου ζυγού (3), ο οποίος ταλαντεύεται ελεύθερα με αναφορά ένα κεντρικό άξονα, ακολουθώντας την κίνηση του πλωτήρα. Στο άλλο άκρο του ζυγού προσαρμόζεται σύστημα μετάδοσης κίνησης (4), το οποίο με την βοήθεια αλυσίδων (6) μεταδίδει την κίνηση του ζυγού σε ζεύγος οδοντωτών τροχών (5), οι οποίοι περιστρέφουν τον άξονα (7). Οι οδοντωτοί τροχοί (5) είναι μονοδρομικοί, δηλ. μεταδίδουν ροπή στον άξονα (7) μόνο προς τη μία κατεύθυνση περιστροφής τους. Επειδή η εμπλοκή των αλυσίδων στους δύο τροχούς γίνεται αντιδιαμετρικά, ενεργοποιείται κατά την ανοδική κίνηση ο ένας τροχός και κατά την καθοδική κίνηση ο άλλος, με αποτέλεσμα ο άξονας (7) να περιστρέφεται πάντοτε προς την ίδια κατεύθυνση, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση περιστροφής του ζυγού. Τέλος, στον άξονα (7) συνδέεται ηλεκτρογεννήτρια, η οποία μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική [6.2].

### 6.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Το ηλεκτρικό μέρος της πρότυπης διάταξης για απομονωμένη λειτουργία του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής, περιλαμβάνει γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (ΣΡ), με κατάλληλο σύστημα ελέγχου της διεγέρσεως προκειμένου να προσαρμόζεται στα επιθυμητά επίπεδα η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς, η οποία καταναλίσκεται σε ωμικά φορτία, Η διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους της διατάξεως φαίνεται και στο σχήμα 6.3 [6.5], [6.6].

#### 6.3.1. Ηλεκτρική εγκατάσταση

Η ηλεκτρική εγκατάσταση υποστήριξης των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, περιλαμβάνει πίνακα τροφοδοσίας ΣΡ το μονογραμμικό διάγραμμα του οποίου φαίνεται στο σχήμα 6.4. Επί πλέον ο οικίσκος ελέγχου διαθέτει ηλεκτρικό πίνακα εναλλασσομένου ρεύματος (EP), το μονογραμμικό διάγραμμα του οποίου φαίνεται στο σχήμα 6.5 [6.4].



Σχήμα 6.3: Προτεινόμενη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους για απομονωμένη από το δίκτυο λειτουργία.



Σχήμα 6.4: Μονογραμμικό διάγραμμα πίνακα διανομής συνεχούς ρεύματος Σ.Ρ.





Στο σχήμα 6.4, απεικονίζεται το μονογραμμικό διάγραμμα της ηλεκτρικής εγκατάστασης της πειραματικής διάταξης ηλεκτροπαραγωγής. Η εναλλασσόμενη τάση του δημόσιου δικτύου παροχής ενέργειας (Δ.Ε.Η.), ανορθώνεται με την χρήση κατάλληλων τροφοδοτικών, ώστε να τροφοδοτηθούν τα κυκλώματα διέγερσης των γεννητριών Σ.Ρ. Τα κυκλώματα εξόδου των γεννητριών, προστατεύονται από υπερεντάσεις με την χρήση κατάλληλων ασφαλιστικών διατάξεων. Η ζεύξη των γεννητριών με τα χρησιμοποιούμενα ως καταναλώσεις ωμικά φορτία, γίνεται με την βοήθεια τηλεχειριζόμενων διακοπτών ισχύος.

#### 6.4 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Κάθε μια από τις τρεις μονάδες που συνθέτουν τον πειραματικό σταθμό παραγωγής περιλαμβάνει γεννήτρια ΣΡ ονομαστικής ισχύος 16 kW.

Οι ηλεκτρικές μηχανές που επελέγησαν είναι τύπου NP100NM2-PVA/B35 της εταιρίας SICMEMTORI. Στο σχήμα 6.6 παρουσιάζεται φωτογραφία μιας από τις γεννήτριες τοποθετημένης στον χώρο εγκατάστασης και συζευγμένης με το κιβώτιο γραναζιών για τον πολλαπλασιασμό στροφών, ενώ επίσης διακρίνεται και η αλυσίδα μετάδοσης της κίνησης. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γεννητριών συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης παρατίθενται στον Πίνακα 6.1.

Παράμετρος	Ονομ. τιμή
Ισχύς	$P_N = 16 \text{ kW}$
Τάση τυμπάνου	$U_{AN} = 440 V$
Ρεύμα τυμπάνου	$I_{AN} = 36.4A$
Ταχύτητα	$n_{\rm N} = 3000 \text{ rpm}$
Ρεύμα διέγερσης	$I_{FN} = 1.4 \text{ A}$
Αυτεπαγωγή διέγερσης	$L_{FF} = 30 \text{ H}$
Αντίσταση διέγερσης	$r_f = 167 \text{ Ohm}$
Αυτεπαγωγή τυμπάνου	$L_{AA} = 10.7 \text{ mH}$
Αντίσταση τυμπάνου	$r_a = 0.8 \text{ Ohm}$
Ροπή αδράνειας δρομέα	$0,047 \text{ kg.m}^2$

Πίνακας 6.1: Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας Σ.Ρ.



Σχήμα 6.6: Φωτογραφία ηλεκτρογεννήτριας ΣΡ και κιβώτιου πολλαπλασιαστή στροφών

#### 6.4.1. Σύστημα ελέγχου διέγερσης γεννητριών συνεχούς ρεύματος

Η στρατηγική ελέγχου της παραγόμενης ισχύος μέσω του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας, βασίζεται στη λογική βελτιστοποίησης της παραγόμενης ενέργειας από τα θαλάσσια κύματα με βάση την εκάστοτε ταχύτητα της γεννήτριας. Η μηχανική ανόρθωση που επιτυγχάνεται με τη χρήση του ζεύγους αλυσίδων και τις καστάνιες, δίνει πάντα ομόρροπη περιστροφή στην ηλεκτρογεννήτρια συνεχούς ρεύματος, η οποία διεγείρεται κατάλληλα από το σύστημα ελέγχου και στέλνει την παραγόμενη ισχύ στις αντιστάσεις φορτίου. Στο σχήμα 6.7 φαίνεται η τεχνική βελτιστοποίησης του ρεύματος διεγέρσεως της ηλεκτρογεννήτριας η οποία βασίζεται σε αποθηκευμένη χαρακτηριστική ταχύτητας-ρεύματος και τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) [6.7].



**Σχήμα 6.7:** Μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ και σύστημα ελέγχου του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας ΣΡ χρησιμοποιώντας τεχνική PWM τριγωνικής κυματομορφής.

Για την τροφοδοσία του συστήματος χρησιμοποιείται ένα ειδικό τροφοδοτικό, ελεγχόμενο από μικροεπεξεργαστή, που παρέχει τη δυνατότητα πραγματοποίησης οποιασδήποτε χαρακτηριστικής στροφών – ρεύματος διέγερσης. Η κατασκευή του ειδικού τροφοδοτικού, παρουσιάζεται στο σχήμα 6.8 [6.3].



Σχήμα 6.8: Ειδικό τροφοδοτικό ελέγχου διέγερσης γεννήτριας μέσω στροφών.

Με προγραμματισμό του μικροεπεξεργαστή είναι δυνατή η αποθήκευση κάποιας συγκεκριμένης χαρακτηριστικής ταχύτητας – ρεύματος της γεννήτριας Σ.Ρ., την οποία το τροφοδοτικό παρακολουθεί και με βάση αυτή τροφοδοτεί το τύλιγμα διέγερσης της γεννήτριας.

Το διάγραμμα ροής του συστήματος ελέγχου φαίνεται στο σχήμα 6.9. Η ταχογεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στον άξονα της γεννήτριας δίνει συνεχή τάση ανάλογη του ρυθμού περιστροφής, την οποία διαβάζει ο μικροεπεξεργαστής μετά από καταμερισμό μέσω αντιστάσεων. Ο ωμικός καταμεριστής έχει λόγο 30:1.215, οπότε ο μέγιστος αναμενόμενος ρυθμός περιστροφής είναι εντός του ορίου των +5V του μικροεπεξεργαστή. Η ταχογεννήτρια δίνει 0.06V/σ.α.λ., οπότε η τάση εξόδου για τις ονομαστικές 1500 σ.α.λ. της γεννήτριας Σ.Ρ. είναι 90V.



Σχήμα 6.9: Διάγραμμα ροής συστήματος ελέγχου.

### 6.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η αξιολόγηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του πειραματικού σταθμού παραγωγής ενέργειας από τον θαλάσσιο κυματισμό έγινε με βάση την συστηματική καταγραφή διάφορων μεγεθών των εγκατεστημένων μονάδων μετατροπής της ενέργειας του προσπίπτοντος κυματισμού σε ηλεκτρική, κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους.

Τα μεγέθη που κατεγράφησαν για κάθε μονάδα παραγωγής είναι:

- ύψος προσπίπτοντος κυματισμού
- ηλεκτρικά μεγέθη ηλεκτρογεννητριών (ρεύμα/τάση διέγερσης, τυμπάνου)

Τα μεγέθη που μετρήθηκαν χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση της απόδοσης των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με στόχο τη βελτιστοποίηση των υδροδυναμικών, αδρανειακών και ηλεκτρικών χαρακτηριστικών κάθε μονάδας για μεγιστοποίηση της ενεργειακής της απόδοσης. Για τη μέτρηση των μεγεθών χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα αισθητήρια συνδεδεμένα με σύστημα συλλογής, επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων (data logger).

#### 6.5.1. Περιγραφή συστήματος μετρήσεων

Στα σχήματα 6.10 και 6.11, απεικονίζονται η διάταξη και οι θέσεις εγκατάστασης των αισθητήρων μέτρησης ανά μονάδα ηλεκτροπαραγωγής. Η στάθμη του θαλάσσιου κυματισμού, μετράται με ένα αισθητήρα ποντισμένο στο κέντρο της προβλήτας, σε σημείο όπου να μην επηρεάζεται από τις κινήσεις των πλωτήρων των μονάδων, ενώ στον Πίνακα 6.2 αναφέρονται τα μετρούμενα μεγέθη ανά μονάδα ηλεκτροπαραγωγής και οι τύποι των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 6.10: Διάταξη αισθητήρων μέτρησης



**Σχήμα 6.11:** Άποψη της προβλήτας με τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής όπου διακρίνονται τα σημεία εγκατάστασης των τερματικών πλακετών με τους αισθητήρες μέτρησης

Μέγεθος	Αισθητήρας	Περιοχή τιμών	Τύπος
Θαλάσσια στάθμη	Πιεσόμετρο	3-4 bar	
Κλίση ζυγού	Ποτενσιόμετρο	+/- 30°	BOURNS 3590S-2-104
Ροπή ζυγού	Μηκυνσιόμετρο	350 Ω	HBM 1-DY41-6/350
Τάση διέγερσης γεννήτριας	Βολτόμετρο	0-600 V	LEM LA 35-NP
Τάση τυμπάνου γεννήτριας	Βολτόμετρο	0-600 V	LEM LA 35-NP
Τάση ταχογεννήτριας	Βολτόμετρο	0-250 V	LEM LA 35-NP
Ρεύμα διέγερσης γεννήτριας	Αμπερόμετρο	0-3 A	LEM LT100-P
Ρεύμα τυμπάνου γεννήτριας	Αμπερόμετρο	0-40 A	LEM LT100-P

Πίνακας 6.2: Μετρούμενα μεγέθη και τύπος αισθητήρα μέτρησης

Επίσης στο σχήμα 6.12 παρουσιάζεται η τερματική πλακέτα των αισθητήρων μέτρησης, η οποία εγκαταστάθηκε σε κάθε μονάδα μετατροπής της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού σε ηλεκτρική.

Στο σχήμα 6.13 παρουσιάζεται διάγραμμα της ροής των σημάτων ελέγχου από τους αισθητήρες προς το σύστημα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων.



Σχήμα 6.12: Τερματική πλακέτα αισθητήρων μετρούμενων ηλεκτρικών μεγεθών



Σχήμα 6.13: Σύστημα data-logger και ροή σημάτων αισθητήρων

#### 6.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η κατασκευαστική δομή του πειραματικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής που κατασκευάστηκε στην Ψυτάλλεια Έγινε αναλυτική περιγραφή του μηχανικού μέρους το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την μετατροπή της κατακόρυφης κίνησης του πλωτήρα σε περιστροφική, ενώ παρουσιάστηκαν και τα ηλεκτρολογικά σχέδια τα οποία αφορούν τους πίνακες συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος που χρησιμοποιήθηκαν στον πειραματικό σταθμό.

Διαπιστώνεται συμπερασματικά, ότι οι μονάδες του πειραματικού σταθμού για ηλεκτροπαραγωγή από θαλάσσιο κυματισμό, έχουν ιδιαίτερα ογκώδη κατασκευή, συγκρινόμενες με αντίστοιχες μονάδες εκμετάλλευσης άλλων ήπιων μορφών ενέργειας όπως για παράδειγμα με τις ανεμογεννήτριες. Το γεγονός αυτό βέβαια δικαιολογείται από την φύση του θαλάσσιου κύματος, το οποίο έχει πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα σε σχέση με τον άνεμο.

Η απαίτηση για απλοποίηση του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης, ικανοποιείται με την χρήση γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών για την ηλεκτροπαραγωγή, καθώς γίνεται άμεση μετάδοση της κίνησης του πλωτήρα, χωρίς την ανάγκη παρεμβολής σύνθετων διατάξεων μετατροπής.

#### 6.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [6.1] S.A. Mavrakos, and A. Kalofonos, «Optimum Power Absorption by Arrays of Interacting Vertical Axisymmetric Wave-Energy Devices», Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 119, pp. 244–251, 1997
- [6.2] Chatzilakos, C., Lemonis, G., «Economically Efficient Floating Device for the Conversion of Wave Energy into Electricity», 4th European Wave Energy Conference, Aalborg-Denmark, 2000.
- [6.3] Αντώνιος Χανιώτης, "Ανάπτυξη, προσομοίωση και κατασκευή συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια μονίμων μαγνητών για απομονωμένη και διασυνδεδεμένη λειτουργία", Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π. Ιανουάριος 2007.
- [6.4] N. M. Kimoulakis, S. A. Papathanassiou and A. G. Kladas, «Design and modelling of the electric part of an experimental power plant from sea waves», 16th International Conference on Electrical Machines, 5-8 September 2004, Cracow, Poland, pp. 467-472
- [6.5] N. M. Kimoulakis, A. G. Kladas and J. A. Tegopoulos, «Coupled magneticelectric-mechanical model for alternative configurations comparison of electric power plant from sea waves», Twelfth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation CEFC 2006, April 30th - May 3rd 2006, Miami, USA
- [6.6] Nikolaos M. Kimoulakis, Antonios G. Kladas "Operational Parameters Variation of an Electromechanical Coupled System Exploiting Vertical Motion of Sea Waves", Proceedings 6th Mediterranean Conference on Power Generation Transmission and Distribution MedPower 2008, November 2-5, 2008, Thessaloniki, Greece
- [6.7] N. M. Kimoulakis, A. G. Kladas "Modeling and Control of a Coupled Electromechanical System Exploiting Heave Motion, for Energy Conversion from Sea Waves", Proceedings IEEE 39th Power Electronics Specialists Conference PESC'08, June 15-19, 2008, Rhodes, Greece.
- [6.8] Constantinos M. Pournaras, Nikolaos. M. Kimoulakis, Antonios G. Kladas and John A. Tegopoulos, « Dynamic Modeling of an Experimental Power Plant from Sea Waves», Proceedings of the 17th International Conference on Electrical Machines, 2-5 September 2006, Chania, Crete Island, Greece

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ

#### 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο πειραματικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από τρεις επιμέρους μηχανικές μονάδες, καθεμία από τις οποίες παρέχει κινητήρια ροπή στην αντίστοιχη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Η μετάδοση της κίνησης γίνεται μέσω κιβωτίου γραναζιών, για τον μετασχηματισμό του αριθμού των στροφών που εφαρμόζονται από το μηχανικό σύστημα στον άξονα της ηλεκτρογεννήτριας [7.1], [7.2].

Προκειμένου να διερευνηθεί ο βέλτιστος λόγος μετασχηματισμού για διάφορες συνθήκες κυματισμού, επελέγησαν διαφορετικοί λόγοι για κάθε μία μηχανική μονάδα. Ειδικότερα, στην μονάδα 1 η μετάδοση της κίνησης γίνεται μέσω κιβωτίου γραναζιών με λόγο μετασχηματισμού 1:57, στην μονάδα 2 το κιβώτιο έχει λόγο μετασχηματισμού 1:4 και στην μονάδα 3 λόγο μετασχηματισμού 1:16.

#### 7.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η συλλογή και καταγραφή των μετρήσεων έγινε με την βοήθεια μετρητικής διάταξης ελεγχόμενης από Η/Υ με κατάλληλο για αυτό τον σκοπό λογισμικό. Σε όλες τις σειρές μετρήσεων που ελήφθησαν και για όλα τα μεγέθη που μετρήθηκαν, ο ρυθμός δειγματοληψίας ήταν 20 μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο. Για το σύνολο των σειρών μετρήσεων ακολούθησε επεξεργασία και γραφική αναπαράσταση των μεγεθών, σαν συνάρτηση του συνολικού χρόνου δειγματοληψίας.

Δεκάδες σειρές μετρήσεων καταγράφηκαν και επεξεργάστηκαν, τόσο για να αναλυθεί η συμπεριφορά των μονάδων σε διάφορες τυχαίες χρονοσειρές κυματισμού και να αξιολογηθεί η καταλληλότητα τους για ηλεκτροπαραγωγή, όσο και για να αξιολογηθεί η αξιοπιστία των μοντέλων προσομοίωσης που αναπτύχθηκαν.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η περίπτωση που αφορά τον κυματισμό μέγιστου ενεργειακού περιεχομένου, μεταξύ του συνόλου των σειρών μετρήσεων που διενεργήθηκαν κατά την περίοδο λειτουργίας του πειραματικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής.

Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις για τα μεγέθη που παρακολουθήθηκαν μέσω του μετρητικού συστήματος, σε κάθε μια από τις 3 συζευγμένες υδραυλικές-μηχανικές-ηλεκτρικές μονάδες του πειραματικού σταθμού.
Οι γραφικές παραστάσεις αποδίδουν την μεταβολή του κάθε μεγέθους για το συνολικό χρόνο της καταγραφής και επίσης παρουσιάζεται και γραφική παράσταση η οποία εστιάζει στην χρονική στιγμή εμφάνισης της μέγιστης τιμής της του μεγέθους. Επίσης δίνονται γραφικές παραστάσεις των μεγεθών, όπως αυτές προκύπτουν από την προσομοίωση της λειτουργίας της συνολικής συζευγμένης διάταξης, με την χρήση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν.

## 7.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΑΤΑΓΕΓΡΑΜΜΕΝΟΥ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ

Συνολική διάρκεια καταγραφής: 5 λεπτά.







Σχήμα 7.1: Γραφικές παραστάσεις του κύματος για την καταγραφή διάρκειας 300s. a: Μετρημένο μέγεθος b: Προσομοιωμένο μέγεθος

### 7.3.1.2. Μέγιστες τιμές

Η χρονική περιοχή εμφάνισης της μέγιστης τιμής του κύματος παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:





Σχήμα 7.2: Μέγιστες τιμές του κύματος για την καταγραφή διάρκειας 300s. a: Μετρημένο μέγεθος b: Προσομοιωμένο μέγεθος

Η συγκεκριμένη καταγραφή είχε συνολική χρονική διάρκεια 5 λεπτά. Το ύψος κύματος εμφάνισε μέγιστη τιμή της τάξης των 0,4 m .Στη μεγαλύτερη χρονική διάρκεια της καταγραφής το ύψος κύματος έφτασε σε τιμές από 0 μέχρι 0,4m. Η προσομοίωση της

κυματομορφής του θαλάσσιου κύματος μέσω του συζευγμένου μοντέλου που αναπτύχθηκε, ταυτίζεται απόλυτα με την μετρημένη χρονοσειρά κυματισμού.



## 7.3.2. Μονάδα 1 – Ταχύτητα περιστροφής



Σχήμα 7.3: Γραφικές παραστάσεις της ταχύτητας περιστροφής a: Μετρημένο μέγεθος b: Προσομοιωμένο μέγεθος

## 7.3.2.1. Μέγιστες τιμές ταχύτητας

Η χρονική περιοχή εμφάνισης της μέγιστης τιμής της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα 7.4.







b

Σχήμα 7.4: Μέγιστες τιμές της ταχύτητας περιστροφής. a: Μετρημένο μέγεθος b: Προσομοιωμένο μέγεθος

## 7.3.3. Μονάδα 1 – Παραγόμενη ισχύς



α: Μετρημένο μέγεθος

b: Προσομοιωμένο μέγεθος

#### 7.3.3.1. Μέγιστες τιμές παραγόμενης ισχύος

Η χρονική περιοχή εμφάνισης της μέγιστης τιμής της παραγόμενης ισχύος της μηχανής παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα 7.6.



Σχήμα 7.6: Μέγιστες τιμές παραγόμενης ισχύος a: Μετρημένο μέγεθος b: Προσομοιωμένο μέγεθος

## 7.3.4. Παρατηρήσεις

Η μονάδα 1 εμφάνισε στιγμιαία μέγιστη ταχύτητα της τάξης των 160 σ.α.λ.. Γενικότερα η κυματομορφή της μετρημένης ταχύτητας παρουσιάζει έντονες αιχμές που φτάνουν και τα 140 σ.α.λ., ενώ για αρκετά χρονικά διαστήματα η ταχύτητα της μηχανής είχε τιμή ακόμη και μικρότερη των 10 σ.α.λ.. Το γεγονός μπορεί να ερμηνευθεί με βάση το ότι το μικρό ύψος κύματος που επικρατούσε κατά την διάρκεια της συγκεκριμένης καταγραφής, δεν ήταν ικανό σε πολλές περιπτώσεις να υπερνικήσει την μεγάλη αδράνεια του συστήματος αλλά και την μεγάλη αντίσταση στην κίνηση που εμφάνιζε το κιβώτιο ταχυτήτων εξαιτίας του μεγάλου λόγου μετασχηματισμού του. Η προσομοίωση της ταχύτητας απέδωσε ανάλογα με τα μετρημένα μεγέθη αποτελέσματα, με κάπως καλύτερο μέσο όρο για την τιμή της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας.

Η μετρημένη ισχύς της γεννήτριας εμφάνισε μέγιστη τιμή της τάξης των 43 W ενώ η προσομοιωμένη μέγιστη τιμή ισχύος πλησιάζει τα 55 W. Στην προσομοίωση η μέση τιμή της ισχύος είναι της τάξης των 10 W ενώ η μετρημένη μέση τιμή της ισχύος είναι αρκετά μικρότερη.

## 7.3.5. Μονάδα 2 – Ταχύτητα περιστροφής





Σχήμα 7.7: Γραφικές παραστάσεις της ταχύτητας περιστροφής a: Μετρημένο μέγεθος b: Προσομοιωμένο μέγεθος

#### 7.3.5.1. Μέγιστες τιμές ταχύτητας

Η χρονική περιοχή εμφάνισης της μέγιστης τιμής της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα 7.8.







Σχήμα 7.8: Μέγιστες τιμές της ταχύτητας περιστροφής. a: Μετρημένο μέγεθος b: Προσομοιωμένο μέγεθος

## 7.3.6. Μονάδα 2 – Παραγόμενη ισχύς







Σχήμα 7.9: Γραφικές παραστάσεις της παραγόμενης ισχύος. a: Μετρημένο μέγεθος b: Προσομοιωμένο μέγεθος

#### 7.3.6.1. Μέγιστες τιμές παραγόμενης ισχύος

Η χρονική περιοχή εμφάνισης της μέγιστης τιμής της παραγόμενης ισχύος της μηχανής παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα 7.6.



a



Σχήμα 7.10: Μέγιστες τιμές παραγόμενης ισχύος a: Μετρημένο μέγεθος b: Προσομοιωμένο μέγεθος

#### 7.3.7. Παρατηρήσεις

Η μηχανή εμφάνισε στιγμιαία μέγιστη μετρημένη ταχύτητα της τάξης των 200 Σ.Α.Λ.. Η κυματομορφή της μετρημένης ταχύτητας παρουσιάζει έντονες αιχμές που φτάνουν σε μερικές περιπτώσεις τις . Η κυματομορφή παρουσιάζει μεγάλη πυκνότητα μέχρι και την τιμή των 50 Σ.Α.Λ..

Η προσομοίωση της ταχύτητας απέδωσε ανάλογα με τα μετρημένα μεγέθη αποτελέσματα, με μέγιστη τιμή κοντά στις 210 ΣΑΛ.

Η μετρημένη ισχύς της γεννήτριας εμφάνισε μέγιστη τιμή της τάξης των 60W ενώ η προσομοιωμένη μέγιστη τιμή ισχύος έφτασε τα 65 W. Στην προσομοίωση η μέση τιμή της ισχύος είναι της τάξης των 10 W ενώ η μετρημένη μέση τιμή της ισχύος είναι μικρότερη.

## 7.3.8. Μονάδα 3 – Ταχύτητα περιστροφής





Σχήμα 7.11: Γραφικές παραστάσεις της ταχύτητας περιστροφής a: Μετρημένο μέγεθος b: Προσομοιωμένο μέγεθος

#### 7.3.8.2. Μέγιστες τιμές ταχύτητας

Η χρονική περιοχή εμφάνισης της μέγιστης τιμής της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα 7.12.



a



Σχήμα 7.12: Μέγιστες τιμές της ταχύτητας περιστροφής. a: Μετρημένο μέγεθος b: Προσομοιωμένο μέγεθος

## 7.3.9. Μονάδα 3 – Παραγόμενη ισχύς



a



Σχήμα 7.13: Γραφικές παραστάσεις της παραγόμενης ισχύος. a: Μετρημένο μέγεθος b: Προσομοιωμένο μέγεθος

#### 7.3.9.2. Μέγιστες τιμές παραγόμενης ισχύος

Η χρονική περιοχή εμφάνισης της μέγιστης τιμής της παραγόμενης ισχύος της μηχανής παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα 7.14.



a



Σχήμα 7.14: Μέγιστες τιμές παραγόμενης ισχύος a: Μετρημένο μέγεθος b: Προσομοιωμένο μέγεθος

#### 7.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε όλες τις περιπτώσεις που μετρήθηκαν, η ισχύς του κυματισμού ήταν πολύ χαμηλή, με αποτέλεσμα η μέση τιμή της παραγόμενης ισχύος να κυμαίνεται σε επίπεδα μερικών δεκάδων Watt. Από τις καταγραφές των χρονικών διαστημάτων εμφάνισης μέγιστης τιμής της ισχύος, οι αποκρίσεις των μοντέλων ήταν ικανοποιητικές τόσο για τα μηχανικά χαρακτηριστικά (ταχύτητα δρομέα) όσο και για τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (παραγόμενη ισχύς).

Η μέγιστη ισχύς που μετρήθηκε ήταν 600 W περίπου (σχήμα 7.14) για ταχύτητα δρομέα γεννήτριας περίπου 600 ΣΑΛ (σχήματα 7.12). Παρατηρούμε ότι ακόμα και κατά την διάρκεια αυτής της αιχμής ισχύος οι λειτουργικές συνθήκες της γεννήτριας ήσαν μακριά από τα ονομαστικά χαρακτηριστικά της (3000 ΣΑΛ).

Προκειμένου να διερευνήσουμε την απόδοση μιας τέτοιας διατάξεως στο κυματισμό της συγκεκριμένης καταγραφής, αρκεί να συγκρίνουμε την δυνατότητα μέσης παραγωγής ισχύος σε σχέση με την μέση ισχύ του κυματισμού. Όπως φάνηκε από την υδροδυναμική ανάλυση (σχήμα 5.26), η μέση ισχύς του κύματος της καταγραφής που μελετάμε, ήταν 952 Watt. Στην περίπτωση που είχαμε προσαρμογή του φορτίου για τον κυματισμό αυτό, η μέση τιμή της παραγόμενης ισχύος θα ήταν 217 Watt από την προσομοίωση που απεικονίζεται στο σχήμα 7.16. Επομένως η συνολική απόδοση της διατάξεως σε χαμηλό κυματισμό είναι 22.7%

Από τις μετρήσεις και τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώθηκε ότι η λειτουργική συμπεριφορά του σταθμού παραγωγής είναι εντός των προδιαγεγραμμένων χαρακτηριστικών και τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν αποδίδουν με ικανοποιητική ακρίβεια τα μεγέθη που μετρήθηκαν.







Σχήμα 7.16: Παραγόμενη μέση ηλεκτρική ισχύς

## 7.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [7.1] ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ ΠΑΒΕΤ 00ΒΕ142: «Πειραματικός Σταθμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας από τον Θαλάσσιο Κυματισμό», Αθήνα, Σεπτέμβριος 2004
- [7.2] ΚΛΑΔΆΣ Α., ΜΑΥΡΑΚΟΣ ΣΠ., Ε.Μ.Π., ΚΟΥΛΑΚΟΓΛΟΥ Σ., ΑΘΗΝΑ ΑΤΕ, ΛΕΜΟΝΗΣ Γ., Κ.Α.Π.Ε., ΧΑΤΖΗΛΑΚΟΣ Κ., «Πειραματικός Σταθμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας από Θαλάσσιο Κυματισμό», 3ο Εθνικό Συνέδριο RENES, Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ "Προοπτικές και Προτεραιότητες προς το Στόχο του 2010", Αθήνα, 23-25 Φεβρουαρίου 2005

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στο κεφάλαιο αυτό ανακεφαλαιώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας, επισημαίνονται τα σημεία πρωτότυπης επιστημονικής συνεισφοράς της και προτείνονται ορισμένα θέματα για περαιτέρω έρευνα, που αναδείχθηκαν με την ολοκλήρωση της.

#### 8.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διερευνήθηκαν οι πιθανές εναλλακτικές διαμορφώσεις συζευγμένων ηλεκτρομηχανικών συστημάτων, κατάλληλων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον θαλάσσιο κυματισμό. Επίσης αναπτύχθηκαν κατάλληλα αριθμητικά μοντέλα για την ανάλυση και τον σχεδιασμό του ελέγχου αυτών των συστημάτων. Τα μοντέλα εφαρμόστηκαν σε επιδεικτικό πειραματικό σταθμό μετατροπής της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων σε ηλεκτρική, που κατασκευάστηκε στην Ψυτάλλεια στα πλαίσια του ερευνητικού έργου ΠΑΒΕΤ 00ΒΕ142, με τίτλο «Πειραματικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από θαλάσσιο κυματισμό».

Όπως προέκυψε από την ενεργειακή ανάλυση των θαλασσίων κυμάτων, τα κύρια χαρακτηριστικά τους όπως η ταχύτητα μετάδοσης c και το μήκος κύματος L, εξαρτώνται από το βάθος h της θάλασσας καθώς και τον χρόνο διάρκειας μιας περιόδου του θαλάσσιου κυματισμού. Ειδικά στην περίπτωση κυμάτων σε θαλάσσια περιοχή με μεγάλο βάθος, προκύπτει ότι η ταχύτητα μετάδοσης ενός θαλάσσιου κύματος είναι περίπου c=0,64T ενώ το μήκος του θαλάσσιου κύματος είναι περίπου ίσο με L=0,64T<sup>2</sup>, όπου T είναι ο χρόνος διάρκειας μιας περιόδου του κύματος. Για τα τυπικά θαλάσσια κύματα με περιόδους από 2 έως 10 δευτερόλεπτα που εμφανίζονται σε θαλάσσιες περιοχές μεγάλου βάθους, αντιστοιχούν ταχύτητες διάδοσης από 1,3 έως 6,5m/s και μήκη κύματος από 2,5 έως 65m.

Επιπλέον η μελέτη των εφαρμοζόμενων δυνάμεων επί ενός πλωτού σώματος όταν αυτό χρησιμοποιείται για την απορρόφηση της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού, ανέδειξε ότι τον δεσπόζοντα ρόλο σε αυτού του είδους τις εφαρμογές δεν παίζουν οι δυνάμεις άνωσης αλλά οι υδροδυναμικές δυνάμεις. Αυτό το συμπέρασμα επιβάλλει την συζευγμένη θεώρηση των υποσυστημάτων (υδραυλικού – μηχανικού –ηλεκτρικού) που συνθέτουν το συνολικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής από θαλάσσιο κυματισμό. Πρόσθετο στοιχείο για την αναγκαιότητα της συζευγμένης θεώρησης των επιμέρους συστημάτων του πειραματικού σταθμού, είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ της μη γραμμικής συμπεριφοράς των μαγνητικών και ηλεκτρικών κυκλωμάτων της γεννήτριας, με τα δυναμικά χαρακτηριστικά των υδραυλικών φαινομένων.

Για την ηλεκτροπαραγωγή από θαλάσσιο κυματισμό, οι εξής δύο τύποι γεννητριών: γεννήτρια συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης και γραμμική γεννήτρια μονίμων μαγνητών.

Κύρια κριτήρια επιλογής στην περίπτωση της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος ήταν η απλή κατασκευή της καθώς και η αξιοπιστία αλλά και η ευελιξία στον έλεγχο του όλου συστήματος. Η απαίτηση όμως σε αυτή την περίπτωση για μετατροπή της κατακόρυφης κίνησης του πλωτήρα σε περιστροφική, διαμορφώνει τελικά μια ιδιαίτερα ογκώδη κατασκευή για την απορρόφηση και μετατροπή της ενέργειας των θαλασσίων κυμάτων σε ηλεκτρική. Στην περίπτωση της γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών, το βασικό όφελος προκύπτει από την απλοποίηση του απαιτούμενου μηχανικού μέρους, καθώς γίνεται άμεση μετάδοση της κίνησης του πλωτήρα, χωρίς την ανάγκη παρεμβολής σύνθετων διατάξεων μετατροπής.

Για την ακριβή απόδοση της αναπαράστασης των γεννητριών που εξετάστηκαν, απαιτήθηκε πλήρης ανάλυση της κατανομής του μαγνητικού τους πεδίου με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, καθώς ο εφαρμοζόμενος έλεγχος με στόχο την βελτιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας ακόμη και από κυματισμό χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου, μπορεί να οδηγήσει σε βραχυχρόνια εμφάνιση φαινομένων τοπικού κορεσμού στο μαγνητικό υλικό των γεννητριών.

Προκειμένου να επιτευχθεί αποδοτική ανάλυση της κατανομής του μαγνητικού πεδίου γραμμικών γεννητριών μονίμων μαγνητών, σε γεωμετρία δύο διαστάσεων, οδηγηθήκαμε στην ανάπτυξη μιας νέας μεικτής τεχνικής πεπερασμένων στοιχείων αναλυτικών λύσεων. Με την νέα αυτή μεικτή τεχνική, είναι δυνατή η θεώρηση μαγνητών υπό κλίση στον δρομέα της γραμμικής γεννήτριας και η ανάλυση, σε καρτεσιανές συντεταγμένες, της κατανομής του μαγνητικού πεδίου στο επίπεδο διάκενο της γεννήτριας.

Από την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου της γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών, αναδείχθηκε η ανάγκη διαφοροποίησης της αυτεπαγωγής των τυλιγμάτων της γεννήτριας, αφενός σε συνάρτηση με την θέση του δρομέα ως προς το στάτη και αφετέρου σε σχέση με το ρεύμα φορτίου. Ειδικότερα, διαπιστώθηκε διακύμανση της αυτεπαγωγής από 0.015 έως 0.025H (μεταβολή 40% της τιμής της) για μετατόπιση του δρομέα κατά ένα πολικό βήμα. Επίσης στην περίπτωση υπερφόρτισης της γεννήτριας κατά 25% του ονομαστικού της ρεύματος, παρατηρήθηκε διακύμανση της τιμής της αυτεπαγωγής από 0.025 σε 0.018H (μείωση κατά 28%).

Επίσης, με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, επιχειρήθηκε γεωμετρική βελτιστοποίηση των μαγνητών της γραμμικής γεννήτριας, με στόχο την ελαχιστοποίηση της αναπτυσσόμενης δύναμης ευθυγράμμισης. Ως βέλτιστη γεωμετρία των επιφανειακών μαγνητών αναδείχθηκε αυτή της ορθογωνικής διατομής, με πλάτος μαγνήτη ίσο με το 70% του πολικού βήματος. Σχετικά με την επίδραση της κλίσης των μαγνητών στην τιμή της δύναμης ευθυγράμμισης, το μοντέλο έδειξε ότι για κλίση των μαγνητών ίση με ένα βήμα αύλακος, επιτυγχάνεται 20% βελτίωση στην κυμάτωση της δύναμης ευθυγράμμισης.

Η ακρίβεια του συζευγμένου υδραυλικού – μηχανικού – ηλεκτρικού μοντέλου, επιβεβαιώθηκε με σύγκριση των αποτελεσμάτων του με εκείνα του πειραματικού σταθμού. Η μέγιστη απόκλιση που εμφανίζει το προσομοιωμένο μέγεθος της παραγόμενης ενέργειας σε σχέση με την αντίστοιχη μετρημένη ποσότητα, είναι της τάξης του 3%.

Στον πειραματικό σταθμό που κατασκευάστηκε στην Ψυτάλλεια, μετρήθηκαν τα χαρακτηριστικά μεγέθη του υδραυλικού, του μηχανικού και του ηλεκτρικού υποσυστήματος. Η συλλογή και καταγραφή των μετρήσεων έγινε με χρήση Η/Υ, με την βοήθεια της κάρτας data acquisition National Instruments PCI-6601 και με το λογισμικό LabView.

Παρότι η παραγόμενη ισχύς που μετρήθηκε ήταν σημαντικά μικρότερη της ονομαστικής δυνατότητας του συστήματος, μετρήθηκε βαθμός απόδοσης του συστήματος που ήταν 22,7%, ιδιαίτερα ικανοποιητικός για αυτή την κατηγορία εφαρμογών.

## 8.2 ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΑΓΩΓΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

Τα κύρια σημεία στα οποία έχει συμβάλλει η παρούσα διδακτορική διατριβή στην προαγωγή της επιστήμης είναι τα παρακάτω:

- Η ανάπτυξη ειδικού μοντέλου το οποίο επιτρέπει την συζευγμένη θεώρηση των υδραυλικών, μηχανικών και ηλεκτρικών φαινομένων, μιας διάταξης ηλεκτροπαραγωγής από τον θαλάσσιο κυματισμό.
- Η ανάπτυξη νέας μεικτής τεχνικής πεπερασμένων στοιχείων αναλυτικής λύσης με δυνατότητα θεώρησης κεκλιμένων μαγνητών στον δρομέα γραμμικών γεννητριών, για την μελέτη της επίδρασης της κλίσης στα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μηχανής με στόχο την γεωμετρική βελτιστοποίηση της.
- Η ανάπτυξη προσεγγιστικού μοντέλου εκτίμησης της παραγόμενης ενέργειας που βασίζεται σε προσέγγιση της πραγματικής χρονοσειράς θαλάσσιου κυματισμού, από αντίστοιχη ενεργειακά ισοδύναμη χρονοσειρά, η οποία αποτελείται από διαδοχικά ημίτονα με βάση την δεσπόζουσα συχνότητα.
- Η ανάπτυξη μεθόδου πρόβλεψης με βάση την καταγεγραμμένη προϊστορία του κύματος, με αποτέλεσμα την βελτιστοποίηση του ελέγχου της γεννήτριας και την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η σχεδίαση ειδικής γραμμικής γεννήτριας μόνιμων μαγνητών, κατάλληλης για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής από θαλάσσιο κυματισμό σε παράκτιους σταθμούς.

## 8.3 ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής αναδείχθηκαν τα ακόλουθα σημεία, η ανάλυση των οποίων αξίζει να αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης. Τέτοια σημεία είναι τα εξής:

- Η κατασκευή πρότυπου δοκιμίου της προτεινόμενης τετράπλευρης γραμμικής γεννήτριας μονίμων μαγνητών, για πειραματική επιβεβαίωση της απόδοσης της σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής από θαλάσσιο κυματισμό.
- Διερεύνηση της επέκτασης των γραμμικών γεννητριών μονίμων μαγνητών και σε άλλες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής, όπου η δυναμική του συστήματος σε γραμμική μετατόπιση είναι δεσπόζουσα, όπως η αξιοποίηση της ενέργειας των αποσβεστήρων ταλαντώσεων (amortisseur) των οχημάτων.