



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Σχεδιασμός και μελέτη μεταβατικής συμπεριφοράς αξονικής γεννήτριας πλοίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παύλος Α. Πολυχρονόπουλος

**Επιβλέπων :** Αντώνιος Κλαδάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2011





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Σχεδιασμός και μελέτη μεταβατικής συμπεριφοράς αξονικής γεννήτριας πλοίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παύλος Α. Πολυχρονόπουλος

**Επιβλέπων:** Αντώνιος Δ. Κλαδάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .....

.....  
Α.Κλαδάς

.....  
Σ. Παπαθανασίου

.....  
Ι. Προυσαλίδης

Αθήνα, Μάιος 2011



.....  
Πάυλος Α. Πολυχρονόπουλος  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Πάυλος Α. Πολυχρονόπουλος, 2011  
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 το συγγραφέα.

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



## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς μιας αξονικής γεννήτριας πλοίου. Σχεδιάστηκε μια σύγχρονη γεννήτρια, με τεχνικά χαρακτηριστικά κατάλληλα ώστε να προσλαμβάνει κινητήρια ισχύ απευθείας από τον άξονα πρόωσης πλοίου.

Αρχικά, παρουσιάστηκαν τα συστήματα ηλεκτροπρόωσης, οι εφαρμογές τους, καθώς και η δυνατότητα χρησιμοποίησης γεννητριών οι οποίες προσλαμβάνουν κινητήρια ισχύ από τον άξονα πρόωσης πλοίων. Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε αξονική σύγχρονη γεννήτρια με τη χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Ακολούθησε ο προσδιορισμός των παραμέτρων του δυναμικού μοντέλου της.

Επιπλέον, μελετήθηκε σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η μεταβολή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής συναρτήσει της εσωτερικής γωνίας ροπής και υπολογίστηκε η επαγόμενη ΗΕΔ στα τυλίγματα του στάτη κατά τη λειτουργία της. Οι προαναφερθείσες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με ευρείας διάδοσης λογισμικά που χρησιμοποιούν την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου διατάξεων και την αριθμητική ολοκλήρωση διαφορικών εξισώσεων για την μοντελοποίηση δυναμικών συστημάτων (FEMM και Matlab/Simulink, αντίστοιχα).

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η συμπεριφορά της γεννήτριας σε περιπτώσεις τριφασικού βραχυκυκλώματος και απότομης μεταβολής της μηχανικής ροπής. Τέλος, εξετάστηκε η δυναμική συμπεριφορά της αξονικής γεννήτριας σε περιπτώσεις λειτουργίας της ως ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης περιορισμένης ισχύος για τη πρόωση του σκάφους σε έκτακτες περιπτώσεις βλάβης της κινητήριας μηχανής.

## Λέξεις Κλειδιά

Ηλεκτροπρόωση, πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο, LNG πλοίο, σύγχρονη γεννήτρια έκτυπων πόλων, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, μετασχηματισμός Park.





## **Abstract**

The present diploma thesis undertakes the design and transient analysis of a ship's shaft generator. A synchronous generator has been designed, based on specifications and standards permitting to be directly driven from the ship's shaft.

An introduction of the electric propulsion systems and their applications has been presented along with the possibility of driving directly a synchronous generator. In a first step a shaft generator has been designed by using a software based on the finite element method. In a second step the dynamic model parameters of the generator have been determined.

In addition, the steady state behavior of the generator has been analysed by calculating the electromagnetic torque variation with the generator internal angle as well as the induced EMF in stator windings. The above mentioned analyses were carried out by using popular packages based on the finite element method for the magnetic field analysis and numerical time integration methodologies for differential equations solution and dynamic systems simulation (FEMM and Matlab/Simulink software, respectively).

Moreover, the dynamic generator response has been modeled in cases of three phase short-circuit and mechanical torque variations.

Finally, the dynamic response of the shaft generator has been examined ensuring electric propulsion under limited power motor operation in cases of emergency due to important failure in the main propulsion engine.

## **Keywords**

Electric propulsion, All Electric Ship, Liquefied Net Gases ship, synchronous generator with salient poles, finite element method, Park transformation.



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ θερμά τους επιβλέποντες της διπλωματικής εργασίας, Καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (Ε.Μ.Π.) κ. Αντώνιο Κλαδά και Καθηγητή της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών (Ε.Μ.Π.) κ. Ιωάννη Προυσαλίδη, για την ευκαιρία που μου προσέφεραν να ασχοληθώ με το ενδιαφέρον αυτό θέμα. Η καθοδήγησή τους σε όλα τα στάδια εκπόνησής της ήταν για μένα πολύτιμη. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αντώνιο Κλαδά για τις γνώσεις που μου μετέδωσε, τόσο στο πλαίσιο των προπτυχιακών μαθημάτων όσο και κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους υποψήφιους διδάκτορες κ. Μίνωα Μπενιακάρ και Χαράλαμπο Πάτσιο για τη συνεχή βοήθεια και συνεργασία τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω τη διπλωματική μου εργασία στην οικογένειά μου, η οποία με στηρίζει ηθικά αλλά και οικονομικά όλα αυτά τα χρόνια στην προσπάθειά μου να πετύχω τους στόχους και τα όνειρά μου.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>17</b>
1.1 Ηλεκτροπρόωση.....	17
1.2 Εφαρμογές της ηλεκτροπρόωσης	19
1.3 Αίτια χρήσης της ηλεκτροπρόωσης.....	20
1.4 Εναλλακτικές διαμορφώσεις ηλεκτρικών δικτύων πλοίων.....	21
1.5 Είδη αξονικών γεννητριών.....	22
1.6 Διαμορφώσεις συστημάτων μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.....	23
1.7 Χρήση αξονικής γεννήτριας της παρούσας διπλωματικής.....	25
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ</b> .....	<b>27</b>
2.1 Σύγχρονη τεχνολογία.....	27
2.2 Σύγχρονη αξονική γεννήτρια έκτυπων πόλων.....	27
2.2.1 Ο στάτης της σύγχρονης γεννήτριας.....	28
2.2.2 Ο δρομέας της σύγχρονης γεννήτριας.....	30
2.3 Επαγόμενη ΗΕΔ στο στάτη.....	31
2.4 Κυκλωματικό ισοδύναμο σύγχρονης γεννήτριας.....	34
2.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες σύγχρονης γεννήτριας.....	36
2.5.1 Χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος.....	36
2.5.2 Χαρακτηριστική βραχυκυκλώσεως.....	37
2.6 Σύνδεση των τριών φάσεων του στάτη.....	38
2.7 Μετασχηματισμός Park.....	39
2.8 Ανά μονάδα σύστημα.....	44
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ</b> .....	<b>45</b>
3.1 Σχεδιασμός της σύγχρονης γεννήτριας.....	45
3.2 Τιμές μαγνητικής επαγωγής στη σύγχρονη αξονική γεννήτρια.....	50
3.3 Η μαγνητική ροή στο διάκενο.....	55
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ</b> .....	<b>57</b>
4.1 Εκτίμηση των $d, q$ αυτεπαγωγών της γεννήτριας στη μόνιμη κατάσταση.....	57
4.1.1 Υπολογισμός $L_d$ .....	58
4.1.2 Υπολογισμός $L_q$ .....	60
4.2 Εκτίμηση των $d, q$ αυτεπαγωγών στη μεταβατική κατάσταση.....	62
4.2.1 Υπολογισμός $L_d'$ .....	62
4.3 Εκτίμηση των $d, q$ αυτεπαγωγών στην υπομεταβατική κατάσταση.....	65
4.3.1 Υπολογισμός $L_d''$ .....	65
4.3.2 Υπολογισμός $L_q''$ .....	67
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ</b>	<b>71</b>
5.1 Ροή ισχύος στη σύγχρονη γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα.....	71
5.2 Ροή ισχύος στη σύγχρονη γεννήτρια έκτυπων πόλων.....	73
5.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	80



<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....</b>	<b>87</b>
6.1 Προσομοίωση επίδοσης γεννήτριας.....	87
6.2 Επαγόμενη ΗΕΔ στο στάτη.....	95
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....</b>	<b>101</b>
7.1 Δυναμικό μοντέλο αξονικής γεννήτριας.....	101
7.2 Εξίσωση μηχανικού μέρους της αξονικής γεννήτριας.....	106
7.3 Εύρεση της γωνίας $\theta$ .....	109
7.4 Μετασχηματισμός Park.....	110
7.5 Το q-block διάγραμμα.....	111
7.6 Το d-block διάγραμμα.....	112
7.7 Αντίστροφος μετασχηματισμός Park.....	114
7.8 Εύρεση τερματικής τάσης, ρεύματος στάτη, ενεργούς και άεργου ισχύος της γεννήτριας.....	116
7.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	118
7.9.1 Μεταβολή της μηχανικής ροπής για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.....	118
7.9.2 Μεταβολή της μηχανικής ροπής για επαγωγικό συντελεστή ισχύος .....	124
7.9.3 Μεταβολή της μηχανικής ροπής για χωρητικό συντελεστή ισχύος .....	129
7.9.4 Τριφασικό βραχυκύκλωμα.....	134
7.10 Η αξονική γεννήτρια ως ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης.....	143
7.10.1 Μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς της αξονικής γεννήτριας.....	144
7.10.1.1 Επιλογή καλωδίων.....	147
7.10.1.2 Περιγραφή των ελεγκτών.....	148
7.10.2 Αποτελέσματα.....	150
7.10.2.1 Βηματική ανάληψη φορτίου.....	151
7.10.2.2 Βαθμιαία ανάληψη φορτίου.....	156
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>161</b>
8.1 Συμπεράσματα.....	161
8.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης.....	163
8.3 Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση.....	163
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....</b>	<b>165</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....</b>	<b>168</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....</b>	<b>172</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.....</b>	<b>174</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε.....</b>	<b>176</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>179</b>





# 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στόχος της είναι η σχεδίαση, αναπαράσταση και μελέτη μεταβατικής συμπεριφοράς γεννήτριας που χρησιμοποιείται ως αξονική γεννήτρια σε πλοία. Η παρούσα εργασία αναπτύσσεται σε οκτώ κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο επιχειρείται μια εισαγωγή στην ηλεκτροπρόωση και μια ανασκόπηση των κυριότερων συστημάτων ηλεκτροπρόωσης πλοίων. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας μίας σύγχρονης μηχανής και ειδικότερα μιας σύγχρονης γεννήτριας. Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσεται ο σχεδιασμός της αξονικής γεννήτριας. Στο τέταρτο κεφάλαιο υπολογίζονται οι παράμετροι του στατικού και δυναμικού μοντέλου της. Στο πέμπτο κεφάλαιο μελετάται η ροή ισχύος για τη σύγχρονη γεννήτρια έκτυπων πόλων της εργασίας. Στο έκτο κεφάλαιο προσομοιώνεται η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της αξονικής γεννήτριας. Στη συνέχεια, στο έβδομο κεφάλαιο, προσδιορίζονται οι παράμετροι του δυναμικού μοντέλου της αξονικής γεννήτριας και μελετάται η δυναμική της συμπεριφορά όταν αυτή λειτουργεί ως ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης σε έκτακτες περιπτώσεις.

Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο ανακεφαλαιώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας, παρουσιάζονται τα θέματα που αναδείχθηκαν και χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης και επισημαίνονται τα σημεία προαγωγής της επιστήμης.

### 1.1 Ηλεκτροπρόωση <sup>[20],[21],[28]</sup>

Ως ηλεκτροπρόωση ορίζεται το είδος εκείνο της πρόωσης στο οποίο οι άξονες του πλοίου κινούνται απ' ευθείας (ή και σπανιότερα μέσω μειωτήρων) από ηλεκτρικούς κινητήρες και όχι από άλλες μηχανές όπως ντήζελ, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους. Φυσικά οι κινητήρες ντήζελ, αεριοστρόβιλοι και ατμοστρόβιλοι εξακολουθούν να υπάρχουν στις εγκαταστάσεις ηλεκτροπρόωσης, αλλά αντί να κινούν απ' ευθείας το αξονικό σύστημα με την έλικα κινούν ηλεκτρικές γεννήτριες, που με τη σειρά τους τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες προώσεως, οπότε και αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως "prime movers" ('κινητήριες μηχανές'). Η προωστήρια εγκατάσταση συμπληρώνεται από κάποιο σύστημα ελέγχου για τον χειρισμό της, δηλαδή την εκκίνηση, την αυξομείωση στροφών και την αλλαγή φοράς περιστροφής των ηλεκτρικών κινητήρων.

Η ηλεκτρική πρόωση έχει αρχίσει να εφαρμόζεται πριν από περίπου 55 χρόνια. Επί μεγάλο διάστημα, η χρήση των συστημάτων είχε σκοπό την παραγωγή συνεχούς ρεύματος και κίνηση με συνεχές ρεύμα. Το εναλλασσόμενο ρεύμα αρχίζει να χρησιμοποιείται στα πλοία στις αρχές της δεκαετίας του 1950, αλλά τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης εξακολουθούν να στηρίζονται σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Κατά την τελευταία εικοσαετία, η ανάπτυξη διατάξεων και τεχνικών ελέγχου κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος (ηλεκτρονικά ισχύος), που να ικανοποιούν τις

απαιτήσεις της πρόωσης από πλευράς τόσο ευελιξίας όσο και οικονομίας καυσίμου, έδωσε τη δυνατότητα για ευρύτερη διάδοση της ηλεκτρικής πρόωσης σε εμπορικά πλοία. Γενικότερα, η διαρκώς αυξανόμενη χρήση της ηλεκτροπρόωσης δημιουργεί νέα δεδομένα για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας των πλοίων. Τα τεχνολογικά επιτεύγματα στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος και η εφαρμογή τους στους κινητήρες πρόωσης προσφέρουν μεγάλα πλεονεκτήματα σε σχέση με το παρελθόν αλλά παράλληλα δημιουργούν μεγαλύτερες απαιτήσεις από την πλευρά της παραγωγής, του ελέγχου, της διανομής και της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος.

Δεδομένης της ραγδαίως αναπτυσσόμενης έρευνας επί των ηλεκτροπροωστικών συστημάτων, είναι αναγκαίο να διευκρινισθούν οι παρακάτω βασικοί όροι που χρησιμοποιούνται συχνά στη σύγχρονη βιομηχανία<sup>[20],[21],[28]</sup> :

➤ Πλήρης Ηλεκτροπρόωση (Full Electric Propulsion) :

Η εγκατάσταση προώσεως κατά την οποία το πλοίο κινείται αποκλειστικά από ηλεκτρικούς κινητήρες. Τα ζεύγη κινητηρίων μηχανών-γεννητριών που τροφοδοτούν τους κινητήρες προώσεως, υπάρχουν αποκλειστικά για το σκοπό αυτό (δεν τροφοδοτούν δηλαδή άλλα φορτία). Η ηλεκτρική ισχύς για όλους τους άλλους καταναλωτές του πλοίου παράγεται από άλλες γεννήτριες.

➤ Ολοκληρωμένη Πλήρης Ηλεκτροπρόωση (Integrated Full Electric Propulsion - I.F.E.P.) :

Η εγκατάσταση ηλεκτροπρόωσης στην οποία τα ίδια ζεύγη κινητηρίων μηχανών - γεννητριών, τροφοδοτούν τόσο τους ηλεκτρικούς κινητήρες προώσεως, όσο και τα υπόλοιπα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου.

➤ Πλήρως Εξηλεκτρισμένο πλοίο ( All Electric Ship -A.E.S. ) :

Το πλοίο που διαθέτει ολοκληρωμένη πλήρη ηλεκτροπρόωση και επιτελεί σε ευρεία έκταση τις λειτουργίες του μέσω ηλεκτρικών μηχανημάτων και συστημάτων.

➤ Ηλεκτρικό δίκτυο προώσεως (Propulsion Network) :

Το τμήμα εκείνο (ανεξάρτητο ή 'ενσωματωμένο') του ηλεκτρικού δικτύου πλοίου που τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία που σχετίζονται με την πρόωση.

➤ Ηλεκτρικό δίκτυο χρήσεως (Ship Service System) :

Το υπόλοιπο, πλην δικτύου προώσεως, ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου.

## 1.2 Εφαρμογές της ηλεκτροπρόωσης<sup>[20],[21],[28]</sup>

Ενώ παλαιότερα η ηλεκτρική πρόωση έβρισκε μόνο πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές (παγοθραυστικά, ερευνητικά σκάφη, σκάφη πόντισης καλωδίων), κατά τη δεκαετία του '90 παρουσιάζει μια έντονα αυξανόμενη διάδοση σε πλοία όπως μεγάλα επιβατηγά, οχηματαγωγά, κρουαζιερόπλοια, δεξαμενόπλοια, κ.λπ.

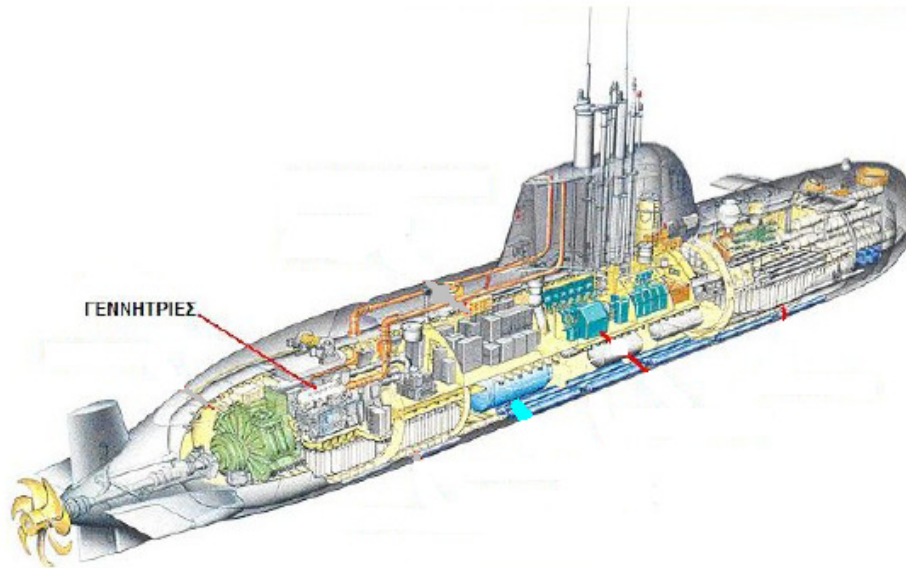


*Σχήμα 1.1 Δεξαμενόπλοιο στο οποίο εφαρμόζεται η ηλεκτρική πρόωση.*

Γενικά, η ηλεκτρική πρόωση μπορεί να αποδειχθεί η καταλληλότερη λύση στις ακόλουθες κατηγορίες εφαρμογών:

- Σκάφη με υψηλές απαιτήσεις ελκτικών ικανοτήτων.
- Σκάφη με μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων.
- Σκάφη με μεγάλα φορτία ενδιαίτησης και έντονη διακύμανση της ισχύος πρόωσης
- Σκάφη εξοπλισμένα με πολλές ταχύστροφες μη αναστρέψιμες μηχανές.
- Υποβρύχια και βαθυσκάφη.

Ειδικά, όσον αφορά στα πολεμικά πλοία, η ηλεκτροπρόωση αποτελεί τη βασική επιλογή για την κίνηση των υποβρυχίων. Η χρήση της σε πολεμικά πλοία επιφάνειας, που μέχρι σήμερα ήταν σχετικά περιορισμένη, προσελκύει ξανά το έντονο ενδιαφέρον των ναυτικών χωρών που κατασκευάζουν πολεμικά πλοία και εξετάζεται πλέον σαν υποψήφιο σύστημα για την πρωστήρια εγκατάσταση της επόμενης γενιάς και των μεγάλων πολεμικών πλοίων<sup>[20],[21],[28]</sup>.



**Σχήμα 1.2** Υποβρύχιο στο οποίο εφαρμόζεται η ηλεκτρική πρόωση.

### 1.3 Αίτια χρήσης ηλεκτροπρόωσης<sup>[20],[21]</sup>

Οι κύριες αιτίες της αναζωπύρωσης του ενδιαφέροντος της θαλάσσιας βιομηχανίας για τη χρήση της ηλεκτροπρόωσης είναι :

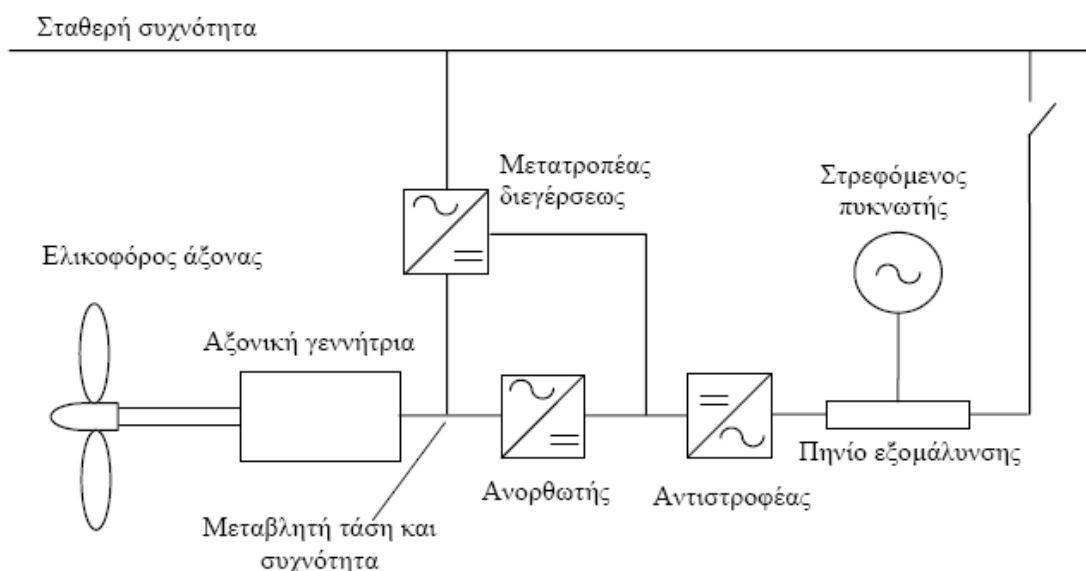
- Η αύξηση των ηλεκτρικών καταναλωτών στα πλοία και η τάση για την ‘ηλεκτροποίηση’ των πλοίων (με αποκορύφωση το Πλήρως Εξηλεκτρισμένο Πλοίο), δηλαδή η τάση όλες οι λειτουργίες, κύριες και βοηθητικές, να γίνονται πλέον από ηλεκτρικά συστήματα και μηχανήματα αντικαθιστώντας π.χ. υδραυλικά, μηχανικά ή συστήματα ατμού.
- Η ανάγκη για περισσότερο ‘αθόρυβη’ λειτουργία των πλοίων.
- Η αναζήτηση προωστήριων συστημάτων με χαμηλότερο κόστος ζωής και μειωμένες απαιτήσεις επανδρώσεως.
- Η ωρίμανση τεχνολογιών που απαιτούνται για να αξιοποιηθεί το πλήρες δυναμικό της ηλεκτροπρόωσης. Τέτοιες τεχνολογίες είναι κυρίως των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος για τον έλεγχό τους.

Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή συστήματος ηλεκτροπρόωσης για ένα πλοίο, προσφέρει περισσότερη ελευθερία στη σχεδίαση και στην επιλογή των υποσυστημάτων και της διάταξης όλης της προωστήριας και ηλεκτρικής εγκατάστασης. Σε κάθε περίπτωση αξίζει να σημειωθεί, ότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι η μόνη λύση για τη βοηθητική πρόωση (δηλαδή το σύστημα των πλευρικών προωστήριων μηχανισμών που επαυξάνουν την ελικτική ικανότητα των σκαφών ιδίως εντός των λιμένων) με αξιοποίηση κυρίως επαγωγικών κινητήρων μεγάλης ισχύος<sup>[20],[21]</sup>.

#### 1.4 Εναλλακτικές διαμορφώσεις ηλεκτρικών δικτύων πλοίων <sup>[21],[27]</sup>

Σε πλοία με συμβατική πρόωση, ειδική υποπερίπτωση αποτελούν τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνουν και γεννήτριες άξονα (shaft generators), δηλαδή γεννήτριες που στρέφονται από την κύρια νηξέλο-μηχανή πρόωσης του πλοίου. Διαφορετικά, αξονική γεννήτρια είναι κάθε γεννήτρια η οποία λαμβάνει μηχανική ισχύ από το αξονικό σύστημα του σκάφους-πλοίου. Η αξονική γεννήτρια είναι σύγχρονη ή ασύγχρονη ηλεκτρική μηχανή απ' ευθείας συνδεδεμένη με τον ελικοφόρο άξονα του πλοίου η οποία παίρνει κίνηση από αυτόν και χρησιμοποιείται σαν μια επιπρόσθετη πηγή ενέργειας όταν το πλοίο κινείται, ενώ έχει και αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης. Ένα βασικό πρόβλημα στην χρήση αξονικών γεννητριών είναι η επίτευξη σταθερής τάσης και συχνότητας ειδικά όταν μεταβάλλονται οι στροφές της μηχανής και κατά συνέπεια του άξονα.

Σήμερα, για την επίτευξη σταθερής τάσης και συχνότητας χρησιμοποιούνται οι στατοί μετατροπείς (static converters). Η σύγχρονη αξονική γεννήτρια παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα μεταβλητής συχνότητας και τάσης. Μετά την ανόρθωση το ρεύμα δίνεται στο ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου με σταθερή τιμή τάσης και συχνότητας μέσω ενός ανορθωτή όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.3. Ένας στρεφόμενος πυκνωτής αναλαμβάνει την παραγωγή άεργου ισχύος. Ο βαθμός απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος φτάνει περίπου το 80%, αλλά παρ' όλα τα εμφανή πλεονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος, υπάρχει ένα βασικό μειονέκτημα : η κυματομορφή της έντασης και της τάσης του ρεύματος είναι παραμορφωμένες στην έξοδο του μετατροπέα, περιέχουν δηλαδή αρμονικές οι οποίες επηρεάζουν την ποιότητα ηλεκτρικής ισχύος <sup>[21],[27]</sup>.



Σχήμα 1.3 Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας <sup>[27]</sup>.

## 1.5 Είδη αξονικών γεννητριών <sup>[20],[21],[22]</sup>

Για τις αξονικές γεννήτριες διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Σύγχρονες γεννήτριες που οδηγούνται από ένα μηχανικό, υδραυλικό ή ηλεκτρικό σύστημα κίνησης διατεταγμένες, ώστε να λειτουργούν με μια σταθερή συχνότητα.
- Ασύγχρονες γεννήτριες που λειτουργούν με μεταβλητή συχνότητα διέγερσης στο κύκλωμα του δρομέα. Οι διαμορφώσεις με τις γεννήτριες αυτού του τύπου βρίσκονται προς το παρόν σε πειραματικό στάδιο.
- Γεννήτριες συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος που χρησιμοποιούν μετατροπείς για να συνδεθούν με το σύστημα ισχύος. Οι διαμορφώσεις με γεννήτριες αυτού του τύπου αξιοποιούνταν στο παρελθόν, ωστόσο σήμερα λόγω του ότι έχουν ιδιαίτερα υψηλό κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης δεν βρίσκουν εφαρμογή <sup>[22]</sup>.

Οι σύγχρονες γεννήτριες αυτές μπορεί να συνδέονται με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο με σύνδεσμο συνεχούς ρεύματος ή να τροφοδοτούν αυτόνομα μόνο μεγάλα φορτία όπως οι κινητήρες βοηθητικής πρόωσης. Ενίοτε, σε έκτακτες περιπτώσεις (π.χ. μεγάλης έκτασης ζημία στην κύρια μηχανή) μπορούν να λειτουργήσουν και αντίστροφα, δηλαδή ως ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης (τροφοδοτούμενες από τις άλλες ηλεκτρογεννήτριες) περιορισμένης ισχύος και να οδηγήσουν το σκάφος σε ασφαλή προορισμό.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 ήταν η χρήση αξονικών γεννητριών σε συνδυασμό με δίχρονες κύριες νηξελομηχανές. Η τιμή του πετρελαίου την περίοδο εκείνη ήταν αναλογικά πολύ υψηλότερη από ότι είναι σήμερα και οι περισσότερες νηξελογεννήτριες δεν μπορούσαν να λειτουργήσουν με βαρύ πετρέλαιο το οποίο ήταν το φθηνότερο είδος πετρελαίου. Για αυτό λοιπόν, η ώθηση των εταιρειών στη χρήση αξονικών γεννητριών έγινε για οικονομικούς κυρίως λόγους.

Η χρήση όμως των αξονικών γεννητριών για την τροφοδότηση των ηλεκτρικών δικτύων των πλοίων συνδέεται με σειρά τεχνικών προβλημάτων, τα οποία θα περιγραφούν στη συνέχεια. Οι μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής του ελικοφόρου άξονα κατά την περίοδο ελιγμών του πλοίου, κατά τη διέλευση διωρύγων, σε περίπτωση τρικυμίας ή ακόμα εξ' αιτίας λανθασμένων εντολών του αξιωματικού βάρδιας, οδηγούν σε παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος της αξονικής γεννήτριας με μεταβαλλόμενη τιμή της τάσης και της συχνότητας.

Μια λύση που δόθηκε για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος, ήταν η τοποθέτηση κατάλληλων γριναζοκιβωτίων μεταξύ της αξονικής γεννήτριας και του ελικοφόρου άξονα του πλοίου, και η χρήση κατάλληλου συνδυασμού γριναζιών για την όσο το δυνατόν σταθεροποίηση της ταχύτητας περιστροφής της αξονικής

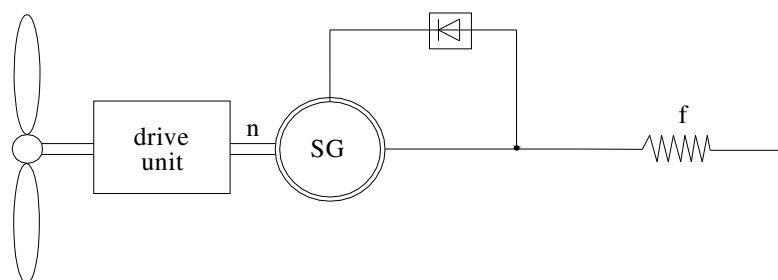
γεννήτριας. Η ενέργεια αυτή έλυνε το πρόβλημα σε μεγάλο βαθμό, αλλά όχι ριζικά. Όργανα του πλοίου υψηλής ευαισθησίας στις μεταβολές της συχνότητας όπως το βυθόμετρο, η γυροπυξίδα, το ραντάρ δε μπορούσαν να λειτουργήσουν σωστά με αυτού του είδους το ρεύμα που τα τροφοδοτούσε η αξονική γεννήτρια και έπρεπε να έχουν ξεχωριστό μεταλλάκτη με σταθεροποιητή συχνότητας.

Σήμερα, λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των ηλεκτρονικών ισχύος, το πρόβλημα της σταθεροποίησης της συχνότητας εναλλασσομένου ρεύματος που παράγουν οι αξονικές γεννήτριες μπορεί να λυθεί με τη χρήση ημιαγωγικών στοιχείων, τα οποία οδηγούμενα με μεγάλη ισχύ ανοίγουν νέες δυνατότητες σταθεροποίησης της συχνότητας χάρη στην κατασκευή ημιαγωγικών μετατροπέων<sup>[20],[21]</sup>.

## 1.6 Διαμορφώσεις συστημάτων μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική<sup>[14],[23]</sup>

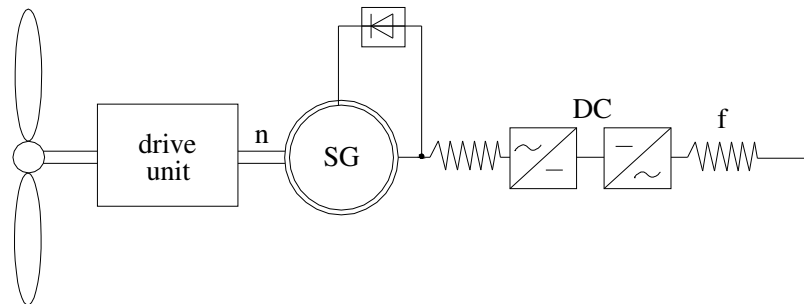
Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε «ηλεκτρικά διεγερόμενη» σύγχρονη αξονική γεννήτρια. Ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύγχρονη γεννήτρια και με «μόνιμους μαγνήτες». Πλεονεκτήματα των πρώτων είναι η δυνατότητα ελέγχου της διεγέρσεως και συνεπώς της παραγωγής έργου ισχύος, ενώ οι δεύτερες είναι απλούστερες και στιβαρότερες. Παρακάτω αναφέρονται μία σειρά από χαρακτηριστικές διαμορφώσεις συστημάτων μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική για σύγχρονες μηχανές, που έχουν εφαρμοστεί ή εξετάζεται η εφαρμογή τους<sup>[23]</sup>.

- (1) **Απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο.** Λειτουργούν βεβαίως μόνο με τη σύγχρονη ταχύτητα που επιβάλλεται από το δίκτυο, μπορεί όμως να ελέγχεται η ροή έργου ισχύος.



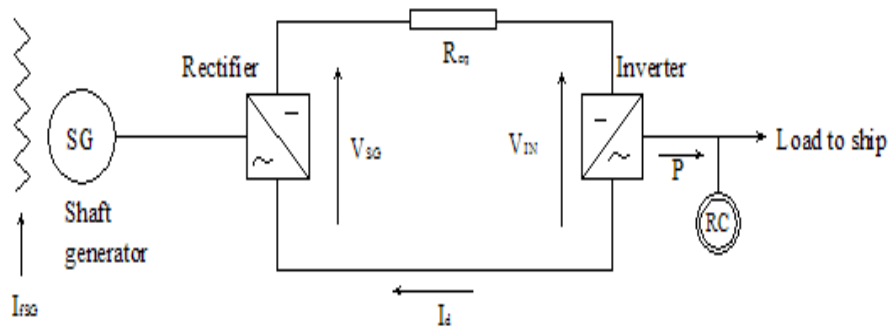
**Σχήμα 1.4** Απ' ευθείας σύνδεση με ηλεκτρική διέγερση<sup>[23]</sup>.

- (2) **Με μετατροπέα AC/DC/AC.** Μπορεί να λειτουργεί με μεταβλητές στροφές (π.χ. 0.5 - 1.2 φορές τις σύγχρονες). Άεργος ισχύς για τον αντιστροφέα μπορεί να λαμβάνεται από το δίκτυο.



**Σχήμα 1.5** Σύνδεση μέσω μετατροπέα AC/DC/AC με ηλεκτρική διέγερση<sup>[23]</sup>.

Σε επίπεδο ηλεκτρικών μεγεθών, το σχήμα θα μπορούσε να δοθεί ως εξής :

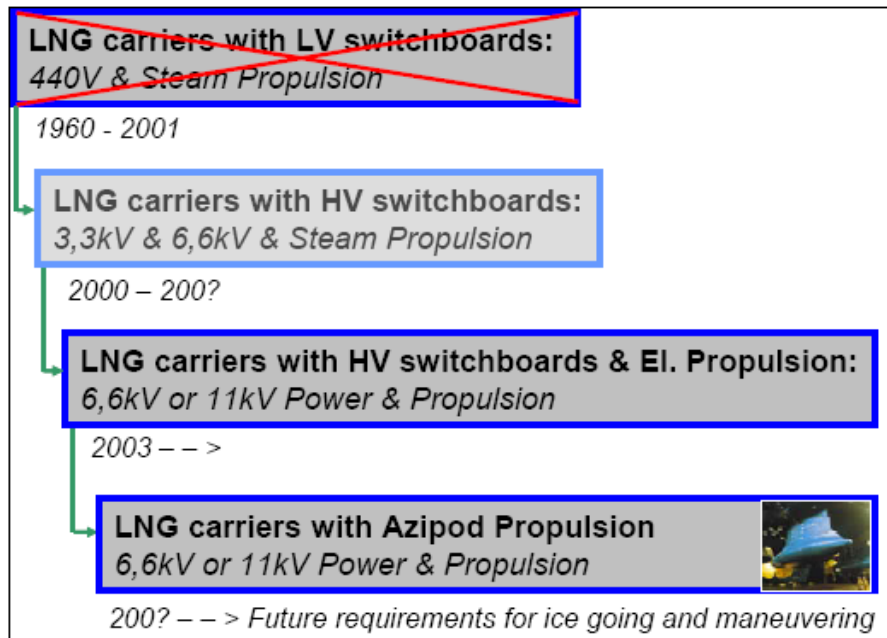


**Σχήμα 1.6** Τρόπος αξιοποίησης της αξονικής γεννήτριας<sup>[14]</sup>.



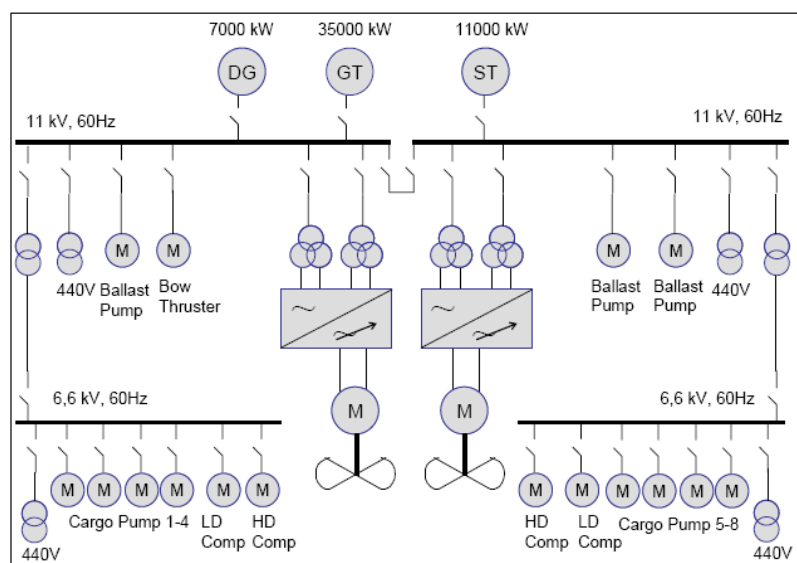
## 1.7 Χρήση αξονικής γεννήτριας της παρούσας διπλωματικής

Τα τελευταία χρόνια τα επίπεδα τάσης που χρησιμοποιούνται γενικότερα στα πλοία αυξάνουν ολοένα και περισσότερο. Χαρακτηριστικά δίνεται το σχήμα :



Σχήμα 1.7 Εξέλιξη ηλεκτρικού δικτύου LNG πλοίου.

Η σύγχρονη αξονική γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία παράγει εναλλασσόμενη τάση 11.000 V. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να βρει εφαρμογή στα σύγχρονα πλοία με παράλληλη χρήση ενός μετασχηματιστή υποβιβασμού της τάσης στα επιθυμητά επίπεδα.



Σχήμα 1.8 Μέρος ηλεκτρικού δικτύου LNG πλοίου.



## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

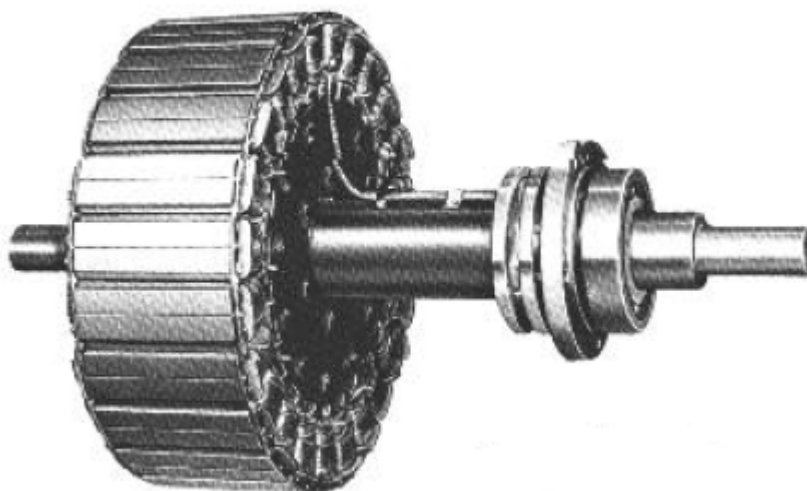
### ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

#### 2.1 Σύγχρονη τεχνολογία <sup>[20],[21]</sup>

Η πλειονότητα των μηχανών είναι σύγχρονες και έχουν βαθμό απόδοσης 96-98%, υψηλότερο κατά 3 - 4% σε σχέση με το βαθμό απόδοσης των μηχανών επαγωγής. Η ονομαστική τάση λειτουργίας στις εγκαταστάσεις μέσης και μεγάλης ισχύος είναι 3,3 - 6,6 kV. Στις σύγχρονες μηχανές έρχεται να προστεθεί μία νέα κατηγορία αυτή των σύγχρονων μηχανών με μόνιμους μαγνήτες των οποίων η απόδοση σύμφωνα με τους κατασκευαστές τους υπερβαίνει το 98%. Ανεξαρτήτως του τρόπου δημιουργίας του μαγνητικού πεδίου, το αποτέλεσμα είναι το ίδιο καθώς και στις δύο περιπτώσεις παράγεται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σταθερής τιμής που στρέφεται στο χώρο με την ταχύτητα του δρομέα <sup>[20],[21]</sup>.

Στη διπλωματική εργασία μελετάται η περίπτωση σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων με τύλιγμα διεγέρσεως δρομέα το οποίο διαρρέεται από συνεχές ρεύμα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές λειτουργίες που διέπουν μια σύγχρονη γεννήτρια.

#### 2.2 Σύγχρονη αξονική γεννήτρια έκτυπων πόλων <sup>[3],[6],[7],[8]</sup>

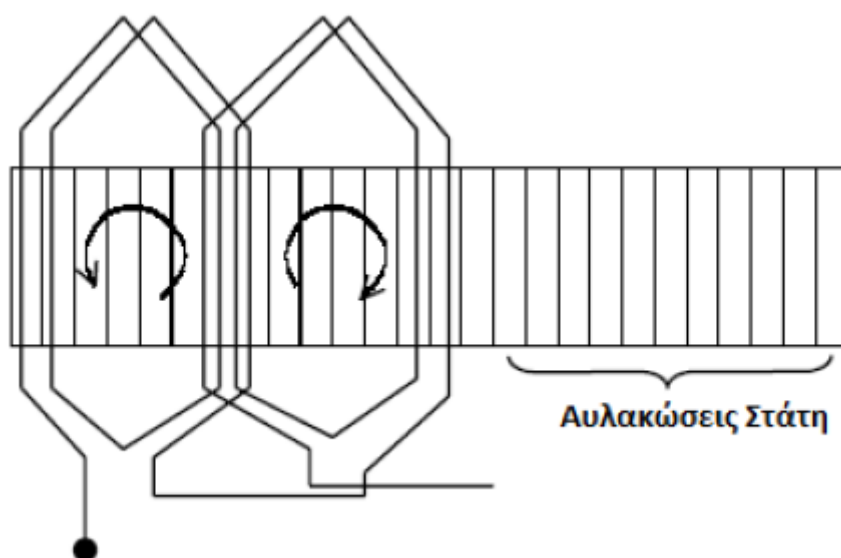


**Σχήμα 2.1** Δρομέας έκτυπων πόλων και στάτης <sup>[3]</sup>.

Δημιουργείται μία σταθερή κυλινδρική κατασκευή, με κατάλληλα διατεταγμένους αγωγούς (τύλιγματα), οι οποίοι δημιουργούν τρία διαφορετικά κυκλώματα (τριφασικό τύλιγμα). Η κυλινδρική αυτή κατασκευή είναι ο στάτης. Ο πυρήνας του στάτη αποτελείται από μονωμένα ελάσματα χάλυβα. Το πάχος των ελασμάτων και ο τύπος χάλυβα επιλέγονται για να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες δινορευμάτων και υστέρησης, διατηρώντας το απαραίτητο μήκος του πυρήνα και ελαχιστοποιώντας το κόστος. Ο πυρήνας τοποθετείται επάνω στο πλαίσιο. Ο πυρήνας διαθέτει ανοικτές

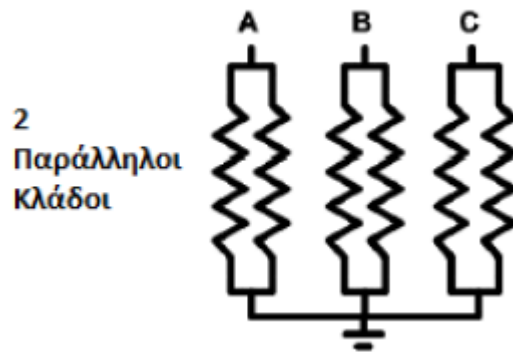
αυλακώσεις και οι σπείρες αποτελούν το τύλιγμα τοποθετούνται μέσα στις αυλακώσεις. Υπάρχουν δύο τύποι τυλιγμάτων τυμπάνου το βροχοτύλιγμα και το κυματοτύλιγμα, αλλά στην αξονική γεννήτρια της παρούσας διπλωματική, θα χρησιμοποιηθούν τυλίγματα διπλής στρώσεως με βροχοτύλιγμα.

### 2.2.1 Ο στάτης της σύγχρονης γεννήτριας <sup>[3],[6],[7],[8]</sup>



**Σχήμα 2.2** Μια φάση του τυλίγματος του στάτη. Διακρίνονται οι αυλακώσεις, οι πόλοι και ένα μέρος του τυλίγματος.

Οι σπείρες διανέμονται στο στάτη με διάφορους τρόπους όπου ο κάθε ένας έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Για παράδειγμα το βροχοτύλιγμα μπορεί να τροφοδοτεί με μεγάλο ρεύμα, διότι το ολικό ρεύμα κατανέμεται σε πολλούς παράλληλους κλάδους. Αντίθετα, το κυματοτύλιγμα δίνει μεγαλύτερη τάση εξ' επαγωγής διότι έχουμε περισσότερους αγωγούς συνδεδεμένους σε σειρά. Ο βασικός στόχος είναι να ληφθούν τρεις συμμετρικές και ημιτονοειδείς τάσεις που έχουν πολύ λίγο αρμονικό περιεχόμενο, επειδή οι αρμονικές που μπορεί να υπάρχουν στις τάσεις και τα ρεύματα είναι επιβλαβείς για τη μηχανή και τον εξοπλισμό. Για να πετύχει επιθυμητή τάση και ισχύ, ο σχεδιαστής μπορεί να χρησιμοποιήσει διαφορετικό συνδυασμό στον αριθμό αυλακώσεων και στον τρόπο σύνδεσης των σπειρών παράγοντας διάφορα σχέδια τυλιγμάτων.



**Σχήμα 2.3** Σχηματική αναπαράσταση των τυλιγμάτων στάτη της αξονικής γεννήτριας με παράλληλη σύνδεση.

Στην αξονική γεννήτρια, τα τμήματα του τυλίγματος συνδέονται παράλληλα με κλασματικό βήμα  $\frac{12}{15}$ . Το τύλιγμα του στάτη δημιουργείται από προκατασκευασμένες συστάδες αγωγών, δηλαδή εντός μίας αυλάκωσης βρίσκονται δύο πλευρές πηνίων. Αυτό σημαίνει ότι, στη συγκεκριμένη περίπτωση, μια συστάδα αγωγών καλύπτει τα  $\frac{12}{15}$  της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων. Μάλιστα, η γωνιακή απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων της μηχανής ονομάζεται πολικό βήμα. Ακόμη, το βήμα μιας συστάδας κλασματικού βήματος δίνεται σε ηλεκτρικές μοίρες από τη σχέση :

$$\rho = \frac{\theta_m}{\rho_p} \cdot 180^\circ \quad (2.2.1.1)$$

όπου

$\theta_m$  : η μηχανική γωνία που καλύπτει σε συστάδα οι μοίρες και

$\rho_p$  : το πολικό βήμα της μηχανής σε μοίρες

Συνήθως τοποθετείται τυλίγματα διπλής στρώσεως για τη βελτίωση της ημιτονικότητας της κατανομής πεδίου. Επίσης το τύλιγμα του στάτη είναι διανεμημένο τύλιγμα χορδής, για να καταστέλλει τις αρμονικές στην έξοδο της γεννήτριας. Ισχύει η σχέση <sup>[3],[6],[7],[8]</sup> :

$$Q = m \cdot P \cdot q \quad (2.2.1.2)$$

όπου

$m$  : ο αριθμός των φάσεων

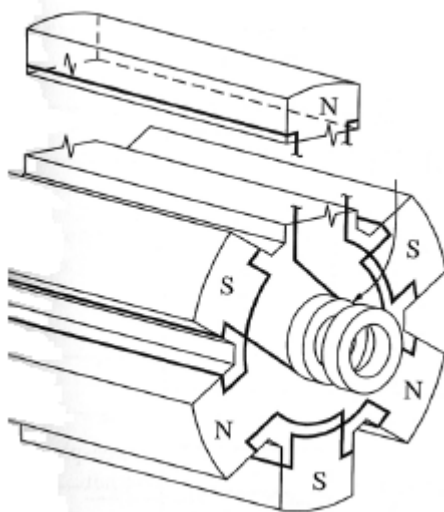
$P$  : ο αριθμός των πόλων της μηχανής

$q$  : ο αριθμός αυλακώσεων ανά πόλο και ανά φάση

$Q$  : ο αριθμός των αυλακώσεων της μηχανής

## 2.2.2 Ο δρομέας της σύγχρονης γεννήτριας<sup>[3],[6],[7],[8],[12]</sup>

Στο εσωτερικό του στάτη τοποθετείται ένας κυλινδρικός άξονας που έχει δυνατότητα περιστροφής. Ο κυλινδρικός αυτός άξονας αποτελεί το δρομέα. Στο δρομέα τοποθετούνται επίσης κατάλληλα διατεταγμένοι αγωγοί που δημιουργούν ένα κύκλωμα (τύλιγμα).



**Σχήμα 2.4** Σχηματική αναπαράσταση του δρομέα έκτυπων πόλων της εξαπολικής αξονικής γεννήτριας πλοίου<sup>[12]</sup>.

Ο δρομέας, στην προκείμενη περίπτωση, είναι έκτυπων πόλων. Οι περισσότερες μηχανές έκτυπων πόλων έχουν έξι ή περισσότερους πόλους. Αυτές περιλαμβάνουν όλους τους σύγχρονους υδροστρόβιλους, τους σύγχρονους αντισταθμιστές και την συντριπτική πλειοψηφία των σύγχρονων κινητήρων. Η αξονική γεννήτρια που θα μελετηθεί είναι μια εξαπολική γεννήτρια.

Τα πέλματα των δρομέων έκτυπων πόλων αποτελούνται από ελάσματα για την αποφυγή δινορευμάτων, διότι σε αυτή την περίπτωση το μαγνητικό πεδίο παρουσιάζει κάποια μεταβολή. Το τύλιγμα διέγερσης τυλίγεται γύρω από το πέλμα. Οι μηχανές έκτυπων πόλων έχουν ένα ακόμη τύλιγμα στο δρομέα. Αυτό το τύλιγμα είναι φτιαγμένο από χάλκινες μπάρες που βραχυκυκλώνονται και στις δύο άκρες τους και είναι τοποθετημένες στην κεφαλή του πόλου. Ο ρόλος αυτών των μπαρών είναι να ξεκινάει τη μηχανή λειτουργώντας ως επαγωγική μηχανή, και να την στρέφει κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα. Οι μπάρες χρησιμεύουν επίσης για να αποσβένουν τις ταλαντώσεις του δρομέα γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα, και για αυτό το λόγο ονομάζονται μπάρες απόσβεσης<sup>[3],[6],[7],[8]</sup>.

### 2.3 Επαγόμενη ΗΕΔ στο στάτη <sup>[1],[13]</sup>

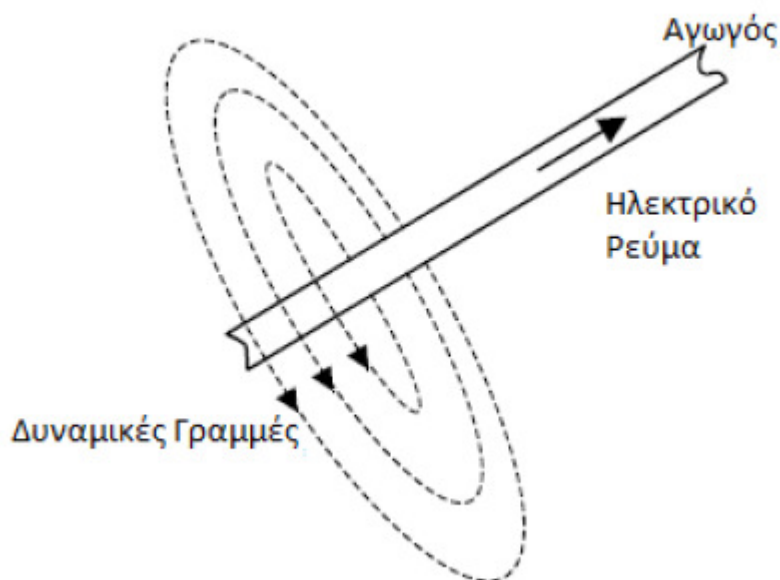
Γενικότερα, υπάρχουν δύο είδη σύγχρονων μηχανών :

- Σύγχρονες μηχανές στατικού μαγνητικού πεδίου

Η σύγχρονη μηχανή στατικού μαγνητικού πεδίου έχει τοποθετημένους τους έκτυπους πόλους στο στάτη. Οι πόλοι μαγνητίζονται είτε από τους μόνιμους μαγνήτες είτε από ένα συνεχές ρεύμα. Το τριφασικό τύλιγμα τυμπάνου, τοποθετείται στον άξονα. Το τύλιγμα τυμπάνου τροφοδοτείται μέσω τριών δακτυλίων (συλλέκτες) και ενός συνόλου ψηκτρών. Αυτή η διάταξη μπορεί να βρεθεί σε μηχανές μέχρι και 5 kVA. Για μεγαλύτερης ισχύος, όπως αυτής της αξονικής γεννήτριας που έχει ισχύ 5 MVA, υπάρχει ο τύπος του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

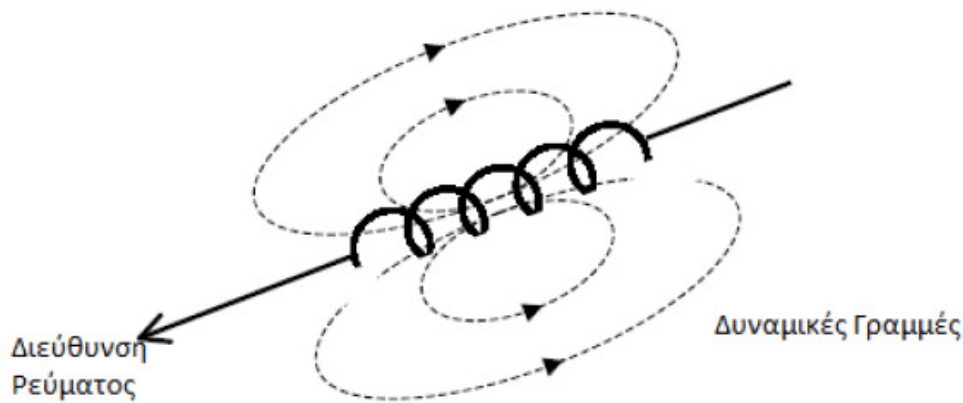
- Σύγχρονες μηχανές περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου

Η σύγχρονη μηχανή περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, που είναι και αυτή που θα μελετηθεί, έχει το τύλιγμα διέγερσης στο περιστρεφόμενο μέρος, δηλαδή στο δρομέα, και το τύλιγμα τυμπάνου στο στάσιμο μέρος του στάτη. Ένα συνεχές ρεύμα τροφοδοτεί το τύλιγμα διέγερσης δημιουργώντας ένα συνεχές μαγνητικό πεδίο. Το τύλιγμα διέγερσης μπορεί να τροφοδοτηθεί μέσω ενός συνόλου δακτυλίων ολίσθησης και ψηκτρών (εξωτερική διέγερση), ή από μια γέφυρα με διόδους που τοποθετείται στο δρομέα. Η γέφυρα τροφοδοτείται από έναν εναλλάκτη, που είναι τοποθετημένος πάνω στον άξονα, ο οποίος διεγείρεται από την προ-διεγέρτρια μηχανή.



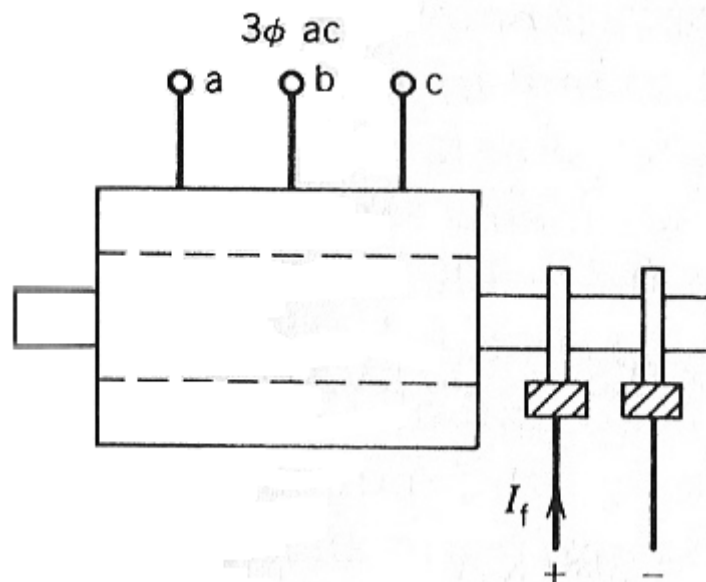
**Σχήμα 2.5** Παραγωγή μαγνητικού πεδίου από ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε αγωγό.

Με τη διαμόρφωση του αγωγού σε μορφή μιας σπείρας αυξάνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τη ροή του ρεύματος μέσω του αγωγού. Με αυτόν τον τρόπο, όσο περισσότερες στροφές προστίθενται στη σπείρα, το ίδιο ρεύμα παράγει μεγαλύτερα μαγνητικά πεδία.



**Σχήμα 2.6** Αναπαράσταση δημιουργίας μαγνητικού πεδίου από ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από μία σπείρα.

Αυτό το συνεχές μαγνητικό πεδίο πρέπει στη συνέχεια να περιστραφεί με τη σύγχρονη ταχύτητα. Θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια πηγή μηχανικής ενέργειας για να περιστραφεί ο δρομέας. Η πηγή μηχανικής ενέργειας στην περίπτωση αυτή είναι η προπέλα του πλοίου. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται γύρω του ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που ήταν και ο τελικός στόχος<sup>[13]</sup>.



**Σχήμα 2.7** Σχηματική αναπαράσταση του ρεύματος διέγερσης του δρομέα και της τριφασικής επαγόμενης τάσης<sup>[13]</sup>.



Μετά τη δημιουργία περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, εφαρμόζεται ο λεγόμενος νόμος του Faraday της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής σύμφωνα με τον οποίο ένας κινούμενος αγωγός που κόβει τις δυναμικές γραμμές ενός σταθερού μαγνητικού πεδίου επάγει μια τάση μέσα στον αγωγό ίση με :

$$e = B \times L \times v \quad (2.3.1)$$

όπου

$e$  : η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) σε *Volts*

$B$  : το μαγνητικό πεδίο σε *Tesla*

$L$  : το μήκος του αγωγού σε  $m$  (μέτρα)

$v$  : η ταχύτητα περιστροφής του αγωγού σε  $m/sec$

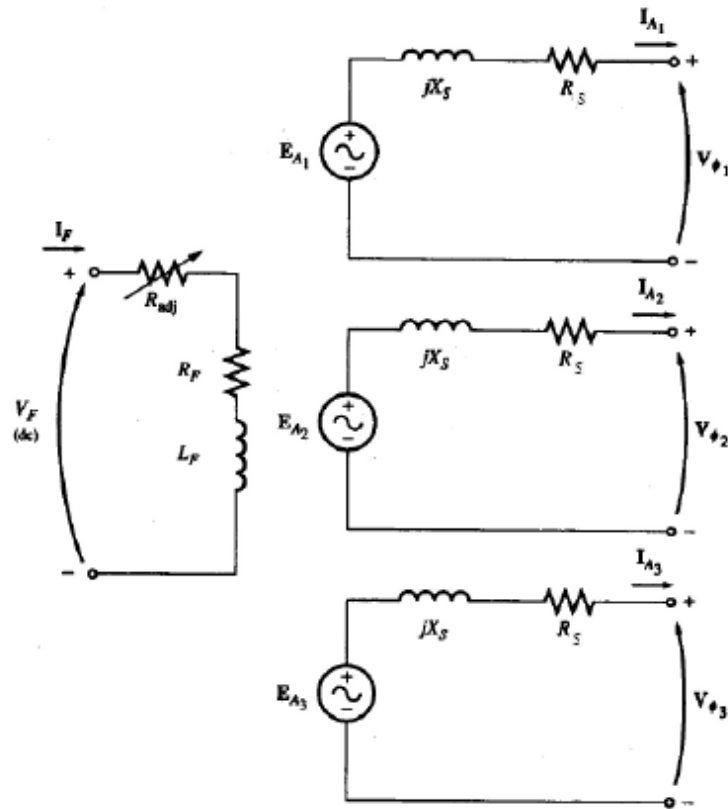
ή σε άλλη έκφραση του ίδιου νόμου, μια μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή μέσα σε ένα βρόχο που αποτελείται από αγωγίμο υλικό θα επάγει μια τάση στο βρόχο :

$$e = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.3.2)$$

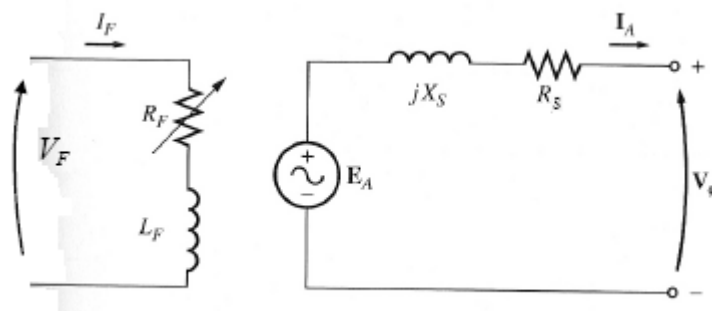
Με λίγα λόγια αρκεί ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο δρομέα για να επαχθεί ένα τριφασικό σύστημα τάσεων στο τριφασικό τύλιγμα του στάτη όπως πολύ απλά φαίνεται στο σχήμα 2.7<sup>[1]</sup>.

## 2.4 Κυκλωματικό ισοδύναμο σύγχρονης γεννήτριας <sup>[12],[13]</sup>

Η λειτουργία της γεννήτριας σε επίπεδο κυκλωμάτων δίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 2.8 Πλήρες κυκλωματικό ισοδύναμο σύγχρονης γεννήτριας <sup>[12]</sup>.



Σχήμα 2.9 Ανά φάση κυκλωματικό ισοδύναμο σύγχρονης γεννήτριας <sup>[12]</sup>.

Από το παραπάνω κύκλωμα η βασική σχέση που διέπει μια σύγχρονη γεννήτρια είναι :

$$V\phi = Ea - j \cdot X_s \cdot Ia - R_s \cdot Ia \quad (2.4.1)$$

και

$$X_s = X + X_a \quad (2.4.2)$$

όπου

$X$  : η αντίδραση του οπλισμού.

$X_a$  : η αυτεπαγωγή των τυλιγμάτων του στάτη.

Να σημειωθεί ότι αντίδραση οπλισμού ονομάζεται το φαινόμενο όπου το τύλιγμα του στάτη (τύμπανο) παραμορφώνει την τάση στα άκρα της γεννήτριας. Αυτό συμβαίνει όταν στα άκρα της μηχανής συνδεθεί κάποιο φορτίο, οπότε εμφανίζεται ρεύμα στους αγωγούς του στάτη το οποίο με τη σειρά του παράγει ένα νέο πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής. Το νέο πεδίο του στάτη επηρεάζει το μαγνητικό πεδίο που ήταν από πριν διαμορφωμένο στη μηχανή, αλλά και την τάση στα άκρα της κάθε φάσης<sup>[13]</sup>.

Η επαγόμενη ΗΕΔ στο στάτη  $Ea$  παράγεται από το μαγνητικό πεδίο του δρομέα  $Br$  και η μέγιστη τιμή της συμπίπτει με τη διεύθυνση του  $Br$ . Όταν δεν υπάρχει συνδεδεμένο φορτίο στο στάτη, το ρεύμα τυμπάνου του είναι μηδενικό και η  $Ea$  είναι ίση με τη  $V\phi$  στα άκρα της αντίστοιχης φάσης. Αν τώρα η γεννήτρια συνδεθεί με ένα επαγωγικό φορτίο, τότε η μέγιστη τιμή της τάσης προπορεύεται της μέγιστης τιμής του ρεύματος. Στην αντίθετη περίπτωση, αν δηλαδή η γεννήτρια συνδεθεί με χωρητικό φορτίο, τότε η μέγιστη τιμή της τάσης θα καθυστερεί της μέγιστης τιμής του ρεύματος. Με την σύνδεση φορτίου όμως έχουμε ροή ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη και δημιουργία μαγνητικού πεδίου με επαγωγή  $B_{stat}$  στο εσωτερικό του. Το νέο αυτό πεδίο παράγει στα άκρα της κάθε φάσης του στάτη την τάση  $E_{stat}$ . Έτσι, η συνολική ΗΕΔ στα άκρα του τυλίγματος μιας φάσης του στάτη είναι το άθροισμα της  $Ea$  και της  $E_{stat}$  που παράγεται λόγω της αντίδρασης οπλισμού :

$$V\phi = Ea + E_{stat} \quad (2.4.3)$$

Η μαγνητική επαγωγή του ολικού μαγνητικού πεδίου στο διάκενο είναι ίση με το άθροισμα των πεδίων του στάτη και του δρομέα :

$$B_{\DeltaΙΑΚΕΝΟ} = Br + B_{stat} \quad (2.4.4)$$

Άρα λοιπόν οι λόγοι που η  $Ea$  και  $V\phi$  διαφέρουν είναι συνοπτικά<sup>[12],[13]</sup> :

1. Η παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο της μηχανής που προκαλείται από το ρεύμα του στάτη (αντίδραση οπλισμού).
2. Οι αυτεπαγωγές των αγωγών του στάτη.

3. Οι αντιστάσεις των αγωγών του στάτη.
4. Το σχήμα των έκτυπων πόλων του δρομέα.

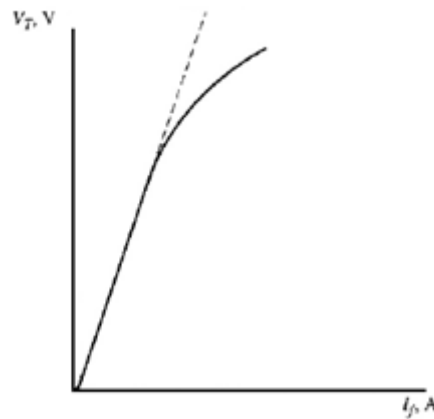
## 2.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες σύγχρονης γεννήτριας<sup>[5],[6],[12]</sup>

Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στους παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία μιας σύγχρονης γεννήτριας. Αυτοί είναι :

- Η σχέση μεταξύ της επαγόμενης ΗΕΔ στο στάτη  $E_a$  και του ρεύματος διέγερσης του δρομέα  $I_f$  και
- Η σύγχρονη αντίδραση  $X_s$

### 2.5.1 Χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος<sup>[5],[6],[12]</sup>

Οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις βοηθούν στην κατανόηση αυτών των παραγόντων. Η πρώτη είναι γνωστή ως χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος της γεννήτριας :



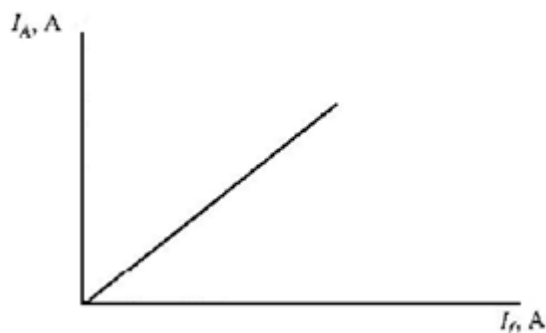
**Σχήμα 2.10** Χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος της σύγχρονης γεννήτριας.

Σε αυτήν την περίπτωση, δεν υπάρχει κάποιο φορτίο συνδεδεμένο στη γεννήτρια. Επομένως, η γεννήτρια περιστρέφεται με ονομαστική ταχύτητα και η τερματική τάση της γεννήτριας  $V\phi$  είναι ίση με την ΗΕΔ που έχει επαχθεί στο στάτη εφόσον το ρεύμα του στάτη είναι μηδενικό. Η τάση που επάγεται στο στάτη οφείλεται αποκλειστικά στο μαγνητικό πεδίο του δρομέα  $B_r$ .

Καθώς το ρεύμα διέγερσεως του δρομέα αυξάνεται, αυξάνει με τη σειρά του και το μαγνητικό πεδίο του δρομέα  $B_r$  μέχρι να φτάσει σε μια τιμή κορεσμού του υλικού. Αυτός είναι και ο λόγος που από ένα σημείο και μετά δεν υφίσταται γραμμική εξάρτηση του ρεύματος διέγερσης του δρομέα  $I_f$  με την επαγόμενη ΗΕΔ στο στάτη  $E_a$ <sup>[5],[6],[12]</sup>.

## 2.5.2 Χαρακτηριστική βραχυκυκλώσεως <sup>[5],[6],[12]</sup>

Η δεύτερη γραφική παράσταση είναι γνωστή ως χαρακτηριστική βραχυκυκλώματος :



**Σχήμα 2.11** Χαρακτηριστική βραχυκυκλώσεως της σύγχρονης γεννήτριας.

Σε αυτήν την περίπτωση μηδενίζεται η τερματική τάση της γεννήτριας (βραχυκυκλώνονται τα άκρα των φάσεων παρεμβάλλοντας αμπερόμετρα). Οπότε θα ισχύει :

$$I_a = \frac{E_a}{R_a + j \cdot X_s} \quad (2.5.2.1)$$

με το μέτρο του ρεύματος του οπλισμού να ισούται με :

$$I_a = \frac{E_a}{\sqrt{R_a^2 + X_s^2}} \quad (2.5.2.2) \quad \text{και}$$

$$V\phi = E_a + E_{stat} \Rightarrow 0 = E_a + E_{stat} \Rightarrow E_a = -E_{stat} \quad (2.5.2.3)$$

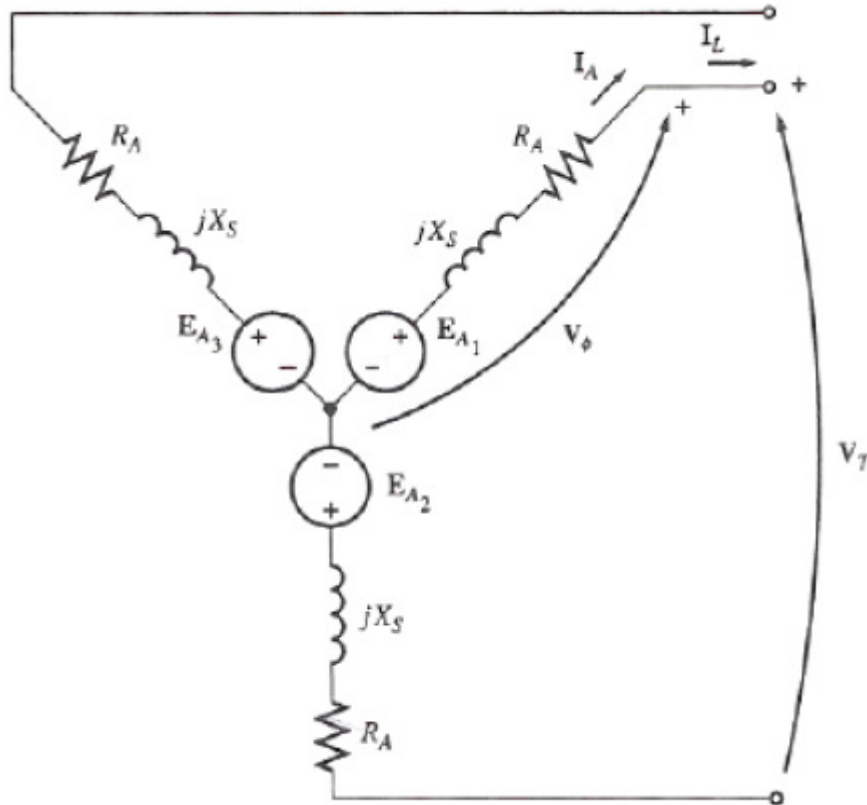
Έτσι λοιπόν, τα μαγνητικά πεδία του στάτη και του δρομέα αλληλοεξουδετερώνονται, εφόσον και οι τάσεις των δύο πεδίων αλληλοεξουδετερώνονται, με αποτέλεσμα το άθροισμά τους (το συνολικό πεδίο) να είναι πολύ μικρό. Συνεπώς, ποτέ δεν υπάρχουν υψηλά επίπεδα μαγνητικής επαγωγής άρα και κορεσμού, και η εξεταζόμενη μεταβολή παραμένει γραμμική <sup>[5],[6],[12]</sup>.

Η σύγχρονη αντίδραση  $X_s$  του στάτη θα δίνεται σε αυτήν την περίπτωση από τη σχέση :

$$X_s = \frac{E_a}{I_a} \quad (2.5.2.4)$$

## 2.6 Σύνδεση των τριών φάσεων του στάτη <sup>[5],[6],[12]</sup>

Επιπλέον, άξιο αναφοράς είναι και ο τρόπος που συνδέονται οι τρεις φάσεις του στάτη. Στην περίπτωση αυτή που είναι συνδεδεμένες σε αστέρα ισχύει :



**Σχήμα 2.12** Σύνδεση κατά αστέρα των τυλιγμάτων του στάτη της αξονικής γεννήτριας <sup>[12]</sup>.

Σε αυτήν την περίπτωση η σχέση που συνδέει την πολική τάση  $V_T$  με τη φασική τάση  $V_\phi$  του σχήματος 2.12 είναι :

$$V_\phi = \frac{V_T}{\sqrt{3}} \quad (2.6.1)$$

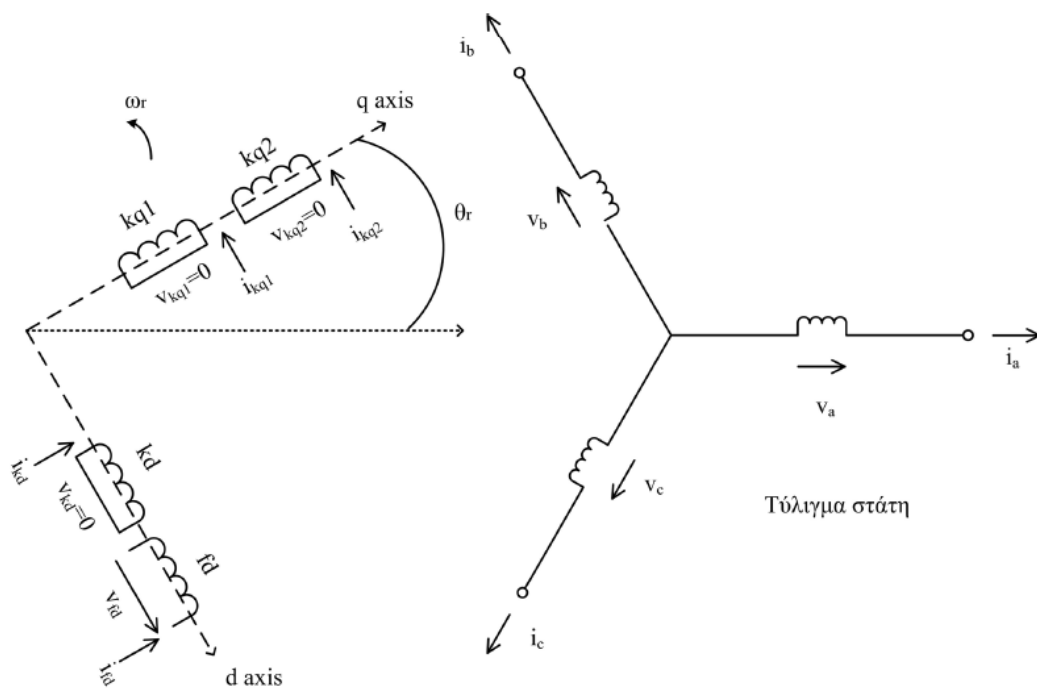
Ενώ η σχέση που συνδέει τα ρεύματα γραμμής και φάσης είναι <sup>[5],[6]</sup> :

$$I_\phi = I_L \quad (2.6.2)$$

## 2.7 Μετασχηματισμός Park <sup>[1],[11],[26]</sup>

Με δεδομένο ότι οι επαγωγές των τυλιγμάτων της μηχανής είναι συναρτήσει της γωνίας δρομέα  $\theta_r$  (και επομένως και της γωνιακής ταχύτητας  $\omega_r$ ), οι διαφορικές εξισώσεις των τάσεων είναι μη γραμμικές και οι συντελεστές των μεταβλητών είναι χρονικά μεταβαλλόμενοι. Επιπλέον, η ταχύτητα του δρομέα είναι συναρτήσει της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, η οποία προκύπτει από γινόμενα εντάσεων. Επομένως, η επίλυση των εξισώσεων είναι εξαιρετικά πολύπλοκη και καθίσταται αναγκαία η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Ο μετασχηματισμός Park αποτελεί το κύριο εργαλείο για την ανάλυση των σύγχρονων μηχανών. Ο μετασχηματισμός αυτός συνίσταται στην αντικατάσταση των τριών τυλιγμάτων  $a, b, c$  του στάτη από τρία υποθετικά, ισοδύναμα τυλίγματα  $d, q, 0$ . Με τον τρόπο αυτό, ο μετασχηματισμός Park συμβάλλει στην απλοποίηση των εξισώσεων μετατρέποντας τους χρονικά μεταβλητούς συντελεστές σε χρονικά αμετάβλητους. Τα τυλίγματα  $d, q$  του στάτη περιστρέφονται μαζί με το δρομέα της μηχανής και βρίσκονται στους ίδιους άξονες με τα αντίστοιχα τυλίγματα του δρομέα (τύλιγμα διέγερσης και τύλιγμα αποσβέσεως).

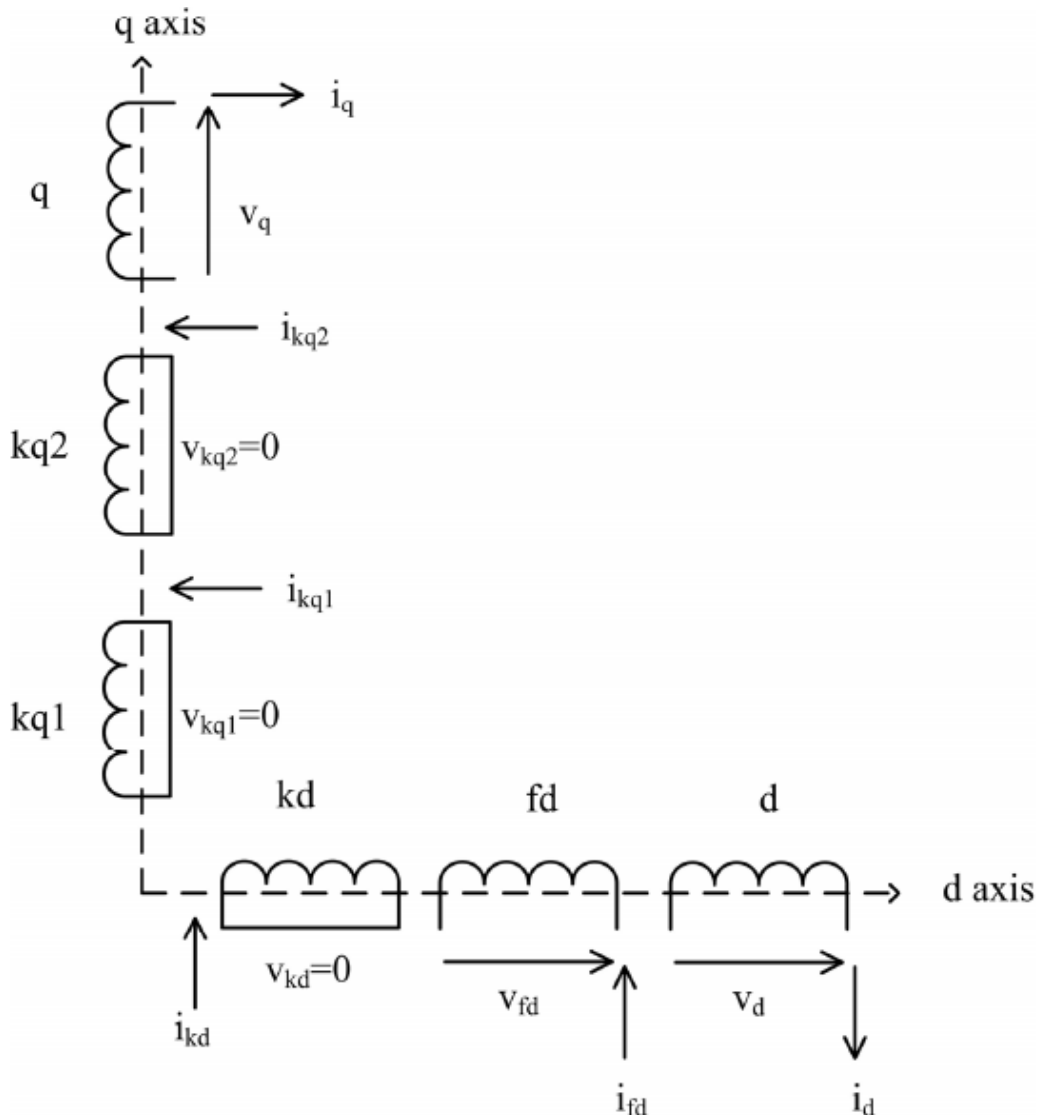


**Σχήμα 2.13** Ο μετασχηματισμός Park.

Στο σχήμα σημειώνονται οι μαγνητικοί άξονες των τυλιγμάτων του στάτη. Επιπλέον, εισάγονται ο εγκάρσιος άξονας (άξονας q) και ο ευθύς ή διαμήκης άξονας (άξονας d). Ο άξονας q είναι ο άξονας των τυλιγμάτων  $kq1$  και  $kq2$ , ενώ ο άξονας d ταυτίζεται με τον άξονα του τυλίγματος διέγερσης και του τυλίγματος αποσβέσεως. Να σημειωθεί ότι ο άξονας q, για την θετική φορά περιστροφής, προηγείται κατά  $90^\circ$  μοίρες του άξονα d. Η γωνία του δρομέα  $\theta_r$  μετράται ως προς τον άξονα της φάσης A (σχήμα 2.13).

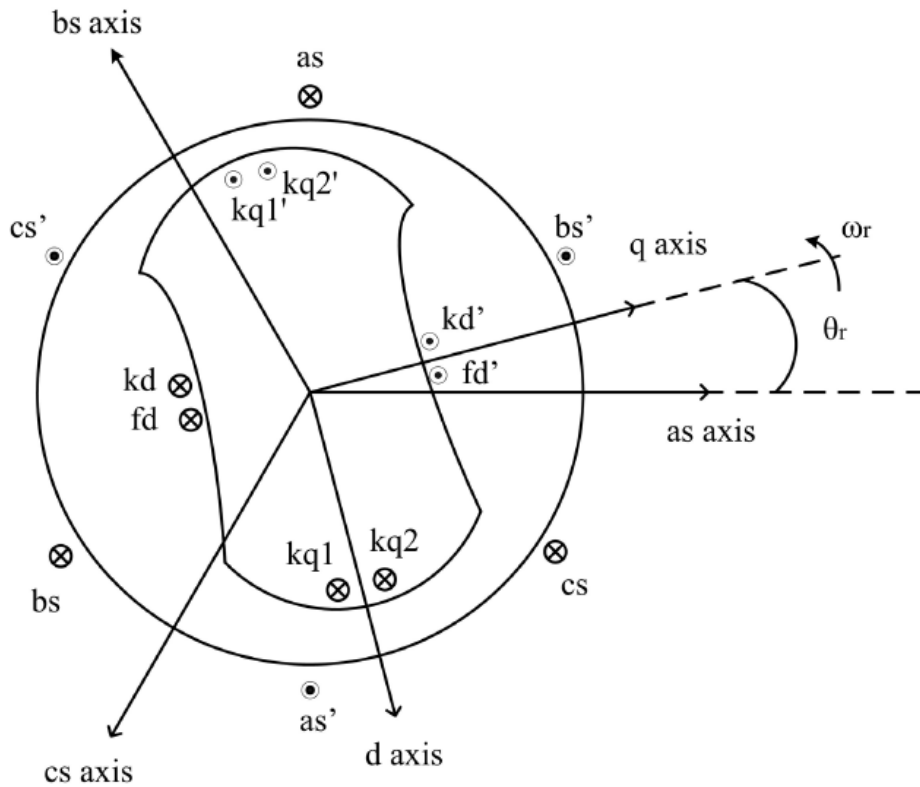
Οι εντάσεις του στάτη θεωρούνται συμβατικά εξερχόμενες από τη μηχανή, δηλαδή ακολουθείται η γνωστή σύμβαση γεννήτριας για τη γραφή των εξισώσεων. Συνεπώς, με τη δεδομένη θετική φορά των μαγνητικών αξόνων, αρνητικές πεπλεγμένες ροές προκύπτουν από θετικά ρεύματα στάτη.

Να σημειωθεί ότι το τρίτο τύλιγμα 0 δεν είναι μαγνητικά συζευγμένο με τα άλλα δύο νέα τυλίγματα του στάτη και παίζει ρόλο μόνο σε συνθήκες ασύμμετρης φόρτισης της μηχανής. Επειδή η παρούσα εργασία αφορά μόνο συμμετρικές συνθήκες φόρτισης, το τύλιγμα 0 θα παραλείπεται. Η σχηματική παράσταση των τυλιγμάτων μιας σύγχρονης μηχανής μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού Park φαίνεται στο σχήμα 2.14<sup>[11]</sup>.



**Σχήμα 2.14** Σχηματική αναπαράσταση των τυλιγμάτων της σύγχρονης αξονικής γεννήτριας μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού Park.





**Σχήμα 2.15** Σχηματική αναπαράσταση του ρεύματος διέγερσης του δρομέα και της τριφασικά επαγόμενης τάσης.

Τα τυλίγματα των τριών φάσεων του στάτη είναι όμοια μεταξύ τους και ημιτονοειδώς διανεμημένα. Το κάθε ένα έχει  $N_s$  ισοδύναμα ελίγματα και ωμική αντίσταση  $r_s$ . Ο δρομέας με την σειρά του διαθέτει τύλιγμα πεδίου με  $N_{fd}$  ισοδύναμα ελίγματα και ωμική αντίσταση  $r_f$  καθώς και τρία βραχυκυκλωμένα τυλίγματα αποσβέσεως τα οποία έχουν ισοδύναμα τυλίγματα  $N_{kq1}$ ,  $N_{kq2}$  και  $N_{kd}$  και αντιστάσεις  $r_{kq1}$ ,  $r_{kq2}$  και  $r_{kd}$  αντίστοιχα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.15<sup>[1]</sup>.

Στην γενικότερη περίπτωση, η αλλαγή των μεταβλητών που συνιστά ένα μετασχηματισμό των τριφασικών μεταβλητών ενός στατικού κυκλώματος  $abc$  σε μεταβλητές ενός στρεφόμενου συστήματος αναφοράς  $qd0s$  γράφεται:

$$f_{qd0s} = K_s \cdot f_{abc} \quad (2.7.1)$$

όπου

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.7.2)$$

και

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0) \quad (2.7.3)$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Park κάνει χρήση του πίνακα:

$$(\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7.4)$$

Στις παραπάνω σχέσεις το σύμβολο  $f$  συμβολίζει τάση, ένταση ή πεπλεγμένη ροή. Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των αξόνων μπορεί να είναι αυθαίρετη και μπορεί να είναι οποιαδήποτε συναρτήσει του χρόνου αρκεί η γωνία  $\theta$  να είναι συνεχής<sup>[26]</sup>.

Ο μετασχηματισμός Park αποτελεί μια ειδική περίπτωση του μετασχηματισμού  $abc \Rightarrow qd0s$ , όπου η γωνιακή ταχύτητα του στρεφόμενου πλαισίου λαμβάνεται ίση με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα. Ο άξονας  $d$  ταυτίζεται με τον άξονα του μαγνητικού πεδίου του τυλίγματος διέγερσης. Αφού εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός Park, οι εξισώσεις Park για τα τυλίγματα  $d, q$  του στάτη στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα είναι:

$$uds = -rs \cdot ids + \frac{1}{\omega b} \cdot \frac{d\psi ds}{dt} - \frac{\omega r}{\omega b} \cdot \psi qs \quad (2.7.5)$$

$$uqs = -rs \cdot iqs + \frac{1}{\omega b} \cdot \frac{d\psi qs}{dt} - \frac{\omega r}{\omega b} \cdot \psi ds \quad (2.7.6)$$

όπου

$uds, uqs$  : οι τάσεις των τυλιγμάτων  $d, q$  του στάτη αντίστοιχα.

$ids, iqs$  : τα ρεύματα των τυλιγμάτων  $d, q$  του στάτη αντίστοιχα.

$\psi ds, \psi qs$  : οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των τυλιγμάτων  $d, q$  του στάτη αντίστοιχα.

$\omega b$  : η βασική γωνιακή ταχύτητα του συστήματος (σε rad/sec).

$rs$  : η ωμική αντίσταση του στάτη.

Οι εξισώσεις Park για τα τυλίγματα του δρομέα είναι :

$$ufd = -rfd \cdot ifd + \frac{1}{\omega b} \cdot \frac{d\psi fd}{dt} \quad (2.7.7)$$

$$ukd = rkd \cdot ikd + \frac{1}{\omega b} \cdot \frac{d\psi kd}{dt} = 0 \quad (2.7.8)$$

$$ukq1 = rkq1 \cdot ikq1 + \frac{1}{\omega b} \cdot \frac{d\psi kq1}{dt} = 0 \quad (2.7.9)$$

$$ukq2 = rkq2 \cdot ikq2 + \frac{1}{\omega b} \cdot \frac{d\psi kq2}{dt} = 0 \quad (2.7.10)$$

όπου

$ufd$  ,  $ukd$  ,  $ukq1$  ,  $ukq2$  : οι τάσεις του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.

$ifd$  ,  $ikd$  ,  $ikq1$  ,  $ikq2$  : τα ρεύματα του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.

$\psi fd$  ,  $\psi kd$  ,  $\psi kq1$  ,  $\psi kq2$  : οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.

Οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο δίνονται από τις σχέσεις <sup>[11]</sup> :

$$\psi ds = -xls \cdot ids + xmd \cdot (-ids + ikd + ifd) \quad (2.7.11)$$

$$\psi qs = -xls \cdot iqs + xmq \cdot (-iqs + iq1 + iq2) \quad (2.7.12)$$

$$\psi fd = -xlfd \cdot ifd + xmd \cdot (-ids + ikd + ifd) \quad (2.7.13)$$

$$\psi kd = -xlkd \cdot ikd + xmd \cdot (-ids + ikd + ifd) \quad (2.7.14)$$

$$\psi kq1 = -xlkq1 \cdot ikq1 + xmq \cdot (-iqs + ikq1 + ikq2) \quad (2.7.15)$$

$$\psi kq2 = -xlkq2 \cdot ikq2 + xmq \cdot (-iqs + ikq1 + ikq2) \quad (2.7.16)$$

όπου

$xls$  ,  $xlfd$  ,  $xkd$  ,  $xkq1$  ,  $xkq2$  : οι αυτεπαγωγές του στάτη, του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.

## 2.8 Ανά μονάδα σύστημα <sup>[5],[11]</sup>

Ιδιαίτερα χρήσιμο στη μελέτη μιας μηχανής είναι το ανά μονάδα σύστημα. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή συναρτίζεται των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο και των ρευμάτων δίνεται σε φυσικές τιμές από τη σχέση <sup>[5],[11]</sup> :

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{\omega b} \cdot (\psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (2.8.1)$$

όπου P ο αριθμός των πόλων της μηχανής.

Η βασική ισχύς μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$S_b = 3 \cdot V_b(abc) \cdot I_b(abc) \quad (2.8.2)$$

ή ισοδύναμα

$$S_b = 3 \cdot V_b(qd0) \cdot I_b(qd0) \quad (2.8.3)$$

Θεωρώντας ως βασική ροπή την :

$$T_b = \frac{P \cdot S_b}{2 \cdot \omega b} \quad (2.8.4)$$

Τότε η ηλεκτρομαγνητική ροπή σε α.μ. :

$$T_e = (\psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (2.8.5)$$

Για την ενεργό και άεργο ισχύ ισχύει:

$$P = \frac{3}{2} \cdot (u_d \cdot i_d - u_q \cdot i_q) \quad (2.8.6)$$

$$Q = \frac{3}{2} \cdot (u_q \cdot i_d - u_d \cdot i_q) \quad (2.8.7)$$

Μετατρέποντας τις σε α.μ. μονάδες :

$$P = (u_d \cdot i_d - u_q \cdot i_q) \quad (2.8.8)$$

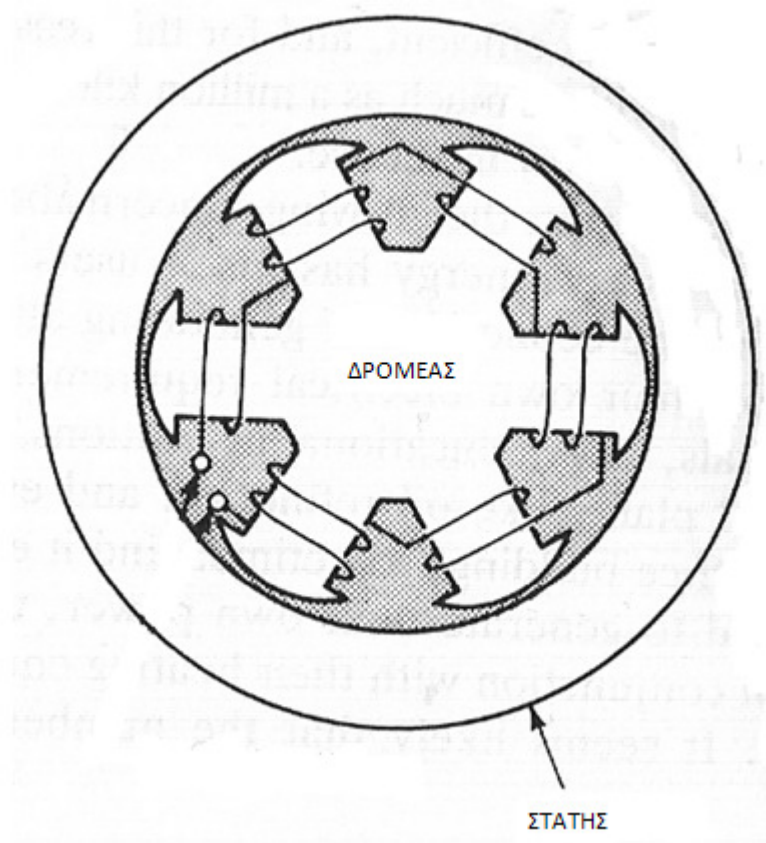
$$Q = (u_q \cdot i_d - u_d \cdot i_q) \quad (2.8.9)$$

## 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

#### 3.1 Σχεδιασμός της σύγχρονης γεννήτριας<sup>[4]</sup>

Η σύγχρονη αξονική γεννήτρια που μελετάται είναι μια εξαπολική (6-πολική) γεννήτρια έκτυπων πόλων συνολικής ισχύος 5 MVA. Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά της παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.1. Για την πεδιακή ανάλυση της γεννήτριας χρησιμοποιήθηκε το FEMM (Finite Element Method Magnetics), που είναι ένα εύχρηστο πρόγραμμα (διαθέσιμο στο διαδίκτυο) επίλυσης δισδιάστατων ηλεκτροστατικών και χαμηλών συχνοτήτων μαγνητικών προβλημάτων με χρήση της αριθμητικής μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.



*Σχήμα 3.1* Απεικόνιση της τομής ολόκληρης της σύγχρονης αξονικής γεννήτριας.

**Βασικά χαρακτηριστικά**

Ονομαστική Ισχύς KVA	$S$	5.000
Ονομαστική Τάση, V	$V_i$	11.000
Φασική Τάση, V	$V_{ph}$	6.350
Συχνότητα, Hz	$f$	50
Ταχύτητα, Σ.Α.Λ.	$n$	1.000
Αριθμός πόλων	$P$	6
Αριθμός φάσεων		3

**Κύριες διαστάσεις**

Ενεργό μήκος, cm	$D$	108
Μήκος σιδήρου, cm	$L_i$	77.5
Ρεύμα φάσης, A	$I$	262

**Στάτης**

Τύλιγμα		Διπλής στρώσεως
Παράλληλες συνδέσεις	$a$	1
Αριθμός αυλακών	$S$	90
Αύλακες ανά φάση	$g'$	5
Αγωγοί ανά αύλακα	$z_s$	2x4
Κλασματικό βήμα		12/15
Διαστάσεις αγωγού, mm		2·(8.5 x 4.5)
Διατομή αγωγού, $mm^2$	$A$	76.5
Πυκνότητα ρεύματος, $\frac{A}{mm^2}$	$J$	3.43
Μήκος αγωγού, m	$L_{mc}$	2.07
Αντίσταση, $\Omega$	$r_s$	0.136

### Δρομέας

Τύπος διέγερσης		Έκτυποι πόλοι
Τόξο πόλου, cm		33
Μήκος πόλου, cm		22
Τυλίγματα ανά πόλο		99.5
Διαστάσεις αγωγού, mm		50 x 1.75
Διατομή αγωγού, $mm^2$	$A$	87.5
Ονομαστικό Ρεύμα, A	$I_f$	270
Πυκνότητα ρεύματος, $\frac{A}{mm^2}$	$J$	3.09
Μήκος αγωγού, m	$L_{mt}$	2.52
Αντίσταση, $\Omega$	$r_f$	0.372
Πτώση τάσης, V		100

**Πίνακας 3.1** Αναλυτικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη σύγχρονης αξονικής γεννήτριας<sup>[4]</sup>.

Η πυκνότητα των ρευμάτων που δίνεται στον παραπάνω πίνακα τόσο στα τυλίγματα του στάτη όσο και στο τυλίγμα διέγερσης του δρομέα αφορά μια συγκεκριμένη επιφάνεια αγωγών που χρησιμοποιούνται και στα δύο είδη τυλιγμάτων. Αρχικά βρέθηκε η πυκνότητα ρευμάτων σε μια συγκεκριμένη συστάδα αγωγών που έχει τοποθετηθεί το κάθε τυλίγμα. Συνεπώς :

- Για το τυλίγμα του στάτη :

Η συνολική επιφάνεια της μισής αύλακας του στάτη είναι ίση με  $1.198,93mm^2$ . Καλύφθηκε το 70% της συνολικής επιφάνειας της, δηλαδή περί τα  $840mm^2$ . Δηλαδή :

$$306mm^2 \text{ επιφάνειας αγωγών (4 αγωγοί σε κάθε μισή αύλακα)} \Rightarrow 3.43 \frac{A}{mm^2}$$

$$840mm^2 \text{ επιφάνειας} \Rightarrow 1.26 \frac{A}{mm^2}$$

- Για το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα :

Η συνολική επιφάνεια της επιφάνειας που θα τοποθετηθεί το τύλιγμα διέγερσης είναι ίση με  $10.942mm^2$ . Δηλαδή :

$$87.5mm^2 \text{ της επιφάνειας ενός αγωγού} \Rightarrow 3.09 \frac{A}{mm^2}$$

Υπάρχουν συνολικά 99 αγωγοί οπότε :

$$99 \cdot 87.5mm^2 = 8.662,5mm^2$$

δηλαδή καλύπτουν το 80% της επιφάνειας που θα τοποθετηθεί το τύλιγμα διέγερσης. Θα καλυφθεί το 55% της συνολικής επιφάνειας, δηλαδή περί τα  $6.000mm^2$ . Συνεπώς :

$$6.000mm^2 \text{ επιφάνειας} \Rightarrow 0.045 \frac{A}{mm^2}$$

Επιπροσθέτως, από τη σχέση :

$$Q = m \cdot P \cdot q \quad (3.1.1)$$

όπου

$m$  : αριθμός των φάσεων

$P$  : αριθμός των πόλων

$q$  : αριθμός αυλακώσεων ανά πόλο και ανά φάση

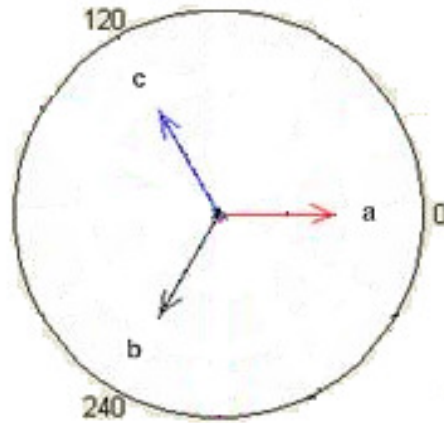
$Q$  : αριθμός των αυλακώσεων

προκύπτει ότι :

$$q = \frac{Q}{m \cdot P} = \frac{90}{3 \cdot 6} = 5 \text{ αύλακες ανά πόλο και φάση}$$

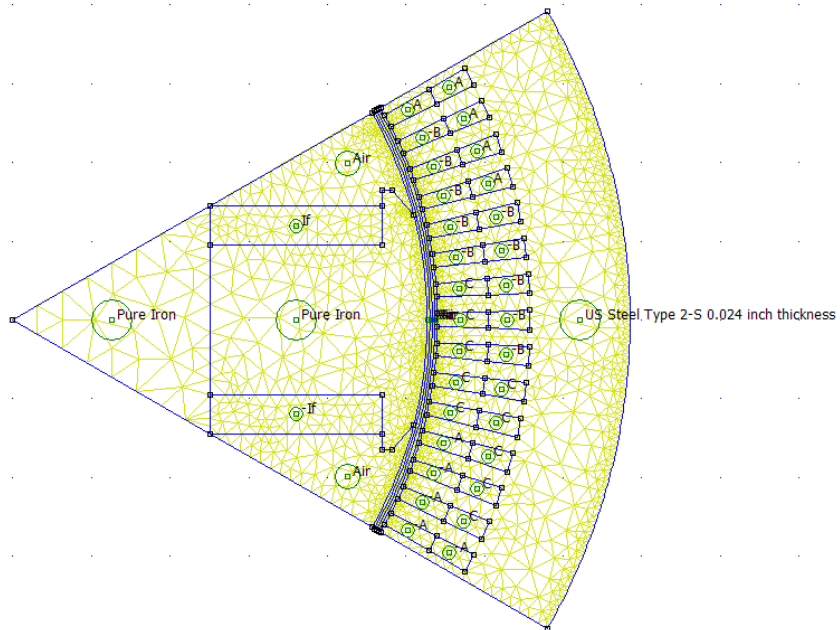
Οι φορές των αυλακών τοποθετούνται με βάση το τριφασικό συμμετρικό σύστημα τάσεων που φαίνεται στο σχήμα. Θεωρήθηκε ότι ο δρομέας της μηχανής στρέφεται με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού.





**Σχήμα 3.2** Τριφασικό συμμετρικό σύστημα τάσεων.

Η γεωμετρική διαμόρφωση της γεννήτριας όπως αυτή σχεδιάστηκε στο FEMM, λαμβάνοντας υπόψη τις πυκνότητες ρευμάτων που υπολογίστηκαν παραπάνω και τη σχέση 3.1.1, παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3 και είναι αυτή που θα χρησιμοποιηθεί σε όλα τα επόμενα κεφάλαια για τη μελέτη των χαρακτηριστικών της αξονικής γεννήτριας<sup>[4]</sup>.



**Σχήμα 3.3** Γεωμετρική διαμόρφωση ενός πόλου της γεννήτριας, όπως αυτός σχεδιάστηκε στο FEMM. Επίσης δείχνεται το είδος των υλικών και το πλέγμα ανάλυσης.

### 3.2 Τιμές μαγνητικής επαγωγής στη σύγχρονη αξονική γεννήτρια<sup>[6],[16]</sup>

Όταν τα ηλεκτρονιακά σπιν κάποιων υλικών αλληλεπιδρούν με τέτοιο τρόπο ώστε να γυρίζουν με την ίδια φορά, τότε τα υλικά αυτά ονομάζονται σιδηρομαγνητικά (αυτό που συνήθως ονομάζουμε μαγνητικά). Εξαιτίας του τρόπου που η κανονική κρυσταλλική ατομική δομή τους προκαλεί τα σπιν τους να αλληλεπιδρούν, μερικά μέταλλα είναι (σιδηρο)μαγνητικά σε φυσική κατάσταση, σαν μεταλλεύματα. Αυτά περιλαμβάνουν μέταλλευμα σιδήρου, μαγνητίτης, κοβάλτιο και νικέλιο, όπως και οι σπάνιες μεταλλικές γαίες γαδολίνιο και δυσπρόσιο (όταν βρίσκονται σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία). Αυτά τα (σίδηρο)μαγνητικά υλικά που βρίσκονται στη φύση χρησιμοποιήθηκαν στα πρώτα πειράματα για τον μαγνητισμό. Από τότε η τεχνολογία επεκτάθηκε όσον αφορά τη διαθεσιμότητα των μαγνητικών υλικών και περιέλαβε διάφορα τεχνητά προϊόντα, με βάση, όμως, όλα φυσικά μαγνητικά υλικά. Για αυτό το λόγο σημαντικό ρόλο παίζουν οι καμπύλες μαγνήτισης κάθε υλικού που χρησιμοποιείται.

Η μαγνητική επαγωγή συνδέεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου με τη σχέση :

$$B = \mu \cdot H \quad (3.2.1)$$

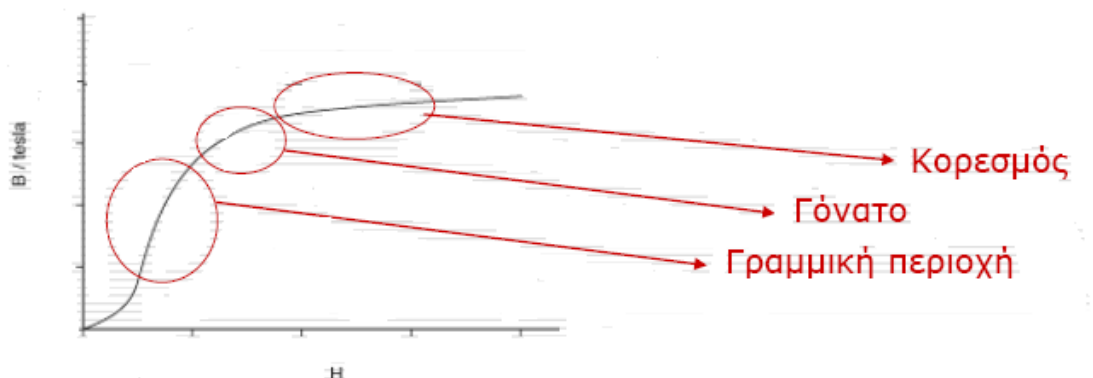
όπου με  $\mu$  συμβολίζεται η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού κατασκευής του πυρήνα. Η μαγνητική διαπερατότητα των υλικών εκφράζεται ως προς αυτή του κενού. Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού  $\mu_0$ , είναι σταθερή και ίση με :

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

Η μαγνητική διαπερατότητα οποιουδήποτε υλικού  $\mu$ , συνδέεται μ' εκείνη του κενού μέσω της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu_r$  :

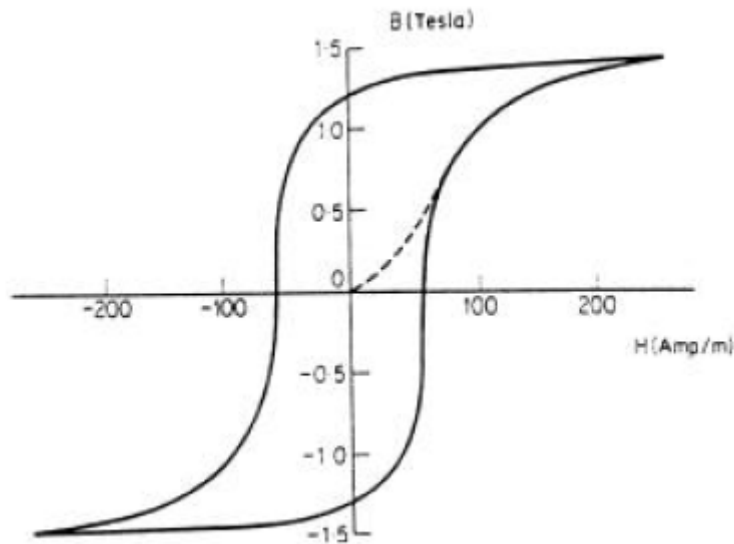
$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (3.2.2)$$

Η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη ένταση του μαγνητικού πεδίου. Μάλιστα οι μηχανές λειτουργούν κοντά στο γόνατο για να έχουν μεγάλη μαγνητική ροή  $\Phi$ .



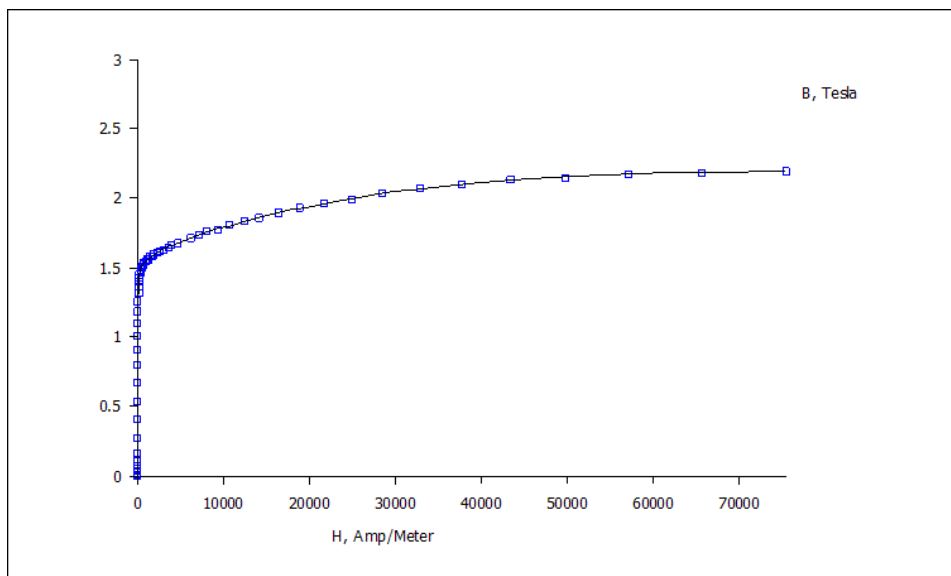
Σχήμα 3.4 Μορφή καμπύλης μαγνήτισης ενός υλικού.

Οι σιδηρομαγνήτες όταν βρεθούν μέσα σε μαγνητικό πεδίο μαγνητίζονται και έχουν την ιδιότητα ακόμα και όταν απομακρυνθούν από το μαγνητικό πεδίο να διατηρούν τη μαγνήτισή τους. Η ιδιότητα αυτή διακρίνει τους σιδηρομαγνήτες από τα παραμαγνητικά υλικά. Αυτή η συμπεριφορά καλείται υστέρηση και η μεταβολή της μαγνήτισης με το μαγνητικό πεδίο βρόχος υστέρησης. Ο συνηθέστερος τρόπος να παρουσιαστούν οι μακροσκοπικές μαγνητικές ιδιότητες ενός σιδηρομαγνητικού υλικού είναι η σχεδίαση της μαγνητικής επαγωγής  $B$  για διάφορα μαγνητικά πεδία  $H$  που ονομάζεται βρόχος υστέρησης<sup>[6],[16]</sup>.

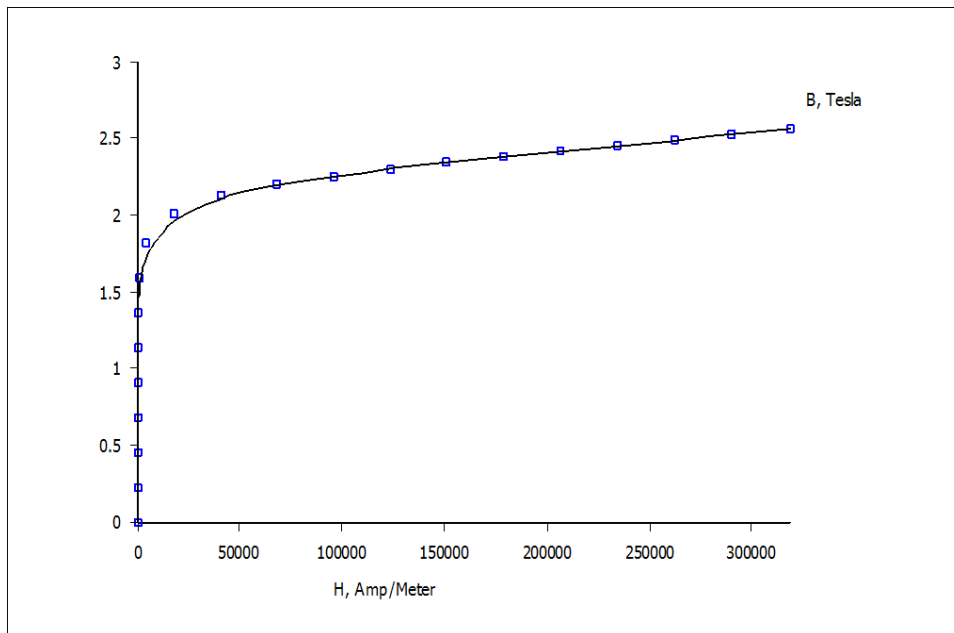


Σχήμα 3.5 Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης<sup>[16]</sup>.

Παρακάτω δίνονται οι καμπύλες μαγνήτισης των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή του στάτη χρησιμοποιήθηκε χάλυβας ενώ στο δρομέα και στον έκτυπο πόλο χρησιμοποιήθηκε σίδηρος.



Σχήμα 3.6 Καμπύλη μαγνήτισης του χάλυβα του στάτη.



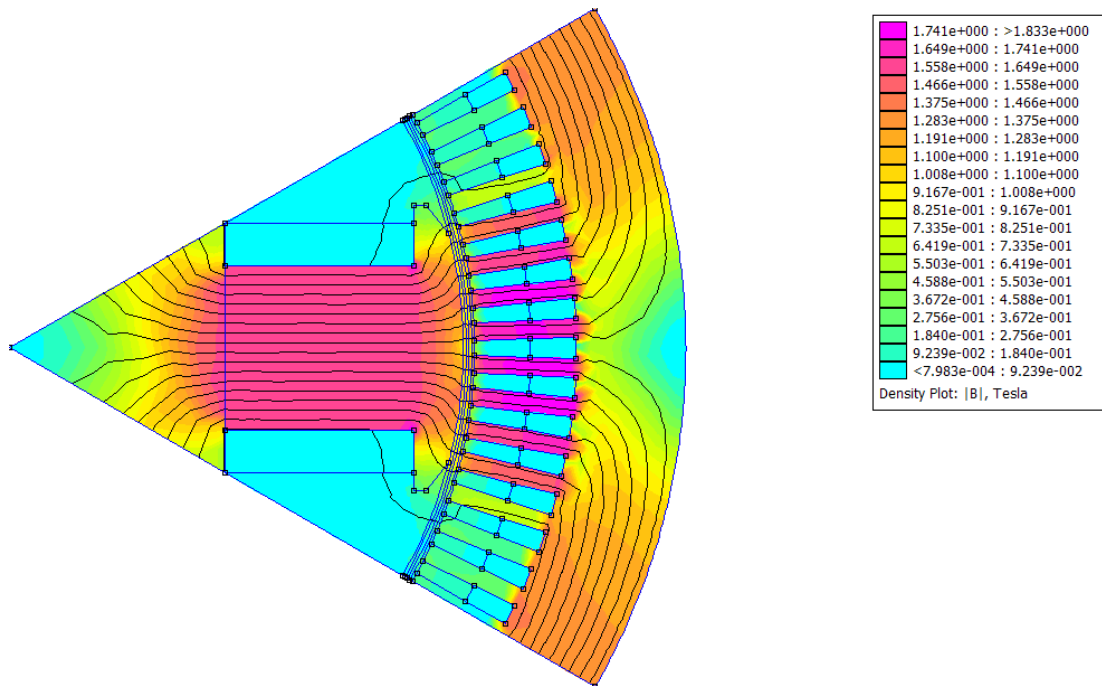
**Σχήμα 3.7** Καμπύλη μαγνήτισης του σιδήρου του δρομέα και του έκτυπου πόλου.

Απώτερος σκοπός της σχεδίασης μιας μηχανής είναι η επίτευξη των επιθυμητών τιμών μαγνητικής επαγωγής σε όλη την έκταση της μηχανής. Τα μέρη που καταπονούνται περισσότερο λόγω της μαγνητικής ροής είναι τα δόντια του στάτη, δηλαδή τα τμήματα που παρεμβάλλονται ανάμεσα στις αύλακες και τοποθετούνται τα τυλίγματα χαλκού, και το διάκενο. Συνεπώς, οι επιτρεπόμενες, άρα και επιθυμητές, τιμές μαγνητικής επαγωγής B (Tesla), σύμφωνα με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, θα είναι :

Μέρος αξονικής γεννήτριας	Μαγνητική Επαγωγή B (Tesla)
Σώμα στάτη / δρομέα	1.2-1.4 Tesla
Έκτυπος πόλος δρομέα	1.2-1.6 Tesla
Δόντια στάτη	1.7-1.8 Tesla
Διάκενο	0.5-0.7 Tesla

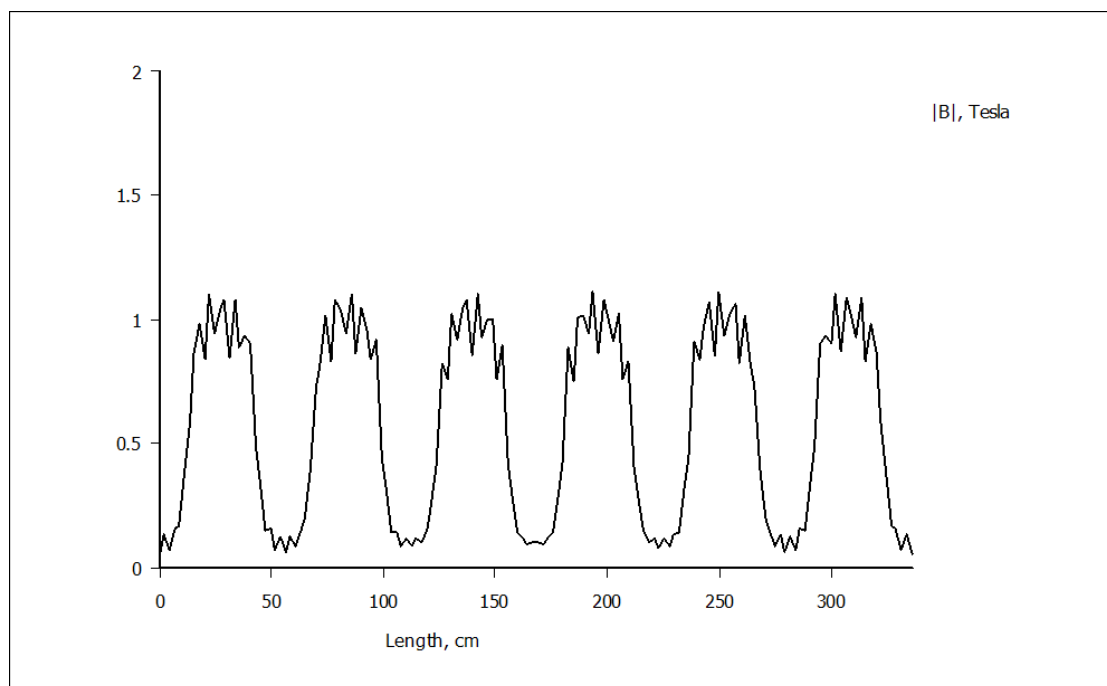
**Πίνακας 3.2** Επιθυμητές τιμές μαγνητικής επαγωγής.

Στο σχήμα 3.8, φαίνεται το μοντέλο του FEMM σε επίπεδο δυναμικών γραμμών και μαγνητικής επαγωγής σε όλη την έκταση του ενός πόλου της μηχανής.



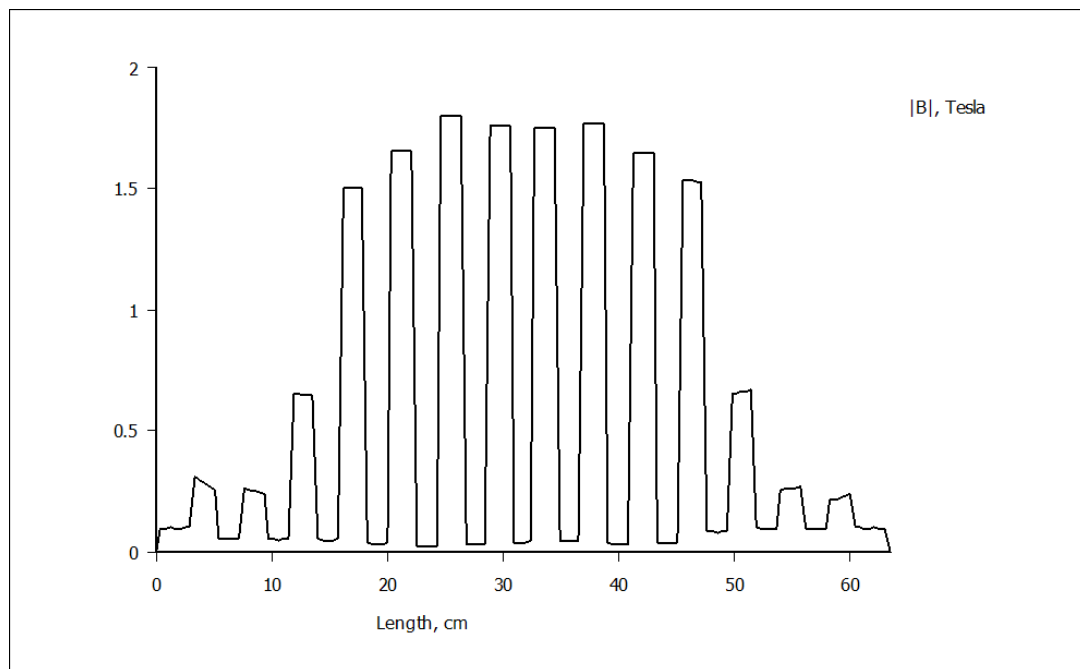
**Σχήμα 3.8.** Γεωμετρική διαμόρφωση ενός πόλου της γεννήτριας, όπως αυτός σχεδιάστηκε στο FEMM. Δείχνεται η μορφή των δυναμικών γραμμών και ενδεικτικές τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε όλο το φάσμα της γεννήτριας.

Παρατηρείται ότι σε όλη την έκταση της μηχανής τηρούνται τα δεδομένα όρια μαγνητικής επαγωγής. Για το διάκενο και τα δόντια του στάτη που καταπονούνται περισσότερο λόγω της μαγνητικής ροής, παίρνουμε τις παρακάτω γραφικές παραστάσεις.



**Σχήμα 3.9** Μαγνητική επαγωγή στο μέσο του διακένου για τους έξι πόλους.

Για την μαγνητική επαγωγή στα δόντια ακολουθεί η παρακάτω γραφική παράσταση :

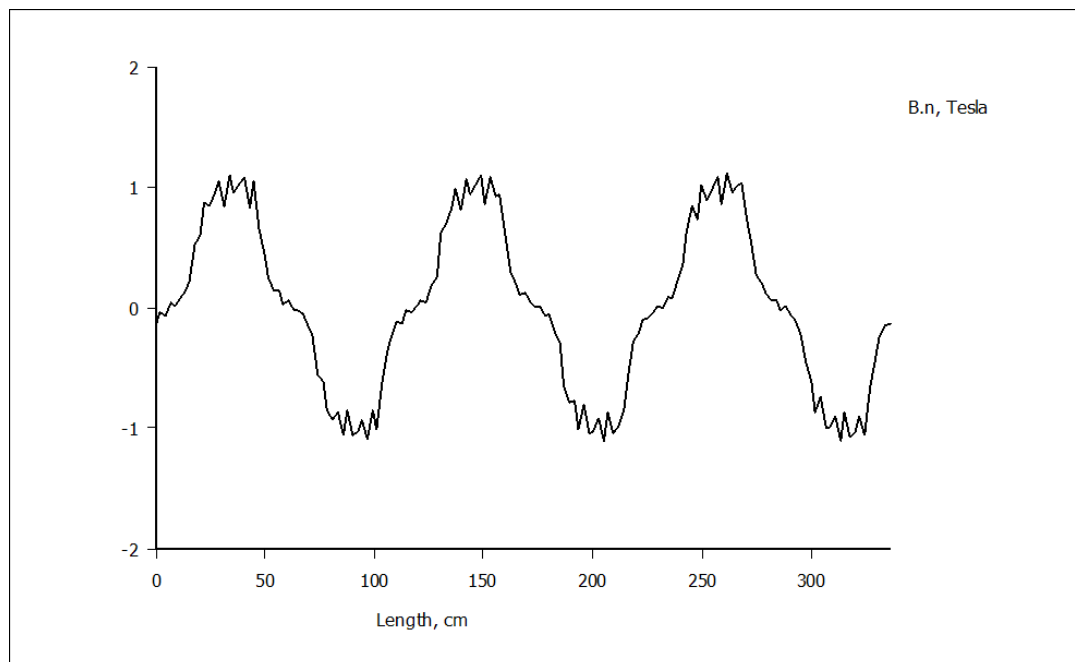


**Σχήμα 3.10** Μαγνητική επαγωγή στο μέσο των δοντιών για τον ένα πόλο.

Οι κυματώσεις που παρατηρούνται στο διάκενο οφείλονται στην παρουσία αρμονικών, ενώ η μέση μαγνητική επαγωγή τόσο στην περίπτωση του διακένου όσο και σε αυτή των δοντιών κυμαίνεται εντός των επιτρεπόμενων ορίων.

### 3.3 Η μαγνητική ροή στο διάκενο

Τέλος, ιδιαίτερη αξία έχει και η μορφή της μαγνητικής ροής στο μέσο του διακένου :



*Σχήμα 3.11 Η ροή στο μέσο του διακένου.*

Σε μια σύγχρονη μηχανή, η κατανομή της μαγνητικής ροής δεν είναι γενικά ημιτονοειδής. Αν και οι σχεδιαστές μηχανών κάνουν πάντα προσπάθειες για να πετύχουν τέτοιες κατανομές, ποτέ οι σχεδιάσεις δεν είναι τέλειες. Πάντα, η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο της μηχανής περιέχει, εκτός από μία βασική ημιτονοειδή κυματομορφή, και κάποιες αρμονικές της. Αυτές οι αρμονικές του μαγνητικού πεδίου παράγουν αντίστοιχες αρμονικές στις τάσεις και στα ρεύματα της μηχανής. Έτσι, αν η μαγνητική ροή στο διάκενο δεν είναι ημιτονοειδής, τότε και οι τάσεις εξόδου της γεννήτριας δεν θα είναι ημιτονοειδείς.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση και λαμβάνοντας υπόψη και το σχήμα, παρατηρούμε ότι η μαγνητική ροή δεν είναι απόλυτα ημιτονοειδής λόγω των αρμονικών. Μάλιστα για να αποφευχθεί η παρουσία αρμονικών χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές, μια εκ των οποίων είναι και η χρήση τυλιγμάτων κλασματικού βήματος.



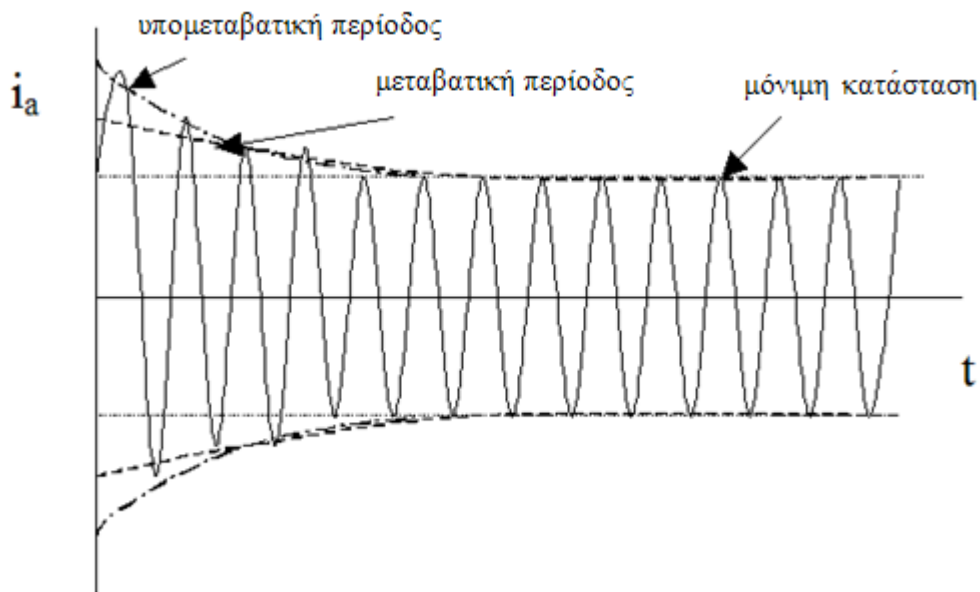


## 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

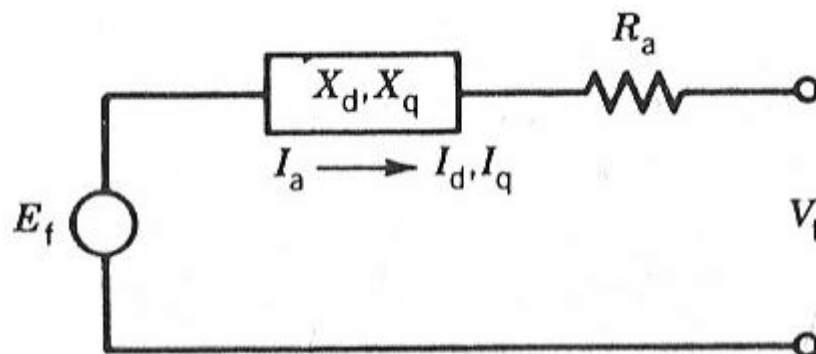
### ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

#### 4.1 Εκτίμηση των d,q αυτεπαγωγών της αξονικής γεννήτριας στη μόνιμη κατάσταση <sup>[1],[4],[12],[13]</sup>

Στο παρόν κεφάλαιο προσδιορίζονται οι αυτεπαγωγές στον d και q άξονα μιας μηχανής τόσο στη μόνιμη κατάσταση όσο και στη μεταβατική και υπομεταβατική της κατάσταση.



**Σχήμα 4.1** Το ρεύμα στη φάση A του στάτη στην υπομεταβατική, στη μεταβατική και στη μόνιμη κατάσταση <sup>[12]</sup>.



**Σχήμα 4.2** Οι αντιδράσεις  $X_d$  και  $X_q$  σε κυκλωματικό ισοδύναμο <sup>[13]</sup>.

Η  $L_d$  ορίζεται ως η αυτεπαγωγή εκείνης της φάσης της οποίας ο μαγνητικός άξονας συμπίπτει με τον πολικό άξονα d, όταν και οι τρεις φάσεις τροφοδοτούνται ταυτόχρονα. Ομοίως,  $L_q$  είναι η αυτεπαγωγή εκείνης της φάσης της οποίας ο μαγνητικός άξονας συμπίπτει με τον άξονα q, όταν και οι τρεις φάσεις τροφοδοτούνται ταυτόχρονα. Για τον υπολογισμό τους θα εφαρμοστεί η μέθοδος που βασίζεται στις πεπλεγμένες ροές των τυλιγμάτων των φάσεων και ισχύει ανεξαρτήτως γραμμικότητας των μαγνητικών κυκλωμάτων. Συνεπώς, οι τιμές τους δίνονται από τις σχέσεις :

$$L_d = \frac{\Lambda_d}{I_d} = \frac{\Lambda_d}{I_{\max}} \quad (4.1.1)$$

$$L_q = \frac{\Lambda_q}{I_q} = \frac{\Lambda_q}{I_{\max}} \quad (4.1.2)$$

Οι  $\Lambda_d$ ,  $\Lambda_q$  είναι οι πεπλεγμένες ροές των φάσεων εκείνων που ο μαγνητικός τους άξονας συμπίπτει με τον d και q άξονα αντίστοιχα. Τα  $I_d$ ,  $I_q$  είναι ίσα με το μέγιστο ρεύμα  $I_{\max}$  (από τη στιγμή που μόνο d και q συνιστώσες ρευμάτων αντίστοιχα τροφοδοτούν το στάτη) και ίσα με τα ρεύματα των παραπάνω φάσεων που ο μαγνητικός τους άξονας συμπίπτει με τους αντίστοιχους d, q άξονες.

Οι d, q αυτεπαγωγές ( $L_d, L_q$ ) της γεννήτριας στη μόνιμη κατάσταση θα υπολογιστούν στις ονομαστικές συνθήκες, δηλαδή για τα ονομαστικά φασικά ρεύματα της γεννήτριας ( $I_{\text{rms,nom}} = 262 \text{ A}$ ). Για την εφαρμογή της απαιτείται πρώτα η πεδιακή ανάλυση της μηχανής μέσω του FEMM εφαρμόζοντας κατάλληλα ρεύματα μόνο στις φάσεις του στάτη. Το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα θα είναι ανοικτοκυκλωμένο. Η ανάλυση θα είναι στατική (0 Hz) για να μην προκύπτουν επαγόμενα ρεύματα στο δρομέα και το τύλιγμα διέγερσης.

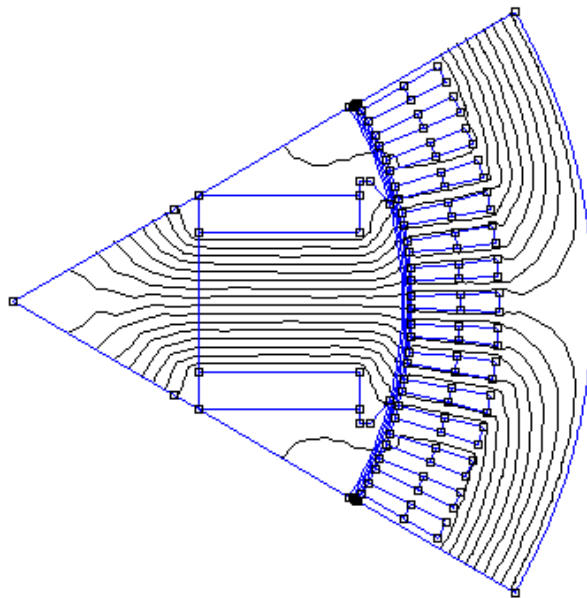
#### 4.1.1 Υπολογισμός $L_d$ <sup>[1],[4]</sup>

Για τον υπολογισμό του  $L_d$ , θα τροφοδοτηθεί η γεννήτρια μόνο με d-άξονα ρεύματα οπότε θα προκαλείται μαγνητικό πεδίο στάτη ευθυγραμμισμένο με τον πολικό άξονα του δρομέα (d-άξονα). Για τη δεδομένη κατανομή των τυλιγμάτων του στάτη, τα ρεύματα στις τρεις φάσεις θα πρέπει να είναι τα εξής (το μείον υποδηλώνει τη φορά των ρευμάτων) :

Ρεύματα στις 3 φάσεις
$I_a = I_{\max} = 262A$
$I_b = -\frac{1}{2} \cdot I_{\max} = -131A$
$I_c = -\frac{1}{2} \cdot I_{\max} = -131A$

**Πίνακας 4.1**

Το προκύπτον μαγνητικό πεδίο της μηχανής για τα παραπάνω ρεύματα δίνεται στο σχήμα 4.3.



**Σχήμα 4.3** Το μαγνητικό πεδίο της μηχανής λόγω των d-άξονα ρευμάτων στο στάτη.

Διαπιστώνεται ότι με τον άξονα d συμπίπτει ο μαγνητικός άξονας της φάσης a και επειδή :

$$I_a = I_{\max} = 262A$$

θα είναι :

$$\Lambda_d = \Lambda_a \quad (4.1.1.1)$$

Από την ανάλυση του FEMM και λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (4.1.1) και (4.1.1.1) προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

<b>ΦΑΣΗ Α</b>
$\Lambda_a = 0.32 \text{ Wb}$
$\Lambda_d = 0.32 \text{ Wb}$
$L_d = 7.329 \text{ mH}$

**Πίνακας 4.2**

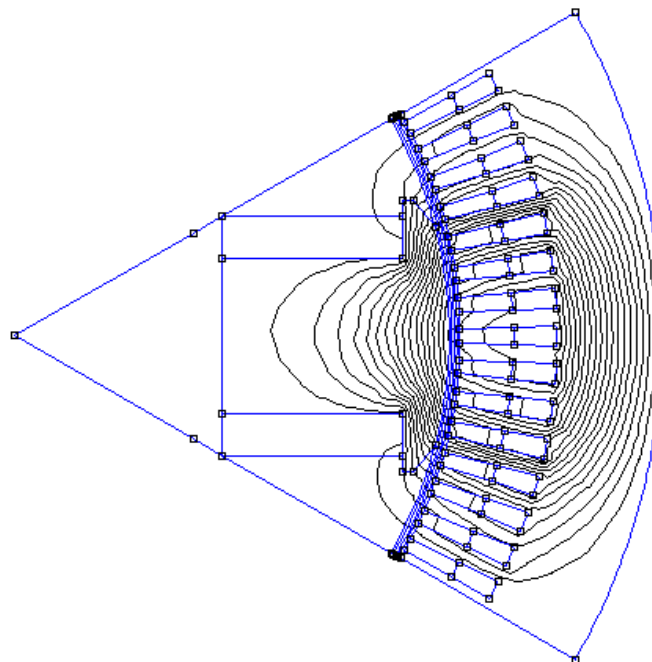
#### 4.1.2 Υπολογισμός $L_q$ <sup>[1],[4],[13]</sup>

Για τον υπολογισμό του  $L_q$ , θα τροφοδοτηθεί η γεννήτρια μόνο με q-άξονα ρεύματα οπότε θα προκαλείται μαγνητικό πεδίο στάτη κάθετο στον πολικό άξονα του δρομέα, δηλαδή ευθυγραμμισμένο με τον q-άξονα. Για τη δεδομένη κατανομή των τυλιγμάτων του στάτη, τα ρεύματα στις τρεις φάσεις θα πρέπει να είναι τα εξής :

<b>Ρεύματα στις 3 φάσεις</b>
$I_a = 0$
$I_b = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\max} = -226.89 \text{ A}$
$I_c = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\max} = 226.89 \text{ A}$

**Πίνακας 4.3**

Το προκύπτον μαγνητικό πεδίο της μηχανής για τα παραπάνω ρεύματα δίνεται στο σχήμα 4.4.



**Σχήμα 4.4** Το μαγνητικό πεδίο της μηχανής λόγω των q-άξονα ρευμάτων στο στάτη.

Διαπιστώνεται ότι με τον άξονα q δεν συμπίπτει ο μαγνητικός άξονας καμιάς φάσης. Επειδή όμως :

$$I_b = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\max}$$

$$I_c = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\max}$$

θα είναι :

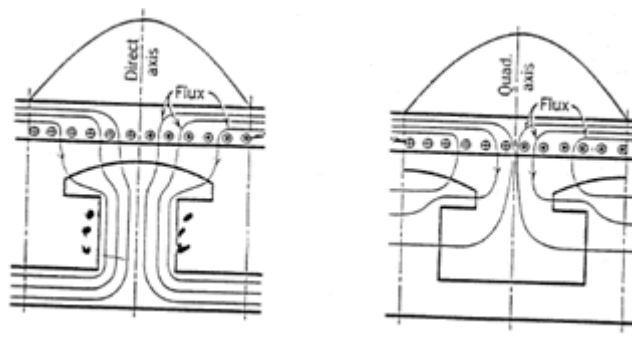
$$\Lambda_q = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \Lambda_b = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \Lambda_c \quad (4.1.2.1)$$

Από την ανάλυση του FEMM και λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (4.1.2) και (4.1.2.1) προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

ΦΑΣΗ Β	ΦΑΣΗ Γ
$\Lambda_b = 0.0738 \text{ Wb}$	$\Lambda_c = 0.0738 \text{ Wb}$
$\Lambda_q = 0.0639 \text{ Wb}$	$\Lambda_q = 0.0639 \text{ Wb}$
$L_q = 1.464 \text{ mH}$	$L_q = 1.464 \text{ mH}$

**Πίνακας 4.4**

Οι διαφορετικές τιμές των  $L_q$  που υπολογίζονται για τις πεπλεγμένες ροές των τριών φάσεων οφείλονται στο έντονο αρμονικό περιεχόμενο του πεδίου του στάτη και στις όποιες ατέλειες συμμετρίας στη σχεδίαση στο FEMM.

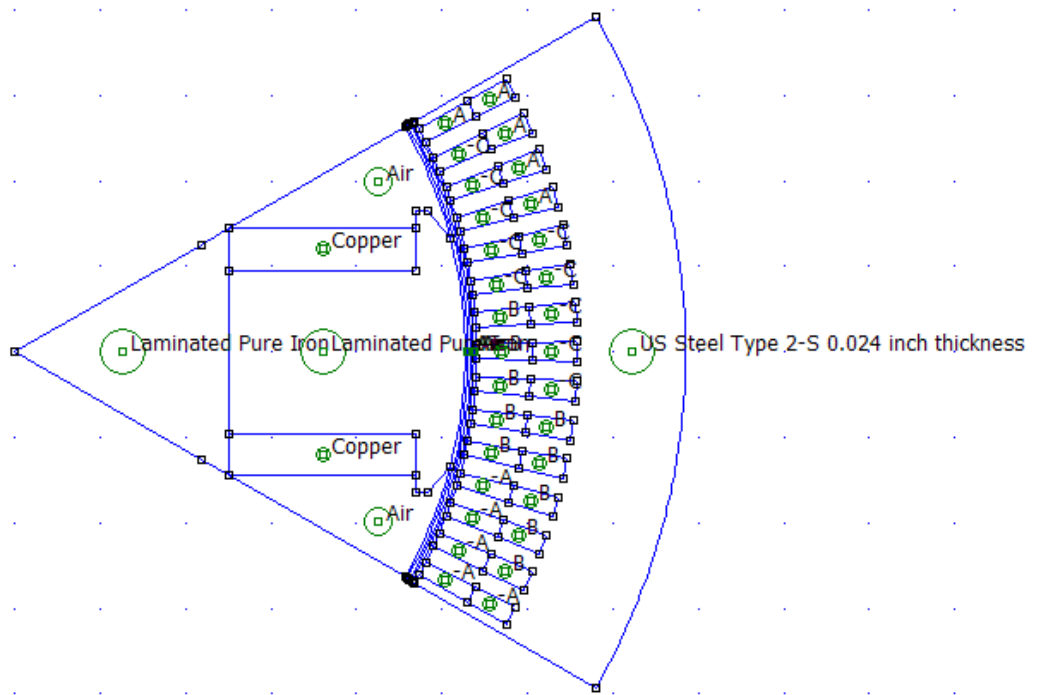


**Σχήμα 4.5** Οι αυτεπαγωγές  $L_d$  και  $L_q$  στη μόνιμη κατάσταση.

## 4.2 Εκτίμηση των $d, q$ αυτεπαγωγών της γεννήτριας στη μεταβατική κατάσταση<sup>[1],[4]</sup>

Στον παρόν κεφάλαιο θα υπολογιστεί η  $d$  αυτεπαγωγή της γεννήτριας στη μεταβατική κατάσταση ( $Ld'$ ), η οποία διαφοροποιείται από την αντίστοιχη της μόνιμης κατάστασης λόγω των επαγόμενων ρευμάτων στο τύλιγμα διέγερσης του πεδίου. Η  $Lq'$  δεν έχει νόημα να υπολογιστεί από τη στιγμή που δεν υπάρχει τύλιγμα στον  $q$  άξονα. Ο υπολογισμός θα βασιστεί στις πεπλεγμένες ροές των τυλιγμάτων των φάσεων.

Η πεδιακή ανάλυση της μηχανής στο FEMM θα γίνει στα 50 Hz ώστε να υπάρχει η δυνατότητα επαγωγής ρευμάτων. Ρεύματα όμως θα επαχθούν μόνο στο τύλιγμα διέγερσης καθώς ο δρομέας έχει θεωρηθεί λαμιναρισμένος από τη στιγμή που μελετάται η μεταβατική περίοδος (οπότε και τα δινορρεύματα στο συμπαγή δρομέα θα έχουν αποσβεστεί). Να σημειωθεί ότι το τύλιγμα διέγερσης προσεγγίστηκε στο FEMM με πλάκες χαλκού (σχήμα 4.6) κάτι που δημιουργεί κάποια ανακρίβεια στα αποτελέσματα.



**Σχήμα 4.6** Ο πόλος της γεννήτριας όπως προσομοιώθηκε στο FEMM, για την ανάλυση στη μεταβατική περίοδο.

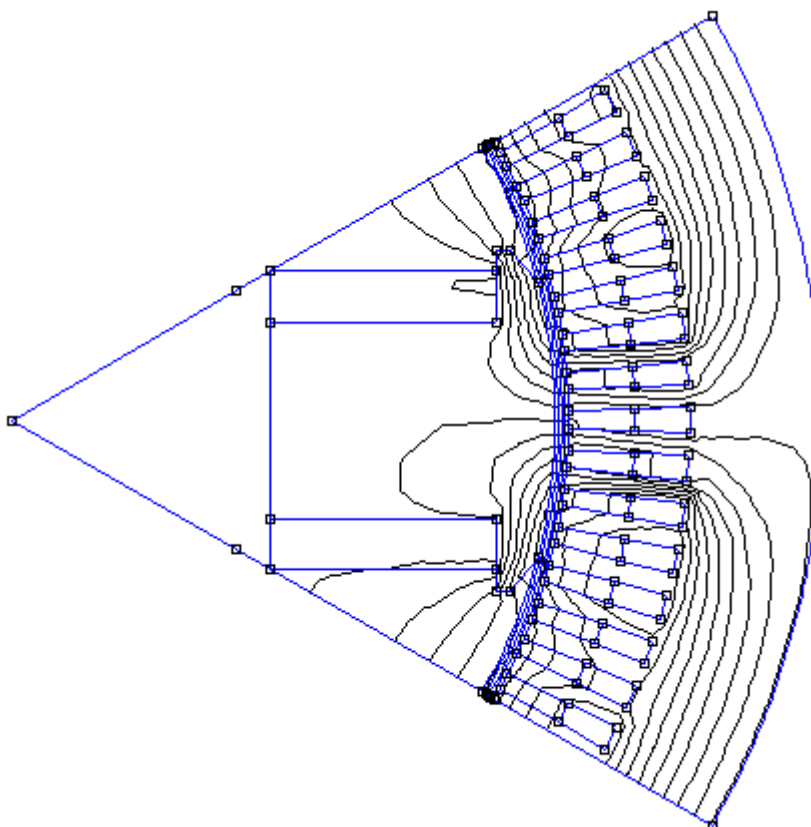
### 4.2.1 Υπολογισμός $Ld'$ <sup>[1],[4],[13]</sup>

Επειδή η ανάλυση γίνεται στα 50 Hz, τα ρεύματα του στάτη δε θα δοθούν σαν στιγμιαίες τιμές αλλά σαν μιγαδικοί και έτσι θα έχουν τη μορφή :

Ρεύματα στις 3 φάσεις
$I_a = I_{\max} = 262 + j \cdot 0A$
$I_b = I_{\max} = -131 - j \cdot 226.89A$
$I_c = I_{\max} = -131 + j \cdot 226.89A$

**Πίνακας 4.5**

Το προκύπτον μαγνητικό πεδίο της μηχανής για τα παραπάνω ρεύματα λόγω μόνο της d-συνιστώσας των ρευμάτων (πραγματικό μέρος) δίνεται στο σχήμα 4.7. Συγκριτικά με το σχήμα 4.4, διαπιστώνεται ότι λόγω των επαγόμενων ρευμάτων στο τύλιγμα διέγερσης, εμποδίζεται το πεδίο του στάτη να εισέλθει βαθύτερα στο δρομέα.



**Σχήμα 4.7** Το μαγνητικό πεδίο της μηχανής λόγω της d-συνιστώσας των ρευμάτων.

Για τον υπολογισμό τώρα του  $L_{d'}$  θα ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία με αυτή που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για τον υπολογισμό του  $L_d$ . Διαπιστώνεται ότι με τον άξονα d συμπίπτει ο μαγνητικός άξονας της φάσης a. Όμως επειδή :

$$I_a = I_{\max} = 262A$$

θα είναι :

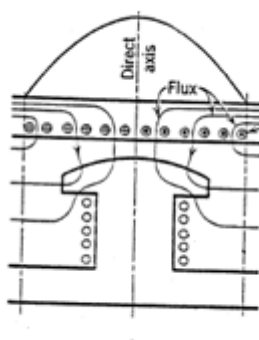
$$\Lambda_d = \Lambda_a \quad (4.2.1.1)$$

Από την ανάλυση του FEMM και λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (4.1.1) και (4.2.1.1) προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

<b>ΦΑΣΗ Α</b>
$\Lambda_a = 0.0445 \text{ Wb}$
$\Lambda_d = 0.0445 \text{ Wb}$
$L_{d'} = 1.019 \text{ mH}$

**Πίνακας 4.6**

Δηλαδή η d-αυτεπαγωγή στη μεταβατική κατάσταση προκύπτει αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη στη μόνιμη κατάσταση, όπως αναμενόταν.



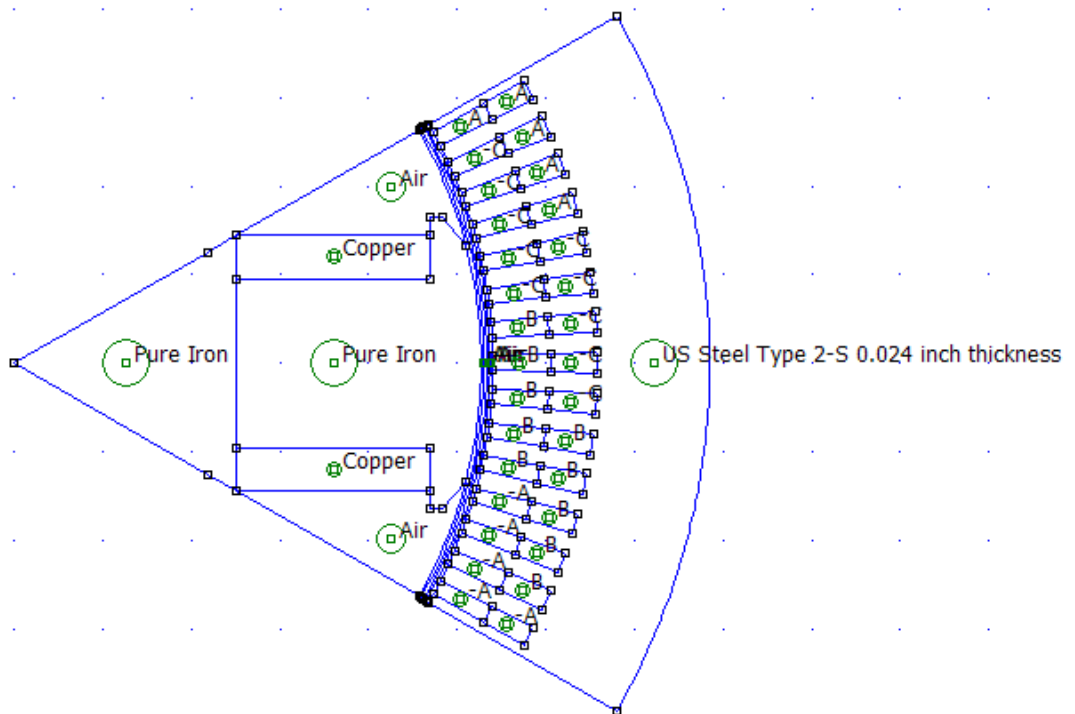
**Σχήμα 4.8** Η αυτεπαγωγή  $L_{d'}$  στη μεταβατική κατάσταση.



### 4.3 Εκτίμηση των $d, q$ αυτεπαγωγών της γεννήτριας στην υπομεταβατική κατάσταση <sup>[1],[4]</sup>

Στον παρόν κεφάλαιο θα υπολογιστούν οι  $d, q$  αυτεπαγωγές της γεννήτριας στην υπομεταβατική κατάσταση ( $Ld'', Lq''$ ), οι οποίες διαφοροποιούνται από τις αντίστοιχες της μόνιμης και μεταβατικής κατάστασης λόγω των επαγόμενων ρευμάτων (δινορρεύματα) στο συμπαγή δρομέα. Οι υπολογισμοί θα βασιστούν στις πεπλεγμένες ροές των τυλιγμάτων των φάσεων.

Η πεδιακή ανάλυση της μηχανής στο FEMM θα γίνει στα 50 Hz ώστε να υπάρχει η δυνατότητα επαγωγής ρευμάτων. Ρεύματα θα επαχθούν τόσο στο τύλιγμα διέγερσης (από την  $d$ -συνιστώσα των ρευμάτων του στάτη μόνο) καθώς και στο συμπαγή δρομέα (σχήμα 4.9). Τα φασικά ρεύματα του στάτη είναι τα ίδια με αυτά του προηγούμενου κεφαλαίου:



*Σχήμα 4.9 Ο πόλος της γεννήτριας όπως προσομοιώθηκε στο FEMM, για την ανάλυση στην υπομεταβατική περίοδο.*

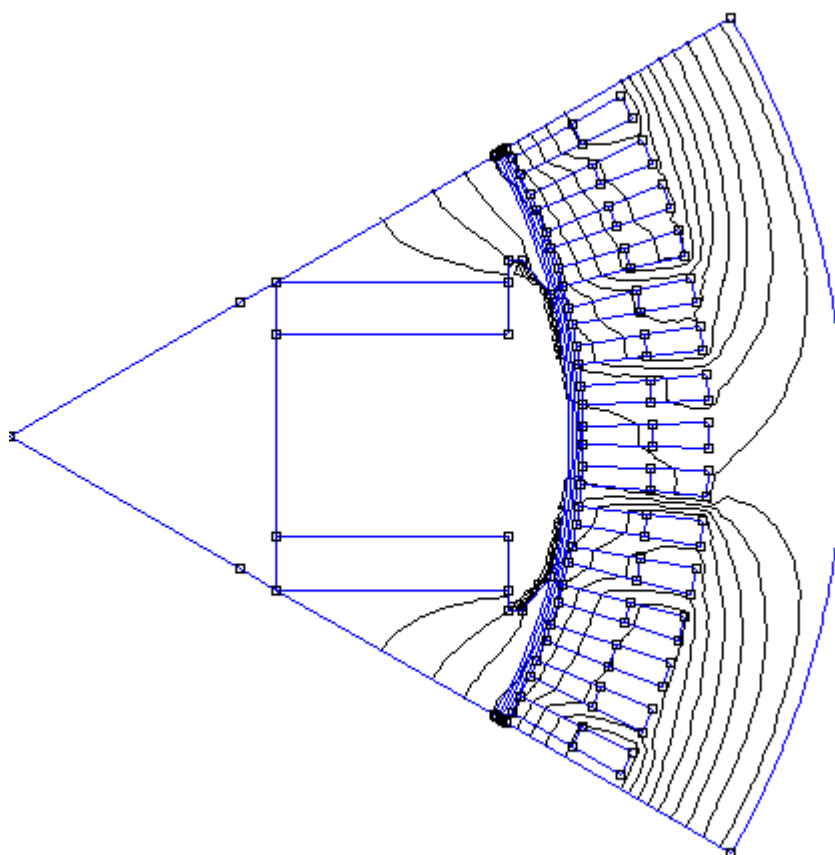
#### 4.3.1 Υπολογισμός $Ld''$ <sup>[1],[4]</sup>

Επειδή η ανάλυση γίνεται στα 50 Hz, τα ρεύματα του στάτη δε θα δοθούν σαν στιγμιαίες τιμές αλλά σαν μιγαδικοί και θα έχουν τη μορφή :

Ρεύματα στις 3 φάσεις
$I_a = I_{\max} = 262 + j \cdot 0A$
$I_b = I_{\max} = -131 - j \cdot 226.89A$
$I_c = I_{\max} = -131 + j \cdot 226.89A$

**Πίνακας 4.7**

Το προκύπτον μαγνητικό πεδίο της μηχανής για τα παραπάνω ρεύματα λόγω μόνο της d-συνιστώσας των ρευμάτων (πραγματικό μέρος) δίνεται στο Σχήμα 4.10.



**Σχήμα 4.10** Το μαγνητικό πεδίο της μηχανής λόγω της d-συνιστώσας των ρευμάτων.

Για τον υπολογισμό τώρα του  $L_d''$  θα ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία με αυτή που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για τον υπολογισμό του  $L_d$ . Διαπιστώνεται ότι με τον άξονα q συμπίπτει ο μαγνητικός άξονας της φάσης a. Όμως επειδή :

$$I_a = I_{\max} = 262A$$

θα είναι :

$$\Lambda_d = \Lambda_a \quad (4.3.1.1)$$

Από την ανάλυση του FEMM και λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (4.1.1) και (4.3.1.1) προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

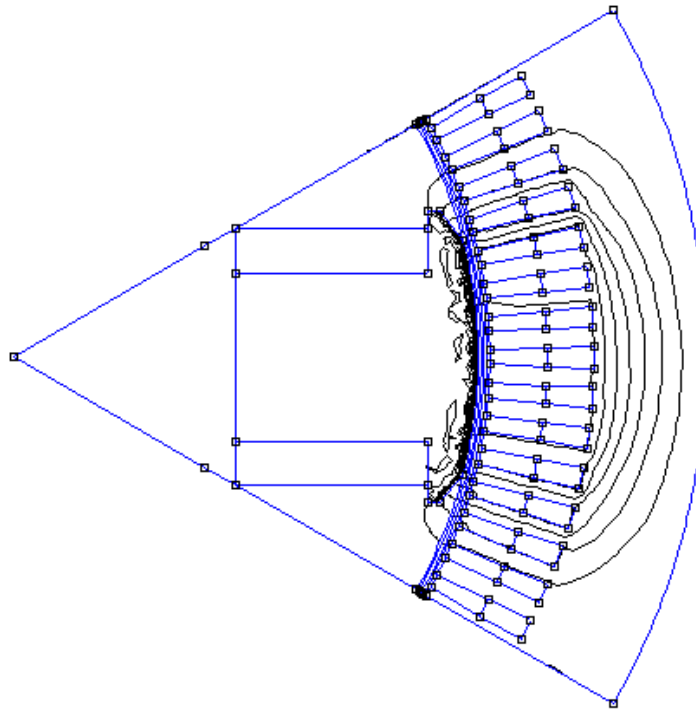
<b>ΦΑΣΗ Α</b>
$\Lambda_a = 0.035 \text{ Wb}$
$\Lambda_d = 0.035 \text{ Wb}$
$L_{d''} = 0.8 \text{ mH}$

**Πίνακας 4.8**

Δηλαδή, η d-αυτεπαγωγή στη υπομεταβατική κατάσταση προκύπτει μικρότερη από τις αντίστοιχες στη μόνιμη και μεταβατική κατάσταση, όπως αναμενόταν.

#### 4.3.2 Υπολογισμός $L''_q$ <sup>[1],[4]</sup>

Το προκύπτον μαγνητικό πεδίο της μηχανής για τα παραπάνω ρεύματα λόγω μόνο της q-συνιστώσας των ρευμάτων (φανταστικό μέρος) δίνεται στο Σχήμα 4.11. Συγκριτικά με το Σχήμα 4.4, διαπιστώνεται ότι λόγω των επαγόμενων ρευμάτων στο συμπαγή δρομέα, εμποδίζεται το πεδίο του στάτη να εισέλθει στο δρομέα.



**Σχήμα 4.11** Το μαγνητικό πεδίο της μηχανής λόγω της q-συνιστώσας των ρευμάτων.

Διαπιστώνεται ότι με τον άξονα q δεν συμπίπτει ο μαγνητικός άξονας καμιάς φάσης. Το  $L''_q$  μπορεί επίσης να υπολογιστεί και από τις πεπλεγμένες ροές των δύο άλλων φάσεων. Συγκεκριμένα επειδή :

$$I_b = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\max}$$

$$I_c = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\max}$$

θα είναι :

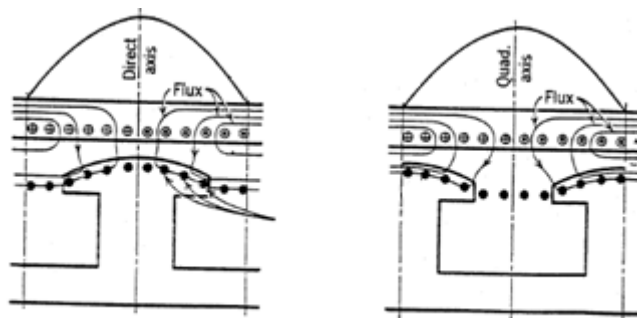
$$\Lambda_q = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \Lambda_b = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \Lambda_c \quad (4.3.2.1)$$

Από την ανάλυση του FEMM και λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (4.1.2) και (4.3.2.1) προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

ΦΑΣΗ Β	ΦΑΣΗ Γ
$\Lambda_b = 0.0068 \text{ Wb}$	$\Lambda_c = 0.0066 \text{ Wb}$
$\Lambda_q = 0.00588 \text{ Wb}$	$\Lambda_q = 0.0057 \text{ Wb}$
$L_{q''} = 0.135 \text{ mH}$	$L_{q''} = 0.132 \text{ mH}$

**Πίνακας 4.9**

Δηλαδή η q-αυτεπαγωγή στην υπομεταβατική κατάσταση προκύπτει γενικά μικρότερη από τις αντίστοιχες στη μόνιμη και τη μεταβατική κατάσταση, όπως αναμενόταν. Οι διαφορετικές τιμές των  $L_{q''}$  που υπολογίζονται για τις πεπλεγμένες ροές των τριών φάσεων οφείλονται στο έντονο αρμονικό περιεχόμενο του πεδίου του και στις όποιες ατέλειες συμμετρίας στη σχεδίαση στο FEMM.



**Σχήμα 4.12** Οι αυτεπαγωγές  $L_{d''}$  και  $L_{q''}$  στην υπομεταβατική κατάσταση.

Συγκεντρωτικά, υπολογίστηκαν οι τιμές που εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα :

<b>ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΗ</b>	<b>ΤΙΜΗ</b>
$Ld$	7.329 mH
$Ld'$	1.019 mH
$Ld''$	0.800 mH
$Lq$	1.464 mH
$Lq''$	0.135 mH

**Πίνακας 4.10**

Σημείωση : Ο υπολογισμός των αυτεπαγωγών  $Ld$  και  $Lq$  (οι υπόλοιπες παραλείπονται αφού ακολουθήθηκε ίδιος κώδικας υπολογισμού) της σύγχρονης γεννήτριας με χρήση τόσο του Matlab όσο και του προγράμματος FEMM δίνονται στο παράρτημα Γ και Δ αντίστοιχα.

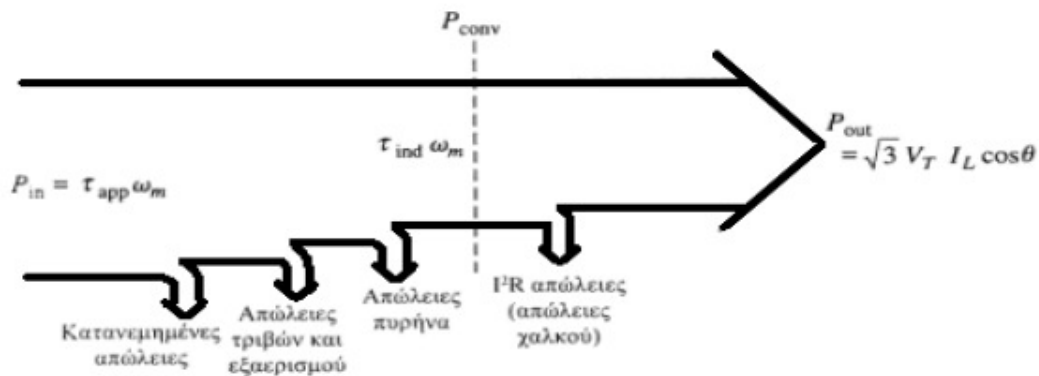


## 5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

#### 5.1 Ροή ισχύος στη σύγχρονη γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα<sup>[5],[6],[12],[13]</sup>

Στο παρόν κεφάλαιο, δεδομένου ότι υπάρχει η γεωμετρία της αξονικής γεννήτριας στο FEMM καθώς και οι αυτεπαγωγές στον d και q άξονα, μελετώνται τα χαρακτηριστικά της μεγέθη, αρχής γενομένης της γραφικής παράστασης της ηλεκτρικής ροπής που παράγει σε σχέση με τη γωνία που σχηματίζουν η τάση διέγερσης με την επαγόμενη ΗΕΔ στα τυλίγματα του στάτη  $E_a$ , ή αλλιώς την κοινώς αποδεκτή ως γωνία δ (δέλτα). Είναι γνωστή και ως γωνία φορτίου ή γωνία ροπής και στην ουσία προσδιορίζει τη μέγιστη τιμή ισχύος (άρα και ροπής) που παράγει μια γεννήτρια<sup>[5]</sup>.



**Σχήμα 5.1** Ροή ισχύος στη σύγχρονη γεννήτρια<sup>[12]</sup>.

Είναι δεδομένο ότι μία σύγχρονη γεννήτρια παρουσιάζει απώλειες κατά τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική για αυτό και ποτέ η εισερχόμενη ισχύς δεν είναι ίση με την εξερχόμενη. Η μηχανική ισχύς εισόδου έχει την τιμή :

$$P_{in} = \tau_{app} \cdot \omega_m \quad (5.1.1)$$

Η ισχύς που μετατρέπεται σε ηλεκτρική στο εσωτερικό της μηχανής έχει την τιμή (έπειτα από τις αναγραφόμενες απώλειες) :

$$P_{conv} = \tau_{ind} \cdot \omega_m = 3 \cdot E_a \cdot I_a \cdot \cos \gamma \quad (5.1.2)$$

όπου  $\gamma$  η γωνία μεταξύ των  $E_a$  και  $I_a$ .

Η διαφορά μεταξύ της εισερχόμενης ισχύος στη γεννήτρια και της ισχύος που μετατρέπεται τελικά σε ηλεκτρική οφείλεται στις απώλειες πυρήνα (ή σιδήρου), τις μηχανικές απώλειες και τις κατανεμημένες απώλειες της γεννήτριας.

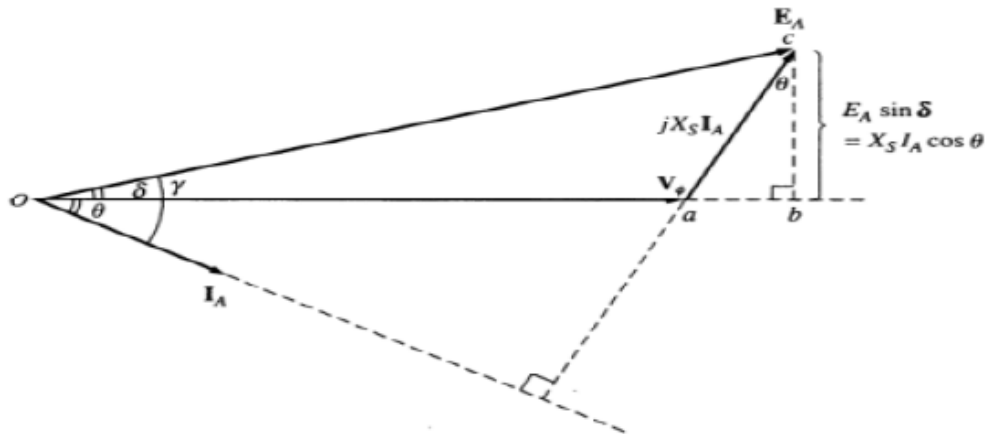
Η ενεργός εξερχόμενη ισχύς της γεννήτριας  $P_{out}$ , λαμβάνοντας υπόψη και τις απώλειες χαλκού του στάτη, δίνεται σε πολικά μεγέθη από τη σχέση :

$$P_{out} = \sqrt{3} \cdot V_t \cdot I_L \cdot \cos \theta \quad (5.1.3)$$

και σε φασικά μεγέθη :

$$P_{out} = 3 \cdot V\phi \cdot I_a \cdot \cos \theta \quad (5.1.4)$$

Μία πολύ χρήσιμη προσεγγιστική σχέση για τον υπολογισμό της εξερχόμενης ισχύος της γεννήτριας εξάγεται, εάν αγνοηθεί η αντίσταση του τυλίγματος του στάτη. Αυτή η προσέγγιση γίνεται συνήθως όταν η αντίδραση του στάτη είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστασή του. Σε αυτή την περίπτωση το διανυσματικό διάγραμμα της γεννήτριας μετατρέπεται σε αυτό του σχήματος 5.2. Σε αυτό το σχήμα το ευθύγραμμο τμήμα bc μπορεί να εκφραστεί ως  $E_a \cdot \sin \delta$  ή ως  $X_s \cdot I_a \cdot \cos \theta$ .



**Σχήμα 5.2** Απλοποιημένο διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας.

Με αντικατάσταση στη σχέση (5.1.4) λόγω του σχήματος 5.2 παίρνουμε :

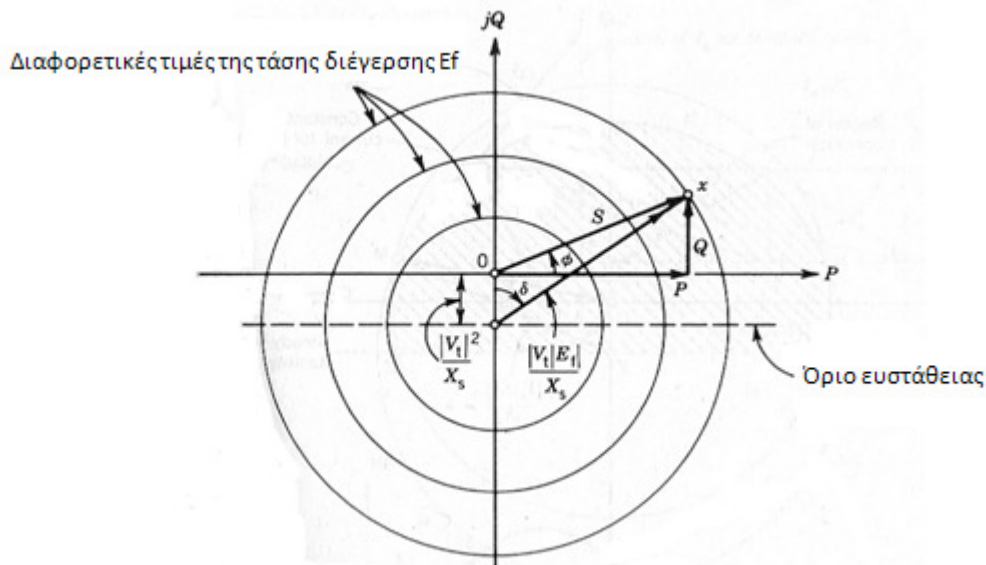
$$P_{out} = \frac{3 \cdot V\phi \cdot E_a \cdot \sin \delta}{X_s} \quad (5.1.5)$$

Έτσι λοιπόν, η ισχύς εξόδου εξαρτάται από τη γωνία δέλτα μεταξύ των  $V\phi$  και  $E_a$ . Αυτή η γωνία που ονομάζεται ηλεκτρική γωνία φορτίου ή γωνία ροπής προσδιορίζει τη μέγιστη ισχύ που είναι ικανή να παράξει μία γεννήτρια. Όταν μάλιστα  $\delta = 90^\circ$  τότε παίρνει τη μορφή :



$$P_{\max} = 3 \cdot \frac{V\phi \cdot Ea}{X_s} \quad (5.1.6)$$

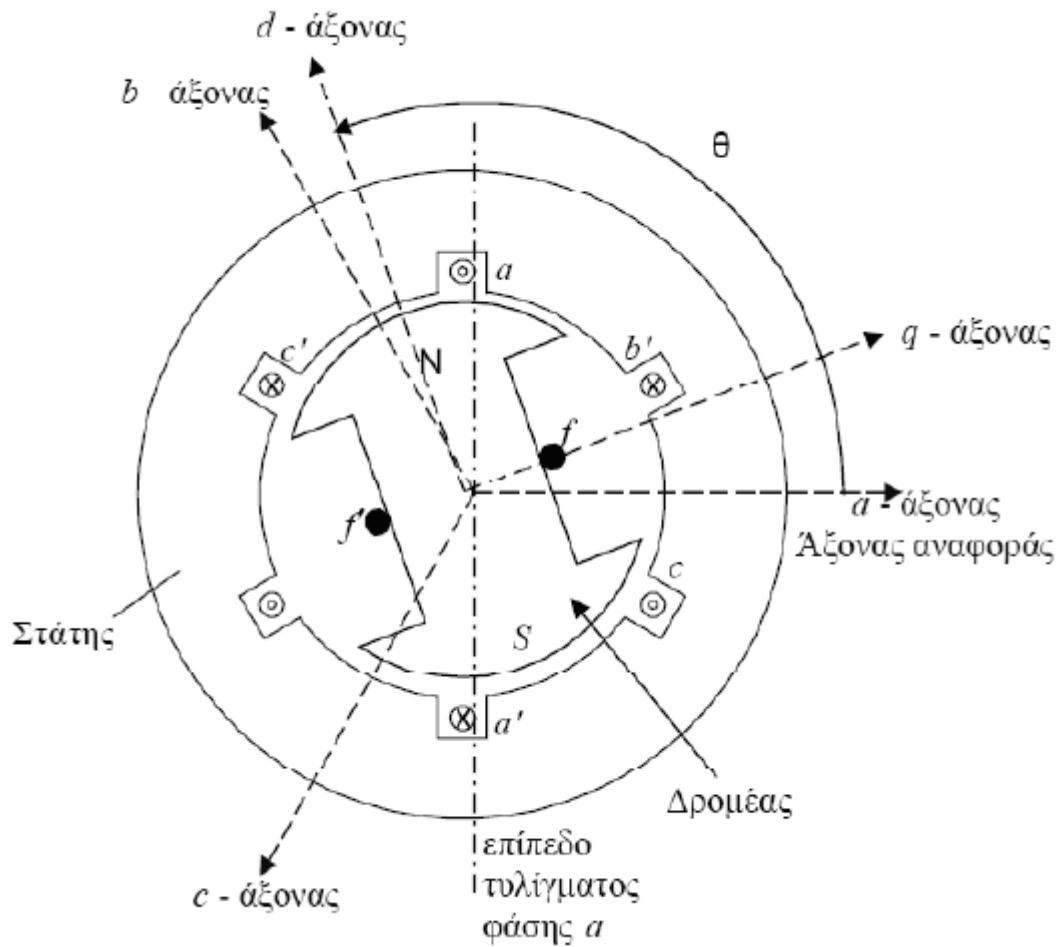
Αυτή η μέγιστη ισχύς ονομάζεται στατικό όριο ευστάθειας της γεννήτριας. Για γωνία δέλτα μεγαλύτερη των 90 μοιρών η γεννήτρια αποσυγχρονίζεται. Οι πραγματικές μηχανές δεν πλησιάζουν ποτέ αυτό το όριο για αυτό και για κανονική λειτουργία στη μόνιμη κατάσταση η γωνία ροπής είναι αρκετά κάτω των 90 μοιρών<sup>[6],[12]</sup>. Παρακάτω δίνεται και το διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζεται ο τρόπος που μεταβάλλονται η ενεργός και η άεργος ισχύς την γεννήτριας για διαφορετικές γωνίες δέλτα κρατώντας σταθερή την τάση διέγερσης.



**Σχήμα 5.3** Εξάρτηση ενεργού και άεργου ισχύος από τη γωνία δέλτα και την τάση διέγερσης<sup>[13]</sup>.

## 5.2 Ροή ισχύος στη σύγχρονη γεννήτρια έκτυπων πόλων

Όλα τα παραπάνω ισχύουν γενικότερα για μια σύγχρονη μηχανή με κυλινδρικό δρομέα. Στη διπλωματική χρησιμοποιείται μία σύγχρονη γεννήτρια έκτυπων πόλων. Αυτό σημαίνει ότι το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα δεν είναι παντού το ίδιο και είμαστε αναγκασμένοι να διακρίνουμε δύο μαγνητικούς άξονες, τον κατά μήκος άξονα (direct axis) και τον εγκάρσιο άξονα (quadrature axis). Ο μαγνητικός άξονας d συμπίπτει με τον άξονα ενός πόλου του δρομέα, ενώ ο άξονας q είναι κάθετος προς τον d άξονα και βρίσκεται στο κενό μεταξύ δύο πόλων του δρομέα.



**Σχήμα 5.4** Σχηματική παράσταση τομής σύγχρονης μηχανής έκτυπων πόλων .

Η φασική τάση της γεννήτριας σε αυτήν την περίπτωση θα είναι ίση με το άθροισμα της τάσης που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της και των τάσεων λόγω της αντίδρασης οπλισμού, δηλαδή :

$$V\phi = Ea + Ed + Eq \quad (5.2.1)$$

όπου

$Ed$  : η συνιστώσα της τάσης εξαιτίας της αντίδρασης οπλισμού στον κατά μήκος άξονα και

$Eq$  : η συνιστώσα της τάσης εξαιτίας της αντίδρασης οπλισμού στον εγκάρσιο άξονα



**Σχήμα 5.5** Η φασική τάση της γεννήτριας.

Κάθε τάση εξαιτίας της αντίδρασης του τυμπάνου είναι ανάλογη του ρεύματος στο στάτη και καθυστερεί σε σχέση με το ρεύματα κατά 90 μοίρες. Έτσι ισχύει :

$$E_d = -jx_d \cdot I_d \quad (5.2.2)$$

$$E_q = -jx_q \cdot I_q \quad (5.2.3)$$

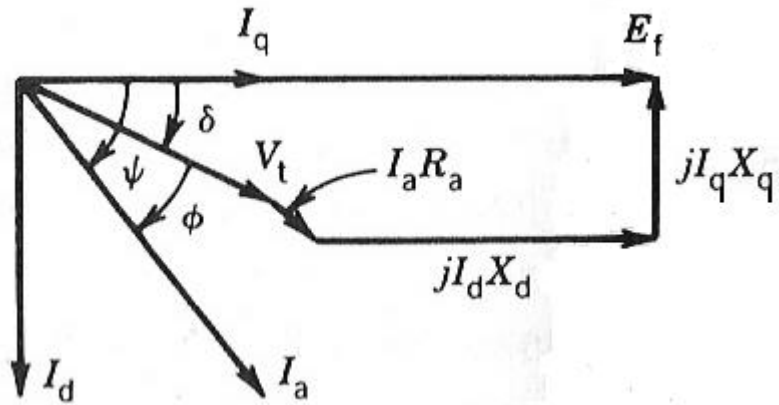
Αφού η αντίδραση του τυμπάνου είναι ανεξάρτητη από τη γωνία θέσης του δρομέα, προστίθεται η αντίδραση του στάτη στην κατά μήκος και την εγκάρσια αντίδραση και έτσι προκύπτουν η κατά μήκος και εγκάρσια σύγχρονη αντίδραση της γεννήτριας. Δηλαδή :

$$X_d = x_d + X_a \quad (5.2.4)$$

$$X_q = x_q + X_a \quad (5.2.5)$$

Έτσι, η βασική σχέση που διέπει μια γεννήτρια έκτυπων πόλων λαμβάνοντας υπόψη και την αντίσταση του στάτη σε πολικά μεγέθη είναι <sup>[6],[15]</sup> :

$$V_t = E_f - jX_d \cdot I_d - jX_q \cdot I_q - R_a \cdot I_a \quad (5.2.6)$$



**Σχήμα 5.6** Διανυσματικό διάγραμμα της σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων.

Η ισχύς εξόδου μιας σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων θα δίνεται από τη σχέση:

$$S = V_t \cdot I_a^* = |V_t| \cdot \angle -\delta \cdot (|I_q| + j \cdot |I_d|) \quad (5.2.7)$$

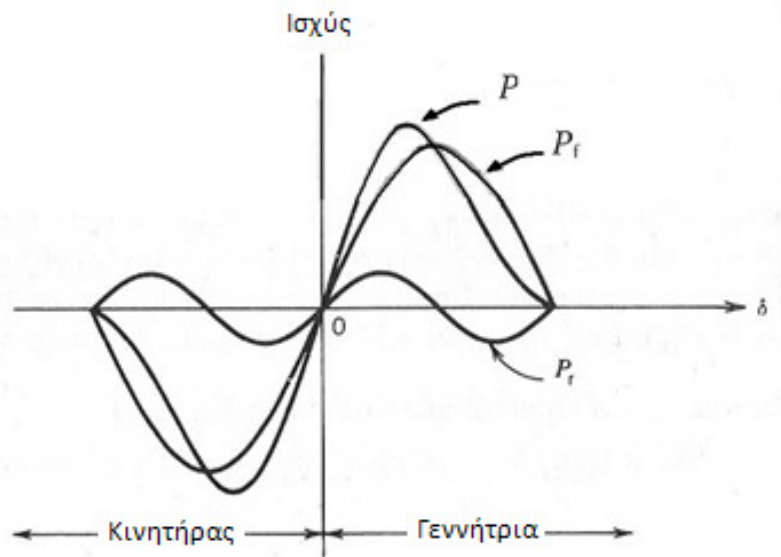
Από το ανυσματικό διάγραμμα προκύπτει ότι :

$$|I_d| = \frac{|E_f| - |V_t| \cdot \cos \delta}{X_d} \quad (5.2.8)$$

$$|I_q| = \frac{|V_t| \cdot \sin \delta}{X_q} \quad (5.2.9)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση παίρνουμε :

$$\begin{aligned} S &= \frac{|V_t|^2}{X_q} \cdot \sin \delta \angle -\delta + \frac{|V_t \cdot E_f|}{X_d} \cdot \angle(90 - \delta) - \frac{|V_t|^2}{X_d} \cdot \cos \delta \angle(90 - \delta) \\ &= P + j \cdot Q \end{aligned} \quad (5.2.10)$$



**Σχήμα 5.7** Εξάρτηση ισχύος εξόδου της γεννήτριας από τη γωνία δέλτα<sup>[13]</sup>.

Η ισχύς εξόδου μιας σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων θα είναι ίση με το άθροισμα της ισχύος που οφείλεται στο ρεύμα του κατά μήκους άξονα και της ισχύος που οφείλεται στον εγκάρσιο άξονα και θα δίνεται από τη σχέση :

$$P = \frac{|V_t \cdot E_f|}{X_d} \cdot \sin \delta + \frac{V_t^2 \cdot (X_d - X_q)}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \cdot \sin 2\delta$$

$$= P_f + j \cdot P_r$$
(5.2.11)

όπου P η ενεργός ισχύς εξόδου της γεννήτριας και

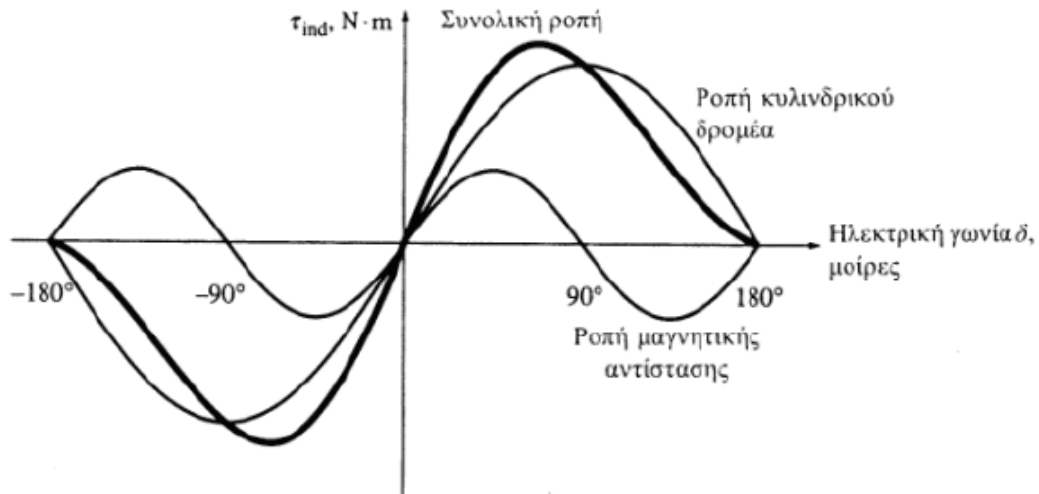
$$Q = \frac{|V_t \cdot E_f|}{X_d} \cdot \cos \delta - V_t^2 \cdot \left( \frac{\cos^2 \delta}{X_d} + \frac{\sin^2 \delta}{X_q} \right)$$
(5.2.12)

όπου Q η άεργος ισχύς εξόδου της γεννήτριας.

Τα αποτελέσματα της εξίσωσης δίνονται σχηματικά παραπάνω. Το δεξιό μέρος των καμπυλών αφορά τη λειτουργία γεννήτριας. Όπως δείχνει η εξίσωση, η ισχύς εξόδου εξαρτάται από τη γωνία δέλτα. Μάλιστα, η γωνία αυτή προσδιορίζει τη μέγιστη ισχύ που είναι ικανή να παράξει μία γεννήτρια. Αυτή η μέγιστη ισχύς ονομάζεται στατικό όριο ευστάθειας της γεννήτριας. Οι πραγματικές μηχανές δεν πλησιάζουν ποτέ αυτό το όριο για αυτό και για κανονική λειτουργία στη μόνιμη κατάσταση η γωνία ροπή είναι αρκετά κάτω των 90 μοιρών.

Η ουσιώδης διαφορά σε σχέση με τη σύγχρονη γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα είναι ότι η συνολική ισχύς εξόδου της γεννήτριας έκτυπων πόλων επηρεάζεται και

από την ισχύ που οφείλεται στο ρεύμα του εγκάρσιου άξονα (q-άξονα), δηλαδή το δεύτερο όρο της εξίσωσης 5.2.11 ( $P_r$ ). Αυτό έχει επίπτωση και στη γωνία για την οποία η γεννήτρια αποσυγχρονίζεται. Εξαιτίας του δεύτερου όρου  $P_r$ , το μέγιστο σημείο της τελικής μας καμπύλης μετατοπίζεται ελαφρώς προς τα αριστερά (για λειτουργία γεννήτριας) με συνέπεια η γωνία κατά την οποία προσεγγίζουμε το στατικό όριο ευστάθειας να είναι λίγο μικρότερη των 90 μοιρών.



**Σχήμα 5.8** Εξάρτηση ηλεκτρομαγνητικής ροπής της γεννήτριας από τη γωνία δέλτα<sup>[13]</sup>.

Εφόσον η εξαγόμενη ηλεκτρική ροπή μιας γεννήτρια δίνεται από τον τύπο :

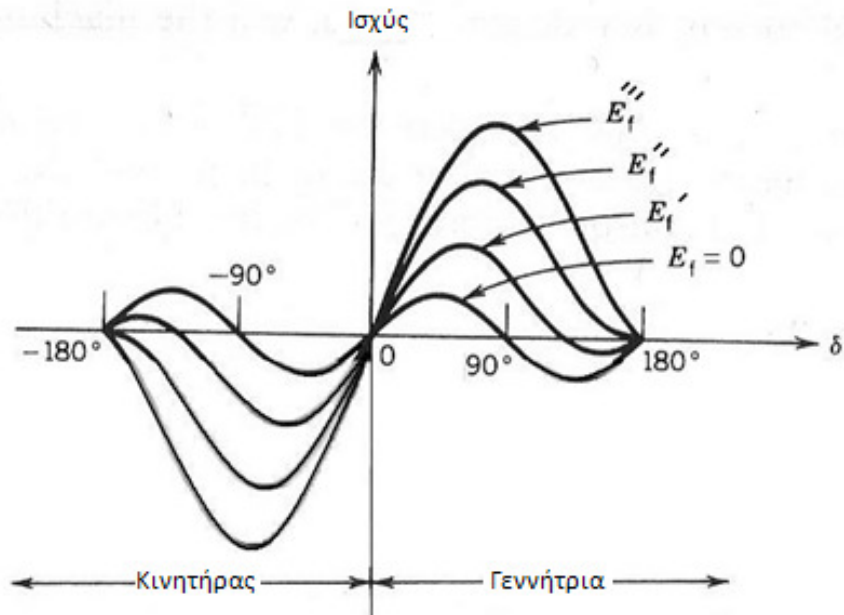
$$P_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega m} \quad (5.2.13)$$

τότε η εξίσωση μπορεί να εκφραστεί και ως :

$$P_{ind} = \frac{|V_t \cdot E_f|}{\omega m \cdot X_d} \cdot \sin \delta + \frac{|V_t|^2 \cdot (X_d - X_q)}{2 \cdot \omega m \cdot (X_d \cdot X_q)} \cdot \sin 2\delta \quad (5.2.14)$$

$T_f + j \cdot T_r$

Αντίστοιχα, η διαφορά σε σχέση με τη σύγχρονη γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα είναι ότι η ροπή εξόδου της γεννήτριας έκτυπων πόλων επηρεάζεται και από τη ροπή μαγνητικής αντίστασης, δηλαδή το δεύτερο όρο της εξίσωσης 5.2.14 ( $T_r$ ).



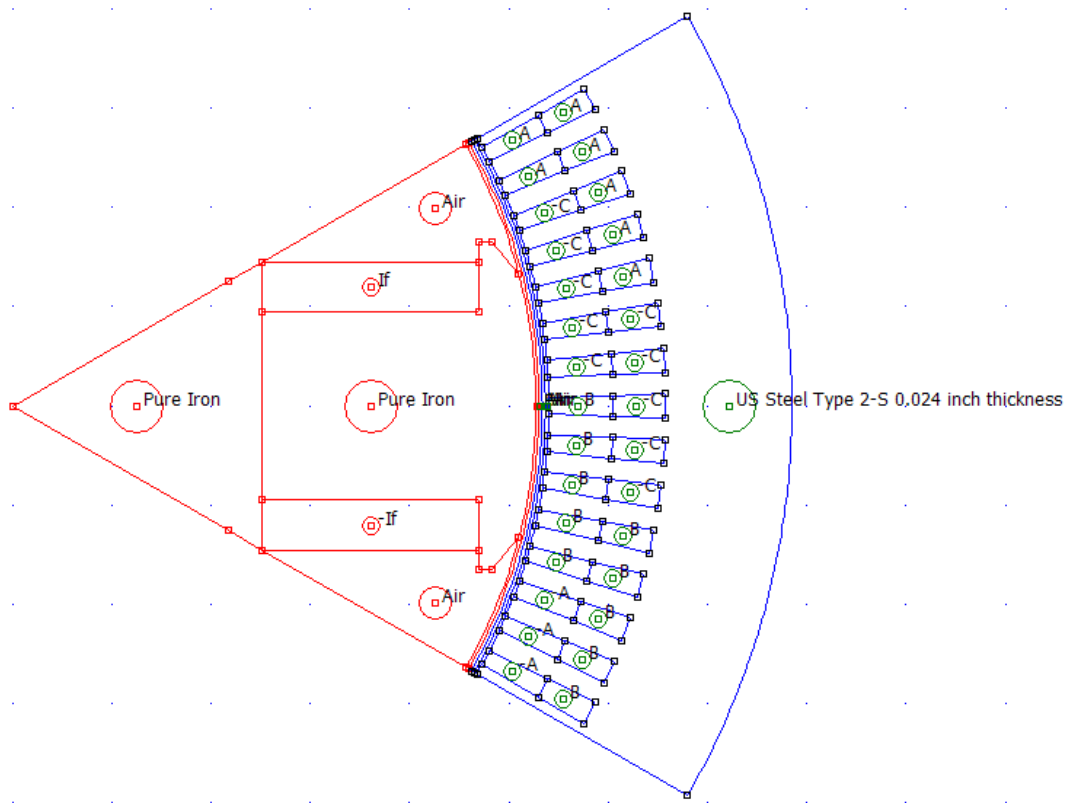
**Σχήμα 5.9** Καμπύλη ισχύος συναρτήσει της γωνίας δέλτα για διάφορες τιμές της τάσης διέγερσης ( $E_f''' > E_f'' > E_f' > E_f$ )<sup>[13]</sup>.

Παραπάνω φαίνεται η γραφική παράσταση της ισχύος σε σχέση με τη γωνία δέλτα για διάφορες τιμές της τάσης διεγέρσεως<sup>[13]</sup>. Να σημειωθεί ότι η γραφική παράσταση του πρώτου τεταρτημορίου αφορά τη λειτουργία της γεννήτριας. Η θεωρητική προσέγγιση που προηγήθηκε θα βοηθήσει στην επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.

### 5.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

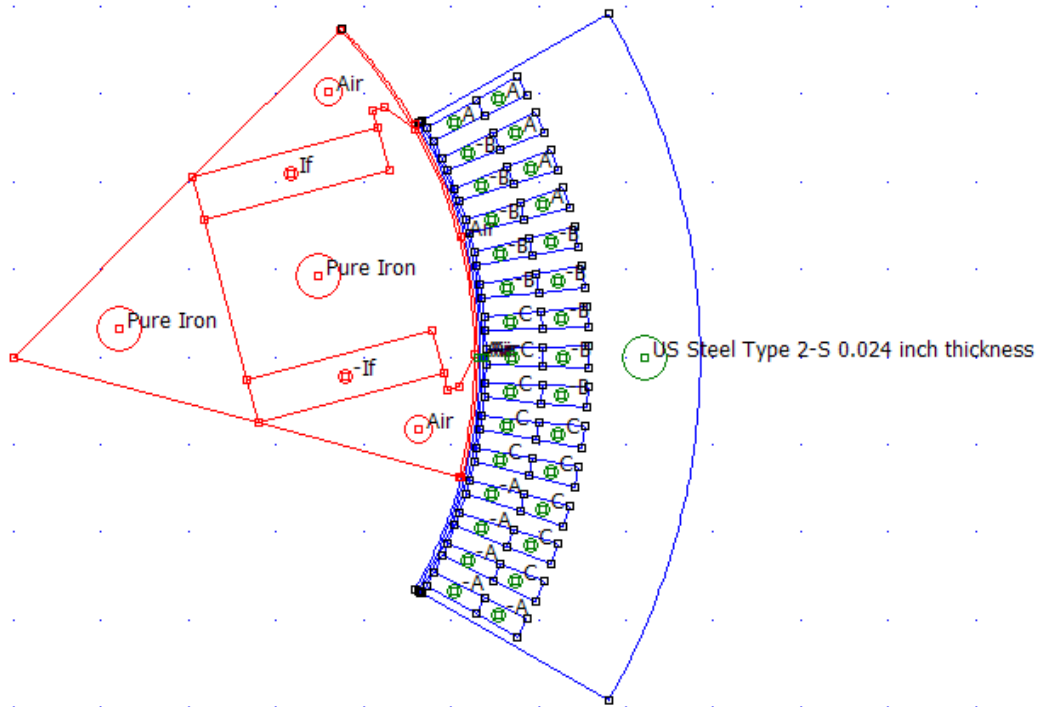
Σχεδιάστηκε ένας πόλος της μηχανής φροντίζοντας όμως κατά την περιστροφή του να τηρούνται όλες οι αντιπεριοδικές συνθήκες. Χωρίστηκε στη συνέχεια η αξονική γεννήτρια σε δύο ομάδες (groups) έτσι ώστε να περιστραφεί (μέσω εντολών του Matlab) ο δρομέας της γεννήτριας κατά  $k$  μηχανικές μοίρες. Τα ρεύματα του στάτη δε μεταβάλλονται καθώς στη συγκεκριμένη περίπτωση μελετάται η μεταβολή της ισχύος σε σχέση με τη γωνία ισχύος.

Περιστράφηκε η ομάδα 1 (με κόκκινο χρώμα), ολισθήσαμε δηλαδή τη μηχανή πάνω στο μέσο του διακένου. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ο μέσος όρος της ροπής που παράγεται από την πλευρά του δρομέα και από την πλευρά του στάτη. Ο υπολογιζόμενος μέσος όρος έδωσε τη ζητούμενη ροπή. Πιο συγκεκριμένα, ο διαχωρισμός των ομάδων στο FEMM καθώς και τα αποτελέσματα δίνονται παρακάτω :

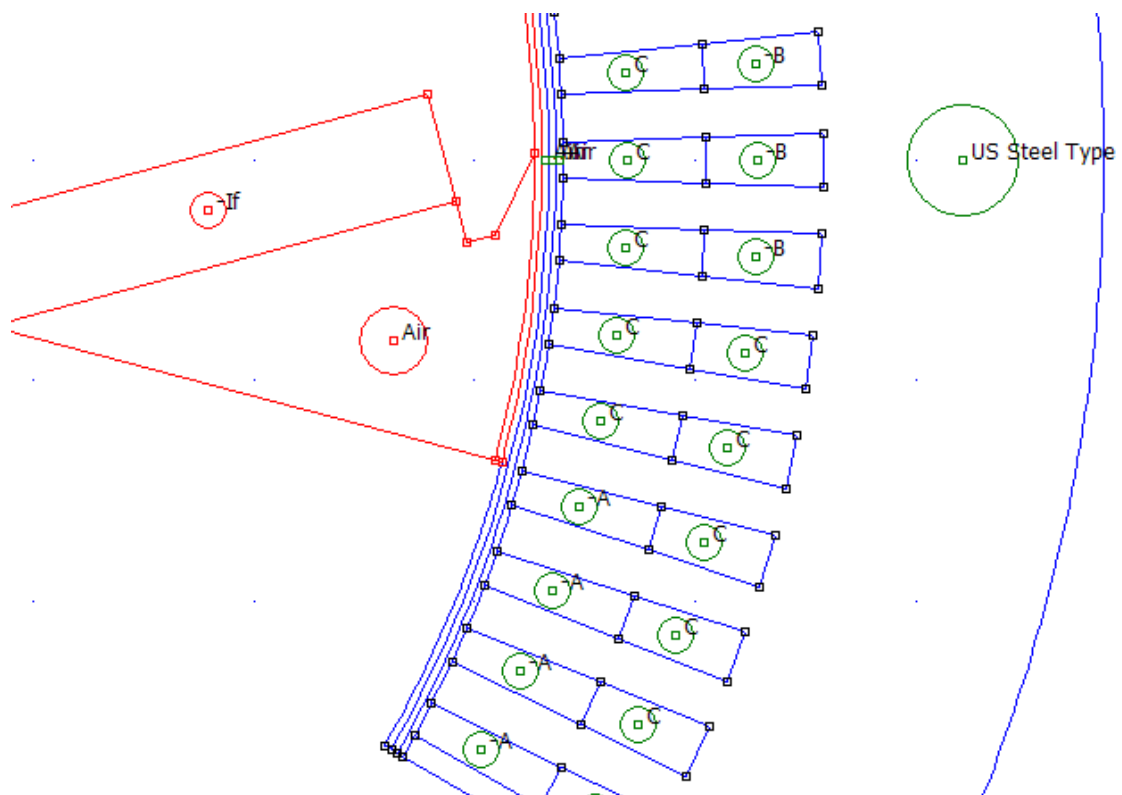


Σχήμα 5.10 Ο διαχωρισμός των ομάδων στη γεννήτρια.



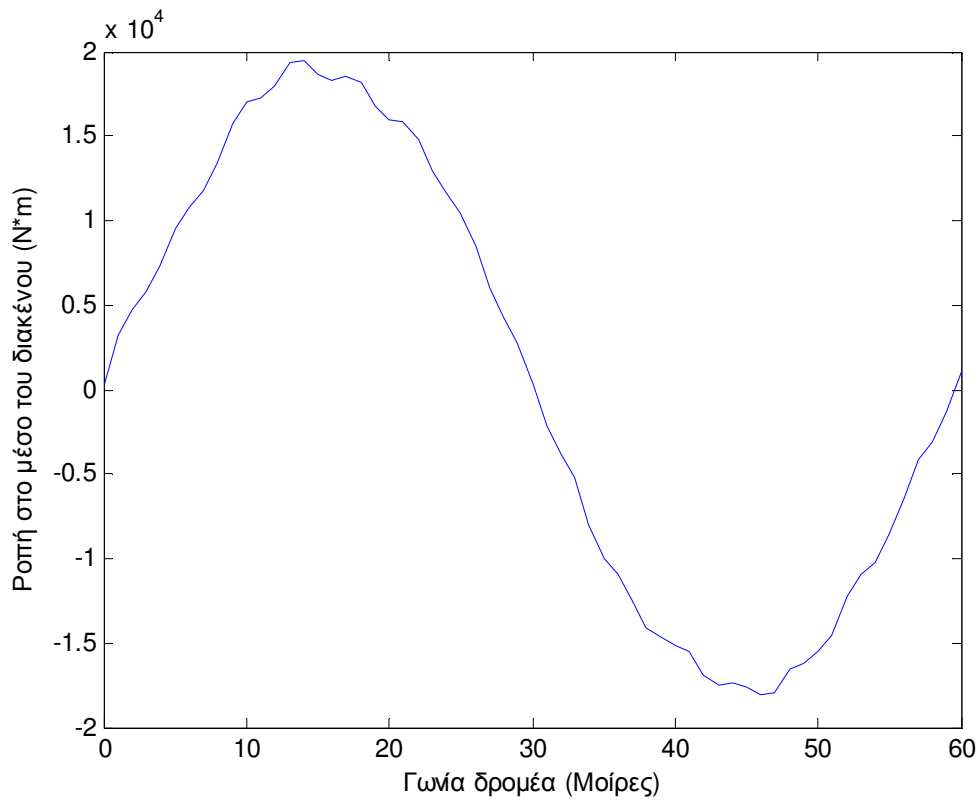


*Σχήμα 5.11 Η περιστροφή του δρομέα της γεννήτριας.*

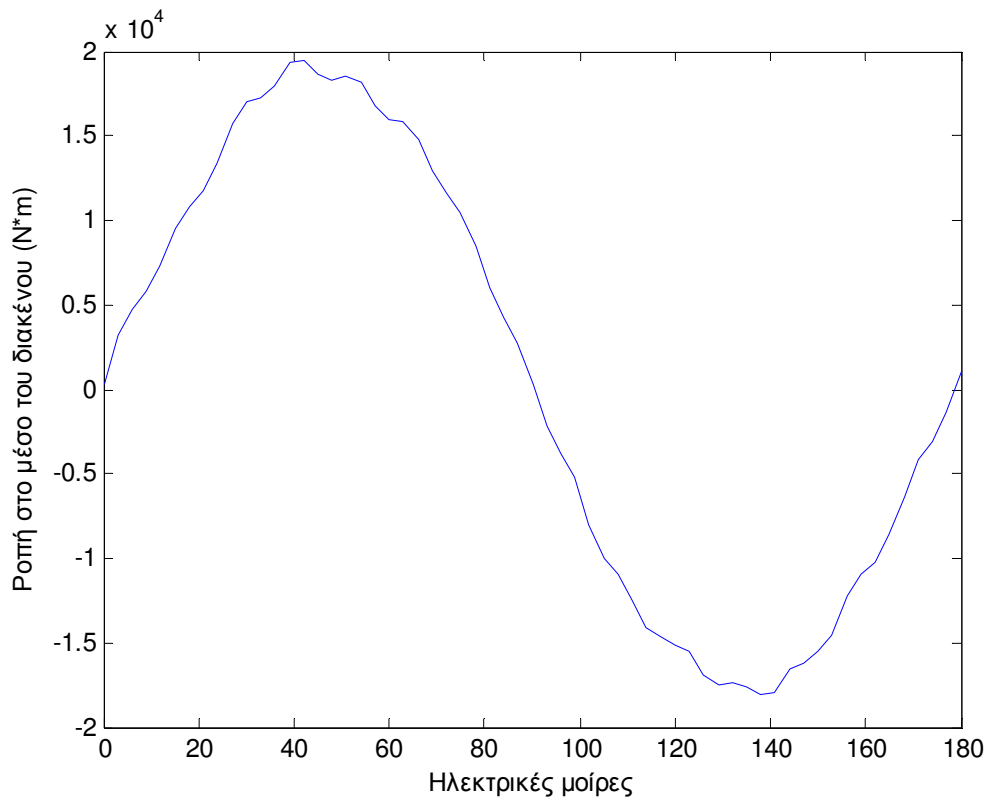


*Σχήμα 5.12 Η περιστροφή του δρομέα της γεννήτριας και ο τρόπος χωρισμού των ομάδων (groups) στο διάκενο.*

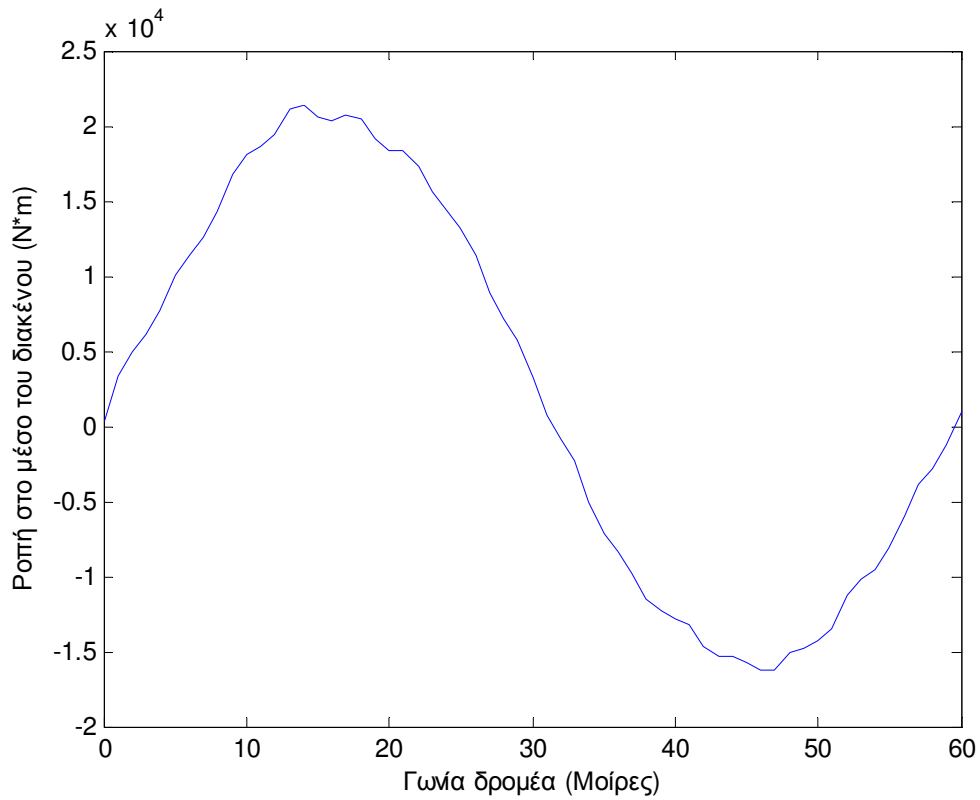
α) Για μηδενικό ρεύμα διέγερσης :



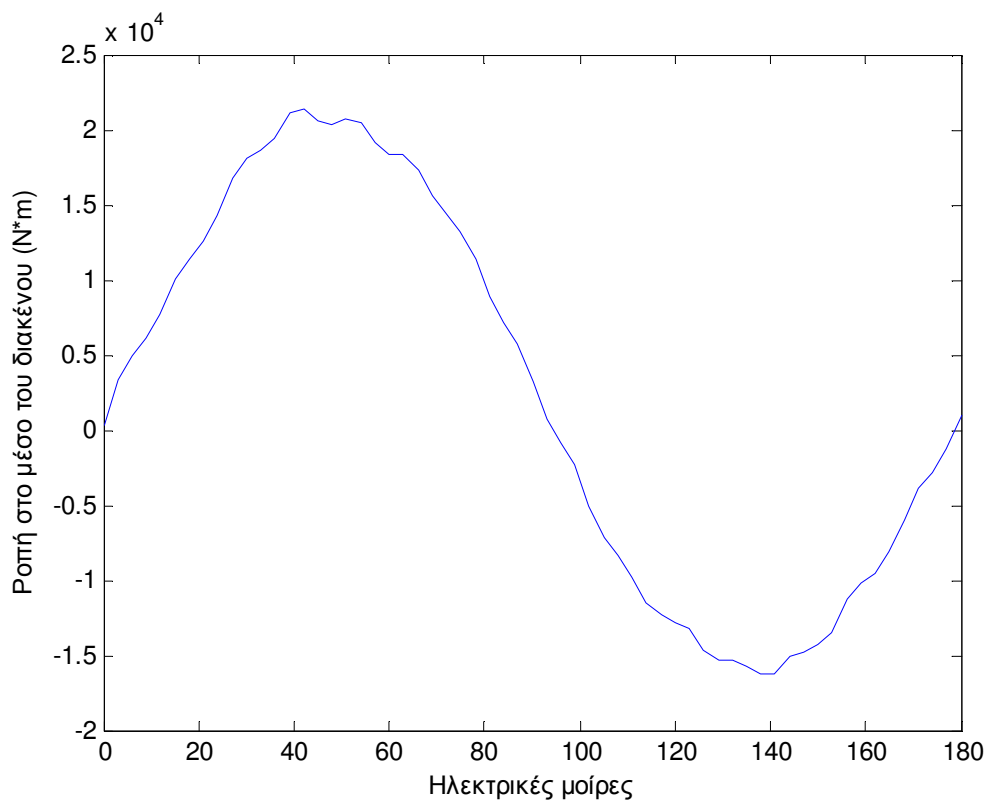
Και συναρτήσει των ηλεκτρικών μοιρών :



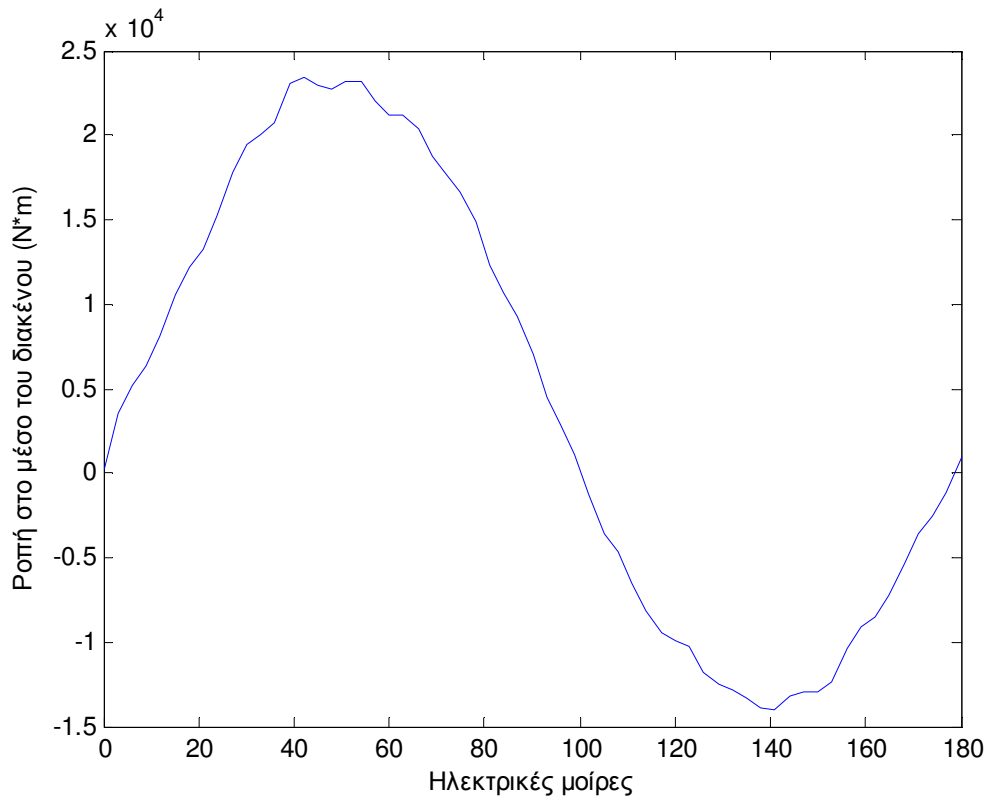
β) Για ρεύμα διέγερσης που αντιστοιχεί σε πυκνότητα ρεύματος ίση με  $0.045 \frac{A}{mm^2}$  :



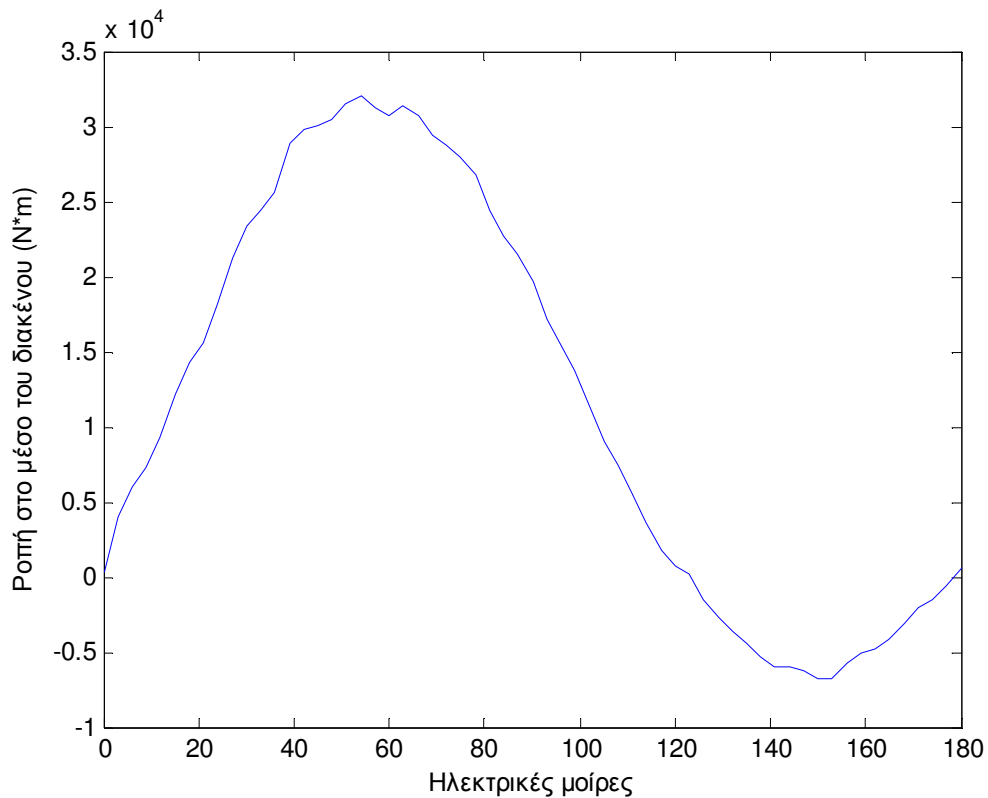
Και συναρτήσει των ηλεκτρικών μοιρών :



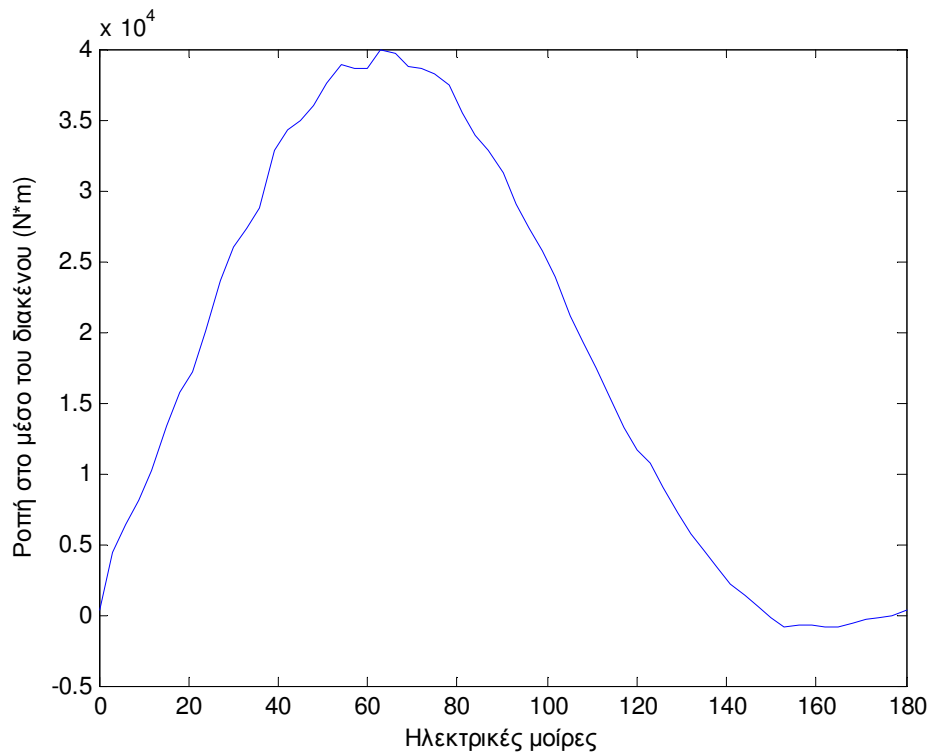
γ) Για ρεύμα διέγερσης που αντιστοιχεί σε πυκνότητα ρεύματος ίση με  $0.1 \frac{A}{mm^2}$  :



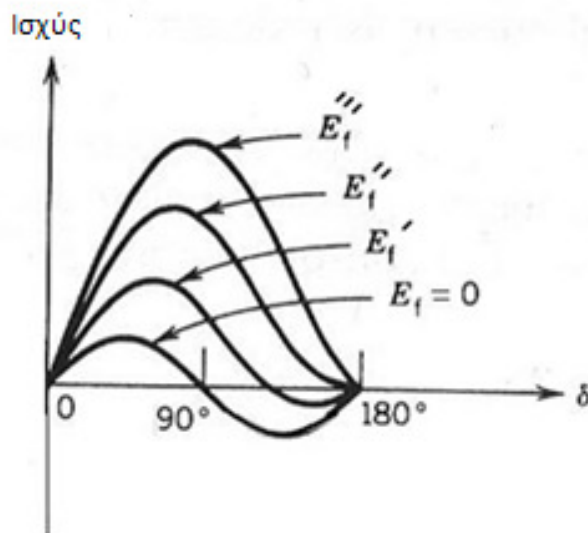
δ) Για ρεύμα διέγερσης που αντιστοιχεί σε πυκνότητα ρεύματος ίση με  $0.3 \frac{A}{mm^2}$  :



ε) Για ρεύμα διέγερσης που αντιστοιχεί σε πυκνότητα ρεύματος ίση με  $0.5 \frac{A}{mm^2}$  :



Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η πυκνότητα του ρεύματος άρα και το ρεύμα διέγερσης (και συνεπώς και την τάση διέγερσης), η μορφή των καμπυλών συμπίπτει με τη θεωρία που παρουσιάστηκε παραπάνω και υπακούει στο σχήμα 5.13 :



**Σχήμα 5.13** Η μεταβολή της ισχύος συναρτήσει της γωνίας δέλτα για διάφορες τιμές της τάσης διέγερσης<sup>[13]</sup>.

Για πολύ μεγάλες πυκνότητες ρευμάτων διέγερσης, η μηχανή μπαίνει σε κατάσταση κορεσμού (ή αλλιώς ξεπερνιούνται τα επιτρεπτά όρια μαγνητικής επαγωγής που παρατέθηκαν στον πίνακα 3.2) των υλικών με συνέπεια την υπερθέρμανση της. Δόθηκαν ενδεικτικά ορισμένες πυκνότητες ρευμάτων διέγερσης για να επιβεβαιωθεί η μορφή που θα πάρουν από τη θεωρία που παρουσιάστηκε, αγνοώντας τον κορεσμό που μπορεί να εμφανίζεται στη γεννήτρια.

Σημείωση : Οι γραφικές παραστάσεις της ροπής στο μέσο του διακένου συναρτήσει των ηλεκτρικών μοιρών, καθώς και η στροφή της σύγχρονης γεννήτριας έγινε με χρήση τόσο του Matlab όσο και του προγράμματος FEMM, και δίνεται στο παράρτημα Α.

## 6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

#### 6.1 Προσομοίωση επίδοσης γεννήτριας <sup>[6],[7],[8],[11]</sup>

Η γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, η οποία αποτελεί αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής, ονομάζεται σύγχρονη γιατί οι συχνότητες των τάσεων που παράγουν βρίσκονται σε συγχρονισμό με την ταχύτητα περιστροφής τους. Η σχέση της ηλεκτρικής συχνότητας με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου δίνεται από τη σχέση :

$$f = \frac{n \cdot P}{120} \quad (6.1.1)$$

όπου

$P$  : ο αριθμός πόλων της γεννήτριας

$n$  : η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου σε στροφές ανά λεπτό

$f$  : η ηλεκτρική συχνότητα σε Hz

Επειδή λοιπόν, ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα που στρέφεται και το μαγνητικό της πεδίο, η παραπάνω εξίσωση δίνει τη σχέση μεταξύ της ηλεκτρικής συχνότητας και της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής. Όλες οι γεννήτριες, όμως, παράγουν συχνότητες 50 ή 60 Hz, οπότε η ταχύτητα περιστροφής τους για συγκεκριμένο αριθμό πόλων είναι προκαθορισμένη. Σε περίπτωση μάλιστα που δεν ισχύει η σχέση, τότε η μηχανή αποσυγχρονίζεται με αποτέλεσμα να παύει να λειτουργεί (επέρχονται βλάβες σε αυτήν).

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση της μηχανής, καθώς θα περιστραφούν και τα δύο πεδία, δηλαδή και το πεδίο του δρομέα (μηχανική περιστροφή) και το πεδίο του στάτη (ηλεκτρική περιστροφή). Επειδή ένας κύκλος τάσης που αντιστοιχεί σε  $360^\circ$  παράγεται κάθε φορά από ένα ζεύγος πόλων, θα πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ της ηλεκτρικής γωνίας που χρησιμοποιείται για να εκφράσει τάσεις και ρεύματα, και της μηχανικής γωνίας που χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη θέση του δρομέα <sup>[6],[7],[8],[11]</sup>. Συγκεκριμένα :

$$\theta_e = \frac{P}{2} \cdot \theta_m \quad (6.1.2)$$

Συνεπώς, η θεμελιώδης εξίσωση για την αντιστοίχιση μηχανικής και ηλεκτρικής περιστροφής είναι:

$$\omega_e = \frac{P}{2} \cdot \omega_m \quad (6.1.3)$$

όπου

$P$  : ο αριθμός πόλων της γεννήτριας

$\omega_e$  : η γωνιακή ταχύτητα του πεδίου του στάτη

$\omega_m$  : η γωνιακή ταχύτητα του πεδίου του δρομέα

Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό, αν υποθεθεί περιστροφή του δρομέα κατά ένα πόλο, δηλαδή 60 μηχανικές μοίρες, αυτή θα αντιστοιχεί σε ηλεκτρική περιστροφή των ρευμάτων του στάτη κατά 180 ηλεκτρικές μοίρες. Δηλαδή :

Μηχανική μετακίνηση 60 μοιρών  $\Rightarrow$  Ηλεκτρική μετακίνηση 180 μοιρών

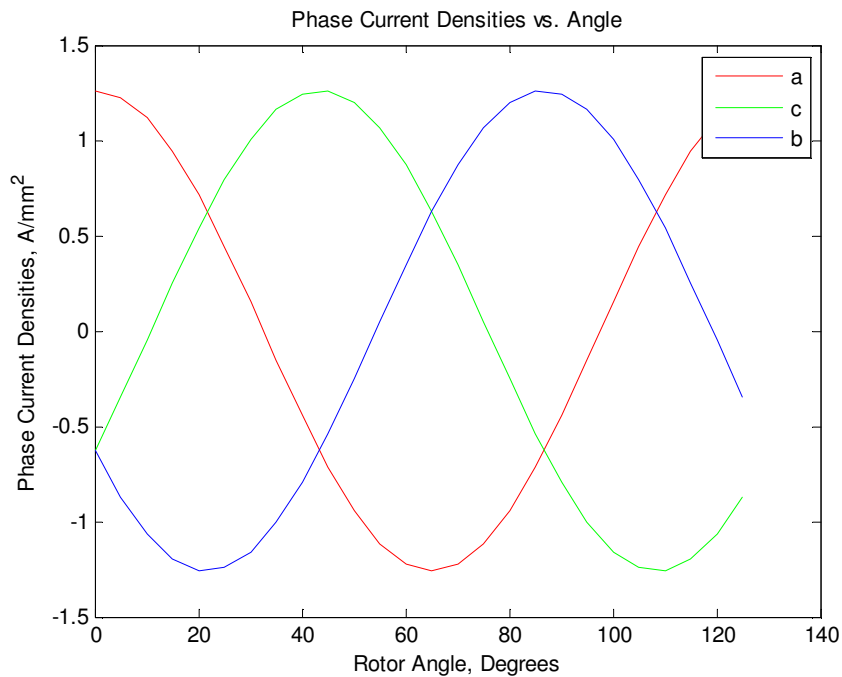
Μηχανική μετακίνηση  $k$  μοιρών  $\Rightarrow$  Ηλεκτρική μετακίνηση  $x$  μοιρών

Με το παραπάνω σκεπτικό, τα ρεύματα στις τρεις φάσεις θα μεταβάλλονται κατά τη μηχανική περιστροφή του δρομέα με τον εξής τρόπο :

$$J_a = J_{\max} \cdot \cos\left(\frac{k \cdot \pi}{60}\right) \quad (6.1.4)$$

$$J_b = J_{\max} \cdot \cos\left(\frac{k \cdot \pi}{60} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad (6.1.5)$$

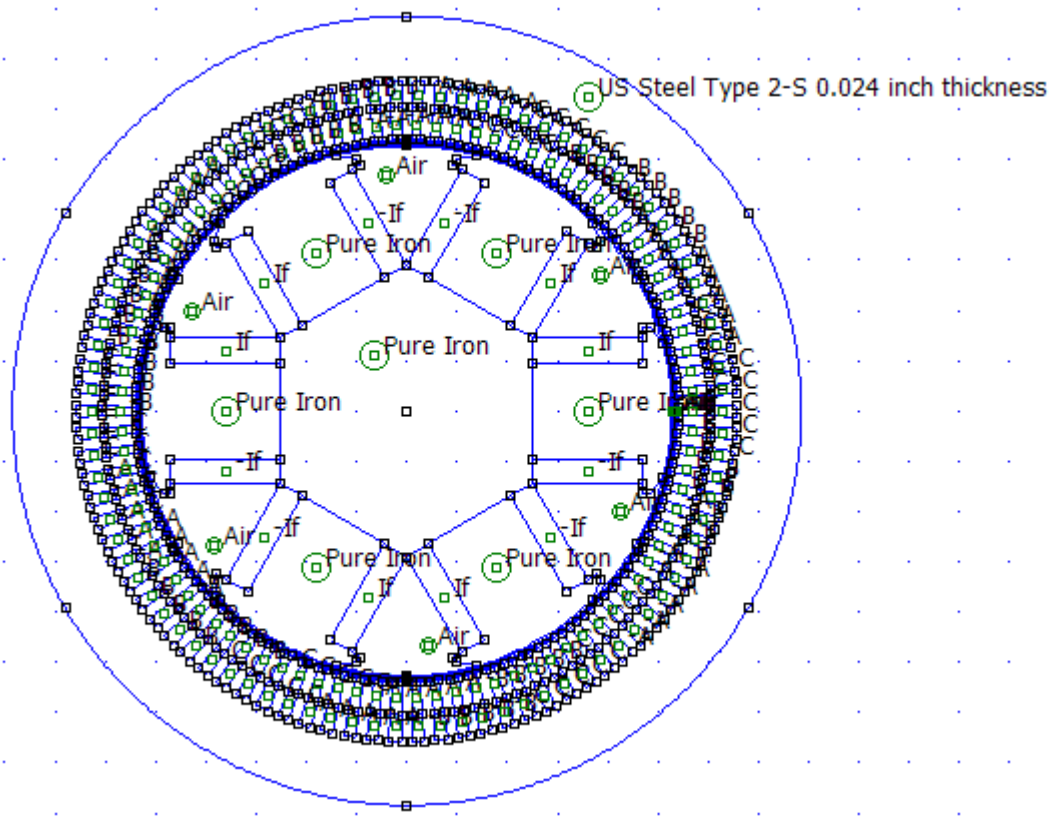
$$J_c = J_{\max} \cdot \cos\left(\frac{k \cdot \pi}{60} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad (6.1.6)$$



**Σχήμα 6.1** Η μεταβολή των ρευμάτων του στάτη στις τρεις φάσεις.



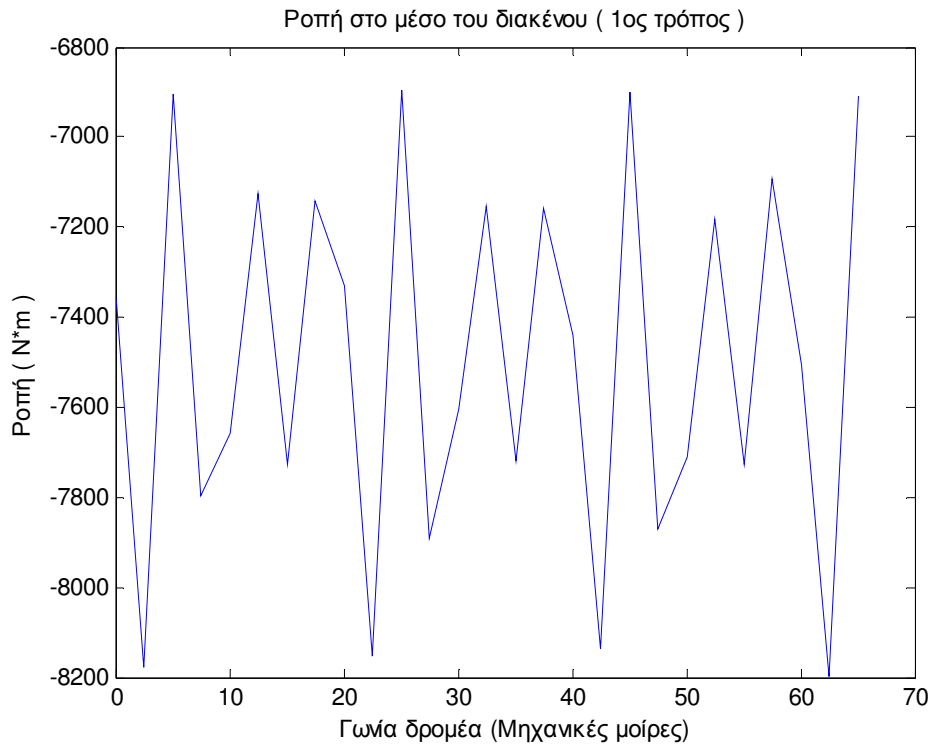
Έτσι επιτυγχάνεται η στροφή τόσο του πεδίου του δρομέα όσο και του πεδίου του στάτη. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό περιβάλλον του Matlab έγινε η στροφή της γεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη την σχέση 6.1.3.



**Σχήμα 6.2** Η αξονική γεννήτρια των έξι πόλων.

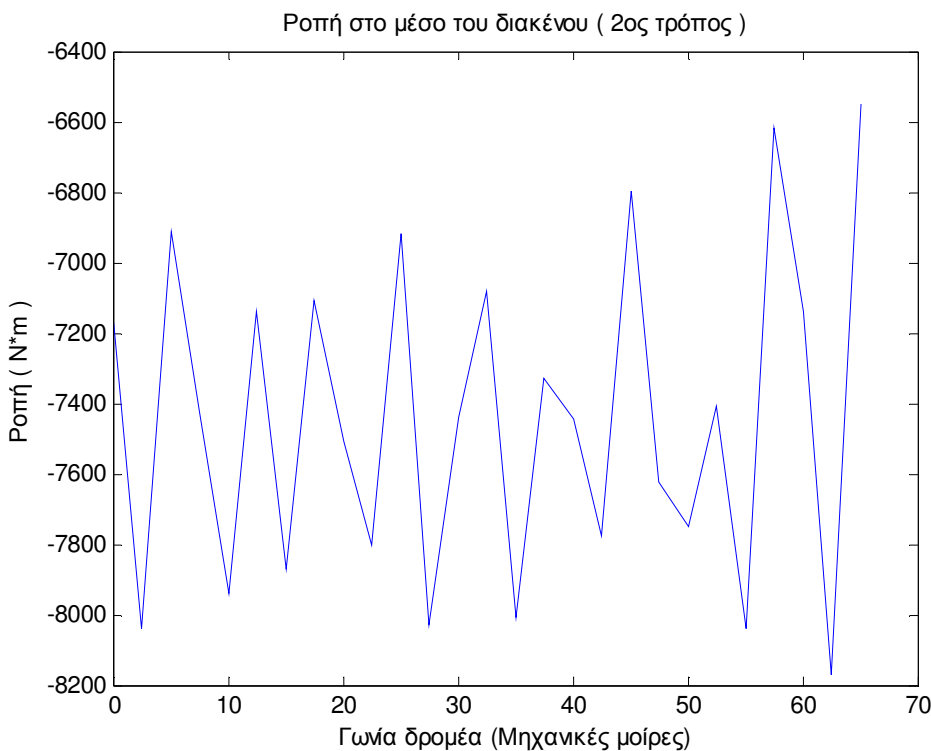
Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η ροπή στο μέσο του διακένου καθώς και η επαγόμενη τάση στο στάτη συναρτήσει της γωνίας περιστροφής. Οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις είναι προσεγγιστικές καθώς το βήμα περιστροφής του δρομέα ήταν 2.5 (μηχανικές) μοίρες, οπότε υπολείπεται σε ακρίβεια αποτελεσμάτων. Ο υπολογισμός της ροπής στο μέσο του διακένου έγινε με δύο τρόπους για δυνατότητα σύγκρισης των δύο μεθόδων αλλά και για επαλήθευση των αποτελεσμάτων μας.

Έχοντας ολόκληρη την αξονική γεννήτρια σχεδιασμένη έγινε ο υπολογισμός της ροπής στο μέσο του διακένου χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες που παρέχει το FEMM σε συνδυασμό με το Matlab.



**Σχήμα 6.3** Η ροπή στο μέσο του διακένου με τον πρώτο τρόπο.

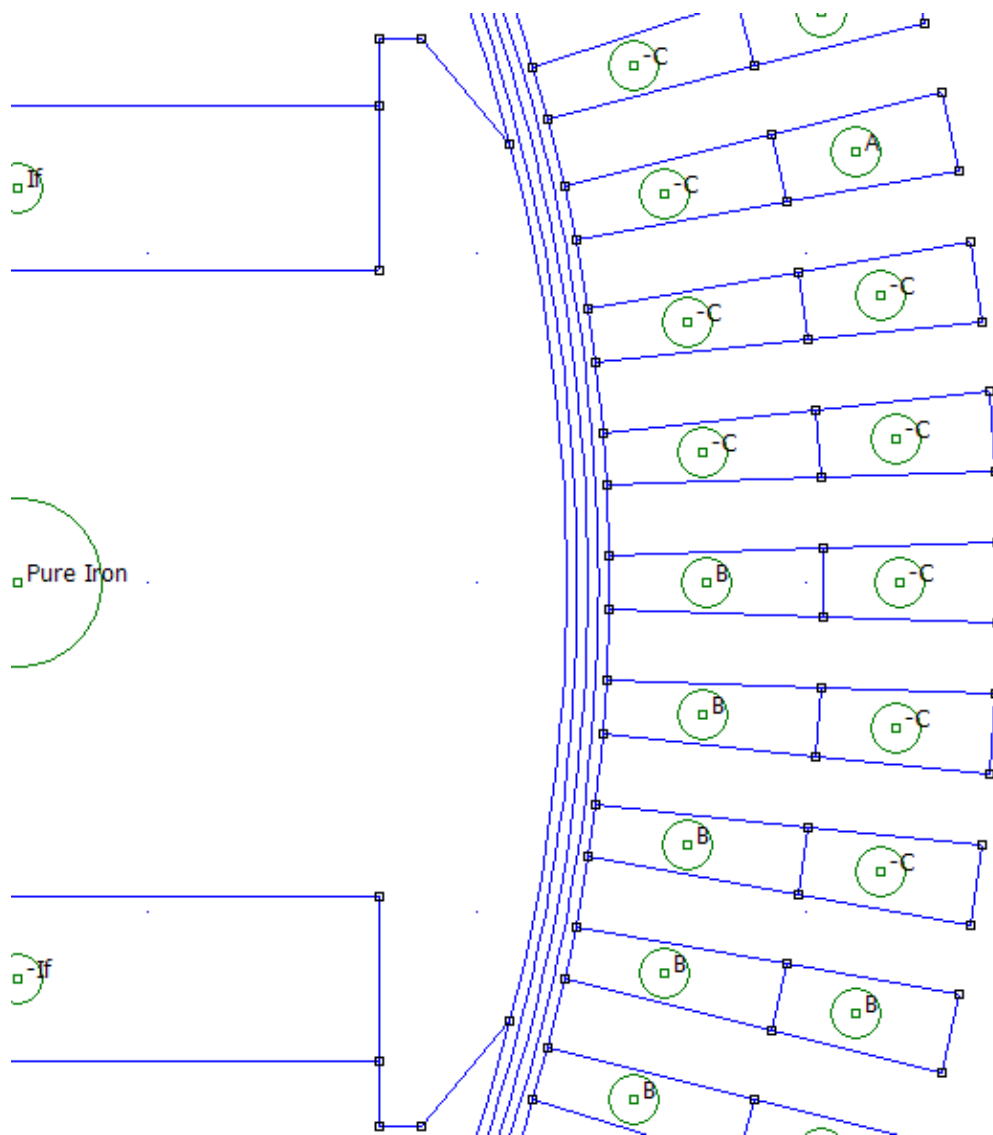
Ο δεύτερος τρόπος προέκυψε από το μέσο όρο της ροπής που παράγεται από την πλευρά του δρομέα και από την πλευρά του στάτη.



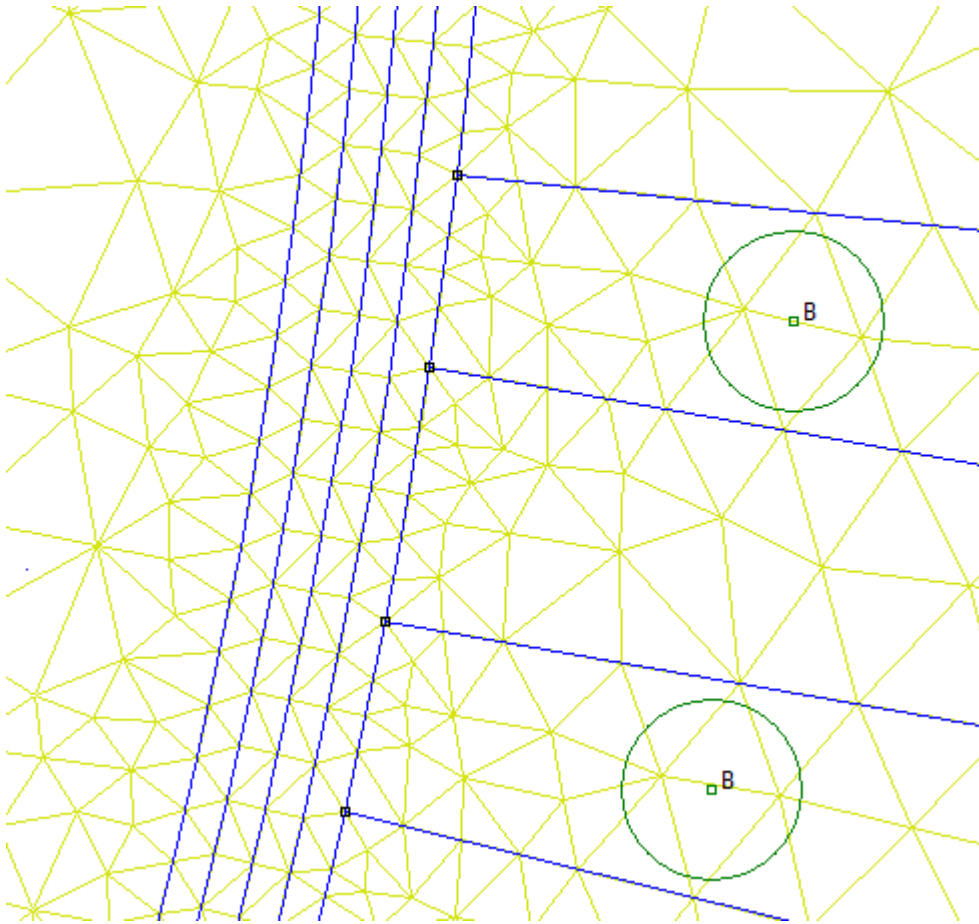
**Σχήμα 6.4** Η ροπή στο μέσο του διακένου με το δεύτερο τρόπο.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή που παράγεται είναι αρνητικού πρόσημου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στη λειτουργία της γεννήτριας, η ηλεκτρική ροπή δρα πάντα αντίθετα από την κίνηση του δρομέα της γεννήτριας ή διαφορετικά έχει πρόσημο αντίθετο από τη μηχανική ροπή που ασκείται στο δρομέα της γεννήτριας.

Για να γίνει πιο κατανοητή η διαδικασία του δεύτερου τρόπου υπολογισμού ακολουθεί η εξήγησή της. Στην αξονική γεννήτρια που σχεδιάστηκε, χωρίστηκε το διάκενο σε τέσσερα ίσα τμήματα, έτσι ώστε να περιστραφεί η γεννήτρια και να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερο πλέγμα στο διάκενο που είναι απαραίτητο στην ανάλυση με χρήση της αριθμητικής μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Σχηματικά αυτό αποτυπώνεται ως εξής :



**Σχήμα 6.5** Το διάκενο χωρισμένο σε τέσσερα ίσα τμήματα.



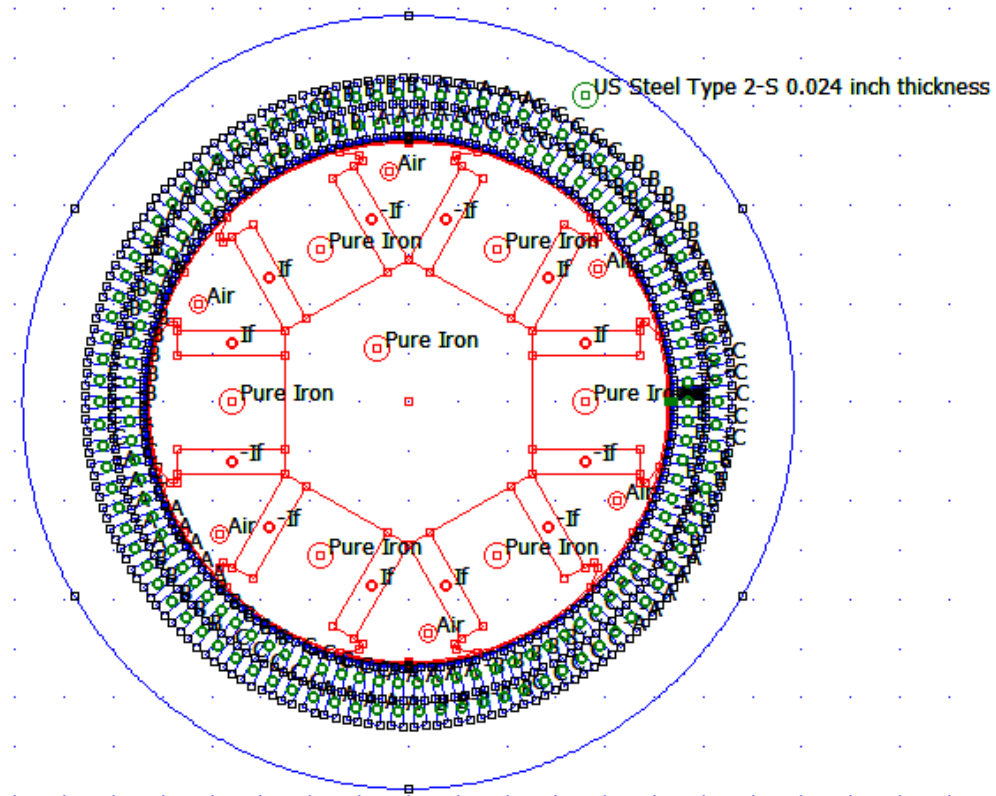
**Σχήμα 6.6** Το πλέγμα στο διάκενο.

Στη συνέχεια, η αξονική γεννήτρια χωρίστηκε σε δύο ομάδες (groups) έτσι ώστε να περιστραφεί (μέσω εντολών του Matlab) ο δρομέας της γεννήτριας κατά  $k$  μηχανικές μοίρες. Να υπενθυμιστεί ότι τα ρεύματα του στάτη μεταβάλλονται παράλληλα, με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω σύμφωνα με τις σχέσεις :

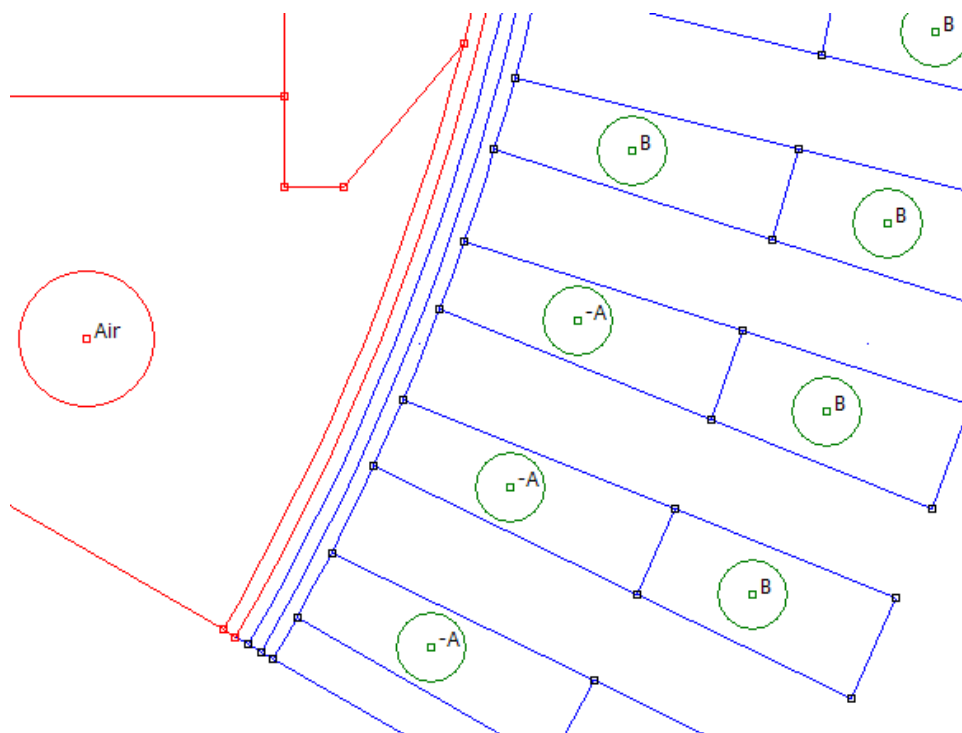
$$J_a = J_{\max} \cdot \cos\left(\frac{k \cdot \pi}{60}\right)$$

$$J_b = J_{\max} \cdot \cos\left(\frac{k \cdot \pi}{60} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$$

$$J_c = J_{\max} \cdot \cos\left(\frac{k \cdot \pi}{60} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$$

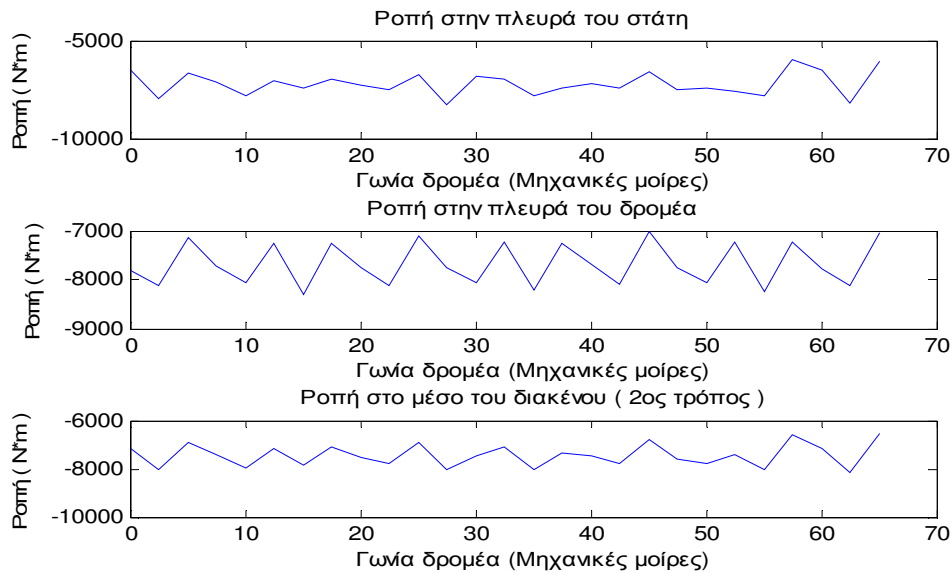


Σχήμα 6.7 Η αξονική γεννήτρια χωρισμένη σε ομάδες (groups) για την περιστροφή της.



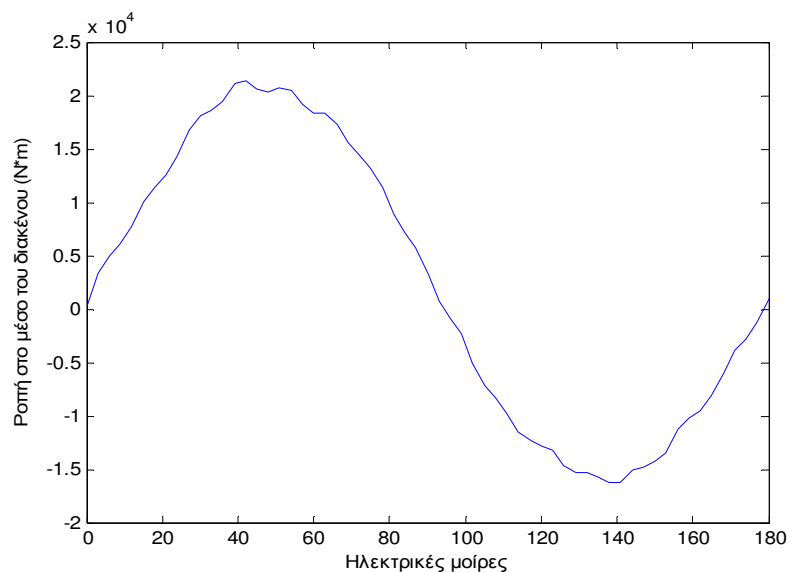
Σχήμα 6.8 Ο χωρισμός των ομάδων (groups) στο διάκενο (μεγεθυμένη μορφή).

Περιστράφηκε η ομάδα 1 (group 1), ολισθήσαμε δηλαδή τη μηχανή μας πάνω στο μέσο του διακένου. Στη συνέχεια έγινε ο υπολογισμός του μέσου όρου της ροπής που παράγεται από την πλευρά του δρομέα και από την πλευρά του στάτη. Προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα :



**Σχήμα 6.9** Η ροπή στο μέσο του διακένου με το δεύτερο τρόπο.

Οι κυματώσεις που εμφανίζονται στην ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας και στους δύο τρόπους υπολογισμού οφείλονται κατά κύριο λόγο στην παρουσία αρμονικών, οι οποίες είναι μεν ανεπιθύμητες αλλά αναπόφευκτες στη λειτουργία μιας μηχανής, και κατά δευτερεύοντα λόγο σε τυχόν αριθμητικά σφάλματα του προγράμματος του FEMM. Ένας από τους τρόπους που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία για τη μείωση των ανεπιθύμητων αρμονικών είναι η χρήση τυλίγματος κλασματικού βήματος στο στάτη. Η μέση τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής είναι περίπου 7.500 Nm, η οποία αντιστοιχεί σε γωνία δέλτα ίση με 15 μοίρες στην αντίστοιχη καμπύλη ισχύος του σχήματος 6.10.



**Σχήμα 6.10** : Καμπύλη ισχύος της γεννήτριας.

## 6.2 Επαγόμενη ΗΕΔ στο στάτη <sup>[1],[6],[7],[8],[12]</sup>

Σχετικά με την τιμή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ) στο στάτη, περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο ο τρόπος με τον οποίο αυτή επάγεται στο στάτη. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή της δίνεται από τη σχέση :

$$E_a = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot N_c \cdot \Phi \cdot f \quad (6.2.1)$$

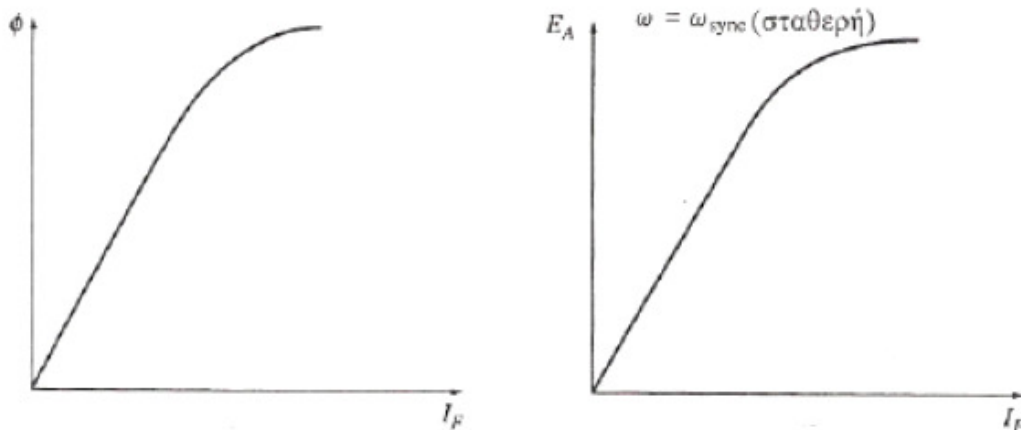
Με λίγα λόγια η επαγόμενη ΗΕΔ στο στάτη  $E_a$  εξαρτάται από τη μαγνητική ροή  $\Phi$ , από τη συχνότητα (ή ταχύτητα περιστροφής της μηχανής) και από κάποια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της. Μία πιο απλή έκφραση της σχέσης είναι <sup>[12]</sup> :

$$E_a = K \cdot \Phi \cdot \omega \quad (6.2.2)$$

όπου 
$$K = \frac{N_c}{\sqrt{2}} \quad (6.2.3)$$

εάν η  $\omega$  δίνεται σε ηλεκτρικά  $rad / sec$  .

Αν ληφθούν υπόψη μόνο εκείνα τα μεγέθη που μπορούν να μεταβληθούν κατά τη λειτουργία της γεννήτριας ( $K$  είναι μία σταθερά που εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής), τότε μπορεί να ειπωθεί ότι η επαγόμενη ΗΕΔ είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από το ρεύμα διεγέρσεως  $I_f$ . Η καμπύλη  $E_a-I_f$  είναι η γνωστή καμπύλη μαγνήτισης <sup>[6],[7],[8]</sup> .



Σχήμα 6.11 Η Καμπύλη  $\Phi-I_f$  <sup>[12]</sup> .

Γενικά, μία μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή μέσα σε ένα βρόχο που αποτελείται από αγώγιμο υλικό θα επάγει μία τάση στο βρόχο<sup>[6],[7],[8]</sup> :

$$e = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.2.4)$$

Μια αναφορά στην έννοια της παραγώγου θα κάνει περισσότερο κατανοητή τη διαδικασία. Έστω  $y=f(x)$  συνάρτηση του  $x$ . Η παράγωγος του  $y$  σε σχέση με το  $x$  στο σημείο  $a$  είναι γεωμετρικά η κλίση της εφαπτομένης της καμπύλης στο σημείο  $a$ . Όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι η τιμή του  $h$  (σε απόλυτη τιμή), τόσο καλύτερη προσέγγιση της κλίσης της εφαπτομένης έχουμε. Η κλίση της τέμνουσας είναι η διαφορά των τιμών του  $y$  διά τη διαφορά των τιμών του  $x$ . Δηλαδή,

$$\frac{f(a+h) - f(a)}{h}$$

Αυτή η έκφραση είναι η διηρημένη διαφορά του Νεύτωνα. Η παράγωγος είναι η τιμή της διηρημένης διαφοράς καθώς η τέμνουσα πλησιάζει όλο και περισσότερο την εφαπτομένη. Τυπικά, η παράγωγος της συνάρτησης  $f$  στο  $a$  είναι το όριο :

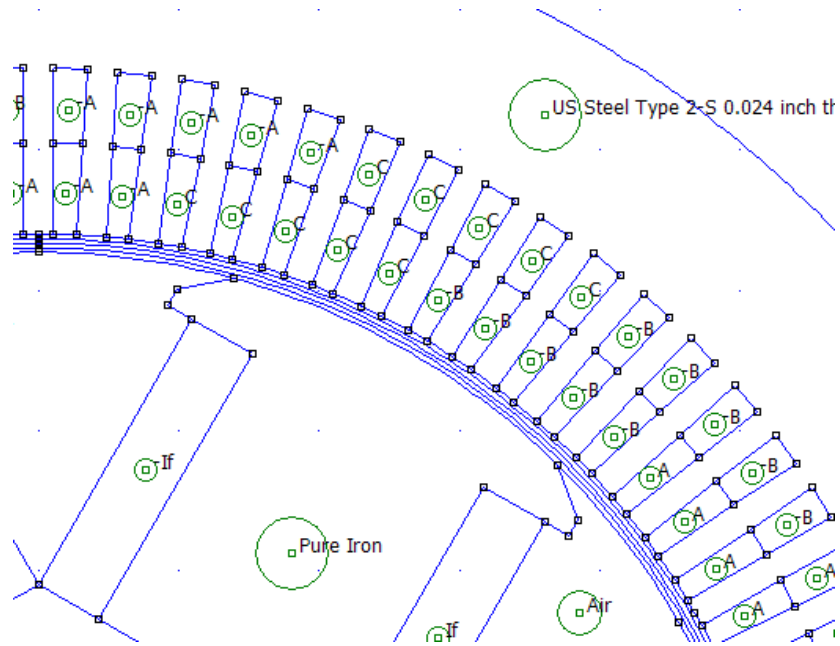
$$f'(a) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h} \quad (6.2.5)$$

Κάνοντας έναν παραλληλισμό αυτό που στην ουσία ενδιαφέρει είναι να βρεθεί το :

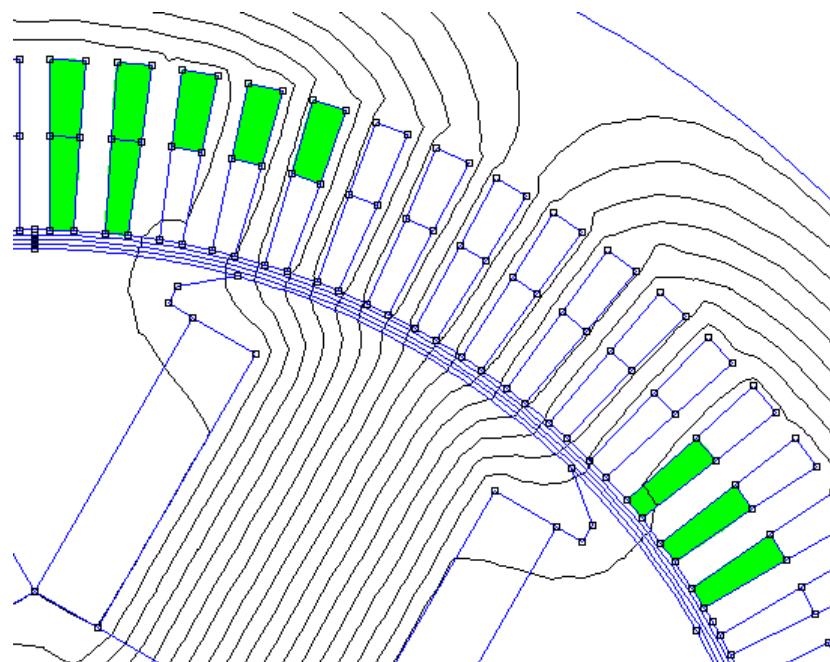
$$e = N \cdot \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Phi(t_2) - \Phi(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (6.2.6)$$

Αρχικά υπολογίζεται η ροή που περνάει από τις αύλακες που περιέχουν τα τυλίγματα χαλκού της φάσης Α.





**Σχήμα 6.12** Τα αυλάκια όλων των φάσεων για έναν πόλο της γεννήτριας.



**Σχήμα 6.13** Όλα τα αυλάκια της φάσης A σκιαγραφισμένα.

Έτσι λοιπόν υπολογίζονται με τη βοήθεια του Matlab οι διαφορές :

$$emf_1(k) = \Phi_1(k+1) - \Phi_1(k)$$

$$emf_2(k) = \Phi_2(k+1) - \Phi_2(k)$$

$$emf_3(k) = \Phi_3(k+1) - \Phi_3(k)$$

$$emf_4(k) = \Phi_4(k+1) - \Phi_4(k)$$

$$emf_5(k) = \Phi_5(k+1) - \Phi_5(k)$$

$$emf_6(k) = \Phi_6(k+1) - \Phi_6(k)$$

$$emf_7(k) = \Phi_7(k+1) - \Phi_7(k)$$

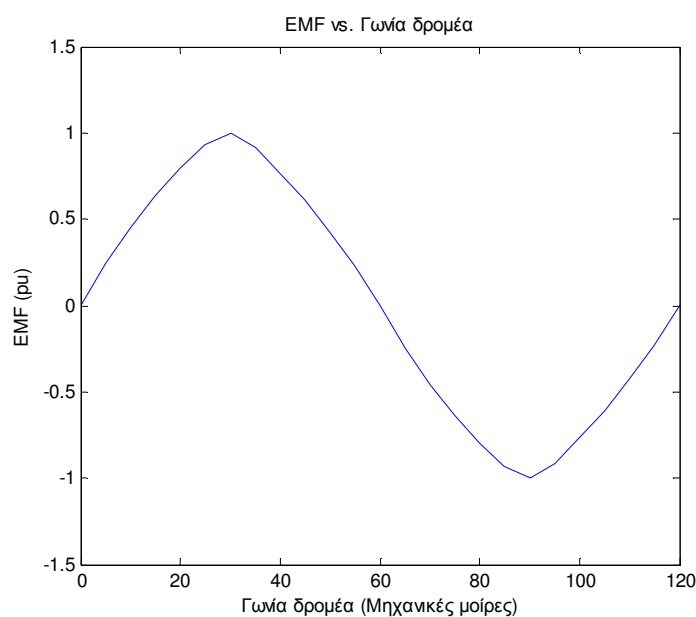
$$emf_8(k) = \Phi_8(k+1) - \Phi_8(k)$$

όπου k : το βήμα περιστροφής του δρομέα

Άρα, η συνολική επαγόμενη ΗΕΔ στο στάτη (*emf*) θα προκύψει από το άθροισμα (λαμβάνοντας υπόψη το πρόσημο) όλων των επιμέρους επαγόμενων τάσεων από τις αύλακες που περιέχουν τυλίγματα χαλκού της φάσης Α (φαίνονται χρωματισμένες στο σχήμα 6.12) :

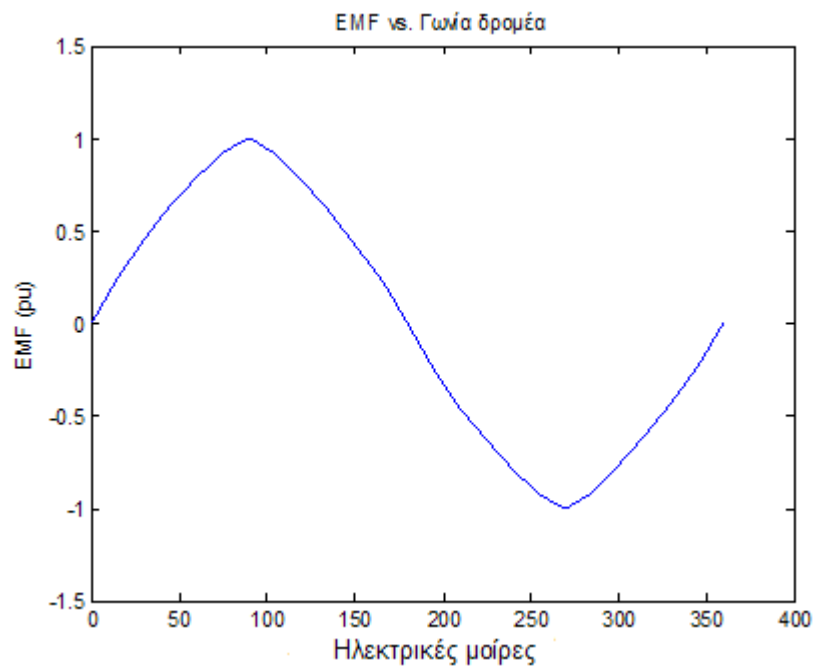
$$EMF = emf_1 + emf_2 + emf_3 + emf_4 + emf_5 - emf_6 - emf_7 - emf_8 \quad (6.2.7)$$

Σχηματικά, η επαγόμενη ΗΕΔ στο στάτη δίνεται :



**Σχήμα 6.14** Η μορφή της επαγόμενης ΗΕΔ στο στάτη σε ανά μονάδα τιμές.

Και συναρτήσει των ηλεκτρικών μοιρών :



*Σχήμα 6.15 Η μορφή της επαγόμενης ΗΕΔ στο στάτη σε ανά μονάδα τιμές.*

Παρατηρούμε ότι η μορφή της επαγόμενης ΗΕΔ στο στάτη είναι αυτή ακριβώς που αναμενόταν από τη θεωρία. Να σημειωθεί ότι εάν υπολογίζαμε τις μορφές των τάσεων και των άλλων δύο φάσεων, δηλαδή των  $B$  και  $C$  θα λαμβάναμε ημιτονική μορφή με τη διαφορά ότι θα αναμέναμε διαφορά φάσης  $120^\circ$  και  $240^\circ$  μοίρες αντίστοιχα σε σχέση με τη φάση  $A$ .

Σημείωση : Οι γραφικές παραστάσεις της ροπής στο μέσο του διακένου και της επαγόμενης τάσης στο στάτη καθώς και η στροφή της σύγχρονης γεννήτριας έγινε με χρήση τόσο του Matlab όσο και του προγράμματος FEMM, και δίνονται στο παράρτημα Β.



## 7<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

#### 7.1 Δυναμικό μοντέλο αξονικής γεννήτριας <sup>[9],[10]</sup>

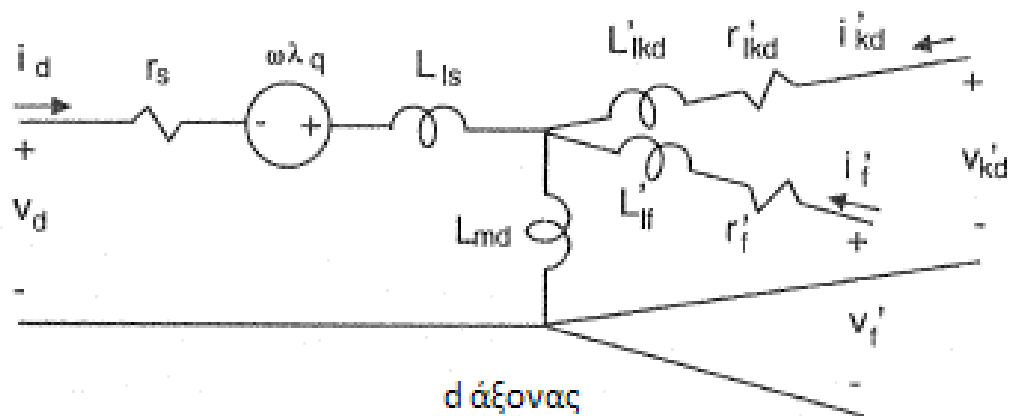
Σε αυτό το κεφάλαιο κατασκευάζεται το δυναμικό μοντέλο της αξονικής γεννήτριας για να εξεταστεί η μεταβατική της λειτουργία. Απαραίτητη προϋπόθεση σε αυτήν την διαδικασία είναι η γνώση των αυτεπαγωγών  $L_d$ ,  $L_d'$ ,  $L_d''$ ,  $L_q$  και  $L_q''$ , οι οποίες υπολογίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο <sup>[9]</sup>.

Δίνονται τα σύμβολα κάποιων μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν στο δυναμικό μοντέλο ή θα αναφερθούν παρακάτω στο συγκεκριμένο κεφάλαιο <sup>[9]</sup>:

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ
$r_s$	Ωμική αντίσταση στάτη
$r_f$	Ωμική αντίσταση στον d-άξονα του πεδίου διέγερσης
$r_g$	Ωμική αντίσταση q-άξονα του πεδίου διέγερσης
$r_{kd}$	Αντίσταση λόγω τριβής στον d-άξονα
$r_{kq}$	Αντίσταση λόγω τριβής στον q-άξονα
$L_{ls}$	Αυτεπαγωγή στάτη
$L_{lf}$	Αυτεπαγωγή στον d-άξονα του πεδίου διέγερσης
$L_{lg}$	Αυτεπαγωγή στον q-άξονα του πεδίου διέγερσης
$L_{lkd}$	Αυτεπαγωγή λόγω τριβής στον d-άξονα
$L_{lkq}$	Αυτεπαγωγή λόγω τριβής στον q-άξονα
$L_{md}$	Μαγνητική αυτεπαγωγή d-άξονα
$L_{mq}$	Μαγνητική αυτεπαγωγή q-άξονα
$L_{mf}$	Μαγνητική αυτεπαγωγή στον d-άξονα του πεδίου διέγερσης
$L_{mg}$	Μαγνητική αυτεπαγωγή στον q-άξονα του πεδίου διέγερσης
$L_{mkd}$	Μαγνητική αυτεπαγωγή στον d-άξονα λόγω τριβής
$L_{mkq}$	Μαγνητική αυτεπαγωγή στον q-άξονα λόγω τριβής

Πίνακας 7.1 Παράμετροι του δυναμικού μοντέλου.

Το δυναμικό μοντέλο της γεννήτριας σε κύκλωμα στον d άξονα :

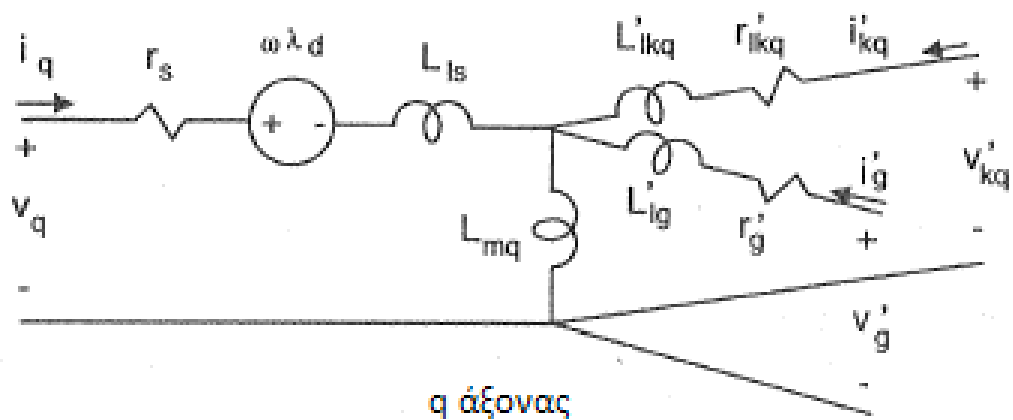


Σχήμα 7.1 Δυναμικό μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας στον d άξονα.

Οι τάσεις της σύγχρονης γεννήτριας που παρουσιάζονται στο σχήμα 7.1 είναι :

$$\begin{aligned}
 u_d &= r_s \cdot i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \lambda_q \frac{d\theta}{dt} \\
 u_f' &= r_f' \cdot i_f' + \frac{d\lambda_f'}{dt} \\
 u_{kd}' &= r_{kd}' \cdot i_{kd}' + \frac{d\lambda_{kd}'}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{7.1.1}$$

Το δυναμικό μοντέλο της γεννήτριας σε κύκλωμα στον q άξονα :



Σχήμα 7.2 Δυναμικό μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας στον q άξονα.

Οι τάσεις της σύγχρονης γεννήτριας που παρουσιάζονται στο σχήμα 7.2 είναι :

$$uq = rs \cdot iq + \frac{d\lambda q}{dt} + \lambda d \frac{d\theta}{dt}$$

$$ukq' = rkq' \cdot ikq' + \frac{d\lambda kq'}{dt} \quad [7.1.2]$$

$$ug' = rg' \cdot ig' + \frac{d\lambda g'}{dt}$$

όπου

$$\lambda q = Lq \cdot iq + Lmq \cdot ig' + Lmq \cdot ikq'$$

$$\lambda d = Ld \cdot id + Lmd \cdot if' + Lmd \cdot ikd'$$

$$\lambda f' = Lmd \cdot id + Lmd \cdot ikd' + Lff' \cdot if' \quad [7.1.3]$$

$$\lambda kd' = Lmd \cdot id + Lmd \cdot if' + Lkdkd' \cdot ikd'$$

$$\lambda g' = Lmq \cdot iq + Lgg' \cdot ig' + Lmq \cdot ikq'$$

$$\lambda kq' = Lmq \cdot iq + Lmq \cdot ig' + Lkqkq' \cdot ikq'$$

Από τα δεδομένα τα οποία δίνονται στον πίνακα 3.1 του 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου και από τις παραμέτρους του στατικού και δυναμικού μοντέλου που υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο 4 προκύπτει ο παρακάτω ο πίνακας:

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
$x_d$	2.30 Henry
$x_d'$	0.32 Henry
$x_d''$	0.25 Henry
$x_q$	0.46 Henry
$x_q'$	0.04 Henry
$x_{ls}$	0.3 Henry
$r_s$	0.0056 αμ
$r_f'$	0.0154 αμ
$T_d'$	7.9 sec
$T_d''$	0.032 sec
$T_q''$	0.055 sec

**Πίνακας 7.2** Παράμετροι του δυναμικού μοντέλου

Οι άγνωστοι παράμετροι που θα βοηθήσουν στην κατασκευή του δυναμικού μοντέλου της αξονικής γεννήτριας και στη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της δίνονται από τις σχέσεις :

$$xmq = xq - xls \quad (7.1.4)$$

$$xmd = xd - xls \quad (7.1.5)$$

$$xlf' = xmd \cdot \frac{(xd' - xls)}{[xmd - (xd' - xls)]} \quad (7.1.6)$$

$$xlkd' = xmd \cdot xlf' \cdot \frac{(xd'' - xls)}{[xmd \cdot xlf' - (xd'' - xls)] \cdot (xmd + xlf')} \quad (7.1.7)$$

$$xlkq' = xmq \cdot \frac{(xq' - xls)}{[xmq - (xq' - xls)]} \quad (7.1.8)$$

$$rf' = \frac{(xlf' + xmd)}{(\omega base \cdot Td')} \quad (7.1.9)$$

$$rkd' = \frac{(xlkd' + xd' - xls)}{(\omega base \cdot Td'')} \quad (7.1.10)$$

$$rkq' = \frac{(xlkq' + xmq)}{(\omega base \cdot Tq'')} \quad (7.1.11)$$

$$xMQ = \left( \frac{1}{xls} + \frac{1}{xmq} + \frac{1}{xlkq} \right)^{-1} \quad (7.1.12)$$

$$xMD = \left( \frac{1}{xls} + \frac{1}{xmd} + \frac{1}{xlkd} + \frac{1}{xlf'} \right)^{-1} \quad (7.1.13)$$

Με βάση τις τιμές του πίνακα 7.2 υπολογίζονται τα μεγέθη που βρίσκονται στο πρώτο μέλος των εξισώσεων (7.1.4) – (7.1.13). Το σύνολο των εξισώσεων εκφράζει



το δυναμικό μοντέλο που θα αναπτυχθεί στο προκείμενο κεφάλαιο. Ιδιαίτερη αξία έχει ο υπολογισμός της ροπής και της ισχύς της γεννήτριας. Πιο συγκεκριμένα :

$$P_{em} = u_a \cdot i_a + u_b \cdot i_b + u_c \cdot i_c + u_f \cdot i_f + u_g \cdot i_g \Rightarrow$$

$$P_{em} = \frac{3}{2} \cdot (u_q \cdot i_q + u_d \cdot i_d) + 3 \cdot u_0 \cdot i_0 + u_f \cdot i_f + u_g \cdot i_g \quad (7.1.13)$$

Κάνοντας χρήση των σχέσεων βρίσκουμε ότι :

$$P_{em} = \frac{3}{2} \cdot \omega e \cdot (\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d) \quad \text{W} \quad (7.1.14)$$

και επειδή (6<sup>ο</sup> κεφάλαιο) ισχύει :

$$\omega e = \frac{P}{2} \cdot \omega m$$

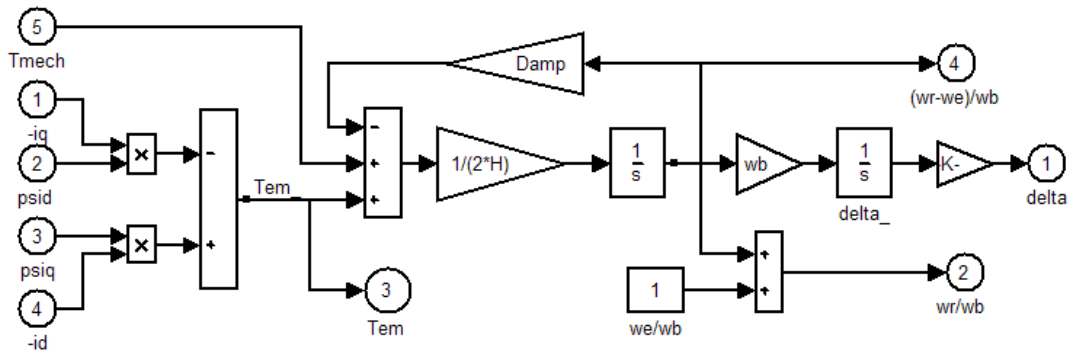
Συνεπώς έχουμε :

$$P_{em} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \omega m \cdot (\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d) \quad \text{W} \quad (7.1.15)$$

Έτσι, η ηλεκτρομαγνητική ροπή :

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d) \quad \text{Nm} \quad (7.1.16)$$

## 7.2 Εξίσωση μηχανικού μέρους της αξονικής γεννήτριας <sup>[9],[15],[19]</sup>



Σχήμα 7.2 Το block διάγραμμα στο Simulink.

Η βασική λειτουργία της γεννήτριας είναι να δέχεται ως είσοδο μηχανική ενέργεια από κάποιον εξωγενή παράγοντα και στη συνέχεια να τη μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. Στην περίπτωση αυτή, η μηχανική ενέργεια δίνεται από τον άξονα προπέλας του πλοίου. Η γενική έκφραση της εξίσωσης της κίνησης του μηχανικού μέρους της μηχανής, δηλαδή του δρομέα, δίνεται από τη σχέση <sup>[15]</sup> :

$$T_m - T_e - T_{damp} = J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} \quad (7.2.1)$$

όπου

$T_m$  : η μηχανική ροπή εισόδου της γεννήτριας

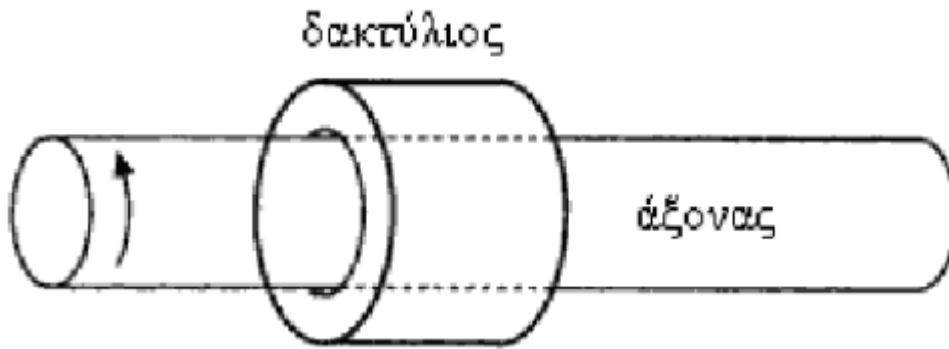
$T_e$  : η ηλεκτρική ροπή εξόδου της γεννήτριας

$T_{damp}$  : η ροπή που προκύπτει λόγω του φαινομένου της τριβής

$J$  : η αδράνεια της μηχανής

$\omega_r$  : η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

Άξιο αναφοράς είναι τα φαινόμενα τριβής που εμφανίζονται στο δρομέα. Στην περίπτωσή μας, η τριβή είναι η δύναμη η οποία αντιτίθεται στην κίνηση του δρομέα ως προς το στάτη. Η τριβή επηρεάζει τόσο την κίνηση όσο και την ενεργειακή κατάσταση του συστήματος καθώς η κινητική ενέργεια του συστήματος μετατρέπεται σε θερμότητα (δηλαδή απώλειες) και συνεπώς και φθορά της μηχανής. Άρα ένα τέτοιο φαινόμενο δε θα μπορούσε να αμεληθεί κατά τη μελέτη κίνησης του δρομέα της γεννήτριας. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι οι απώλειες τριβής φτάνουν το 1% στην αξονική γεννήτρια <sup>[19]</sup>.



Σχήμα 7.3 Ο τρόπος που αναπτύσσεται η τριβή ανάμεσα σε δρομέα και στάτη<sup>[25]</sup>.

Επιπλέον, η ανηγμένη σταθερά αδράνειας  $H$  σε sec ορίζεται ως:

$$H = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2}{P}\right)^2 \cdot \frac{J \cdot \omega b^2}{Sb} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{P} \cdot \frac{J \cdot \omega b}{Tb} \quad (7.2.2)$$

όπου

$P$  : ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας

$\omega b$  : η βασική (σύγχρονη) ταχύτητα περιστροφής της μηχανής

$Sb$  : η ισχύς βάσης

$Tb$  : η ροπή βάσης

Συνεπώς λύνοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς  $J$ :

$$J = \frac{2H}{\left(\frac{2}{P}\right) \cdot \omega b} \cdot Tb \quad (7.2.3)$$

Και η εξίσωση κίνησης παίρνει τη μορφή:

$$Tm - Te - Tdamp = \frac{2H}{\left(\frac{2}{P}\right) \cdot \omega b} \cdot Tb \cdot \frac{2}{P} \cdot \frac{d\omega r}{dt} \Rightarrow \frac{Tm - Te}{Tb} = 2H \cdot \frac{d\left(\frac{\omega r}{\omega b}\right)}{dt}$$

Επομένως η εξίσωση κίνησης στο α.μ. σύστημα θα είναι :

$$Tm - Te - Tdamp = 2H \cdot \frac{d\omega r}{dt} \quad (7.2.4)$$

όπου όλα τα μεγέθη είναι σε ανά μονάδα σύστημα.

Στο διάγραμμα που σχεδιάστηκε στο Simulink λύσαμε την σχέση (7.2.1) ως προς  $\omega r$  και επομένως ισχύει :

$$\omega r = \frac{1}{2 \cdot H} \cdot \frac{1}{s} \cdot (T_m - T_e - T_{damp}) \quad (7.2.5)$$

όπου όλα τα μεγέθη είναι σε ανά μονάδα σύστημα και ως αρχική συνθήκη για την ταχύτητα του δρομέα θεωρήσαμε τη σύγχρονη ταχύτητα.

Επιπροσθέτως, η γωνία δέλτα ορίζεται ως η γωνία που προκύπτει από τη διαφορά της γωνίας που σχηματίζει ο  $d$  άξονας του δρομέα με την τερματική τάση του ζυγού ( $\theta r$ ), με τη γωνία που σχηματίζει η τερματική τάση της γεννήτριας με την τερματική τάση του ζυγού ( $\theta e$ ). Δηλαδή :

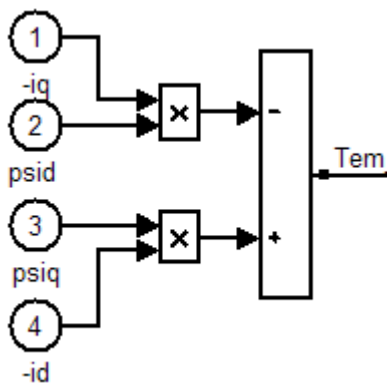
$$\delta(t) = \theta r(t) - \theta e(t)$$

Επομένως, η δεύτερη σχέση που απεικονίζεται στο διάγραμμα είναι :

$$\delta(t) = \frac{1}{s} \cdot (\omega r(t) - \omega e(t)) \quad (7.2.6)$$

(ως αρχική συνθήκη χρησιμοποιήθηκε η σχέση:  $\theta r(0) = \delta(0) + \theta e(0) \Rightarrow \delta(0) = \theta r(0)$ )

Τέλος, υπενθυμίζεται (από 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο) ότι :



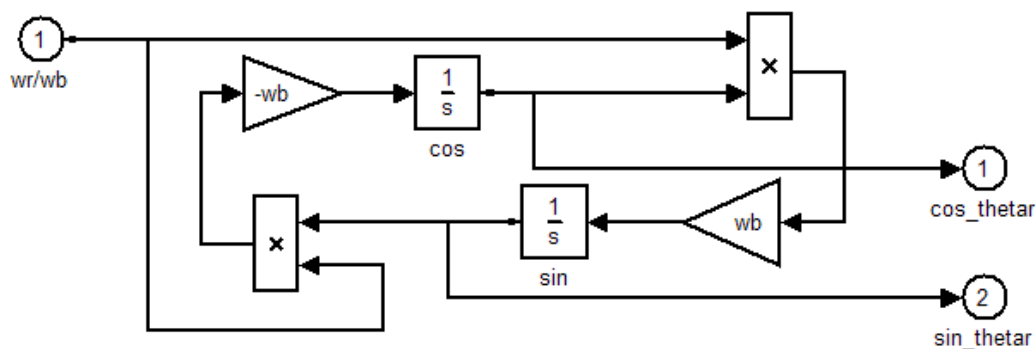
**Σχήμα 7.4** Το block διάγραμμα στο Simulink της  $T_{em}$ .

Και σε επίπεδο μαθηματικής σχέσης :

$$T_{em} = (\psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (7.2.7)$$

Με τη χρήση των εξισώσεων (7.2.4) - (7.2.6) αναπαρίσταται στο Simulink το μοντέλο που αφορά την κίνηση του δρομέα της αξονικής γεννήτριας του πλοίου. Να σημειωθεί ότι στο block διάγραμμα που παρατίθεται παραπάνω η  $T_e$  έχει θετικό πρόσημο, καθώς ο υπολογισμός της από τη σχέση (7.2.7) μας δίνει το πρόσημο της ανάλογα με τη λειτουργία της μηχανής (αρνητικό για λειτουργία γεννήτριας και θετικό για λειτουργία κινητήρα) <sup>[9]</sup>.

### 7.3 Εύρεση της γωνίας $\theta_r$ <sup>[9]</sup>



**Σχήμα 7.5** Το block διάγραμμα στο Simulink.

Έχουμε βρει από το δομικό διάγραμμα που περιγράφηκε στην παράγραφο 7.2 την μελέτη κίνησης του δρομέα της αξονικής γεννήτριας. Από την εξίσωση :

$$\omega r = \frac{1}{2 \cdot H} \cdot \frac{1}{s} \cdot (T_m - T_e - T_{damp})$$

και

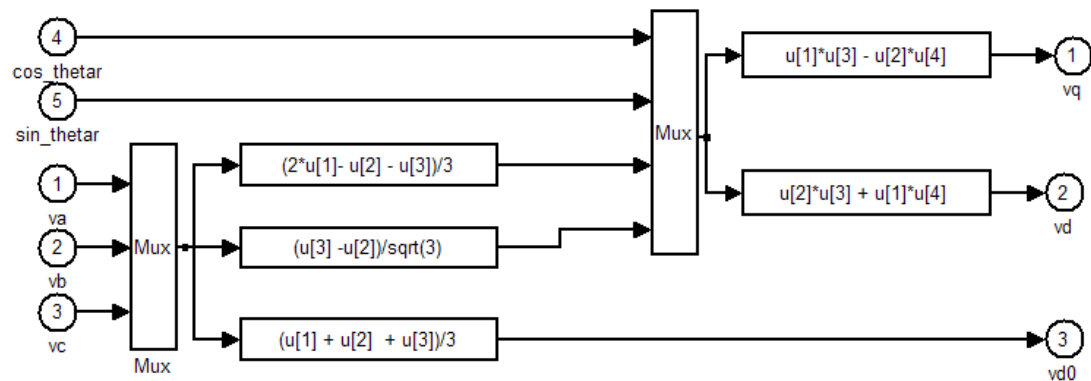
$$\delta(t) = \theta_r(t) - \theta_e(t) \Rightarrow \theta_r(t) = \delta(t) + \theta_e(t)$$

όπου  $\theta_e(t)$  η γωνία που σχηματίζει η τερματική τάση της γεννήτριας με την τερματική τάση του ζυγού. Χρησιμοποιείται η αρχική συνθήκη :

$$\theta_r(0) = \delta(0) + \theta_e(0) \Rightarrow \theta_r(0) = \delta(0) \quad (7.3.1)$$

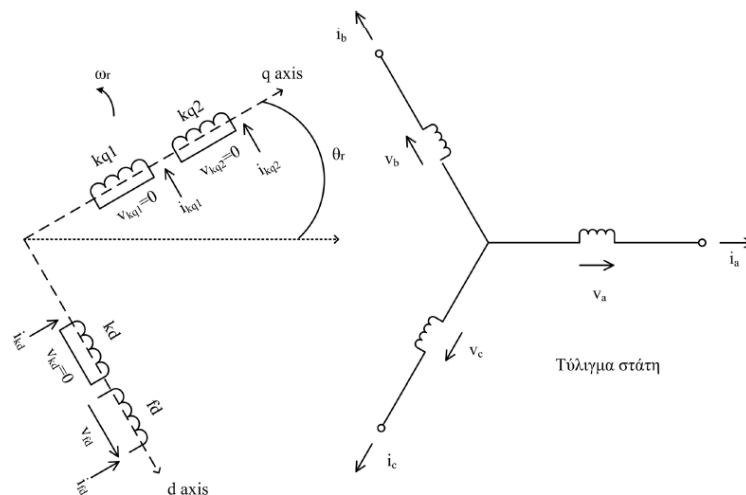
όπου  $\theta_e(0)$  είναι μηδενική καθώς η γεννήτρια συνδέθηκε σε έναν άπειρο ζυγό, δηλαδή δε μεσολαβεί κάποιο φορτίο ανάμεσα στην τερματική τάση της γεννήτριας και την τάση του ζυγού. Να υπενθυμιστεί ότι ως γωνία  $\theta_r$  ορίζεται η γωνία που σχηματίζει ο  $d$  άξονας του δρομέα με την τερματική τάση του ζυγού <sup>[9]</sup>.

## 7.4 Μετασχηματισμός Park <sup>[9],[10],[26]</sup>



Σχήμα 7.6 Το block διάγραμμα στο Simulink.

Πρόκειται για το λεγόμενο μετασχηματισμό Park με βάση τον οποίο μετατρέπουμε ένα τριφασικό σύστημα τάσης σε ένα νέο πλαίσιο αναφοράς dq. Αρχικά, παρουσιάζεται το μοντέλο μιας ιδανικής σύγχρονης γεννήτριας στο σχήμα για να γίνει πιο κατανοητός ο μετασχηματισμός.



Σχήμα 7.7 Μετασχηματισμός Park.

Ξέροντας πλέον τη γωνία του δρομέα  $\theta_r$  σε σχέση με τον άξονα αναφοράς d, οι τάσεις  $v_a$ ,  $v_b$  και  $v_c$  μετασχηματίζονται στο νέο πλαίσιο αναφοράς και παίρνουμε τις νέες τάσεις  $v_d$  και  $v_q$ . Ο μετασχηματισμός Park στηρίζεται στις σχέσεις :

$$V_d = \frac{2}{3} \cdot \left[ V_a \cdot \sin(\omega t) + V_b \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + V_c \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (7.4.1)$$

$$Vq = \frac{2}{3} \cdot \left[ Va \cdot \cos(\omega t) + Vb \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + Vc \cdot \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (7.4.2)$$

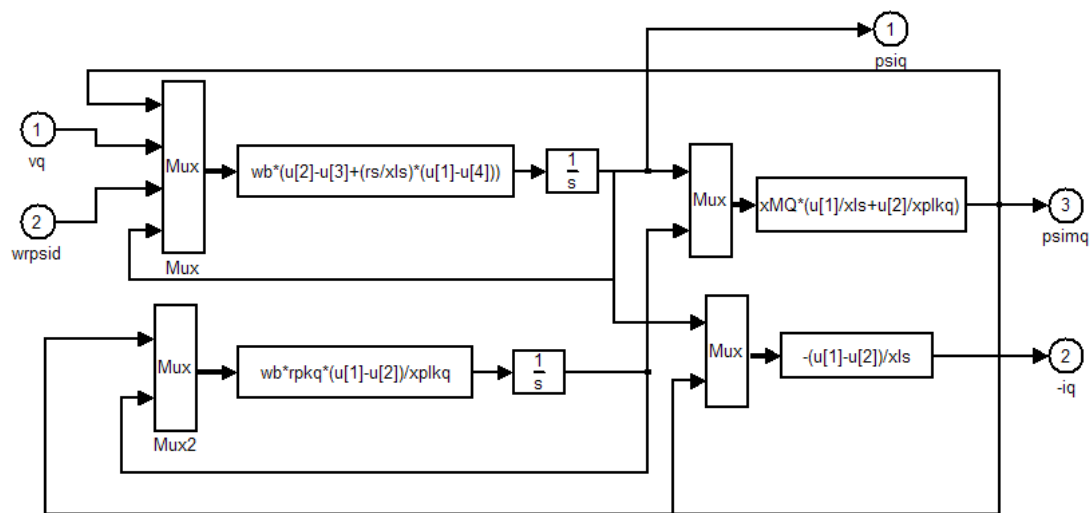
$$V0 = \frac{1}{3} \cdot [Va + Vb + Vc] \quad (7.4.3)$$

Να υπενθυμιστεί ότι το τύλιγμα “0” δεν είναι μαγνητικά συζευγμένο με τα άλλα δυο νέα τυλίγματα d και q του δρομέα και παίζει ρόλο μόνο σε συνθήκες ασύμμετρης φόρτισης της μηχανής. Αν μάλιστα παρατηρήσουμε τη σχέση (7.4.3) θα δούμε ότι η τάση  $v_0$  έχει μηδενική τιμή. Περισσότερα για την χρησιμότητα του μετασχηματισμού Park αναφέρονται στο κεφάλαιο 2.

Με τη χρήση των εξισώσεων (7.4.1) - (7.4.3) αναπαριστάται στο Simulink το μοντέλο που αφορά το μετασχηματισμό Park<sup>[9],[10],[26]</sup>.

### 7.5 Το q-block<sup>[9],[10]</sup>

Το δομικό διάγραμμα αυτής της ενότητας είναι :



Σχήμα 7.8 Το block διάγραμμα στο Simulink.

Βρέθηκε το ρεύμα  $i_q$  από την τάση  $v_q$  η οποία υπολογίστηκε από το μετασχηματισμό Park στο αμέσως προηγούμενο βήμα. Εκφράζονται οι εξισώσεις της ολικής ροής που προκύπτει στον q-άξονα, της ροής που προκύπτει λόγω τριβής στον q-άξονα και της ροής που προκύπτει λόγω μαγνητικής αυτεπαγωγής στον q-άξονα. Πιο συγκεκριμένα:

$$\psi q = wb \int \left[ uq - \frac{wr}{wb} \cdot \psi d + \frac{rs}{xls} \cdot (\psi m q - \psi q) \right] dt \quad (7.5.1)$$

$$\psi' k q = wb \cdot \frac{r' k q}{x' l k q} \int (\psi m q - \psi' k q) dt \quad (7.5.2)$$

$$\psi m q = wb \cdot L m q \cdot (i q + i' k q) \quad (7.5.3)$$

Επιπλέον, οι σχέσεις ρευμάτων στον q άξονα :

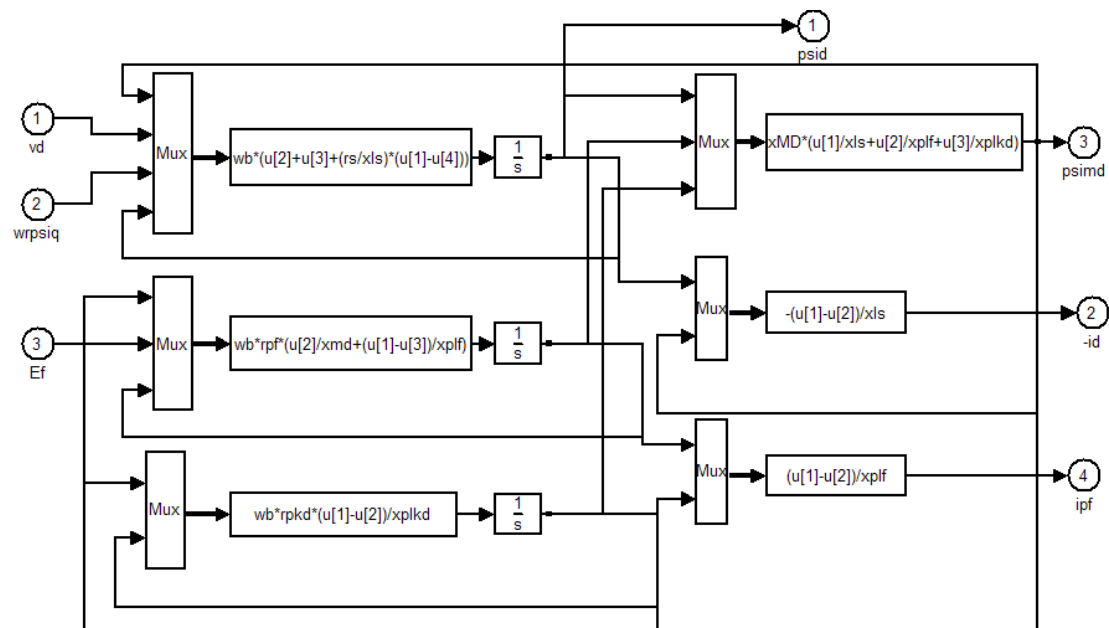
$$i q = \frac{\psi q - \psi m q}{xls} \quad (7.5.4)$$

$$i' k q = \frac{\psi' k q - \psi m q}{x' l k q} \quad (7.5.5)$$

Με τη χρήση των εξισώσεων (7.5.1) - (7.5.5), αναπαριστάται στο Simulink το μοντέλο που αφορά το q-block <sup>[9],[10]</sup>.

## 7.6 Το d-block <sup>[9],[10]</sup>

Το δομικό διάγραμμα αυτής της ενότητας είναι :



Σχήμα 7.9 Το block διάγραμμα στο Simulink.



Βρέθηκε το ρεύμα  $id$  από την τάση  $vd$  που υπολογίστηκε από τον μετασχηματισμό Park. Εκφράζονται οι εξισώσεις της ολικής ροής που προκύπτει στον d-άξονα, της ροής που προκύπτει λόγω τριβής στον d-άξονα, της ροής λόγω του πεδίου διέγερσης και της ροής που προκύπτει λόγω μαγνητικής αυτεπαγωγής στον d-άξονα. Πιο συγκεκριμένα:

$$\psi d = wb \int \left[ ud - \frac{wr}{wb} \cdot \psi q + \frac{rs}{xls} \cdot (\psi md - \psi d) \right] dt \quad (7.6.1)$$

$$\psi' kd = wb \cdot \frac{r' kd}{x' lkd} \int (\psi md - \psi' kd) dt \quad (7.6.2)$$

$$\psi' f = wb \cdot \frac{r' f}{xmd} \int \left[ Ef + \frac{xmd}{x' lf} \cdot (\psi md - \psi' f) \right] dt \quad (7.6.3)$$

$$\psi md = wb \cdot Lmd \cdot (id + i' kd + i' f) \quad (7.6.4)$$

Η τάση διέγερσης δίνεται από τη σχέση:

$$Ef = xmd \cdot \frac{u' f}{r' f} \quad (7.6.5)$$

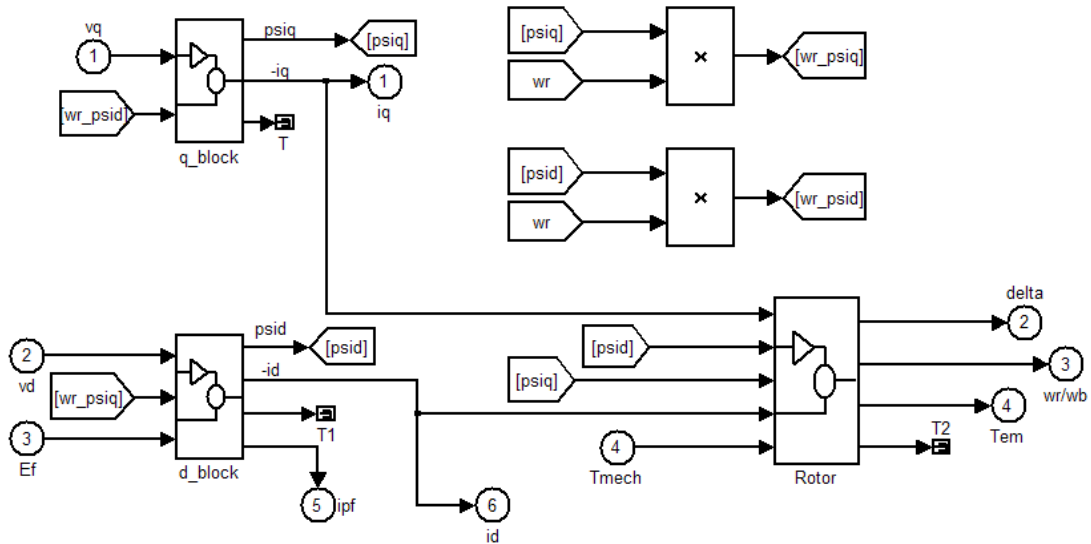
Επιπλέον, οι σχέσεις ρευμάτων στον d-άξονα και του ρεύματος διέγερσης :

$$id = \frac{\psi d - \psi md}{xls} \quad (7.6.6)$$

$$i' kd = \frac{\psi' kd - \psi md}{x' lkd} \quad (7.6.7)$$

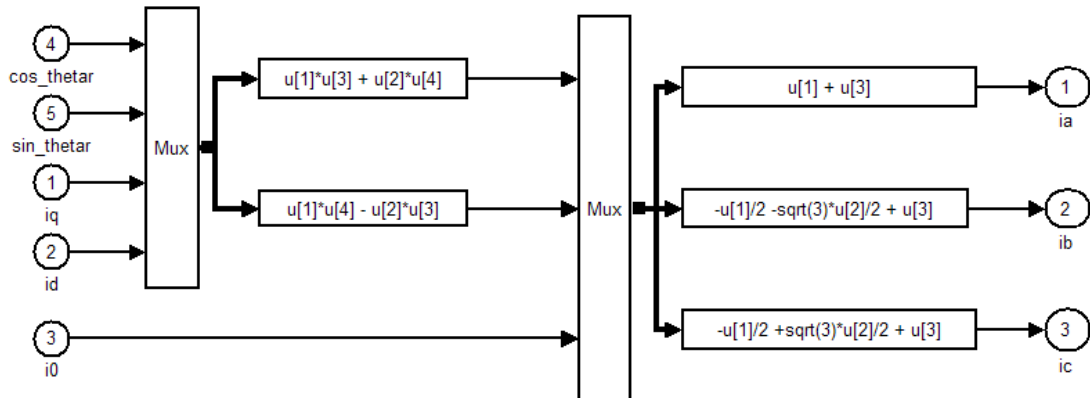
$$i' f = \frac{\psi' f - \psi md}{x' lf} \quad (7.6.8)$$

Με τη χρήση των εξισώσεων (7.6.1) - (7.6.8), αναπαριστάται στο Simulink το μοντέλο που αφορά το d-block<sup>[9],[10]</sup>. Συγκεντρωτικά, τα βασικά block διαγράμματα (χωρίς τον μετασχηματισμό Park και τον τρόπο εύρεσης του  $\theta r$ ) είναι :



Σχήμα 7.10 Το block διάγραμμα στο Simulink.

### 7.7 Αντίστροφος μετασχηματισμός Park <sup>[9],[26]</sup>



Σχήμα 7.11 Το block διάγραμμα στο Simulink.

Πρόκειται για τον αντίστροφο μετασχηματισμό Park. Έχουμε αρχικά τις σχέσεις :

$$iqs = iq \cdot \cos(\theta_r) + id \cdot \sin(\theta_r)$$

$$ids = -iq \cdot \sin(\theta_r) + id \cdot \cos(\theta_r)$$

και τα ρεύματα στο πλαίσιο  $abc$  δίνονται πλέον απο τις σχέσεις :

$$ia = iqs + i0 \quad (7.7.1)$$

$$ib = -\frac{1}{2} \cdot iqs - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot ids + i0 \quad (7.7.2)$$

$$ic = -\frac{1}{2} \cdot iqs + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot ids + i0 \quad (7.7.3)$$

Έχοντας θεωρήσει το ρεύμα  $i0$  μηδενικό (λόγω μηδενικής τάσης  $v0$ ) οι τελικές σχέσεις παίρνουν τη μορφή :

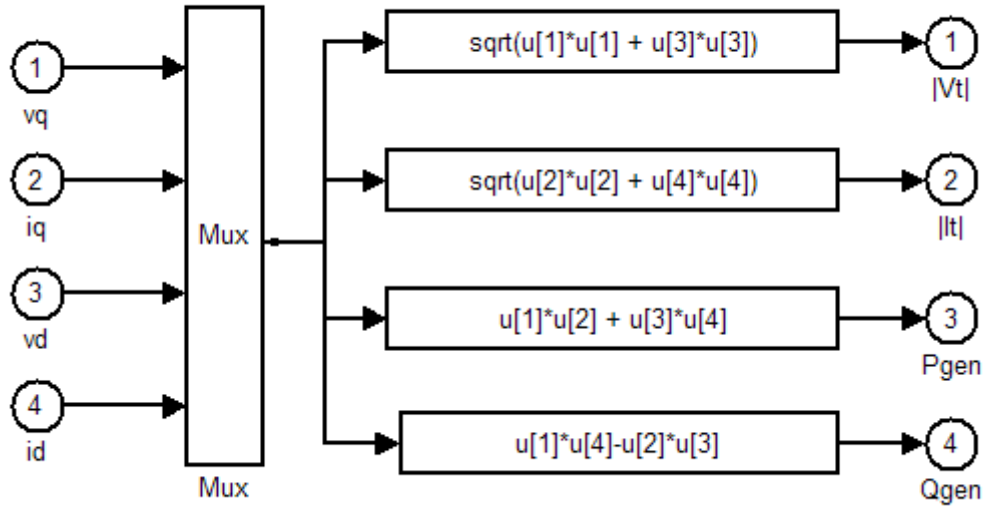
$$ia = iqs$$

$$ib = -\frac{1}{2} \cdot iqs - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot ids$$

$$ic = -\frac{1}{2} \cdot iqs + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot ids$$

Με τη χρήση των εξισώσεων (7.7.1) - (7.7.3), αναπαριστάται στο Simulink το μοντέλο που αφορά τον αντίστροφο μετασχηματισμό Park <sup>[9],[26]</sup>.

**7.8 Εύρεση τερματικής τάσης ( $V_t$ ), ρεύμα στάτη ( $I_t$ ), ενεργού ( $P_{gen}$ ) και άεργου ισχύος ( $Q_{gen}$ ) της γεννήτριας <sup>[9]</sup>**



*Σχήμα 7.12 Το block διάγραμμα στο Simulink.*

Το ρεύμα γραμμής που ρέει το στάτη, η τερματική τάση της γεννήτριας, η ενεργός και η άεργος ισχύς που παράγονται ή απορροφούνται δίνονται από τις σχέσεις :

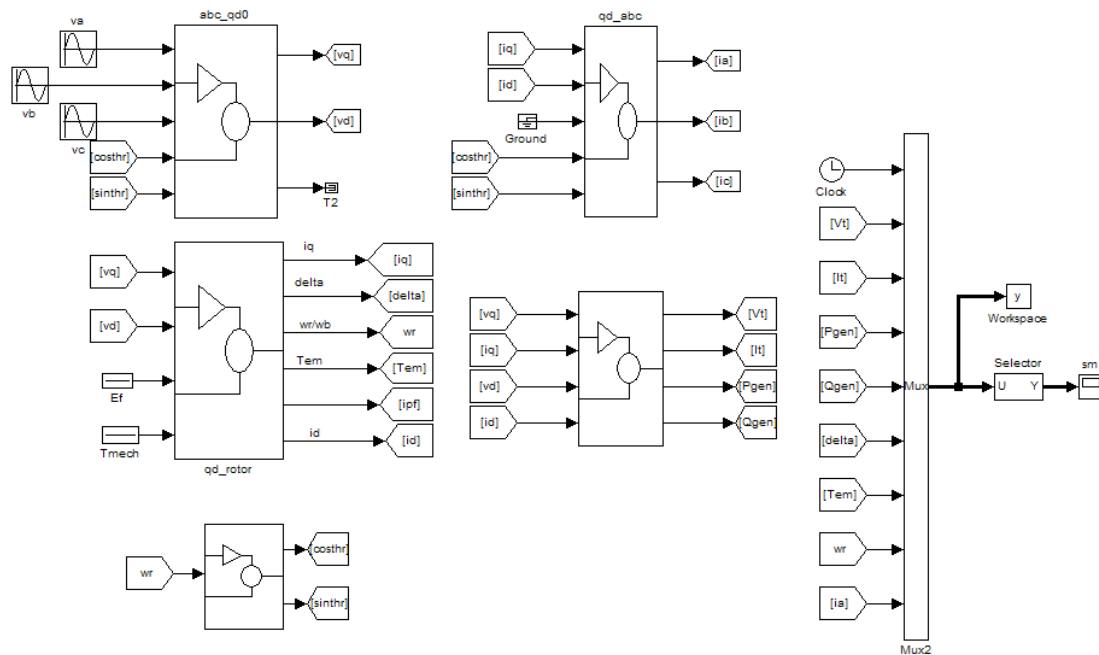
$$|V_t| = \sqrt{v_q^2 + v_d^2} \quad (7.8.1)$$

$$|I_t| = \sqrt{i_q^2 + i_d^2} \quad (7.8.2)$$

$$P_{gen} = v_q \cdot i_q + v_d \cdot i_d \quad (7.8.3)$$

$$Q_{gen} = v_q \cdot i_d - v_d \cdot i_q \quad (7.8.4)$$

Με τη χρήση των εξισώσεων (7.8.1) - (7.8.4), αναπαριστούμε στο Simulink το μοντέλο<sup>[9]</sup>.



**Σχήμα 7.13** Το block διάγραμμα στο Simulink.

Έπειτα από την κατασκευή του δυναμικού μοντέλου της γεννήτριας προχωράμε στη μελέτη της λειτουργίας της στις εξής περιπτώσεις :

- 1) Μεταβολή της μηχανικής ροπής εισόδου για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και μελέτη των μεταβατικών φαινομένων
- 2) Μεταβολή της μηχανικής ροπής εισόδου για επαγωγικό συντελεστή ισχύος και μελέτη των μεταβατικών φαινομένων
- 3) Μεταβολή της μηχανικής ροπής εισόδου για χωρητικό συντελεστή ισχύος και μελέτη των μεταβατικών φαινομένων
- 4) Τριφασικό βραχυκύκλωμα

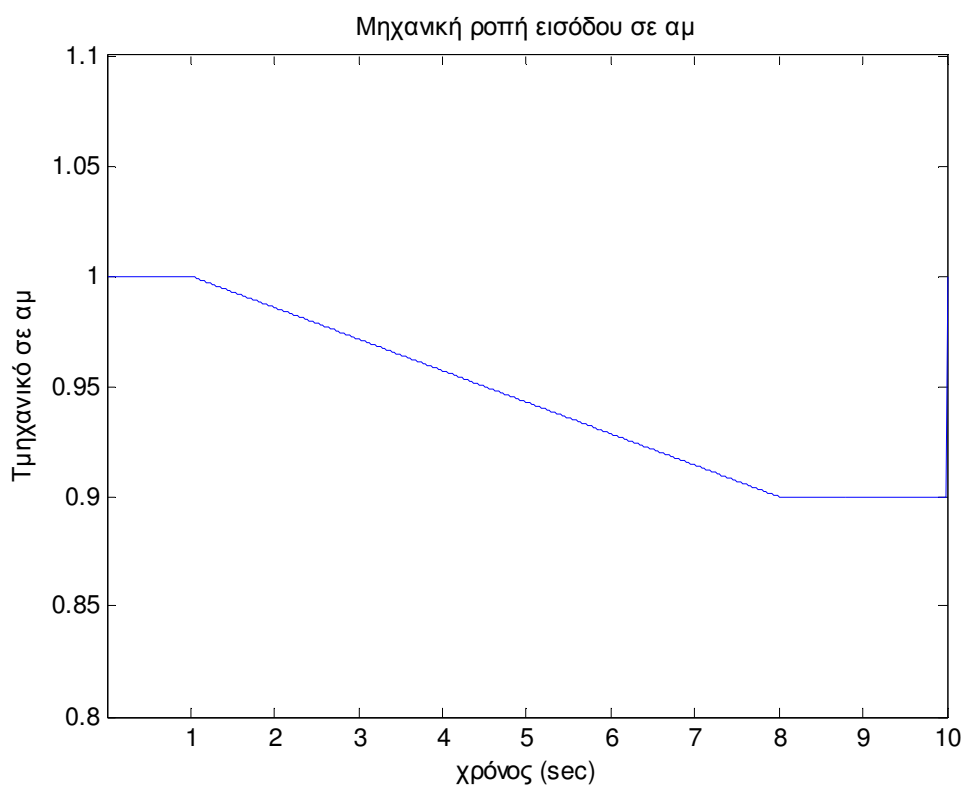
Να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο μοντέλο έχει δημιουργηθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε, εάν θεωρήσουμε χρονική στιγμή 0 αυτή που θα συνδέσουμε την γεννήτρια στο δίκτυο, τότε αυτή τη χρονική στιγμή η σύγχρονη γεννήτρια τροφοδοτείται με ονομαστική ροπή εισόδου και στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, καθώς κατά τη μεταβολή της μηχανικής ροπής εισόδου για τη μελέτη των μεταβατικών φαινομένων, θα θεωρηθεί ως αρχική τιμή της μηχανικής ροπής, η ονομαστική. Αυτός είναι και ο λόγος, που στις παρακάτω περιπτώσεις, εφαρμόζονται μεταβολές στη μηχανική ροπή που αρχίζουν από την ονομαστική της τιμή και καταλήγουν σε κάποια μικρότερη.

Σημείωση : Οι γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν καθώς και η δημιουργία του δυναμικού μοντέλου της γεννήτριας έγινε με τη χρήση παραμέτρων και εξισώσεων στο Matlab που δίνονται στο παράρτημα Ε.

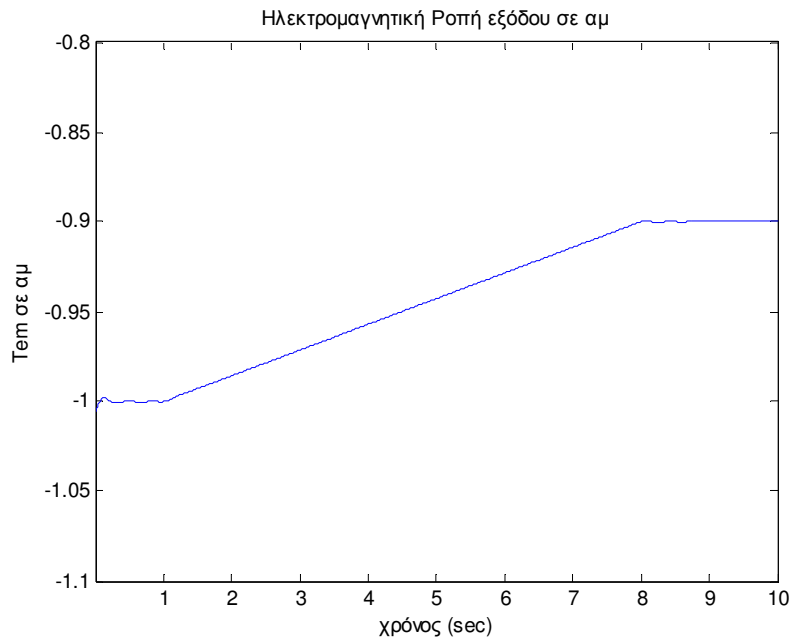
## 7.9 Αποτελέσματα Προσομοίωσης <sup>[2],[6],[11],[12],[17],[18],[24]</sup>

### 7.9.1 Μεταβολή της μηχανικής ροπής εισόδου για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος

Έχουμε ωμικό φορτίο στα άκρα της γεννήτριας και εφαρμόζουμε μεταβολή την χρονική στιγμή  $t=1\text{sec}$  έως την  $t=8\text{sec}$  στην μηχανική ροπή εισόδου της γεννήτριας από την ονομαστική της τιμή στο 90% της ονομαστικής της τιμής σύμφωνα με το σχήμα :



Επιλέξαμε την παραπάνω μεταβολή της μηχανικής ενέργειας για να μπορέσουμε να προσαρμοστούμε στα δεδομένα της παρούσας διπλωματικής. Η μηχανική ενέργεια στην περίπτωση μίας αξονικής γεννήτριας προέρχεται από το αξονικό σύστημα του πλοίου. Άρα λοιπόν, αυτή η μείωση της μηχανικής ενέργειας θα συμβεί πιο αργά και ομαλά, εφόσον η επιβράδυνση ενός τέτοιου συστήματος δεν γίνεται γρήγορα και απότομα. Να υπενθυμίσουμε ότι η μηχανική ροπή εισόδου είναι θετική και συμπίπτει με την φορά κίνηση του δρομέα της γεννήτριας.

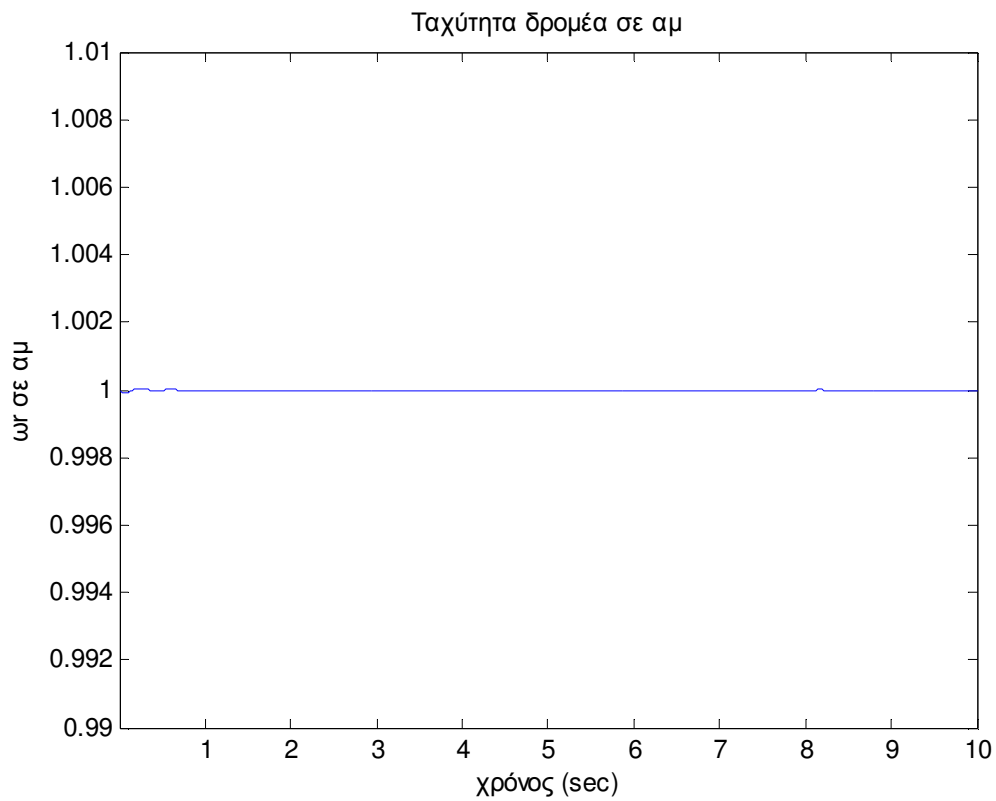


Παρατηρούμε ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή εξόδου της γεννήτριας ξεκινάει από την ονομαστική της τιμή σε ανά μονάδα σύστημα και σταθεροποιείται στο 90% της ονομαστικής της τιμής. Αυτό είναι κάτι που αναμενόταν καθώς από την εξίσωση του δυναμικού μοντέλου ισχύει :

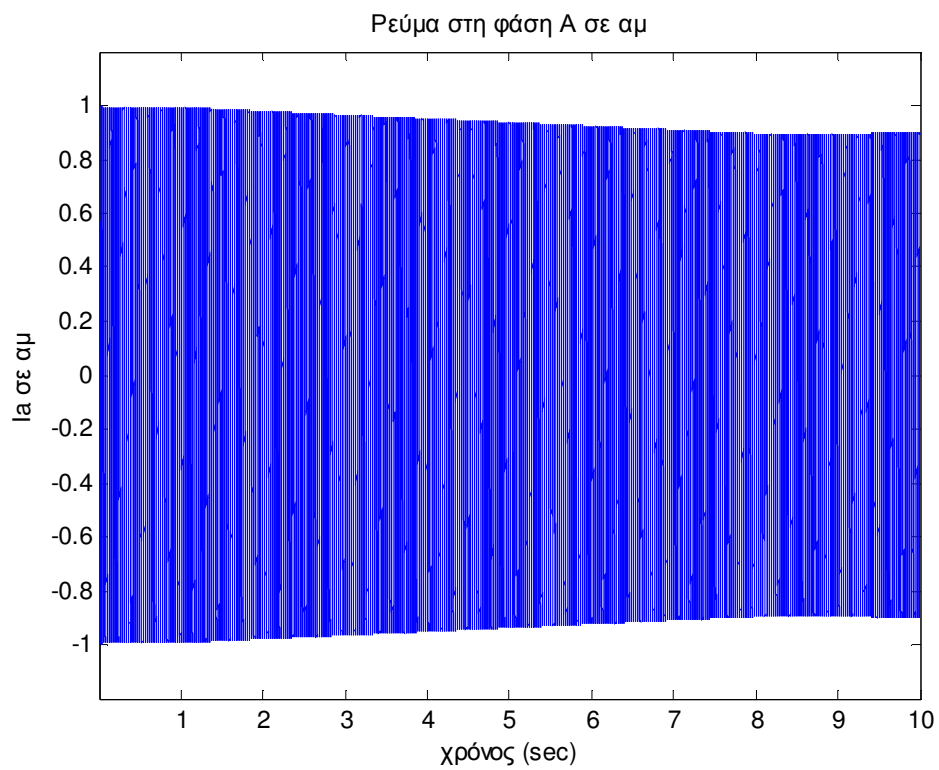
$$T_m - T_e - T_{damp} = 2H \cdot \frac{d\omega_r}{dt} \quad (7.9.1.1)$$

Εφόσον μεταβάλλαμε την μηχανική ισχύ εισόδου από την ονομαστική της τιμή στο 90% της ονομαστικής της, τότε αναμένουμε και η ηλεκτρομαγνητική τιμή εξόδου να ακολουθήσει την ίδια μεταβολή, έτσι ώστε η ταχύτητα του δρομέα να παραμένει σταθερή και ίση με την σύγχρονη. Μάλιστα, αναμένουμε αρνητική την τιμή της, καθώς στην λειτουργία γεννήτριας η φορά της ηλεκτρομαγνητικής ροπής εξόδου είναι αντίθετη στην φορά κίνησης του δρομέα της μηχανής. Έτσι εξηγείται και το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω γραφική παράσταση. Ακολουθεί η μεταβολή και άλλων χαρακτηριστικών μηχανικών και ηλεκτρικών μεγεθών.

Η ταχύτητα του δρομέα διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της μεταβολής σύμφωνα με την εξίσωση 7.9.1.1

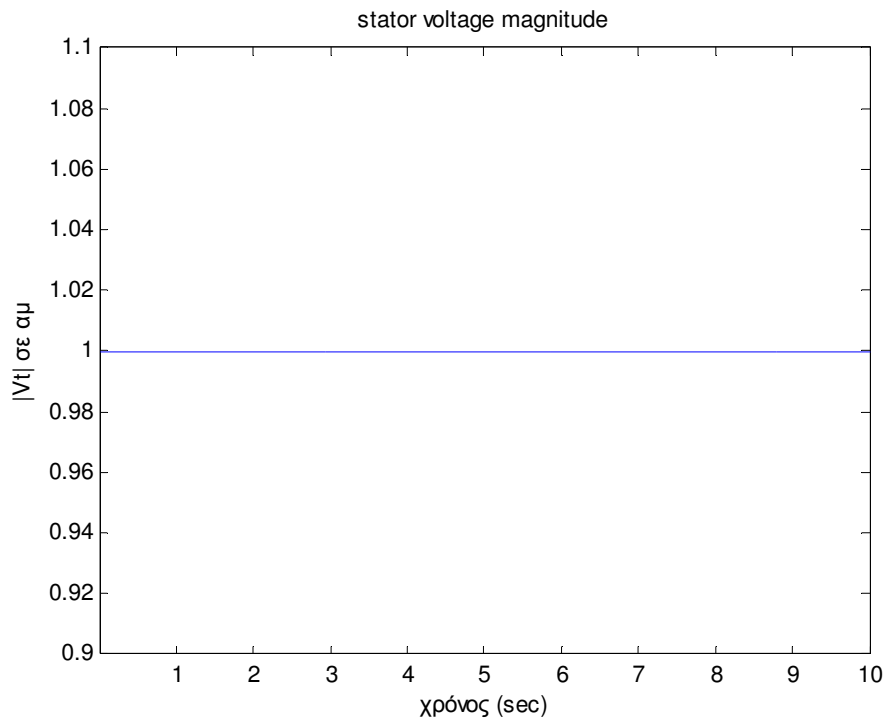


Το ρεύμα ακολουθεί αρχικά πτωτική τάση και στη συνέχεια σταθεροποιείται.

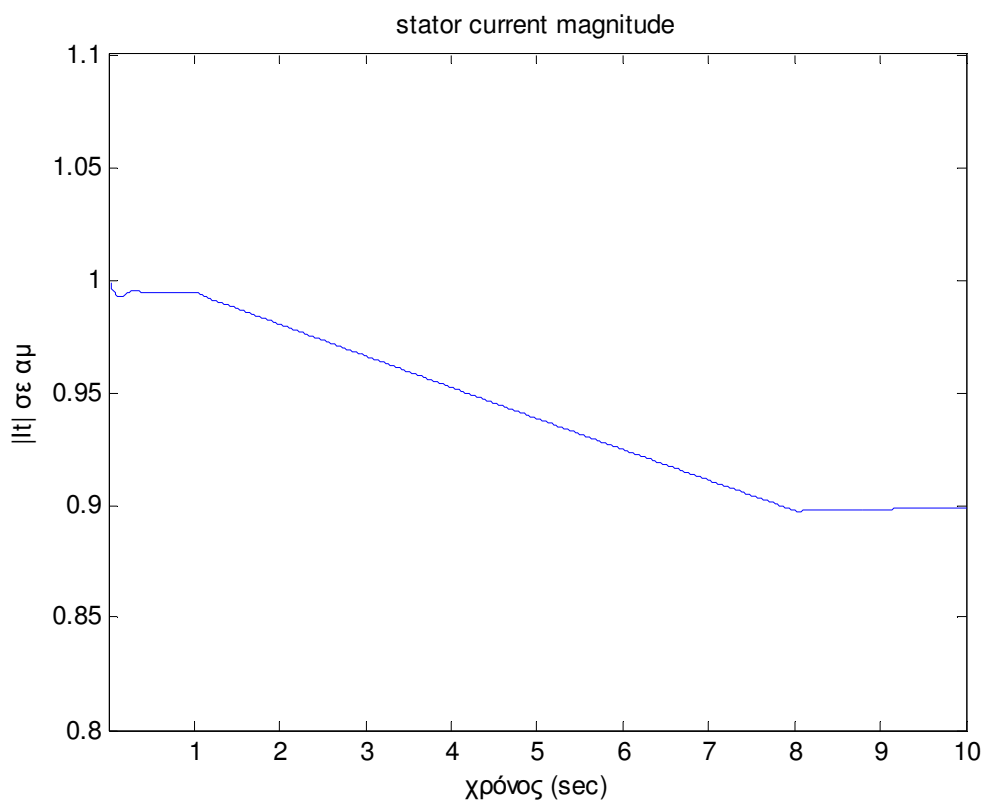




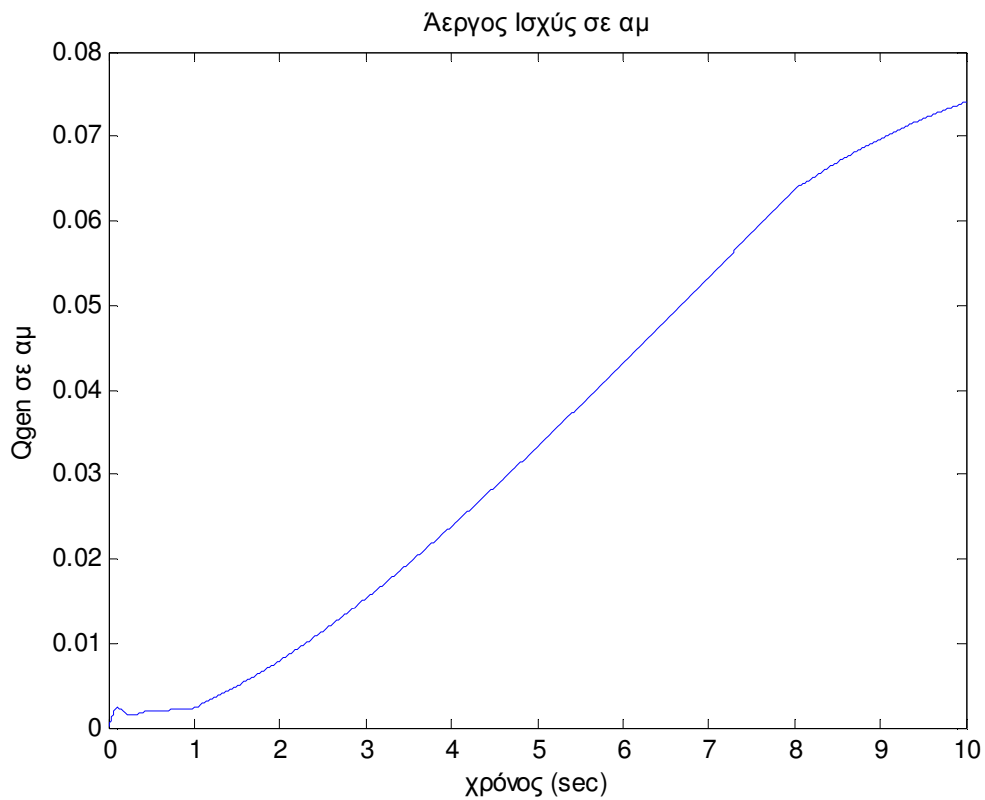
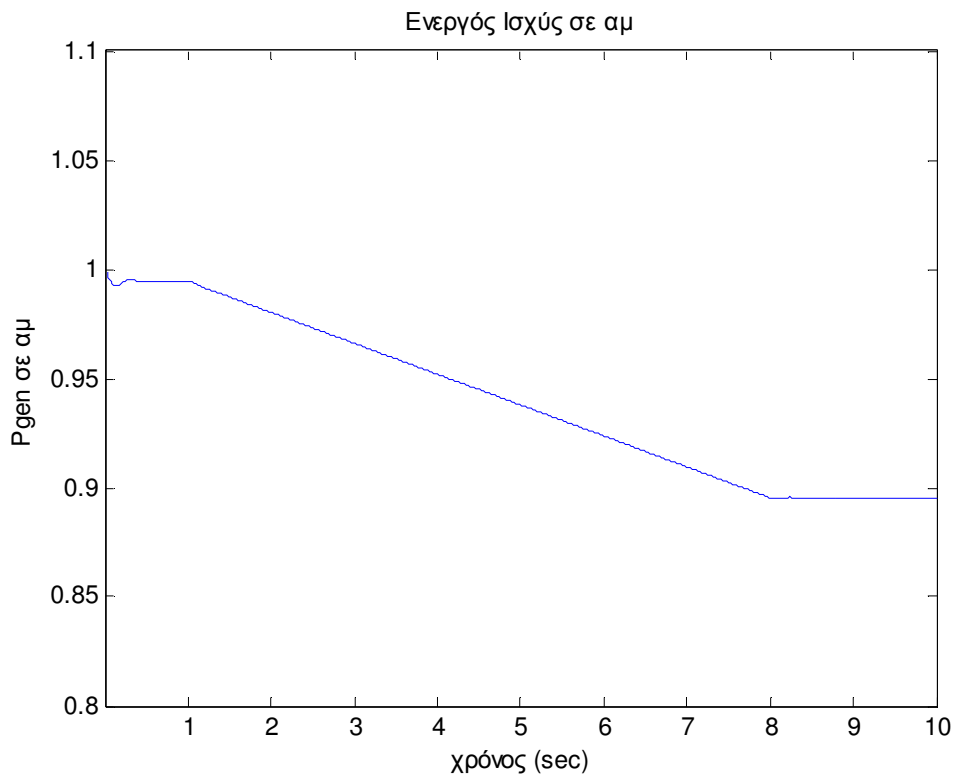
Η τερματική τάση της γεννήτριας θεωρείται σταθερή και ίση με 1 αμ σε ανά μονάδα σύστημα εφόσον είναι συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό.



Το ρεύμα του στάτη ακολουθεί και αυτό πτωτική τάση μέχρι να σταθεροποιηθεί.



Η γεννήτρια παράγει ενεργό ισχύ και επειδή βρισκόμαστε στην περίπτωση μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στα άκρα της, αναμένουμε σχεδόν μηδενική τιμή της άεργου ισχύος.



Από το κεφάλαιο 5 βρήκαμε ότι η ενεργός ισχύς δίνεται από τον τύπο :

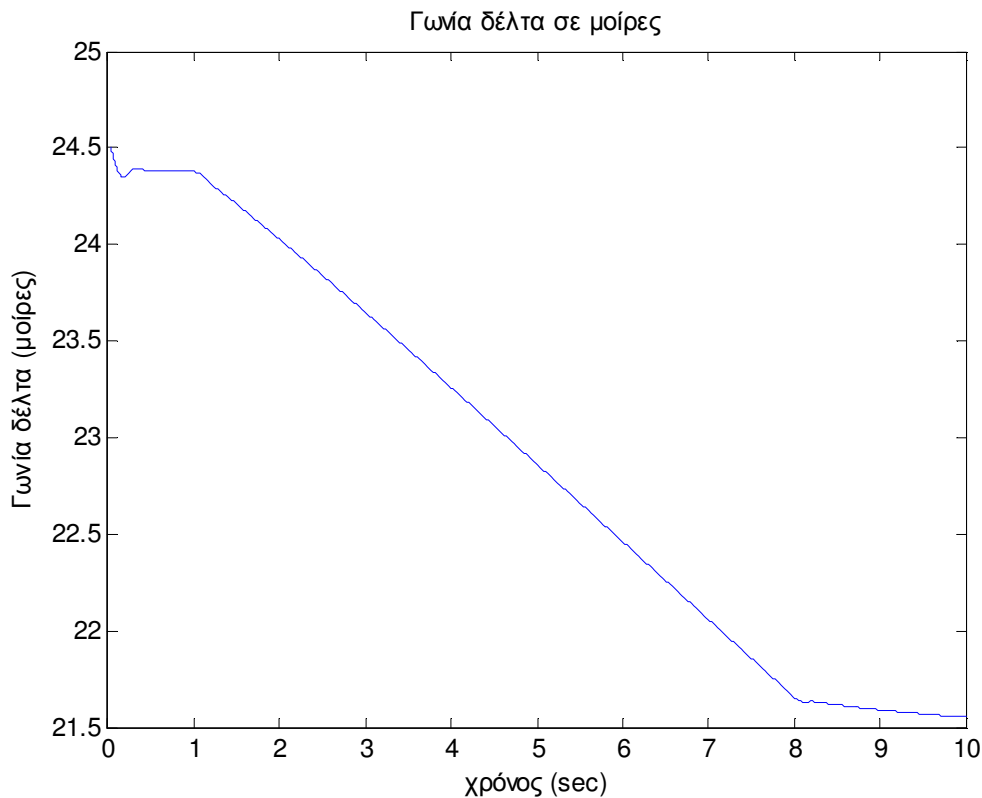
$$P = \frac{|V_t \cdot E_f|}{X_d} \cdot \sin \delta + \frac{V_t^2 \cdot (X_d - X_q)}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \cdot \sin 2\delta$$

$$= Pf + j \cdot Pr$$
(7.9.1.2)

ενώ η άεργος ισχύς :

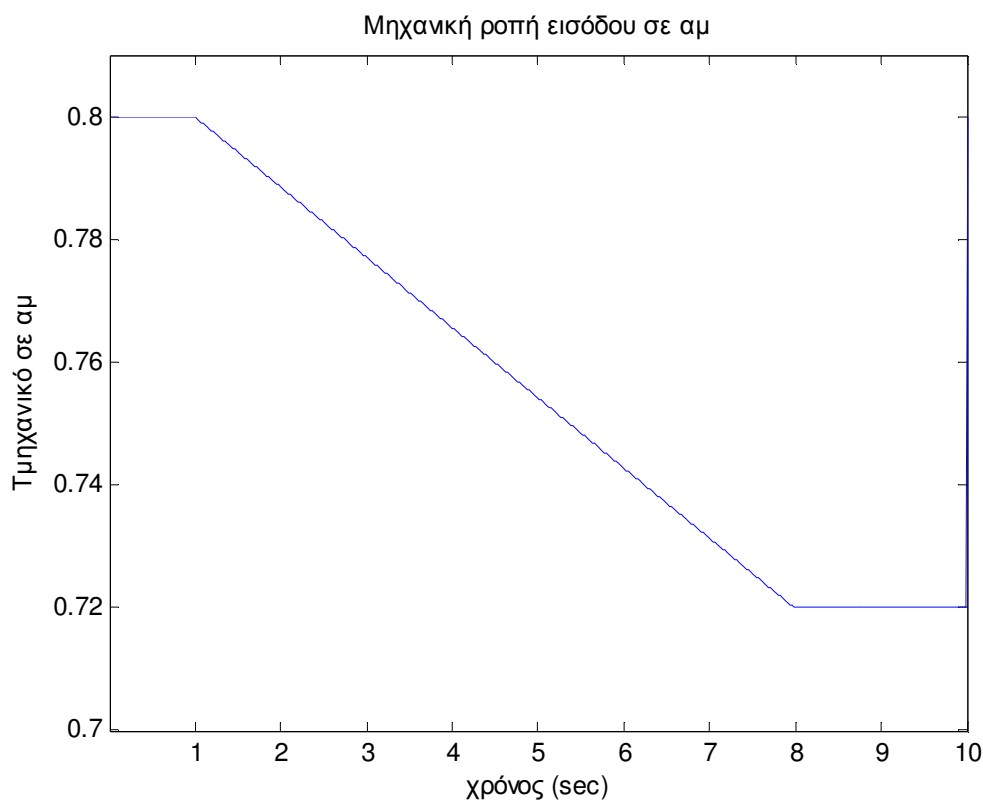
$$Q = \frac{|V_t \cdot E_f|}{X_d} \cdot \cos \delta - V_t^2 \cdot \left( \frac{\cos^2 \delta}{X_d} + \frac{\sin^2 \delta}{X_q} \right)$$
(7.9.1.3)

Παρατηρούμε ότι για ίδια τιμή της τάσης διέγερσης, η ενεργός ισχύς εξόδου της γεννήτριας μειώνεται ενώ η άεργος ισχύς αυξάνει ελαφρώς. Συνεπώς, μειώνοντας την εισαγόμενη μηχανική ισχύ, μειώνεται με τον τρόπο που περιγράψαμε παραπάνω και η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας. Άρα, εφόσον η ενεργός ισχύς P μειώνεται, η άεργος ισχύς Q θα αυξηθεί προκειμένου η γεννήτρια μας να λειτουργεί στην ίδια 'τροχιά διέγερσης'.



### 7.9.2 Μεταβολή της μηχανικής ροπής εισόδου για επαγωγικό συντελεστή ισχύος

Έχουμε επαγωγικό συντελεστή ισχύος στα άκρα της γεννήτριας και εφαρμόζουμε μεταβολή την χρονική στιγμή  $t=1\text{sec}$  έως την  $t=8\text{sec}$  στην μηχανική ροπή εισόδου της γεννήτριας σύμφωνα με το σχήμα :

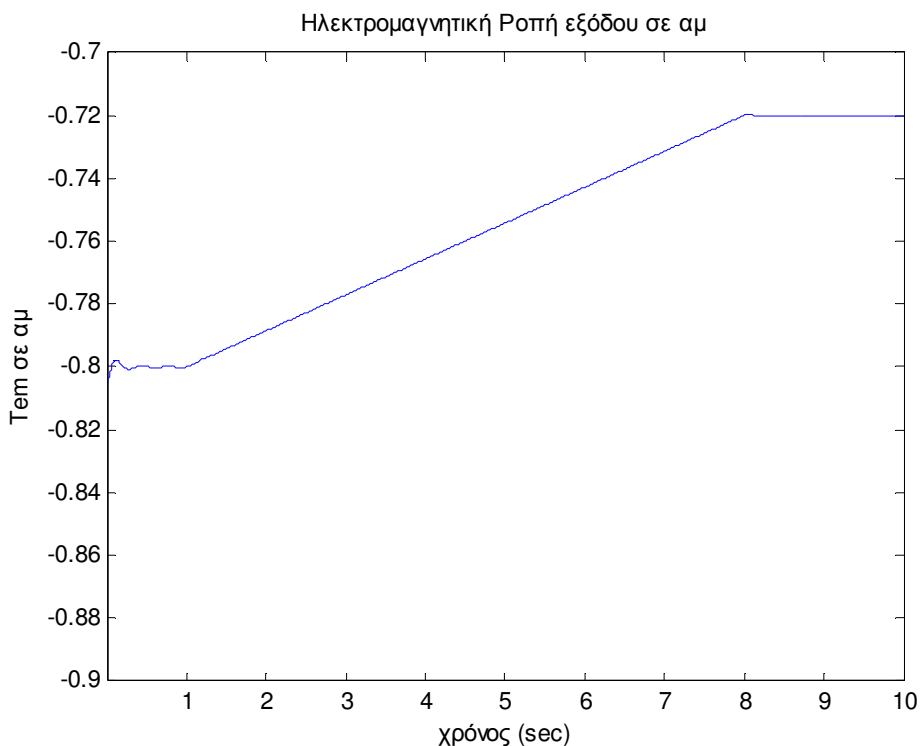


Παρατηρούμε ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή εξόδου της γεννήτριας ξεκινάει από το 80% της ονομαστικής της τιμής σε ανά μονάδα σύστημα και σταθεροποιείται στο 72% της ονομαστικής της τιμής. Αυτό είναι κάτι που αναμενόταν καθώς στην προκείμενη περίπτωση, η ενεργός ισχύ που θα παράξει η γεννήτρια θα είναι ίση με το 80% της ονομαστικής της ισχύς  $S$ , καθώς έχουμε επαγωγικό συντελεστή ισχύος ίσο με 0.8. Επομένως επειδή ισχύει ,

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (7.9.2.1)$$

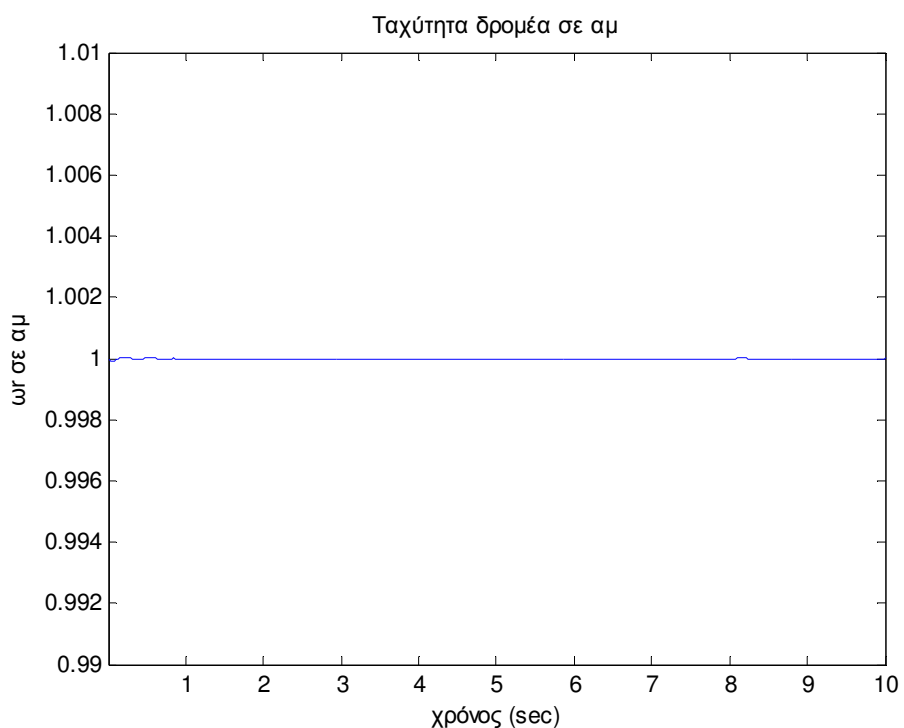
η αρχική μηχανική ροπή εισόδου της γεννήτριας θα είναι ίση με το 80% της ονομαστικής της τιμής. Εφόσον μεταβάλλαμε την μηχανική ροπή εισόδου από το 80% της ονομαστικής της τιμής στο 72% της ονομαστικής της, τότε αναμένουμε και η ηλεκτρομαγνητική τιμή εξόδου να ακολουθήσει την ίδια μεταβολή έτσι ώστε η ταχύτητα του δρομέα να παραμένει σταθερή και ίση με την σύγχρονη καθώς ισχύει :

$$T_m - T_e - T_{damp} = 2H \cdot \frac{d\omega_r}{dt} \quad (7.9.2.2)$$

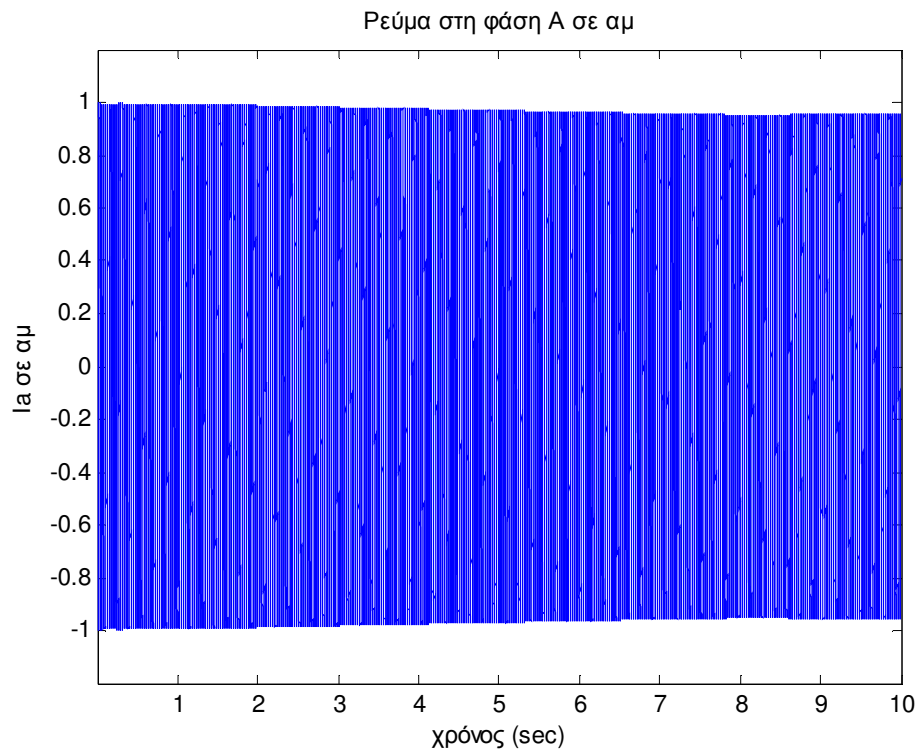


Αναμένουμε αρνητική την τιμή της ροπής εξόδου  $T_e$  καθώς, στην λειτουργία γεννήτριας, η φορά της ηλεκτρομαγνητικής ροπής εξόδου είναι αντίθετη στην φορά κίνησης του δρομέα της μηχανής. Έτσι εξηγείται και το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω γραφική παράσταση.

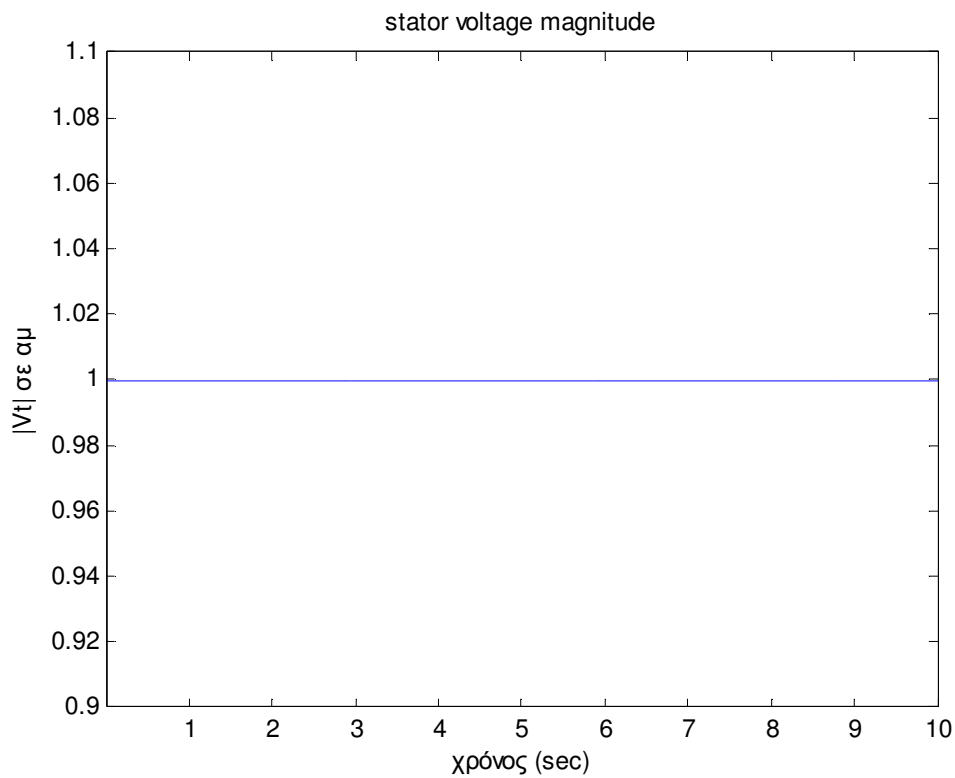
Η ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας παραμένει σταθερή και ίση με την σύγχρονη ταχύτητα σε ανά μονάδα τιμές.



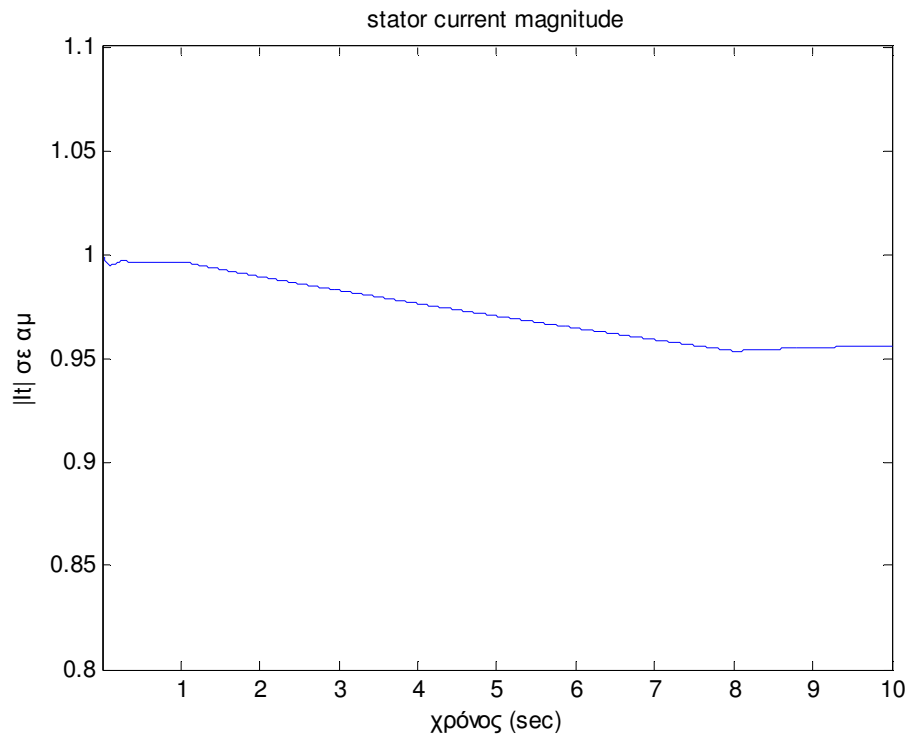
Το ρεύμα της φάσης A αρχικά μειώνεται και στη συνέχεια σταθεροποιείται.



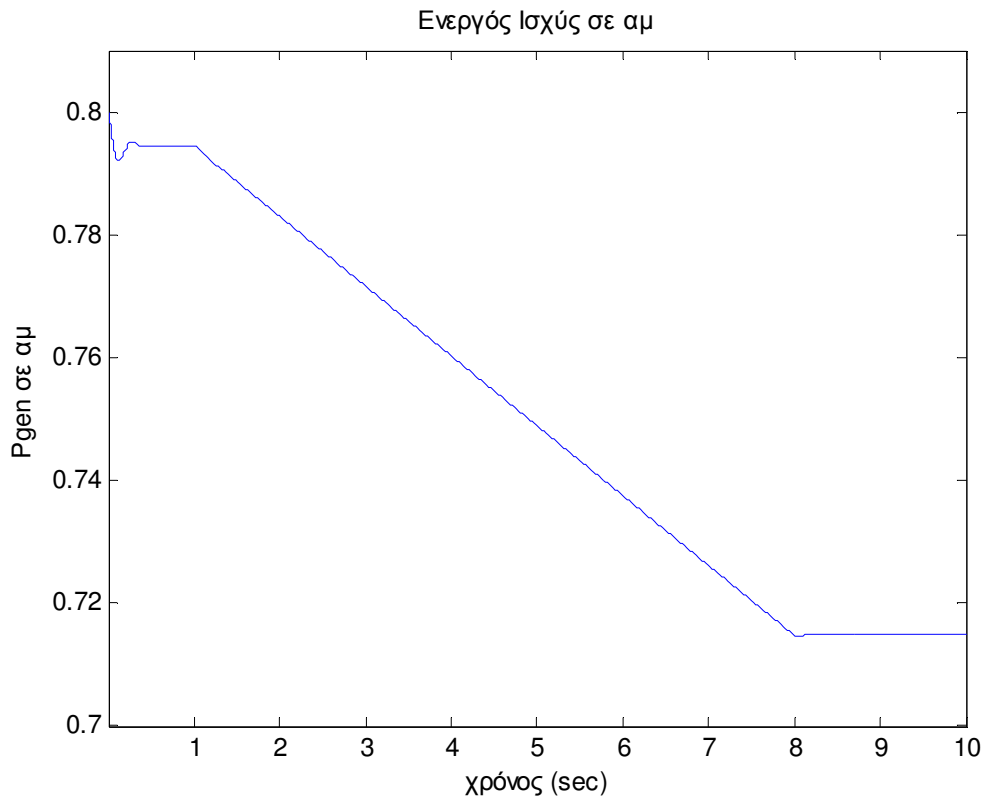
Η τερματική τάση της γεννήτριας θεωρείται σταθερή και ίση με 1 σε ονομαστικά μεγέθη εφόσον είναι συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό.



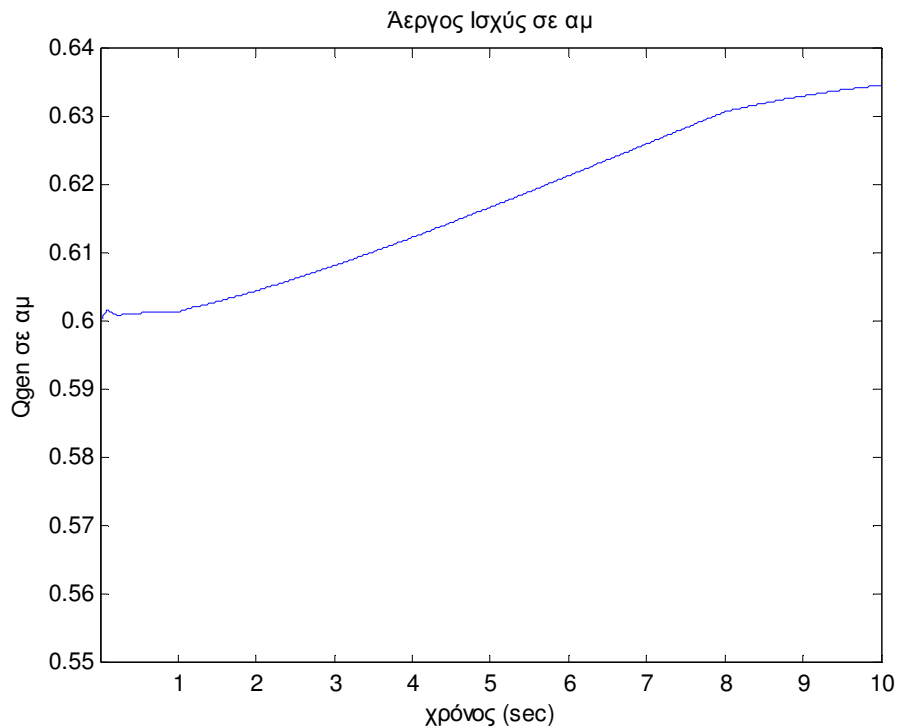
Το ρεύμα του στάτη αρχικά μειώνεται και στη συνέχεια σταθεροποιείται.



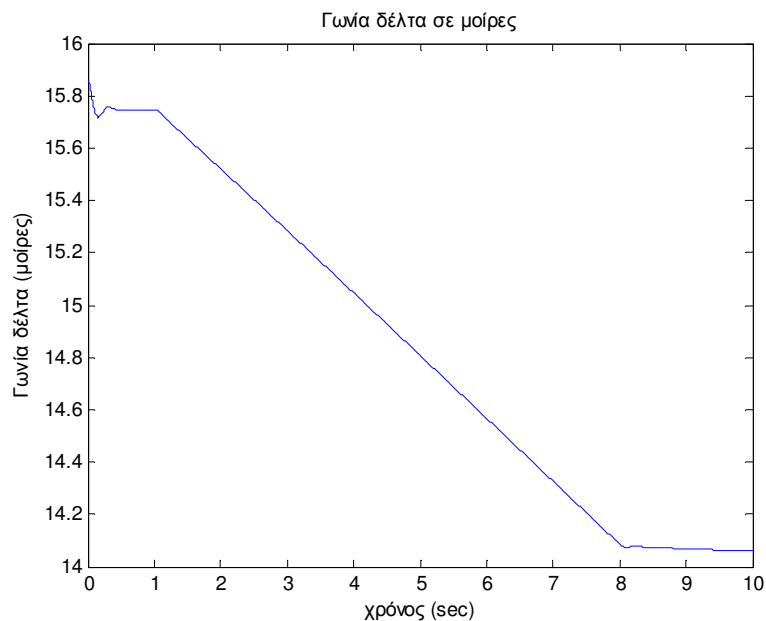
Η γεννήτρια παράγει ενεργό ισχύ και επειδή βρισκόμαστε στην περίπτωση επαγωγικού συντελεστή ισχύος αναμένουμε μεταβολή της παραγωγής ενεργού ισχύος.



Βρισκόμαστε στην περίπτωση επαγωγικού συντελεστή ισχύος οπότε αναμένουμε και παροχή επαγωγικής άεργος ισχύος από την γεννήτρια με αρχική τιμή που εξαρτάται από τον συντελεστή ισχύος λειτουργίας.



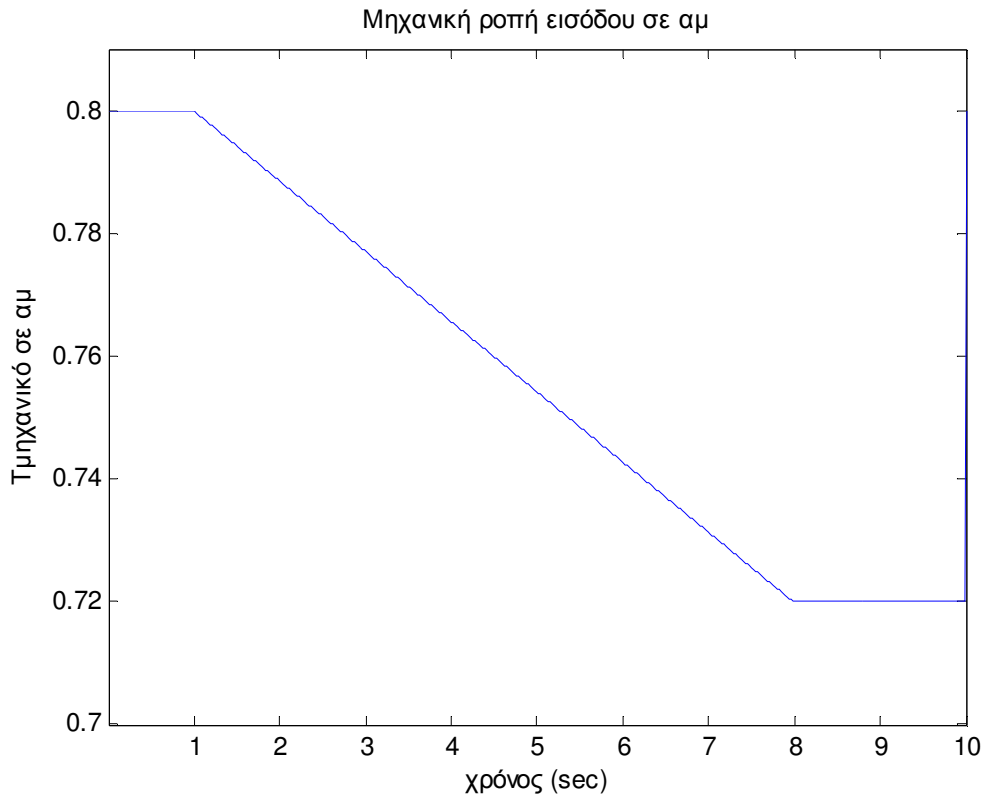
Παρατηρούμε ότι χωρίς να μεταβάλλουμε την τιμή της τάσης διέγερσης, η ενεργός ισχύς εξόδου της γεννήτριας μειώνεται ενώ η άεργος ισχύς που παρέχει αυξάνεται. Συνεπώς, μειώνοντας την εισαγόμενη μηχανική ισχύ, μειώνεται και η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας. Άρα, εφόσον η ενεργός ισχύς  $P$  μειώνεται, η άεργος ισχύς  $Q$  θα αυξηθεί προκειμένου η γεννήτρια μας να λειτουργεί στην ίδια 'τροχιά διέγερσης'.





### 7.9.3 Μεταβολή της μηχανικής ροπής εισόδου για χωρητικό συντελεστή ισχύος

Έχουμε χωρητικό συντελεστή ισχύος στα άκρα της γεννήτριας και εφαρμόζουμε μεταβολή την χρονική στιγμή  $t=1\text{sec}$  έως την  $t=8\text{sec}$  στην μηχανική ροπή εισόδου της γεννήτριας σύμφωνα με το σχήμα :

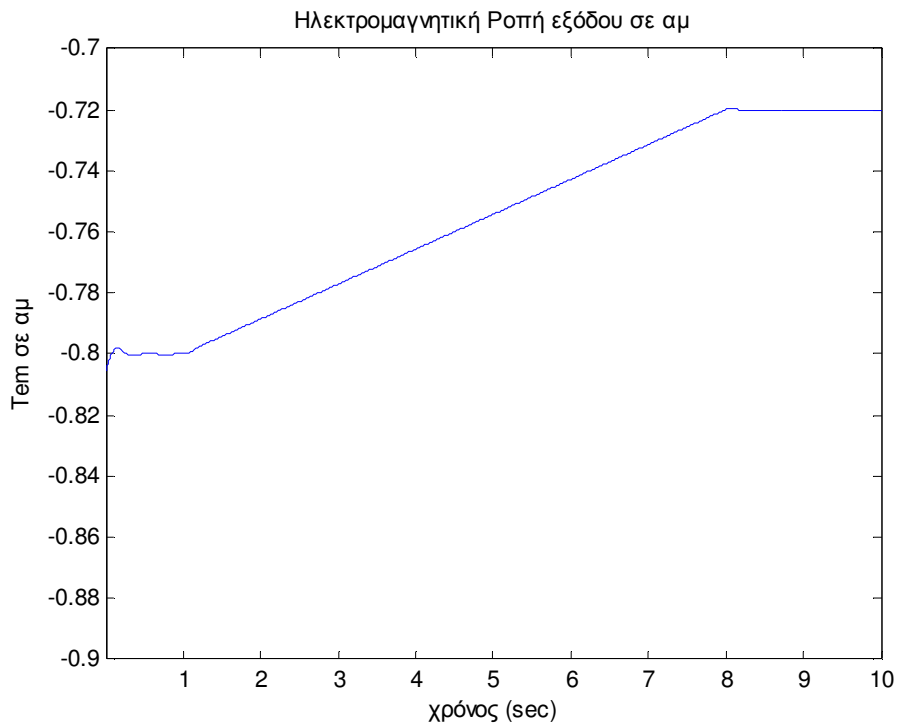


Παρατηρούμε ότι και εδώ η ηλεκτρομαγνητική ροπή εξόδου της γεννήτριας ξεκινάει από το 80% της ονομαστικής της τιμής σε ανά μονάδα σύστημα και σταθεροποιείται στο 72% της ονομαστικής της τιμής. Επειδή ισχύει ,

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (7.9.3.1)$$

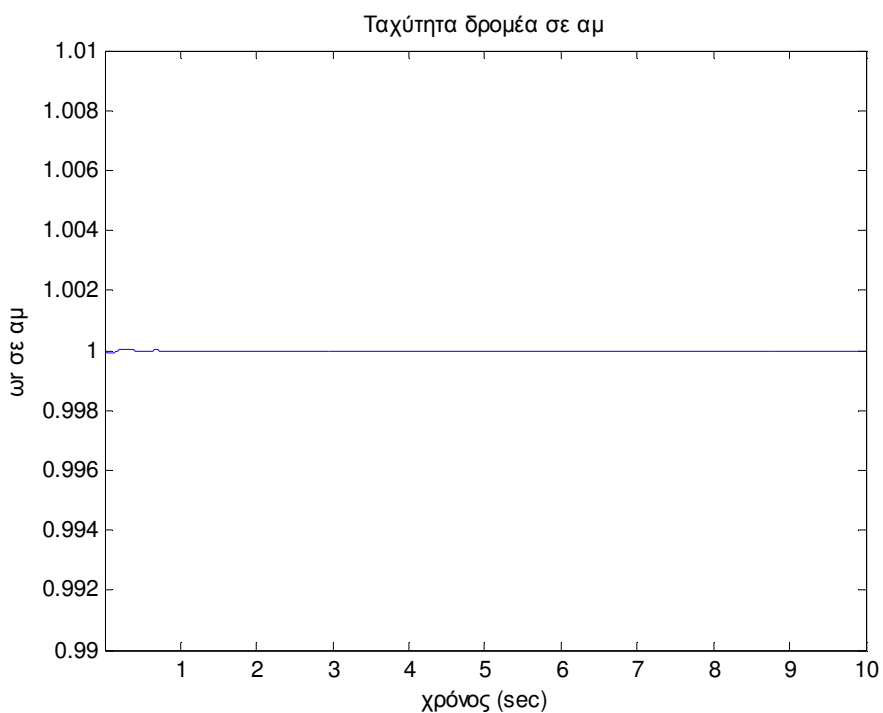
η αρχική μηχανική ροπή εισόδου της γεννήτριας θα είναι ίση με το 80% της ονομαστικής της τιμής. Εφόσον μεταβάλλαμε την μηχανική ροπή εισόδου από το 80% της ονομαστικής της τιμής στο 72% της ονομαστικής της τιμής, τότε αναμένουμε και η ηλεκτρομαγνητική ροπή εξόδου να ακολουθήσει την ίδια μεταβολή έτσι ώστε η ταχύτητα του δρομέα της μηχανής να παραμένει σταθερή και ίση με την σύγχρονη ταχύτητα καθώς ισχύει :

$$T_m - T_e - T_{damp} = 2H \cdot \frac{d\omega_r}{dt} \quad (7.9.3.2)$$

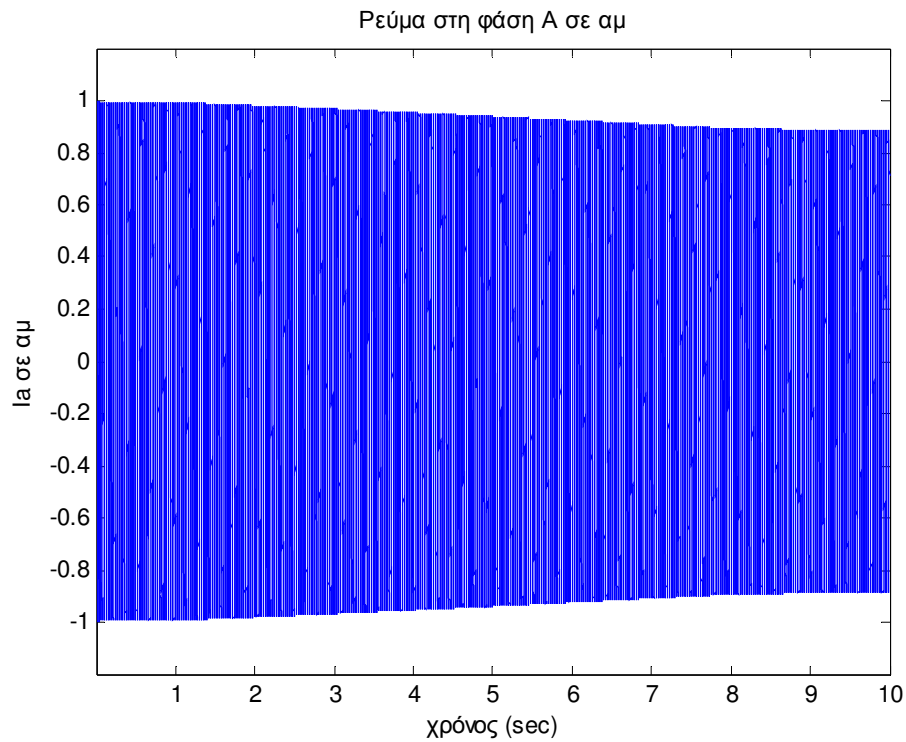


Η αρνητική της τιμή οφείλεται στο ότι η φορά της ηλεκτρομαγνητικής ροπής εξόδου είναι αντίθετη στην κίνηση του δρομέα της μηχανής. Έτσι εξηγείται και το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω γραφική παράσταση.

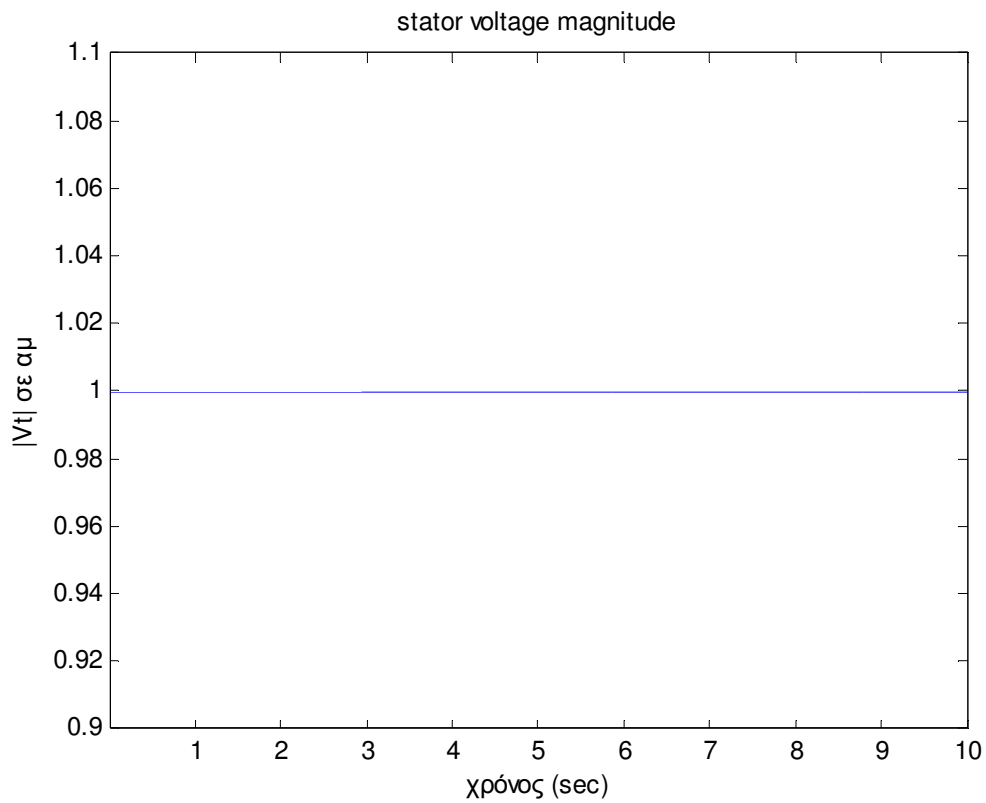
Η ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας παραμένει σταθερή και ίση με την σύγχρονη ταχύτητα σε ανά μονάδα τιμές.



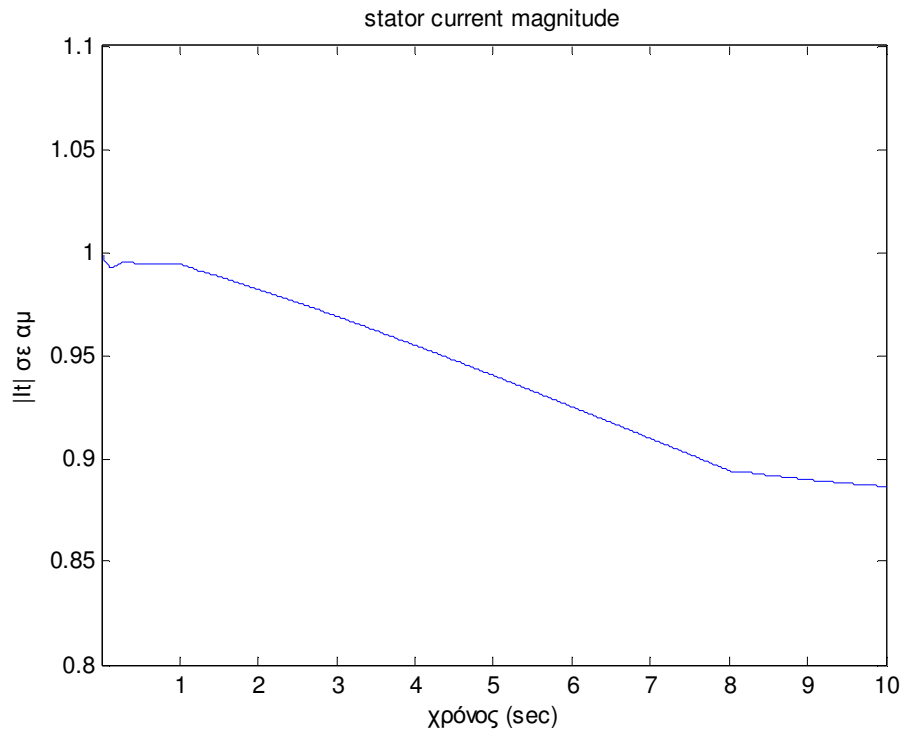
Το ρεύμα της φάσης A αρχικά μειώνεται και στη συνέχεια σταθεροποιείται.



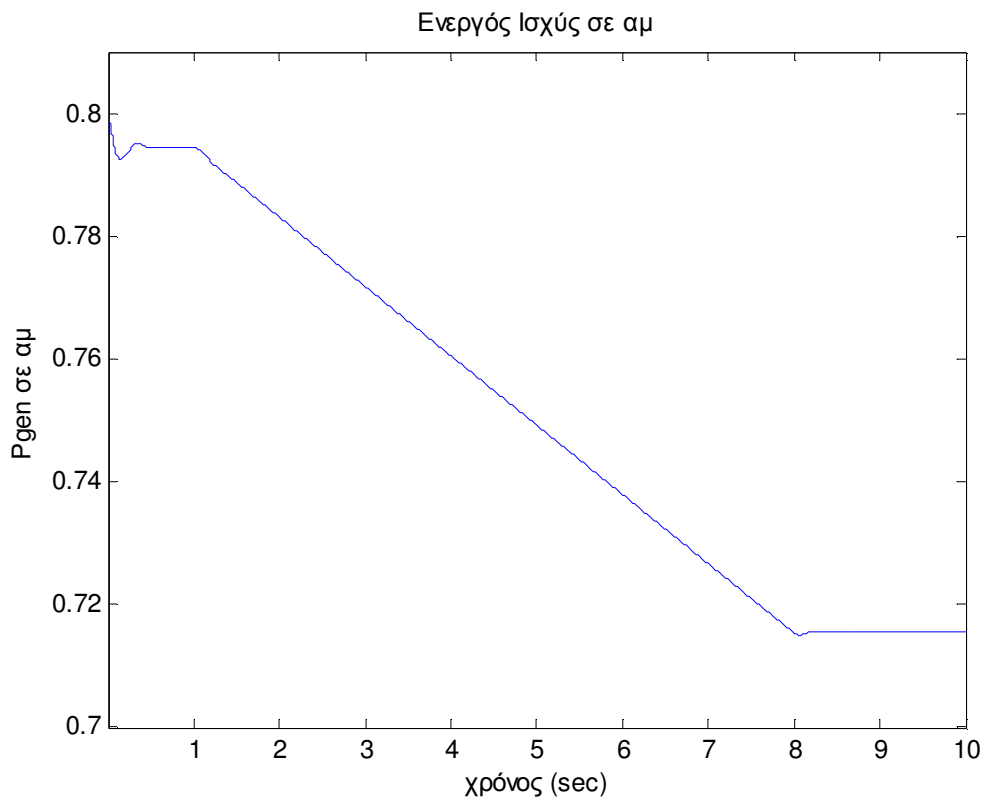
Η τερματική τάση της γεννήτριας θεωρείται σταθερή και ίση με 1 σε ονομαστικά μεγέθη εφόσον είναι συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό.



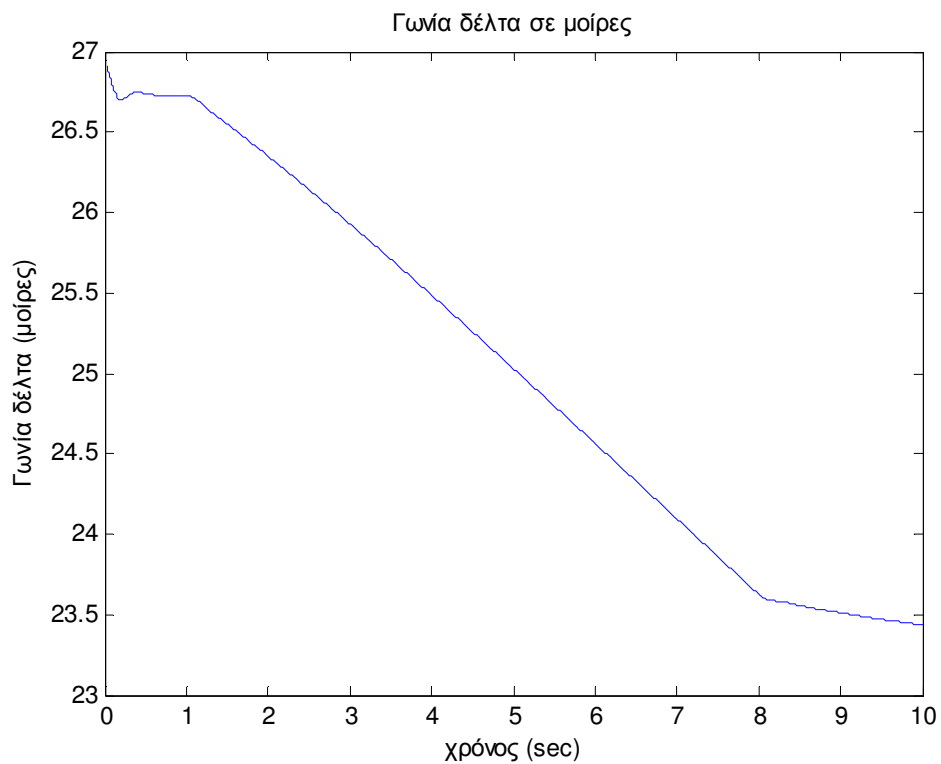
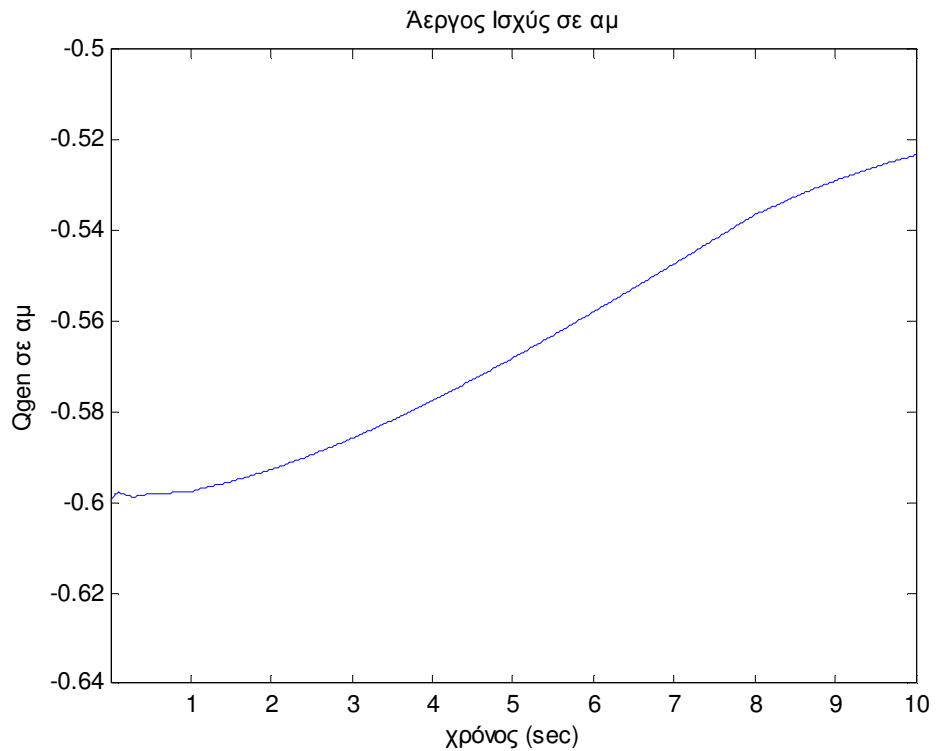
Το ρεύμα του στάτη αρχικά μειώνεται και στη συνέχεια σταθεροποιείται.



Η γεννήτρια παράγει ενεργό ισχύ και επειδή βρισκόμαστε στην περίπτωση χωρητικού συντελεστή ισχύος αναμένουμε μεταβολή της παραγωγής ενεργού ισχύος.



Βρισκόμαστε στην περίπτωση χωρητικού συντελεστή ισχύος οπότε αναμένουμε απορρόφηση επαγωγικής άεργου ισχύος (ή διαφορετικά παροχή χωρητικού άεργου ισχύος) από την γεννήτρια με αρχική τιμή που εξαρτάται από τον συντελεστή ισχύος. Το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στο γεγονός ότι έχουμε απορρόφηση επαγωγικής άεργου ισχύος :

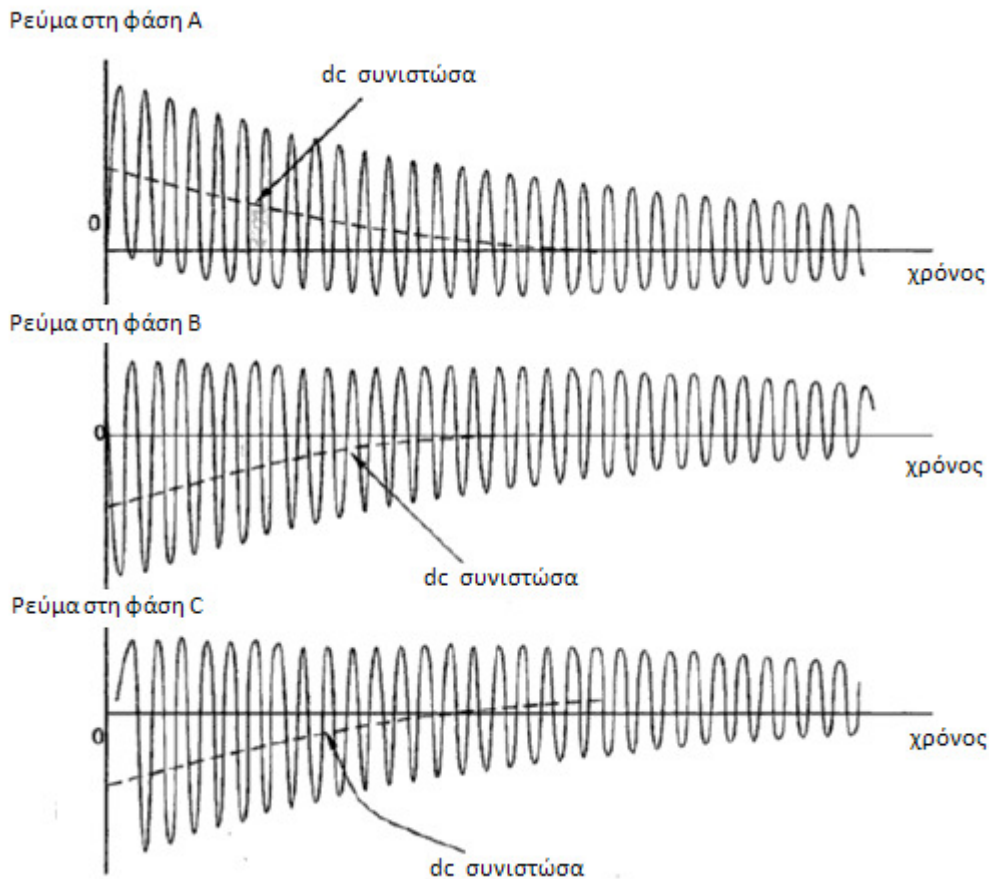


#### 7.9.4 Τριφασικό βραχυκύκλωμα <sup>[2],[6],[11],[12],[17],[18],[24]</sup>

Πριν προχωρήσουμε στην προσομοίωση των αποτελεσμάτων ενός τριφασικού βραχυκυκλώματος, καλό θα ήταν να αναφέρουμε τι ακριβώς γίνεται κατά την διάρκεια ενός τριφασικού βραχυκυκλώματος. Όταν συμβεί ένα βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες μιας σύγχρονης μηχανής μεταξύ των οποίων επικρατεί μία τάση, εμφανίζεται ένα μεταβατικό φαινόμενο κατά τη διάρκεια του οποίου τα ρεύματα αποκτούν πολύ μεγάλες τιμές. Τη μέγιστη τιμή του ρεύματος μετά από ένα απότομο βραχυκύκλωμα μιας σύγχρονης μηχανής που είχε ονομαστική τάση στους ακροδέκτες της, ονομάζουμε κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης. Η τιμή αυτή εμφανίζεται όταν το βραχυκύκλωμα γίνει σε μια στιγμή που είναι ιδιαίτερα δυσμενής. Μετά από μερικά δευτερόλεπτα η μεταβατική κατάσταση τελειώνει και ακολουθεί η μόνιμη κατάσταση, όπου έχουμε το ρεύμα μόνιμης κατάστασης.

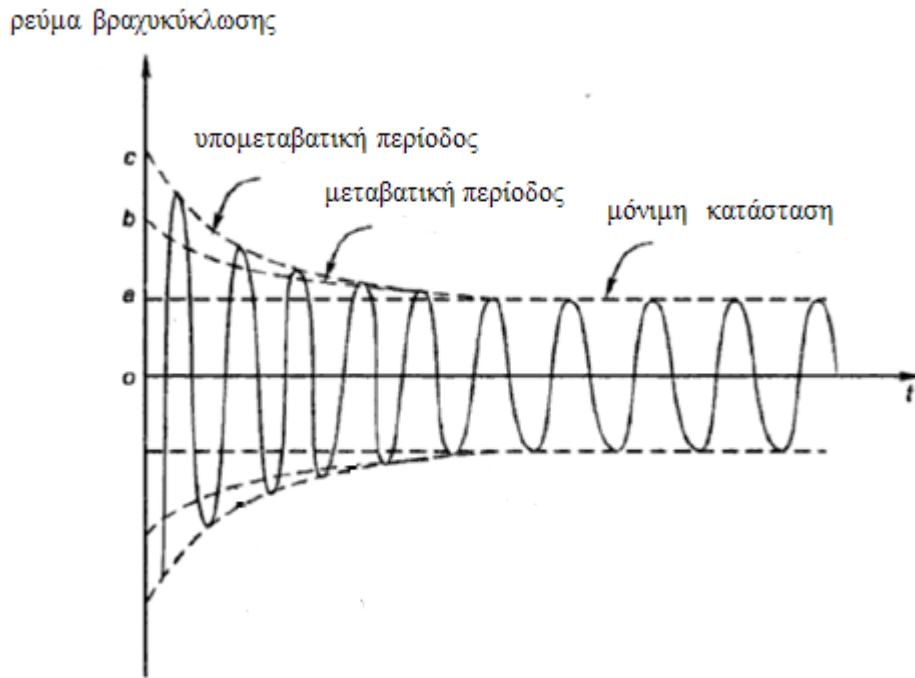
Το κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης δημιουργεί μεγάλες ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις, οι οποίες επενεργούν δυσμενώς ιδιαίτερα στις κεφαλές των τυλιγμάτων. Το μόνιμο βραχυκύκλωμα χρησιμεύει για τον προσδιορισμό ορισμένων σημαντικών στοιχείων της μηχανής. Για αυτό πολύ συχνά γίνεται ένα σκόπιμο βραχυκύκλωμα και ακολουθούν διάφορες μετρήσεις. Στις περιπτώσεις αυτές, για να αποφύγουμε το επικίνδυνο κρουστικό ρεύμα, στρέφουμε την μηχανή με την ονομαστική ταχύτητα, βραχυκυκλώνουμε τον στάτη και κρατάμε την διέγερση σταθερή ή την αυξάνουμε. Η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης εξαρτάται από την τιμή της τάσης κατά τη στιγμή που γίνεται το βραχυκύκλωμα και από τον αριθμό των φάσεων που βραχυκυκλώνονται. Έτσι, στην περίπτωσή μας θα αναφερθούμε στο τριφασικό βραχυκύκλωμα αφού θα βραχυκυκλώσουμε και τις τρεις φάσεις στην έξοδο του στάτη <sup>[2],[18]</sup>.

Όταν λοιπόν σε μια σύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωθούν και οι τρεις φάσεις του στάτη, τα φασικά ρεύματα μοιάζουν με αυτά του σχήματος 7.14. Όπως φαίνεται στο σχήμα εμφανίζεται μια συνεχή dc συνιστώσα (dc component) που προστίθεται στην εναλλασσόμενη συνιστώσα της κάθε φάσης (ac component).



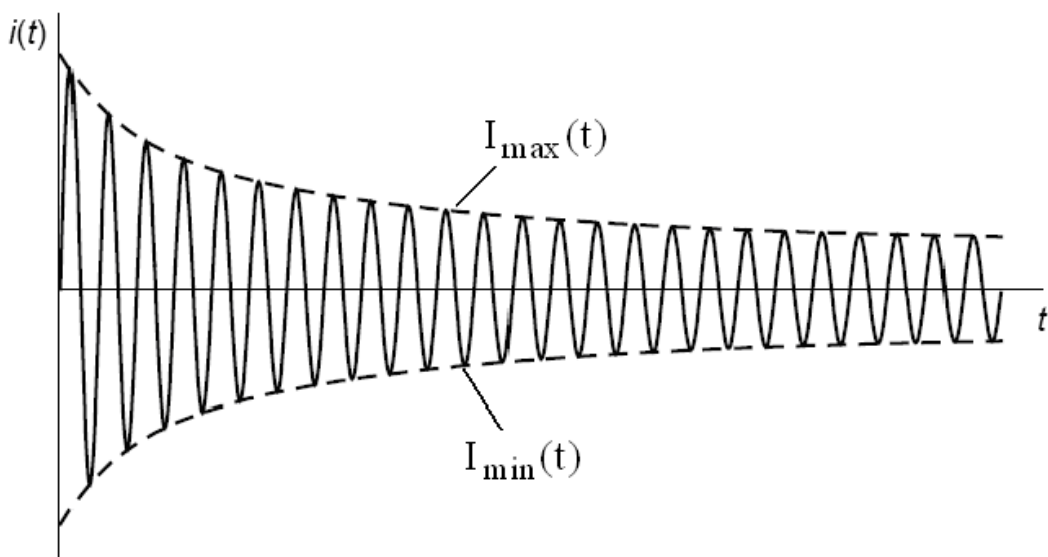
**Σχήμα 7.14** Ρεύματα βραχυκύκλωσης σύγχρονης γεννήτριας για κάθε φάση στην μόνιμη κατάσταση κατά την ανάπτυξη τριφασικού βραχυκυκλώματος<sup>[11]</sup>.

Πριν την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, οι τάσεις και τα ρεύματα της γεννήτριας διέθεταν μόνο εναλλασσόμενες συνιστώσες. Η ανάπτυξη της συνεχούς συνιστώσας οφείλεται στην επαγωγική φύση της σύγχρονης γεννήτριας. Όμως, η μεταβολή του ρεύματος μιας αυτεπαγωγής δεν είναι δυνατόν να συμβεί ακαριαία. Κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος στην γεννήτρια, η εναλλασσόμενη τάση στην γεννήτρια παίρνει μια πολύ μεγάλη τιμή αλλά το συνολικό ρεύμα της δεν είναι δυνατόν να αυξηθεί με τον ίδιο ρυθμό. Η τιμή μάλιστα της συνεχούς συνιστώσας του ρεύματος είναι τέτοια ώστε το άθροισμα συνεχούς και εναλλασσόμενης τάσης πριν και μετά το βραχυκύκλωμα να είναι ίσες. Επειδή κατά το βραχυκύκλωμα οι στιγμιαίες τιμές των ρευμάτων της κάθε φάσης είναι διαφορετικές, το πλάτος της συνεχούς συνιστώσας στην κάθε φάση θα είναι διαφορετικό.



**Σχήμα 7.15** Η συμμετρική εναλλασσόμενη συνιστώσα του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

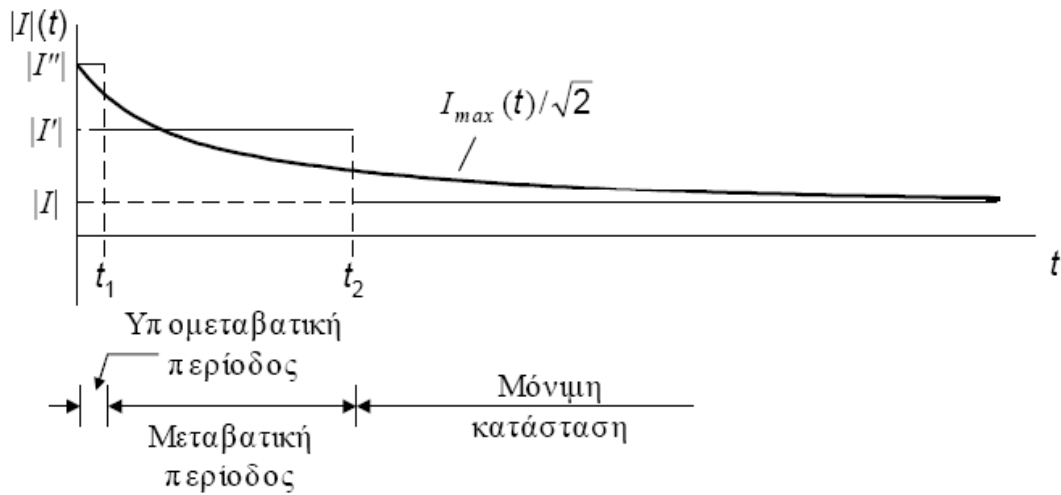
Η συμμετρική συνιστώσα του σχήματος 7.15 μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις περιόδους. Η πρώτη περίοδος αμέσως μετά το βραχυκύκλωμα ονομάζεται υπομεταβατική και η στιγμιαία τιμή του το ρεύματος μειώνεται πολύ γρήγορα. Ακολουθεί η μεταβατική περίοδος όπου το ρεύμα συνεχίζει να μειώνεται αλλά με μικρότερο ρυθμό. Όταν πια το ρεύμα παύει να μεταβάλλεται, βρισκόμαστε στην περίοδο της μόνιμης κατάστασης. Οι περιβάλλουσες καμπύλες που φαίνονται με διακεκομμένες γραμμές στο σχήμα 7.16 δείχνουν τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλονται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του ρεύματος :



**Σχήμα 7.16** Στιγμιαίο ρεύμα στάτη μετά από το βραχυκύκλωμα.



Διαιρώντας τις μέγιστες τιμές του σχήματος 7.16 με το  $\sqrt{2}$ , προκύπτει η κυματομορφή που δείχνει τον τρόπο μεταβολής της ενεργούς τιμής (rms) του ρεύματος του στάτη.



**Σχήμα 7.17** Ενεργός τιμή του ρεύματος στην υπομεταβατική, μεταβατική περίοδο και στη μόνιμη κατάσταση.

Η ενεργός τιμή του ρεύματος κατά την υπομεταβατική περίοδο ονομάζεται υπομεταβατικό ρεύμα και το συμβολίζουμε με  $I''$ . Αυτό το ρεύμα οφείλεται στο τύλιγμα απόσβεσης των σύγχρονων γεννητριών και είναι αρκετά μεγαλύτερο του ρεύματος της μόνιμης κατάστασης. Η ενεργός τιμή του ρεύματος κατά την μεταβατική περίοδο ονομάζεται μεταβατικό ρεύμα και το συμβολίζουμε με  $I'$ . Το ρεύμα αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, στο κύκλωμα διέγερσης την γεννήτριας, επάγεται κάποιο ρεύμα το οποίο με την σειρά του αυξάνει την τάση που παράγεται στο εσωτερικό της μηχανής. Αυτή η τάση αυξάνει το ρεύμα βραχυκύκλωσης της γεννήτριας σε αυτήν την περίοδο και η τιμή του είναι περίπου πενταπλάσια από αυτή του ρεύματος της μόνιμης κατάστασης.

Στις περισσότερες μηχανές, η υπομεταβατική περίοδος έχει πολύ μικρή διάρκεια και εκτείνεται από 0 έως και 0.1 δευτερόλεπτα, η μεταβατική περίοδος φτάνει μέχρι και τα 5 (περίπου) δευτερόλεπτα, ενώ μετά τα 5 δευτερόλεπτα αρχίζει η περίοδος της μόνιμης κατάστασης <sup>[6],[12],[17],[24]</sup>.

Τα στοιχεία που προστατεύουν το κύκλωμα από βραχυκύκλωμα, το διακόπτουν όταν ανιχνεύσουν υψηλές εντάσεις ρευμάτων. Τέτοια στοιχεία είναι:

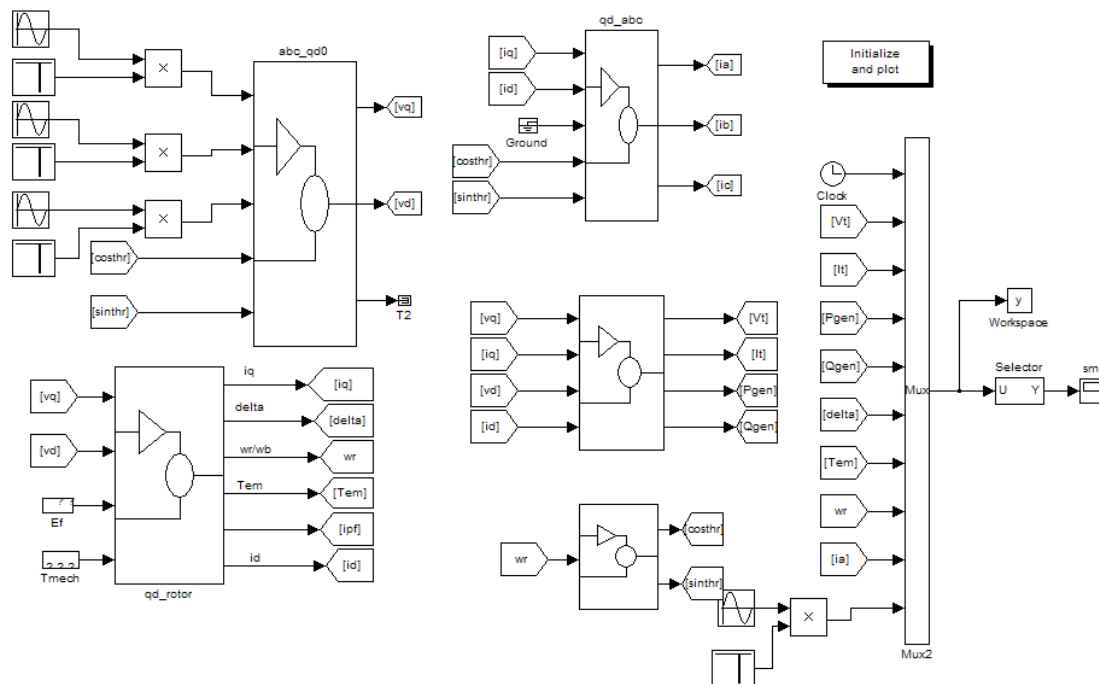
- Οι ασφάλειες, όπου τήκεται ένα μεταλλικό στοιχείο λόγω της διαρροής του ρεύματος
- Οι αυτόματοι διακόπτες ισχύος

Οι χαρακτηριστικές παράμετροι των στοιχείων προστασίας είναι :

- Το μέγεθος του διακοπόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης
- Ο χρόνος διακοπής (από τη στιγμή της αναγνώρισης ύπαρξης σφάλματος και εντολής διακοπής έως την πλήρη διακοπή κάθε μορφής ροής ρεύματος)

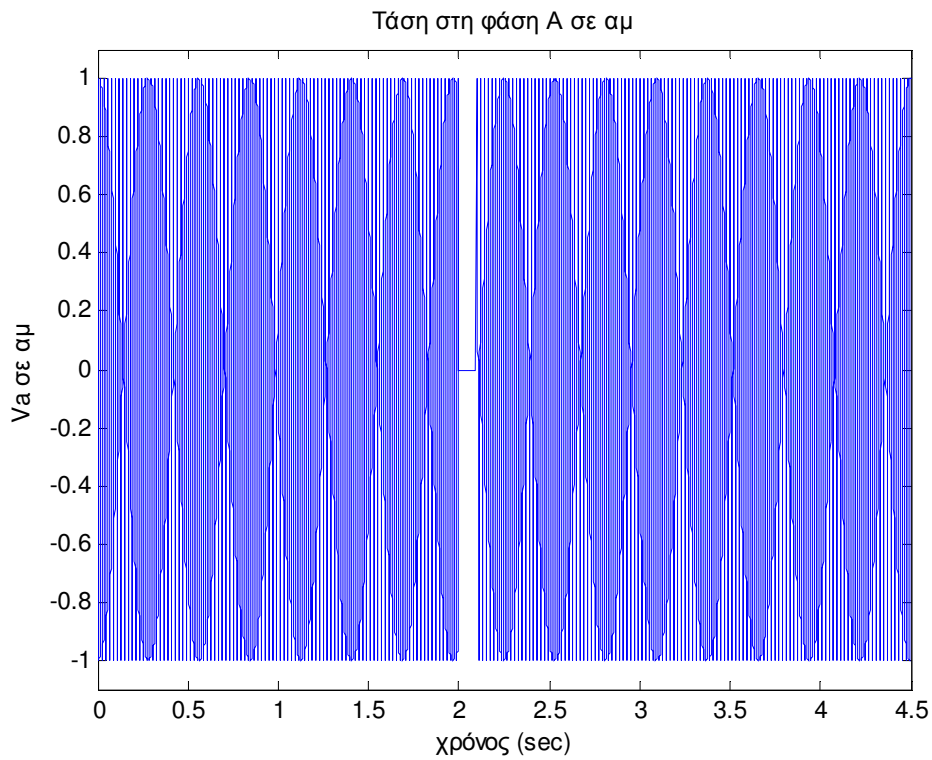
Ο χρόνος διακοπής πέραν κάποιας σκόπιμης καθυστέρησης που ρυθμίζεται από τους ηλεκτρονόμους (βοηθητικά ρελαί που δίνουν την εντολή διακοπής), περιλαμβάνει και χρόνους καθυστέρησης λόγω των φυσικών φαινομένων διακοπής. Κατά τη φάση διακοπής, στην εκκίνηση του φαινομένου απομάκρυνσης των αγωγίμων επαφών του διακόπτη αναπτύσσεται ηλεκτρικό τόξο στον ενδιάμεσο χώρο (που πληρώνεται από κάποιο διακοπτικό - μονωτικό μέσο όπως αέρας, SF<sub>6</sub>, κενό, μονωτικό έλαιο). Ο φυσικός μηχανισμός για την αποκατάσταση της μόνωσης στο εσωτερικό διακόπτη (σβέση του τόξου με εξάλειψη όλων των αγωγίμων φορέων και αποκατάσταση της διηλεκτρικής αντοχής μεταξύ των επαφών του διακόπτη) απαιτεί κάποιο χρόνο.

Η μελέτη του βραχυκυκλώματος της γεννήτριας στην προκειμένη διπλωματική εργασία έγινε με την υπόθεση ότι έχουμε επαγωγικό συντελεστή ισχύος. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, εφαρμόζουμε τριφασικό βραχυκύκλωμα μετά το πέρασ δύο δευτερολέπτων (την χρονική στιγμή  $t = 2\text{sec}$ ) στο δυναμικό μοντέλο που έχει κατασκευαστεί. Η διάρκεια του βραχυκυκλώματος που επιλέχθηκε είναι 80 msec ή αλλιώς 0.08 δευτερόλεπτα.

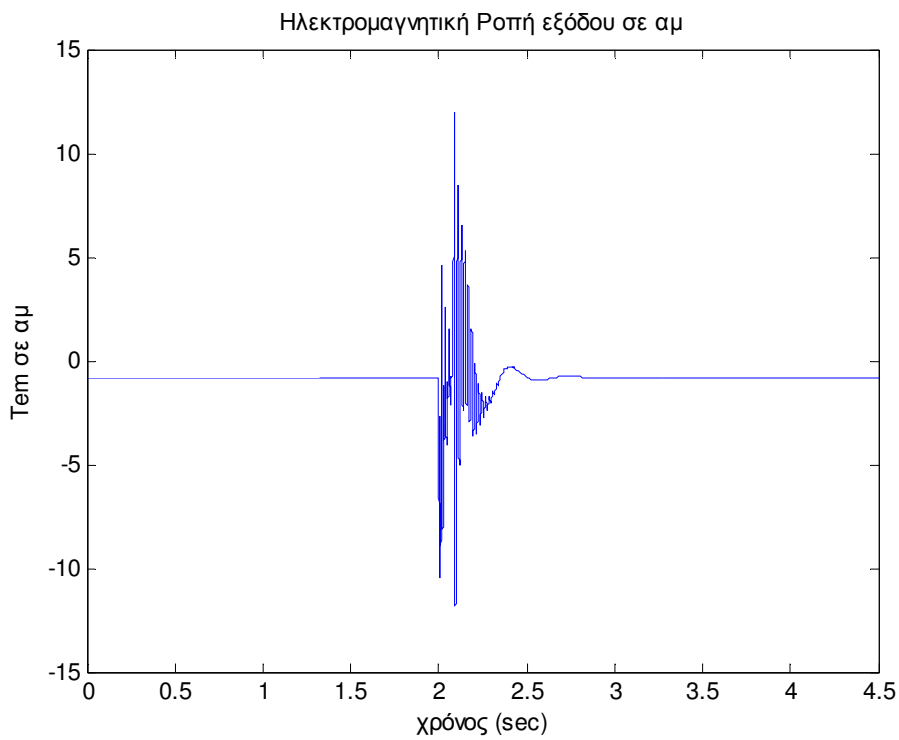


**Σχήμα 7.18** Το block διάγραμμα στο Simulink για το τριφασικό βραχυκύκλωμα.

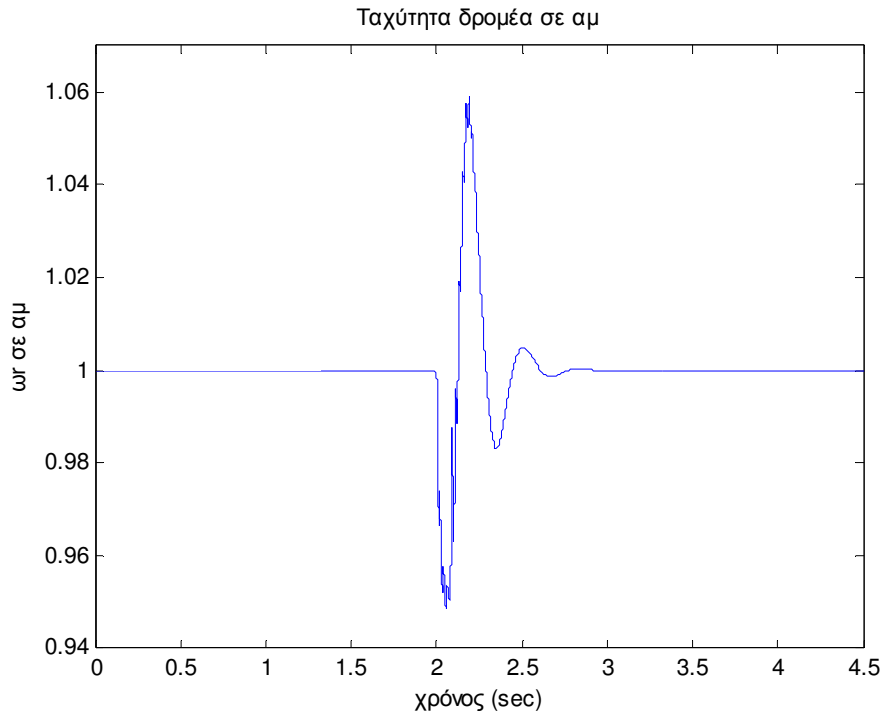
Προχωράμε να δούμε πως μεταβάλλονται κάποια μεγέθη κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος. Ενδεικτικά βλέπουμε τον μηδενισμό της μίας από τις τρεις φασικές τάσεις στην έξοδο την γεννήτριας.



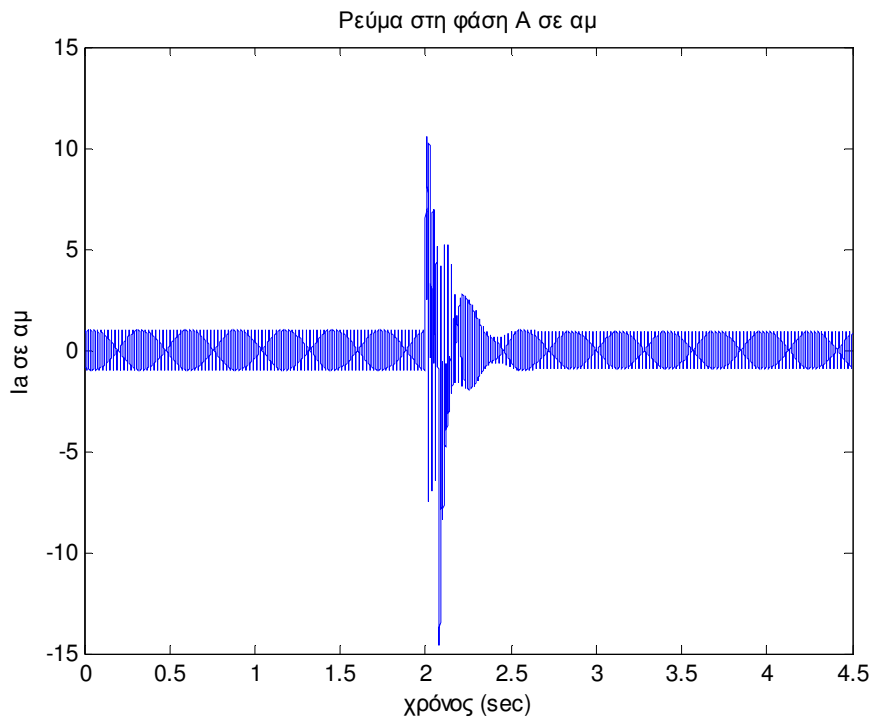
Η ηλεκτρομαγνητική ροπή τη στιγμή του βραχυκυκλώματος παίρνει, όπως αναμενόταν, υψηλές τιμές και στη συνέχεια επανέρχεται στην αρχική της τιμή.



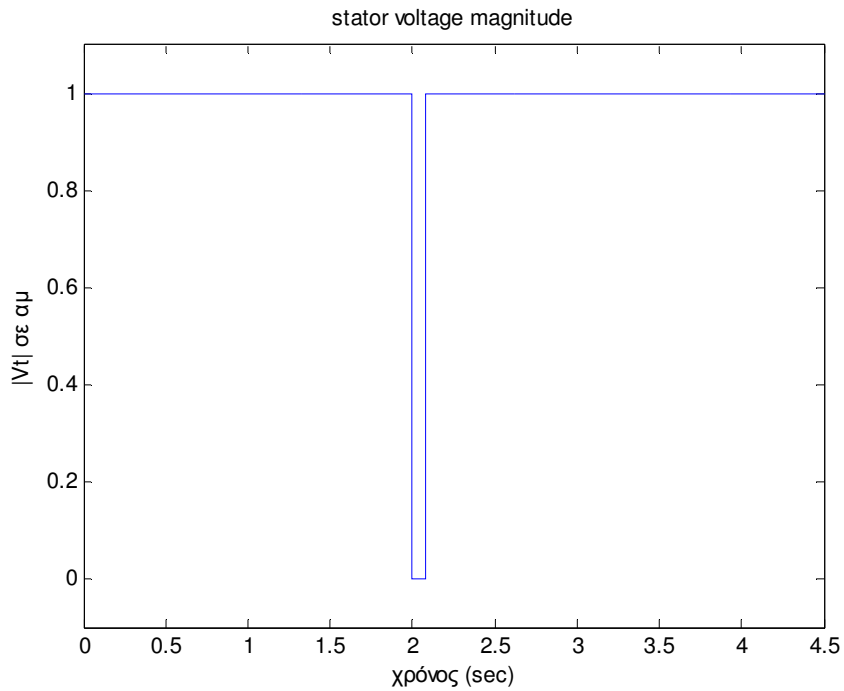
Η ταχύτητα του δρομέα επηρεάζεται από το τριφασικό βραχυκύκλωμα καθώς η ηλεκτρομαγνητική ροπή εξόδου, όπως φαίνεται παραπάνω, αρχικά μειώνεται και στη συνέχεια ταλαντεύεται. Συνεπώς, ανάλογη πορεία ακολουθεί και η ταχύτητα του δρομέα μέχρι τη στιγμή που θα σταθεροποιηθεί ξανά στη σύγχρονη ταχύτητα.



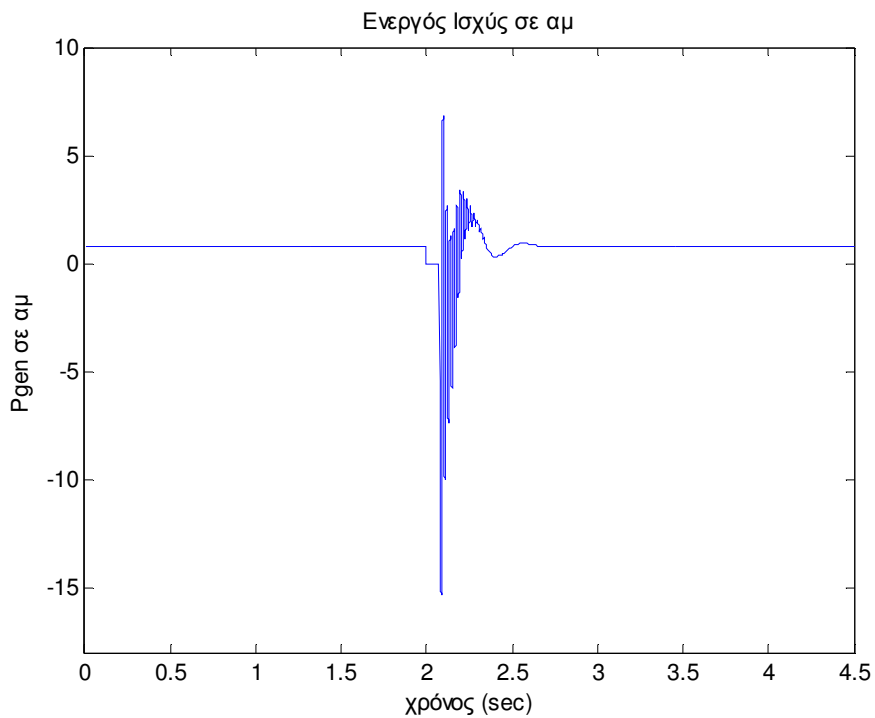
Το ρεύμα της φάσης A αυξάνει κατά τη διάρκεια του τριφασικού βραχυκυκλώματος επιβεβαιώνοντας την μορφή που αναμέναμε από τη θεωρία. Μετά το πέρας του βραχυκυκλώματος επανέρχεται στην ονομαστική του τιμή.



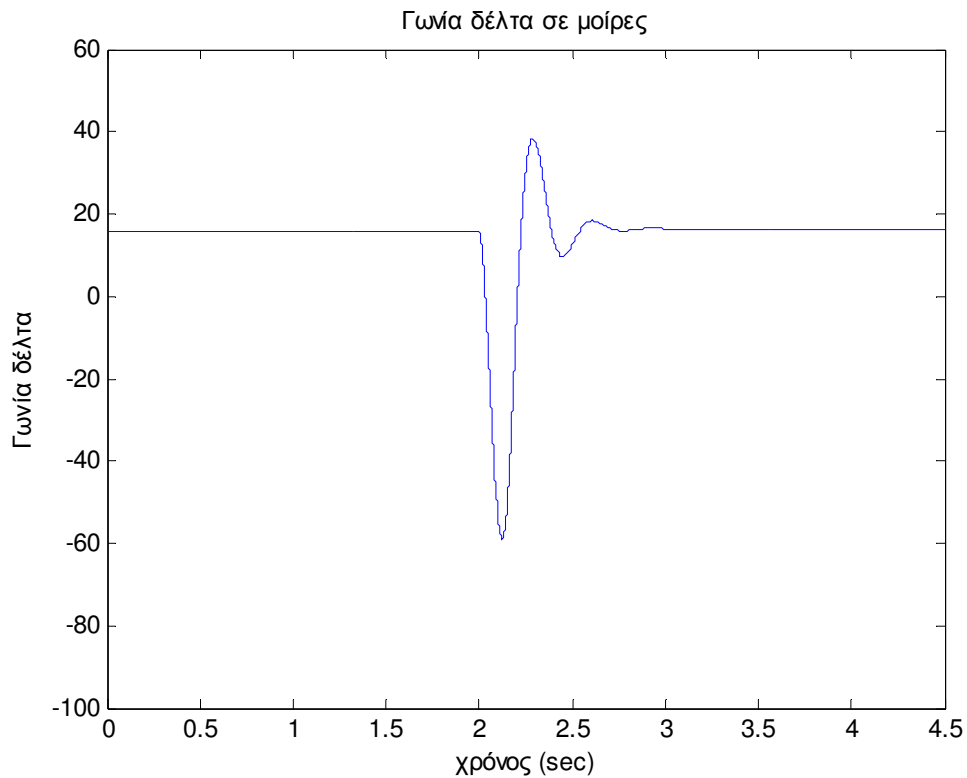
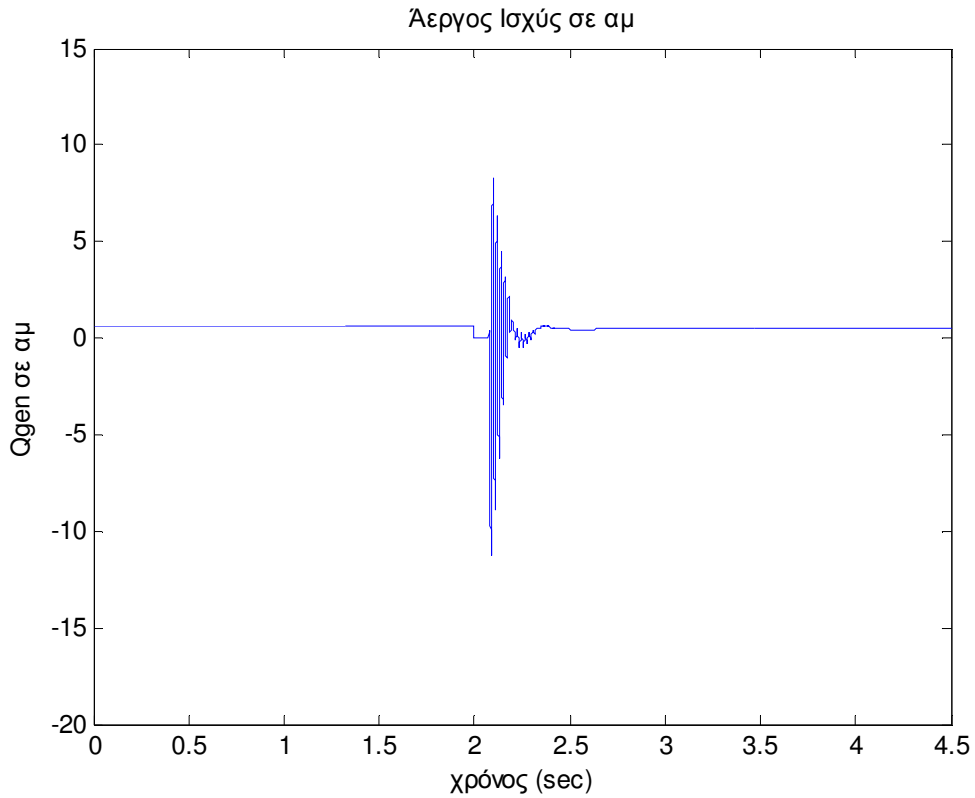
Η τερματική τάση του ζυγού μηδενίζεται ακαριαία όπως αναμενόταν, αφού ακαριαία βραχυκυκλώσαμε και τις τρεις τάσεις στους ακροδέκτες της γεννήτριας.



Η ενεργός ισχύς παίρνει ιδιαίτερα υψηλές τιμές κατά την εφαρμογή του τριφασικού βραχυκυκλώματος, ενώ μετά το πέρας αυτού επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή. Να θυμίσουμε ότι λόγω του επαγωγικού συντελεστή ισχύος που έχουμε θεωρήσει η ονομαστική τιμή της ενεργός ισχύος είναι ίση με 0.8.



Η άεργος ισχύς παίρνει αντίστοιχα υψηλές τιμές κατά την εφαρμογή του τριφασικού βραχυκυκλώματος, ενώ μετά το πέρας αυτού επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή. Η ονομαστική τιμή της άεργου ισχύος είναι ίση με 0.6 λόγω του επαγωγικού συντελεστή ισχύος που έχουμε θεωρήσει.



## 7.10 Η αξονική γεννήτρια ως ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης <sup>[14],[29]</sup>

Μέχρι το 1940 περίπου, σχεδόν όλες οι εγκαταστάσεις πλοίου ήταν συνεχούς ρεύματος με τάση 110 ή 220 V (ή 24 V σε μερικές περιπτώσεις). Σήμερα, οι εγκαταστάσεις είναι εναλλασσομένου ρεύματος (E.P.) και μόνο σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα (Σ.Ρ.). Η συχνότητα και η τάση στα πιο διαδεδομένα συστήματα E.P. είναι:

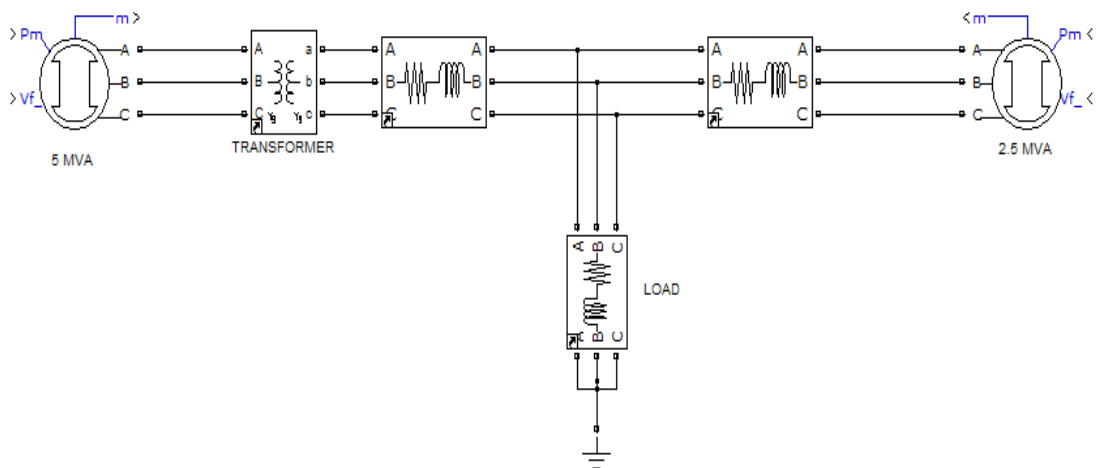
- 60 Hz / 440 V ή 50 Hz / 380 V για ηλεκτροπαραγωγή και κίνηση,
- 60 Hz / 110 V ή 50 Hz / 220 V για φωτισμό,
- 60Hz / 6.6 kV ή 11kV σε νεότερες εφαρμογές.

Τα δίκτυα Σ.Ρ. έχουν δύο ή τρεις αγωγούς (με το μεσαίο μονωμένο). Τα δίκτυα μονοφασικού E.P. έχουν δύο αγωγούς. Τα δίκτυα τριφασικού E.P. έχουν τρεις ή και τέσσερις αγωγούς (με τον ουδέτερο γειωμένο).

Οι εγκαταστάσεις E.P. έχουν μικρότερο βάρος και κόστος και μεγαλύτερη αξιοπιστία σε σύγκριση με τις εγκαταστάσεις Σ.Ρ. Επιπλέον, η συντήρησή τους είναι ευκολότερη. Όμως, το E.P. είναι πιο επικίνδυνο από το Σ.Ρ. από πλευράς ηλεκτροπληξίας. Αρκεί να σκεφτεί κανείς ότι Σ.Ρ. ακόμη και 220V δεν προκαλεί πάντοτε θανατηφόρο ηλεκτροπληξία, το E.P. αρχίζει να είναι επικίνδυνο από τα 60 V και άνω.

Σημειώνεται ότι οι ηλεκτρικές μηχανές και συσκευές πρέπει να είναι ικανές να λειτουργούν ακόμη και με κλίση 150° προς τα δεξιά ή αριστερά, με διατοιχισμό 22,5°, με διαμήκη κλίση 5° και προνευστασμό 7,5°. Πρέπει επίσης να μπορούν να λειτουργούν ικανοποιητικά σε τελική θερμοκρασία έως 85 °C όταν βρίσκονται εκτός μηχανοστασίου ή 90-95°C όταν βρίσκονται στο μηχανοστάσιο. Η τελική θερμοκρασία καθορίζεται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και τη θέρμανση του μηχανήματος κατά τη λειτουργία του. Ας σημειωθεί ότι η θερμοκρασία αυτή επηρεάζει τόσο την απόδοση του μηχανήματος όσο και τη διάρκεια ζωής του. Για παράδειγμα, μια επαφή ή ένας αυτόματος διακόπτης μπορεί να μη λειτουργήσει εάν υπερθερμανθεί. Όταν η θερμοκρασία αυξάνει, η τάση μιας γεννήτριας πέφτει, ενώ η ταχύτητα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος αυξάνει. Είναι απαραίτητος λοιπόν ο αερισμός των μηχανών, που όταν δεν είναι επαρκής για τη διατήρηση των θερμοκρασιών σε χαμηλά επίπεδα, συμπληρώνεται με κατάλληλο σύστημα ψύξης.

Η εγκατάσταση ηλεκτροπρόωσης, όπως ειπώθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, έχει ως σκοπό την τροφοδότηση τόσο των ηλεκτρικών κινητήρων πρόωσης, όσο και των υπόλοιπων ηλεκτρικών φορτίων του πλοίου. Οι αξονικές γεννήτριες μπορεί να συνδέονται με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο με σύνδεσμο συνεχούς ρεύματος ή να τροφοδοτούν αυτόνομα μόνο μεγάλα φορτία όπως οι κινητήρες βοηθητικής πρόωσης. Ενίοτε, σε έκτακτες περιπτώσεις (π.χ. μεγάλης έκτασης ζημιά στην κύρια μηχανή) μπορούν να λειτουργήσουν και αντίστροφα, δηλαδή ως ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης (τροφοδοτούμενες από τις άλλες ηλεκτρογεννήτριες) περιορισμένης ισχύος και να οδηγήσουν το σκάφος σε ασφαλή προορισμό.



**Σχήμα 7.19 :** Η αξονική γεννήτρια σε παράλληλη λειτουργία με μία μικρότερης ισχύος γεννήτρια. Έγινε χρήση μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσεως 11.000 / 380 V.

Σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχει μια άλλη μικρότερης ισχύος γεννήτρια, η οποία ενώ μέχρι εκείνη τη στιγμή λειτουργούσε βοηθητικά με την αξονική γεννήτρια συνεισφέροντας μαζί με αυτή στο φορτίο του ζυγού, πλέον λειτουργεί κοντά στα ονομαστικά της μεγέθη και αναλαμβάνει πλήρως τόσο το φορτίο του ζυγού όσο και να τροφοδοτήσει τον ηλεκτρικό κινητήρα πρόωσης. Έτσι, στην παρούσα διπλωματική η αξονική γεννήτρια των 5 MVA συνδέεται στον ίδιο ζυγό με μια μικρότερης ισχύος βοηθητική γεννήτρια των 2.5 MVA. Μετά από κάποια χρονική στιγμή, η αξονική γεννήτρια θα λειτουργήσει ως κινητήρας πρόωσης περιορισμένης ισχύος με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω. Η σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας της αξονικής γεννήτριας σε συνεργασία με μια άλλη, μικρότερης ισχύος, γεννήτρια φαίνεται στο σχήμα 7.19.

Επιπλέον, σημειώνεται ότι η αξονική γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία παράγει εναλλασσόμενη τάση 11.000 V, συνεπώς η χρήση μετασχηματιστή υποβιβασμού της τάσεως σε 380 V ήταν απαραίτητη για τη γεννήτρια των 5 MVA. Στη μικρότερη ισχύος γεννήτρια δεν χρειάστηκε κάτι τέτοιο καθώς παράγει εναλλασσόμενη τάση 380 V.

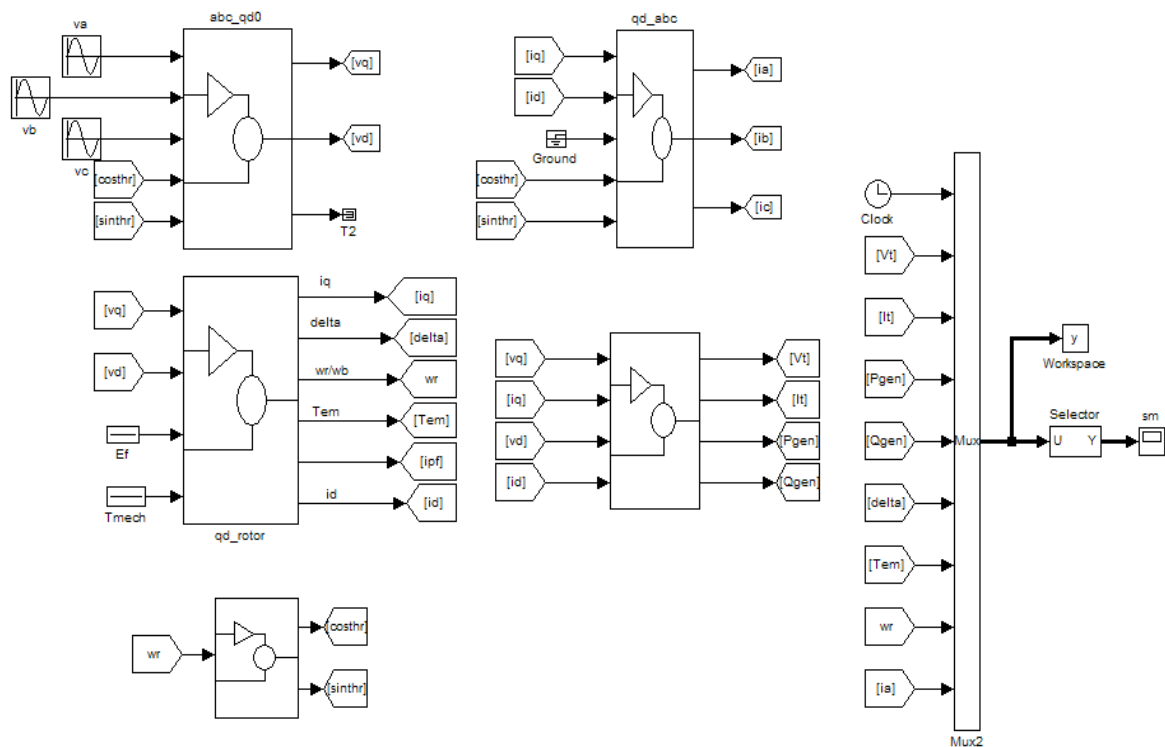
### 7.10.1 Μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς της αξονικής γεννήτριας

Στις μηχανές των πλοίων συμβαίνουν διάφορα μεταβατικά φαινόμενα. Στην προκειμένη περίπτωση θα μελετηθεί η δυναμική συμπεριφορά τόσο της αξονικής γεννήτριας όσο και της μικρότερης ισχύος ηλεκτρογεννήτρια. Πιο συγκεκριμένα, λόγω κάποιας βλάβης στην κύρια μηχανή του πλοίου θα υπάρξει απώλεια της ισχύος στην αξονική γεννήτρια και ταυτόχρονη ανάληψη φορτίου από την άλλη ηλεκτρογεννήτρια. Στο πρώτο στάδιο λειτουργίας τους, η αξονική γεννήτρια παίρνει μηχανική ισχύ από τον άξονα κίνησης του πλοίου (την προπέλα). Σε αυτό το στάδιο τόσο η αξονική γεννήτρια όσο και η μικρότερης ισχύος γεννήτρια τροφοδοτούν από κοινού το φορτίο του πλοίου στο ζυγό.



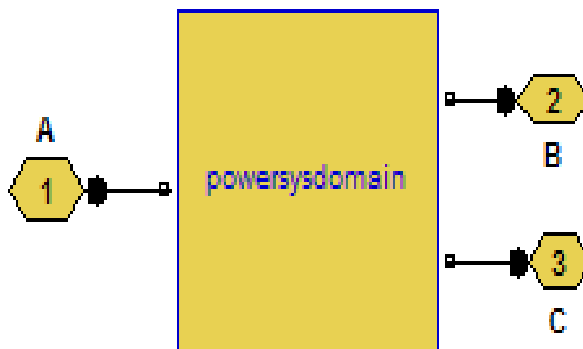
Στο δεύτερο, χρονικά, στάδιο λειτουργίας τους, η μεγάλης έκτασης ζημία στην κύρια μηχανή που συνδέεται με την προπέλα του πλοίου, αναγκάζει την αξονική γεννήτρια να λειτουργήσει αντίστροφα, δηλαδή ως ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης περιορισμένης ισχύος και να οδηγήσει το σκάφος σε ασφαλή προορισμό. Στην προκείμενη περίπτωση, η αξονική γεννήτρια των 5 MVA θα λειτουργήσει ως ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης, ενώ η βοηθητική γεννήτρια των 2.5 MVA θα είναι αυτή που θα αναλάβει εξ ολοκλήρου τόσο την τροφοδότηση του φορτίου όσο και του ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης.

Στην προσπάθεια αυτή να αποτυπωθούν τα αποτελέσματα της παραπάνω λειτουργίας θα χρησιμοποιηθεί το δυναμικό μοντέλο που κατασκευάστηκε. Η τελική του μορφή ήταν :



**Σχήμα 7.20 :** Το δυναμικό μοντέλο της αξονικής γεννήτριας.

Ένα από τα πρώτα προβλήματα ήταν να προσαρμοστεί το παραπάνω δυναμικό μοντέλο στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Το δυναμικό μοντέλο δέχεται σαν είσοδο τις τάσεις και σαν έξοδο παίρνει τα ρεύματα του στάτη και έχει κατασκευαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να θεωρείται ότι η μηχανή είναι συνδεδεμένη σε έναν άπειρο ζυγό. Δεδομένου ότι στο ζυγό έχουμε φορτίο, κατασκευάστηκε το παρακάτω block διάγραμμα στο Simulink με το οποίο μετριοούνται οι τάσεις και τα ρεύματα στην έξοδο του μοντέλου.



**Σχήμα 7.21** : Το block διάγραμμα στο Simulink.

Έχοντας την νέα τιμή της τάσης στην έξοδο του δυναμικού μοντέλου, αυτή στη συνέχεια χρησιμοποιείται ως είσοδο στο δυναμικό μοντέλο για να κάνει επίλυση με τα νέα δεδομένα του προβλήματος.

Επιπροσθέτως, επειδή εμπλέκονται δύο μηχανές στο σύστημα θα πρέπει αρχικά αυτές να είναι παραλληλισμένες για να μην τραβάει ρεύμα η μία από την άλλη. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να τηρούνται οι εξής προϋποθέσεις :

- Οι συχνότητες λειτουργίας των δύο γεννητριών πρέπει να είναι ίσες
- Να υπάρχει ίδια διαδοχή φάσεων
- Η φασική απόκλιση να είναι μηδενική
- Οι μεταξύ τους φασικές τάσεις να είναι ίδιες

Δεδομένου ότι τηρούνται αυτές, επιλέγονται τα καλώδια που συνδέουν την αξονική γεννήτρια και τη μικρότερης ισχύος γεννήτρια με το ζυγό. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι έλεγχοι ισχύος και διέγερσης που έγιναν στη μικρότερης ισχύος βοηθητική γεννήτρια, δηλαδή αυτή των 2.5 MVA. Αυτό σημαίνει ότι η αξονική γεννήτρια των 5 MVA θα δέχεται ως είσοδο μηχανική ισχύ από την προπέλα του πλοίου και θα διεγείρεται με σταθερή DC τάση.

### 7.10.1.1 Επιλογή καλωδίων <sup>[14],[29]</sup>

Ιδιαίτερη αξία έχει η μελέτη των τιμών των αντιστάσεων και των αυτεπαγωγών των καλωδίων από τις γεννήτριες στο ζυγό. Πιο συγκεκριμένα :

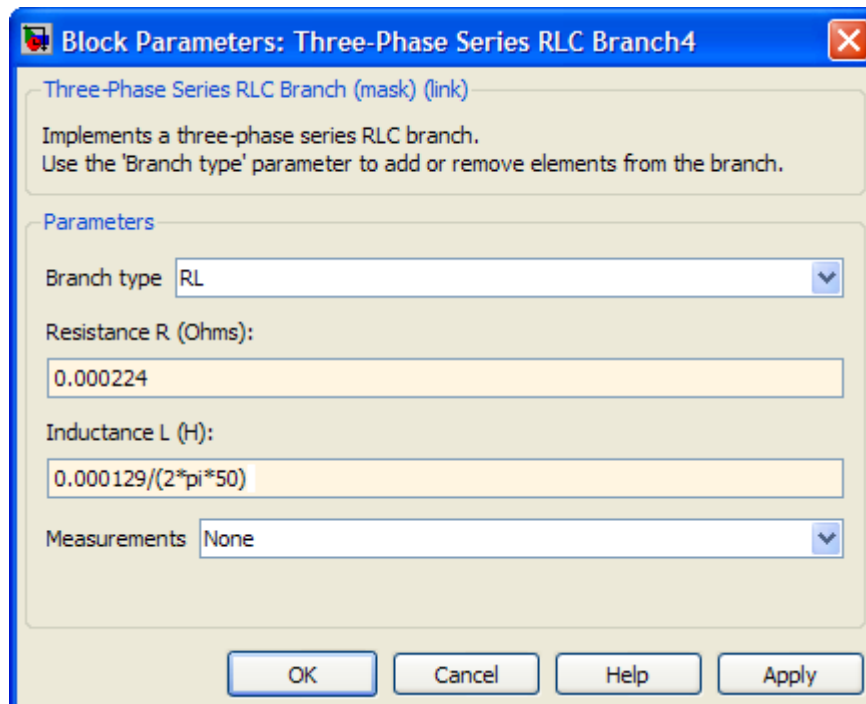
**A.** Καλώδιο από αξονική γεννήτρια έως ζυγό

**B.** Καλώδιο από γεννήτρια μικρότερης ισχύος έως ζυγό

	<b>A</b>	<b>B</b>
Διατομή καλωδίου	3 x (1*240)	3 x (1*240)
Μήκος καλωδίου	2 m	1 m
Τάση	380V	380V
Αντίσταση	0,000224 Ω/m	0,000224 Ω/m
Αυτεπαγωγή	0,000129 Ω/m	0,000129 Ω/m

*Πίνακας 7.3 : Οι αντιστάσεις και οι αυτεπαγωγές των καλωδίων.*

Ενδεικτικά, ο τρόπος που τοποθετήθηκαν οι παραπάνω τιμές για το καλώδιο που συνδέει τη γεννήτρια μικρότερης ισχύος στο ζυγό είναι :

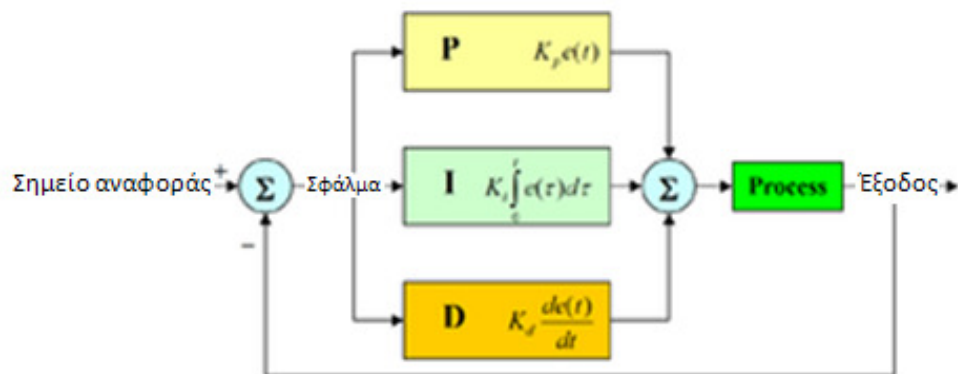


*Σχήμα 7.22 : Η αντίσταση και η αυτεπαγωγή καλωδίου.*

### 7.10.1.2 Περιγραφή των ελεγκτών

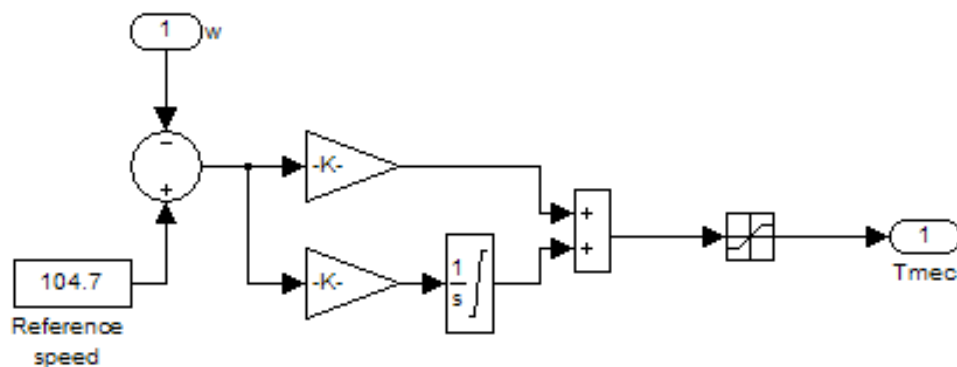
Οι δύο έλεγχοι, τόσο αυτός της ισχύος όσο και της διέγερσης, θα γίνουν στη μικρότερης ισχύος βοηθητική γεννήτρια, δηλαδή αυτή των 2.5 MVA. Αυτό σημαίνει ότι η αξονική γεννήτρια των 5 MVA θα δέχεται ως είσοδο μηχανική ισχύ από την προπέλα του πλοίου και θα διεγείρεται με σταθερή DC τάση.

#### α) Ο Ελεγκτής Ισχύος



Σχήμα 7.23 :: Ο PI ελεγκτής.

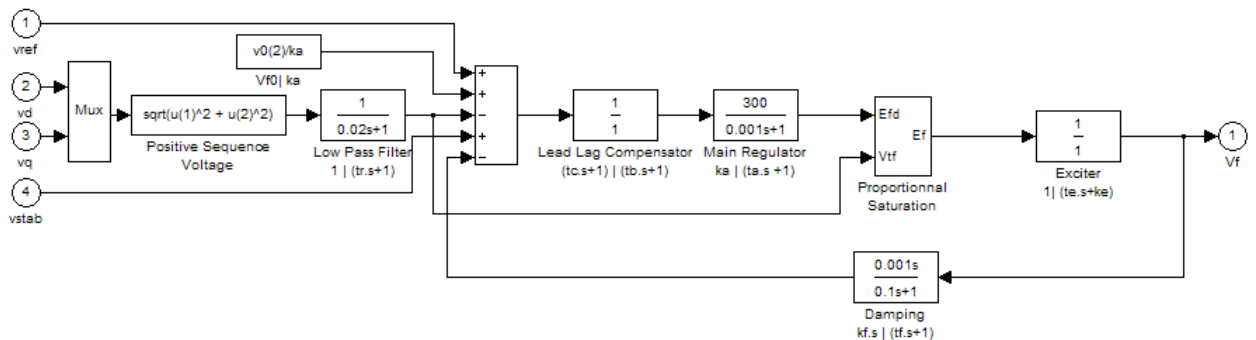
Ο πρώτος έλεγχος αφορά τον έλεγχο ισχύος. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιήθηκε ένας PI ελεγκτής για τη ρύθμιση ισχύος. Η λειτουργία ενός PI ελεγκτή έγκειται στο να υπολογίζει το σφάλμα μεταξύ μιας μετρημένης τιμής και της επιθυμητής τιμής και να προσπαθεί εν συνεχεία να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα. Στην προκειμένη περίπτωση, η λειτουργία του PI ελεγκτή είναι η εύρεση και η ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ της μετρούμενης ταχύτητας του δρομέα της βοηθητικής γεννήτριας των 2.5MVA και της επιθυμητής ονομαστικής των 1.000 ΣΑΛ ή διαφορετικά των 104.7 rad/sec.



Σχήμα 7.24 :: Ο PI ελεγκτής ισχύος.

## β) Έλεγχος Διέγερσης

Ο δεύτερος έλεγχος αφορά τον έλεγχο διέγερσης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε σύστημα διέγερσης για σύγχρονη μηχανή που ρυθμίζει την τερματική της τάση :



Σχήμα 7.25 : : Ο έλεγχος διέγερσης

όπου

$V_{ref}$  : η επιθυμητή τιμή της τερματικής τάσης σε αμ

$V_d$  : η d συνιστώσα της τάσης ακροδεκτών σε αμ

$V_q$  : η q συνιστώσα της τάσης ακροδεκτών σε αμ

$V_{stab}$  : για παροχή πρόσθετης σταθεροποίησης των ταλαντώσεων του συστήματος

$V_f$  : η τάση διέγερσης σε αμ

Να σημειωθεί πως ο έλεγχος διέγερσης (όπως και ο έλεγχος ισχύος) έγινε στην βοηθητική γεννήτρια των 2.5MVA. Αυτό σημαίνει ότι δεν έγινε καμία παρέμβαση στην αξονική γεννήτρια των 5 MVA, η οποία θα δέχεται ως είσοδο σταθερή μηχανική ισχύ από την προπέλα του πλοίου και θα διεγείρεται με σταθερή DC τάση.

### 7.10.2 Αποτελέσματα

Να σημειωθεί ότι η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της αξονικής γεννήτριας και της βοηθητικής γεννήτριας θα γίνει με διαφορετικού είδους μεταβολές κατά τις οποίες :

- Η αξονική γεννήτρια γίνεται άμεσα (βηματικά) κινητήρας στο 3<sup>ο</sup> δευτερόλεπτο, θεωρώντας χρονική στιγμή μηδέν αυτή που έχει φτάσει στη μόνιμη κατάσταση. Εκείνη τη χρονική στιγμή η αξονική γεννήτρια χάνει απότομα (βηματικά) τη μηχανική ισχύ από την προπέλα του πλοίου, ενώ ταυτόχρονα η βοηθητική γεννήτρια κάνει ανάληψη του φορτίου (αντίστοιχα με βηματικό τρόπο).
- Η αξονική γεννήτρια γίνεται βαθμιαία και γραμμικά κινητήρας (και συγκεκριμένα από το 3<sup>ο</sup> έως το 5<sup>ο</sup> δευτερόλεπτο) θεωρώντας και εδώ χρονική στιγμή μηδέν αυτή που έχει φτάσει στη μόνιμη κατάσταση. Η αξονική γεννήτρια χάνει σταδιακά (με γραμμικό τρόπο) τη μηχανική ισχύ από την προπέλα του πλοίου, ενώ ταυτόχρονα η βοηθητική γεννήτρια κάνει ανάληψη του φορτίου (αντίστοιχα με γραμμικό τρόπο).

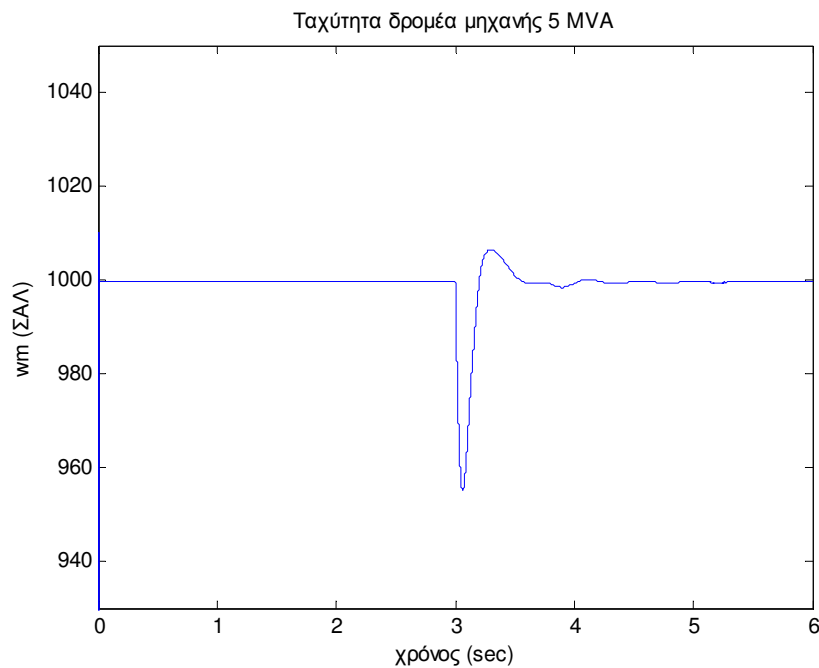
Άρα ισοδύναμα υποθέτουμε ότι η βλάβη στην κύρια μηχανή του πλοίου που τροφοδοτεί την προπέλα γίνεται βηματικά και βαθμιαία αντίστοιχα. Μια βηματική μεταβολή, πόσο μάλλον όταν έχουμε να κάνουμε με τις αδράνεις τέτοιων μηχανών, είναι αδύνατο να συμβεί στην πραγματικότητα. Παρόλα αυτά, στη μελέτη της λειτουργίας των μηχανών εξετάζονται συχνά τέτοιου είδους μεταβολές για να μελετηθεί η λειτουργία τους σε ακραίες μεταβολές. Τέλος, η διάρκεια των 2 δευτερολέπτων (από το 3<sup>ο</sup> έως και το 5<sup>ο</sup> δευτερόλεπτο) που θεωρήθηκε ότι χρειάζεται για να λειτουργήσει η αξονική γεννήτρια ως ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης επιλέχθηκε τυχαία ως μια σταθερά χρόνου.

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν αφορούν τις δοκιμές που έγιναν για βηματική ανάληψη και βαθμιαία ανάληψη φορτίου από τη βοηθητική γεννήτρια (ή ανάληψη φορτίου με γραμμικό τρόπο).

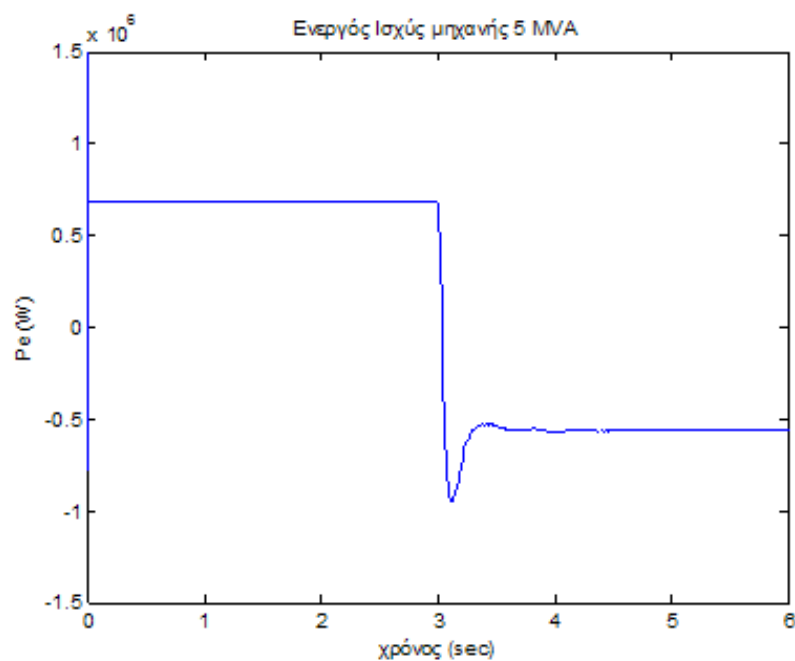
### 7.10.2.1 Βηματική ανάληψη φορτίου

#### α) Μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς αξονικής γεννήτριας

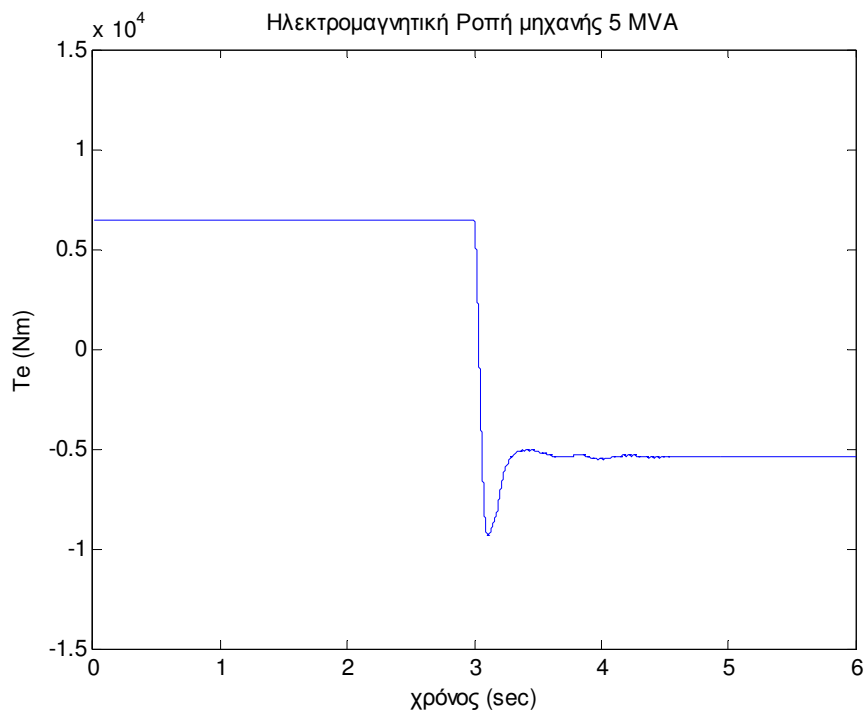
Η ταχύτητα του δρομέα της αξονικής γεννήτριας διατηρείται σταθερή μετά από ένα σύντομο μεταβατικό φαινόμενο τη χρονική στιγμή 3 sec. Αυτό οφείλεται αφενός στο γεγονός ότι ο PI ελεγκτής ισχύος έχει επέμβει στη βοηθητική γεννήτρια των 2.5MVA και αφετέρου στο ότι οι δυο γεννήτριες είναι μεταξύ τους συγχρονισμένες.



Η αξονική γεννήτρια των 5 MVA μετατρέπεται σε ηλεκτρικό κινητήρα πρόωσης. Το θετικό πρόσημο είναι η ενέργεια που παρέχει η αξονική γεννήτρια στο σύστημα, ενώ το αρνητικό πρόσημο μετά τα 3sec είναι πλέον η ηλεκτρική ενέργεια που απορροφά ο κινητήρας από τη βοηθητική γεννήτρια των 2.5 MVA.



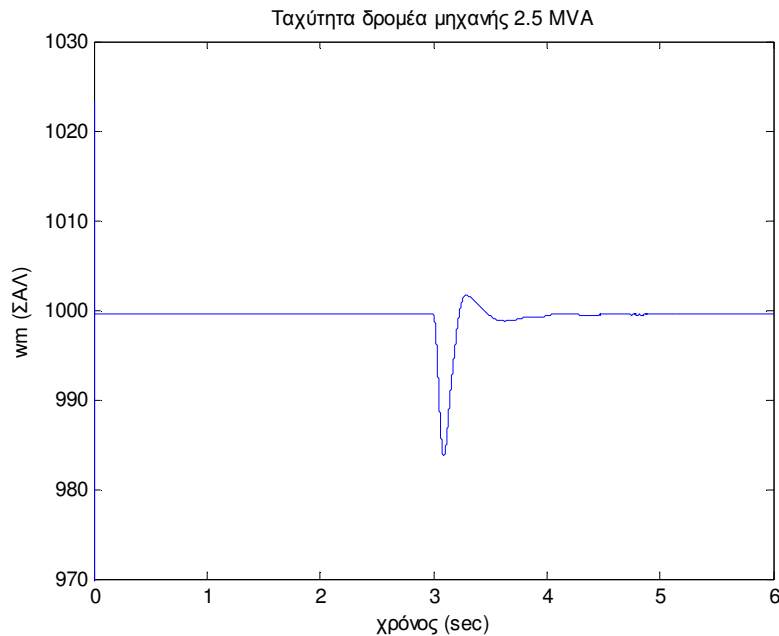
Αντίστοιχα, λόγω του ότι η αξονική γεννήτρια μετατρέπεται σε κινητήρας πρόωσης η ηλεκτρομαγνητική ροπή αλλάζει πρόσημο, ακολουθώντας την αλλαγή προσήμου της ενεργού ισχύος στο προηγούμενο διάγραμμα.



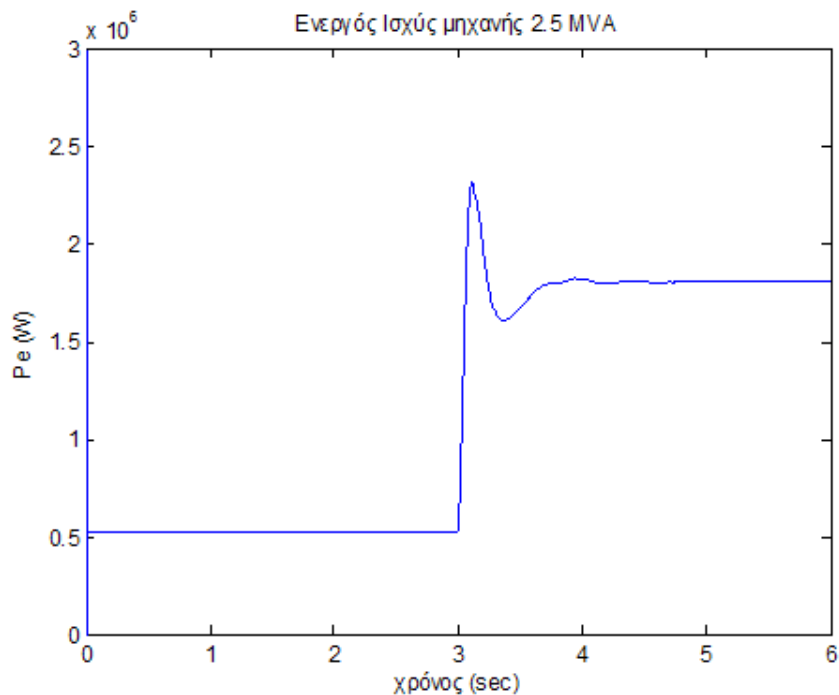


## β) Μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς βοηθητικής γεννήτριας

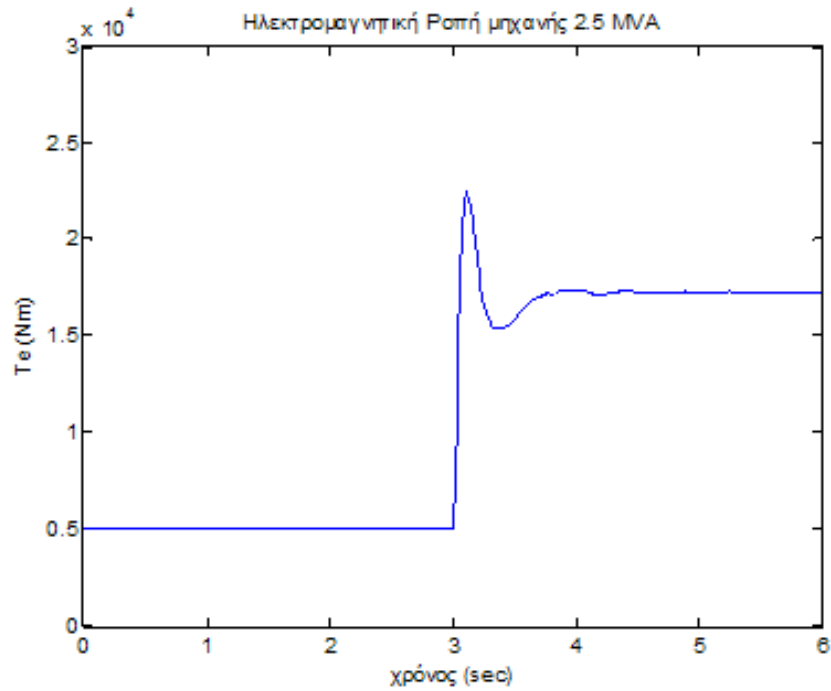
Η ταχύτητα του δρομέα της μικρότερης ισχύος βοηθητικής γεννήτριας των 2.5 MVA διατηρείται σταθερή μετά από ένα σύντομο μεταβατικό φαινόμενο τη χρονική στιγμή 3 sec. Ο PI ελεγκτής είναι αυτός που βοηθάει στο να διατηρηθεί σταθερή η ταχύτητα του δρομέα άρα και η συχνότητα λειτουργίας της μηχανής (και κατ' επέκταση του συστήματος).



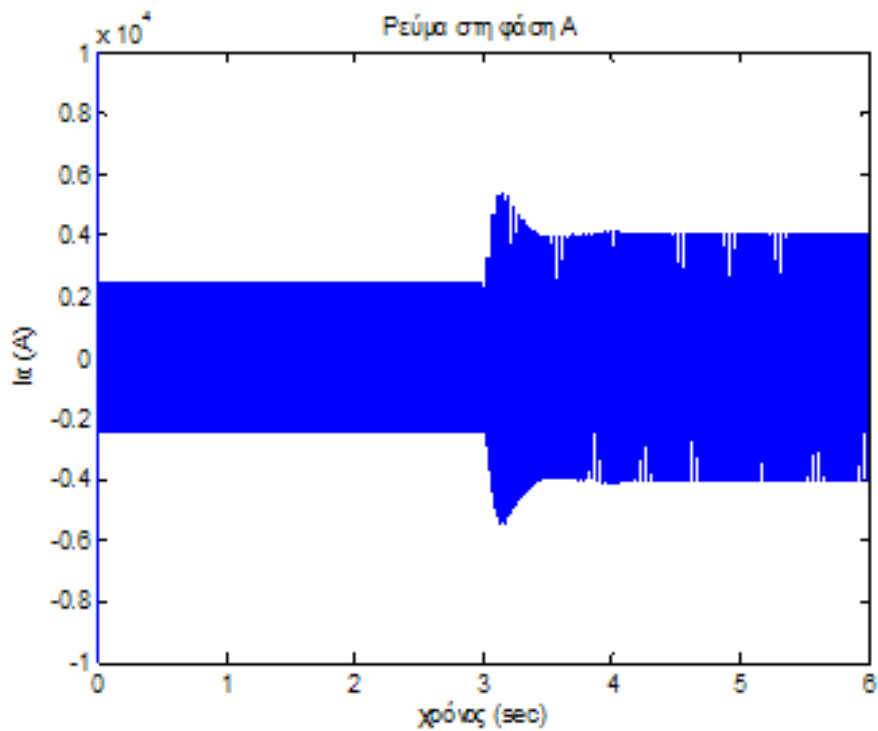
Η ενεργός ισχύς που παράγει η βοηθητική γεννήτρια αυξάνεται. Μέχρι τα 3 πρώτα sec αναλαμβάνει, από κοινού με την αξονική γεννήτρια, να τροφοδοτήσει το φορτίο, ενώ μετά το πέρας του 3<sup>ου</sup> sec αναλαμβάνει να τροφοδοτήσει εξ ολοκλήρου τόσο το φορτίο του πλοίου όσο και τον κινητήρα πρόωσης το ρόλο του οποίου παίζει πλέον η αξονική γεννήτρια.



Αντίστοιχα, η ηλεκτρομαγνητική ροπή της βοηθητικής γεννήτριας αυξάνεται, καθώς αυξάνεται και η ενεργός ισχύς που παράγει για να τροφοδοτήσει το φορτίο του πλοίου και τον κινητήρα πρόωσης.

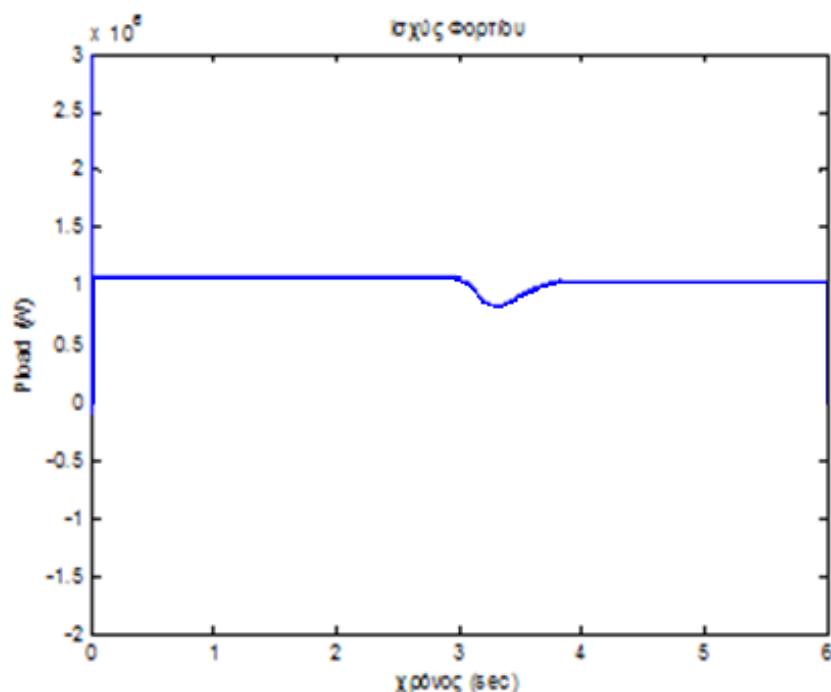


Το ρεύμα της βοηθητικής γεννήτριας των 2.5 MVA αυξάνεται, καθώς αυξάνεται και η ενεργός ισχύς που παράγει για να τροφοδοτήσει το φορτίο του πλοίου και τον κινητήρα πρόωσης.

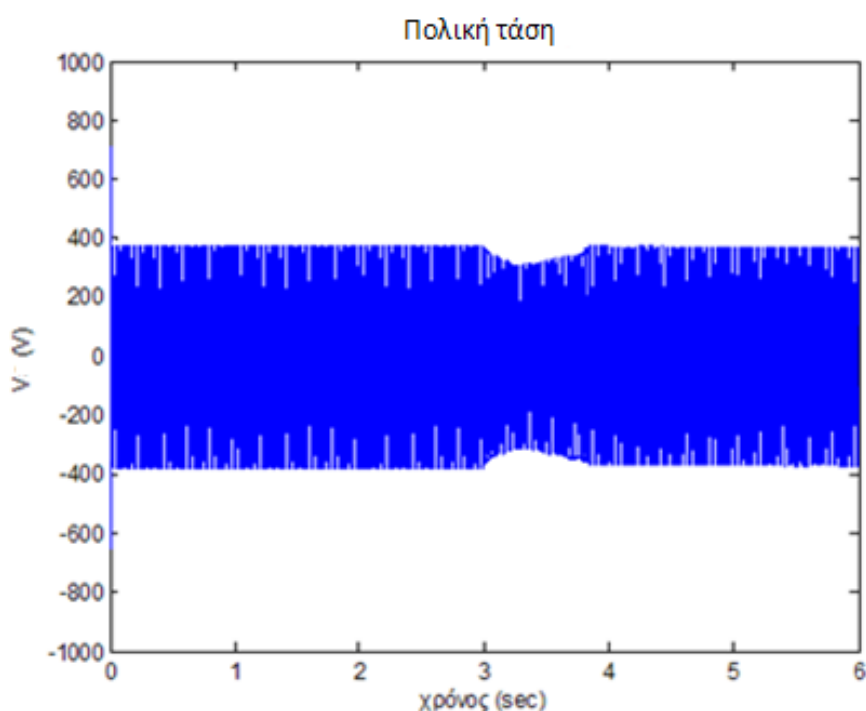


### γ) Ισχύς φορτίου και τάση στο ζυγό

Το φορτίο του ζυγού διατηρείται σταθερό και είναι αυτό που θα αναλάβει να τροφοδοτήσει η βοηθητική γεννήτρια των 2.5 MVA σε πρώτη φάση από κοινού με την αξονική γεννήτρια (μέχρι τα 3 πρώτα sec) και στη συνέχεια εξ ολοκλήρου η ίδια, καθώς η αξονική γεννήτρια έχει μετατραπεί σε κινητήρα πρόωσης.



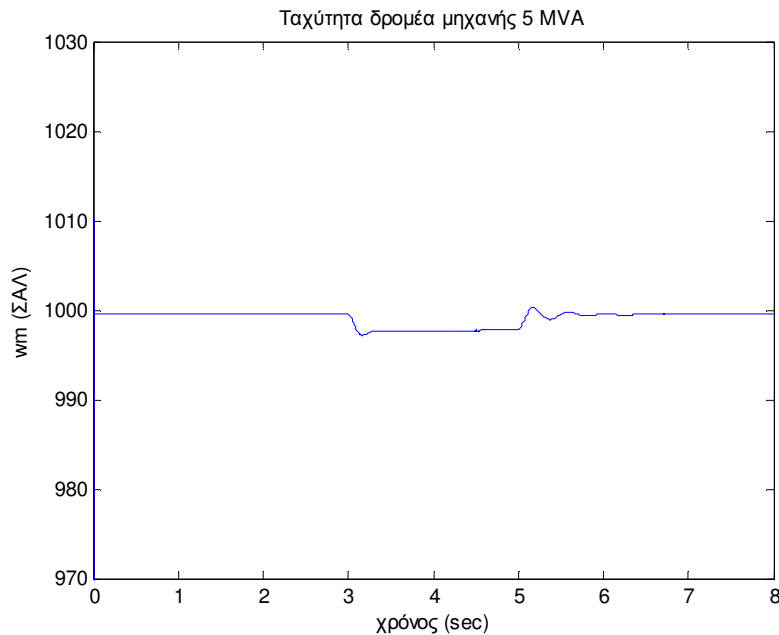
Η τάση του ζυγού, στον οποίο είναι συνδεδεμένοι η αξονική γεννήτρια και η μικρότερης ισχύος βοηθητική γεννήτρια, διατηρείται σταθερή στην τιμή των 380 V (εφόσον η συχνότητα λειτουργίας των μηχανών είναι 50 Hz) χάρη στον έλεγχο διέγερσης που έγινε στην ηλεκτρογεννήτρια των 2.5 MVA.



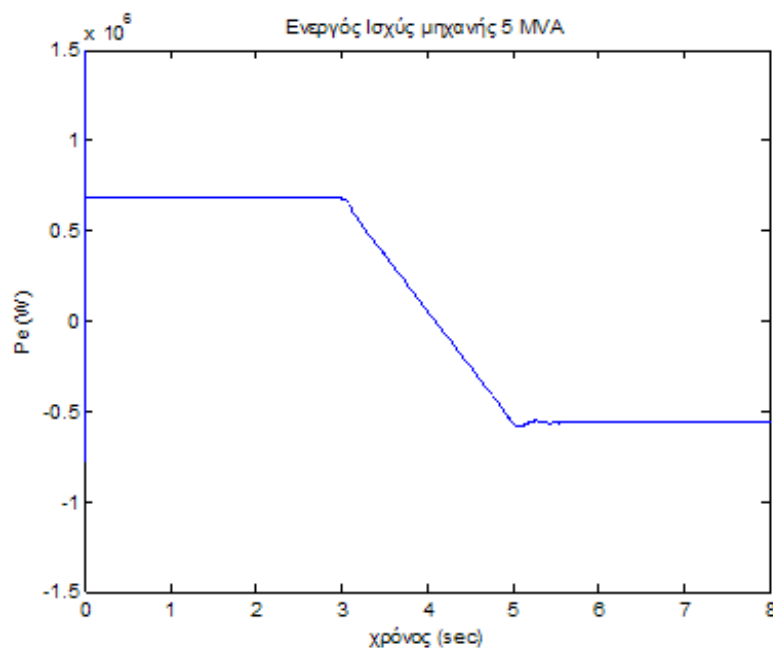
### 7.10.2.2 Βαθμιαία ανάληψη φορτίου

#### α) Μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς αξονικής γεννήτριας

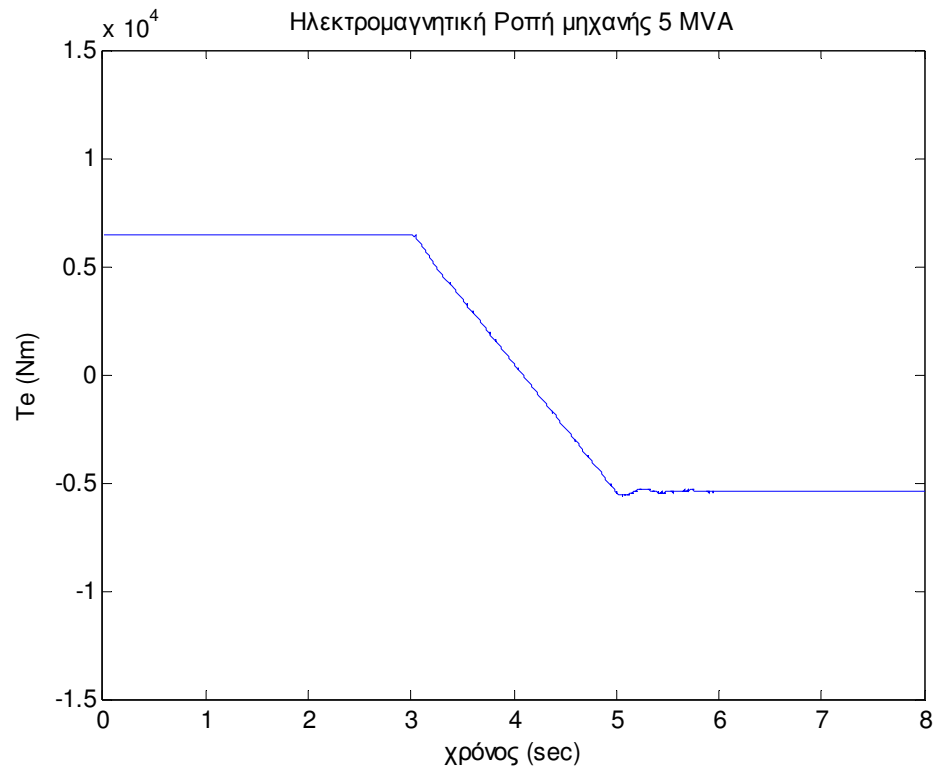
Η ταχύτητα του δρομέα της αξονικής γεννήτριας επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή έπειτα από ένα σύντομο χρονικό διάστημα 2 sec κατά το οποίο η αξονική γεννήτρια μετατρέπεται βαθμιαία σε κινητήρα πρόωσης. Αυτό οφείλεται αφενός στο γεγονός ότι ο PI ελεγκτής ισχύος έχει επέμβει στη βοηθητική γεννήτρια των 2.5MVA και αφετέρου στο ότι οι δυο γεννήτριες είναι μεταξύ τους συγχρονισμένες.



Η αξονική γεννήτρια μετατρέπεται βαθμιαία (και ιδανικά) σε ηλεκτρικό κινητήρα πρόωσης. Το θετικό πρόσημο είναι η ενέργεια που παρέχει η αξονική γεννήτρια στο σύστημα, ενώ το αρνητικό πρόσημο είναι πλέον η ηλεκτρική ενέργεια που απορροφά ο κινητήρας από τη βοηθητική γεννήτρια των 2.5 MVA.

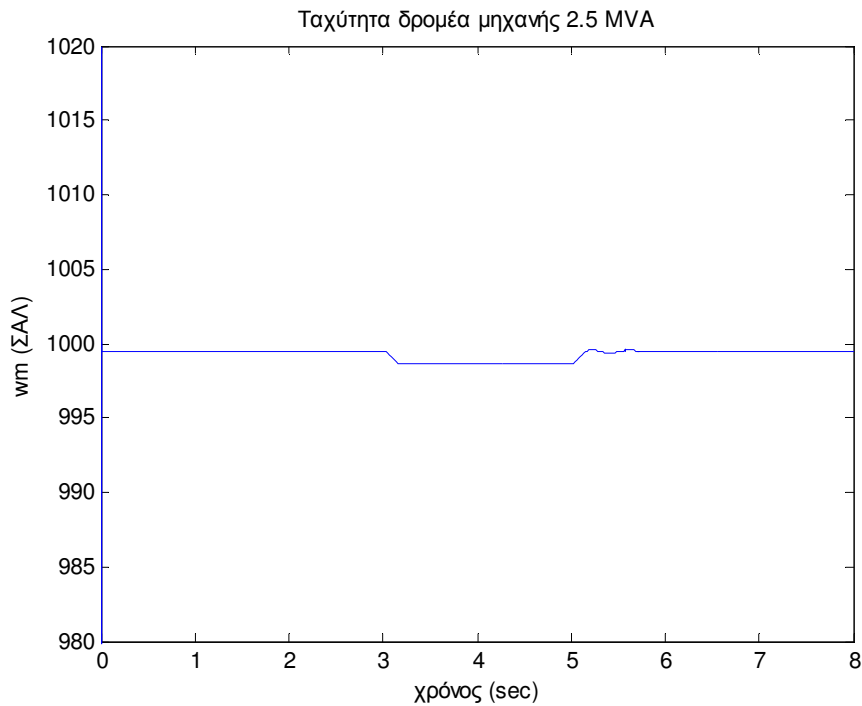


Αντίστοιχα, η γραφική παράσταση της ηλεκτρομαγνητικής της ροπή ακολουθεί αυτή της ενεργού ισχύος. Η αλλαγή προσήμου οφείλεται στο γεγονός ότι η αξονική γεννήτρια έχει μετατραπεί σε κινητήρα πρόωσης.

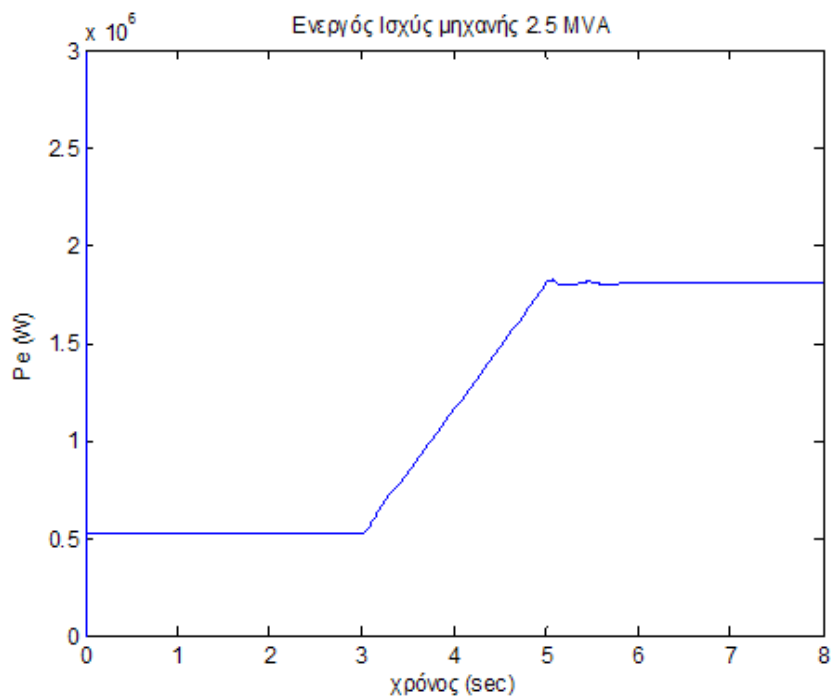


## β) Μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς βοηθητικής γεννήτριας

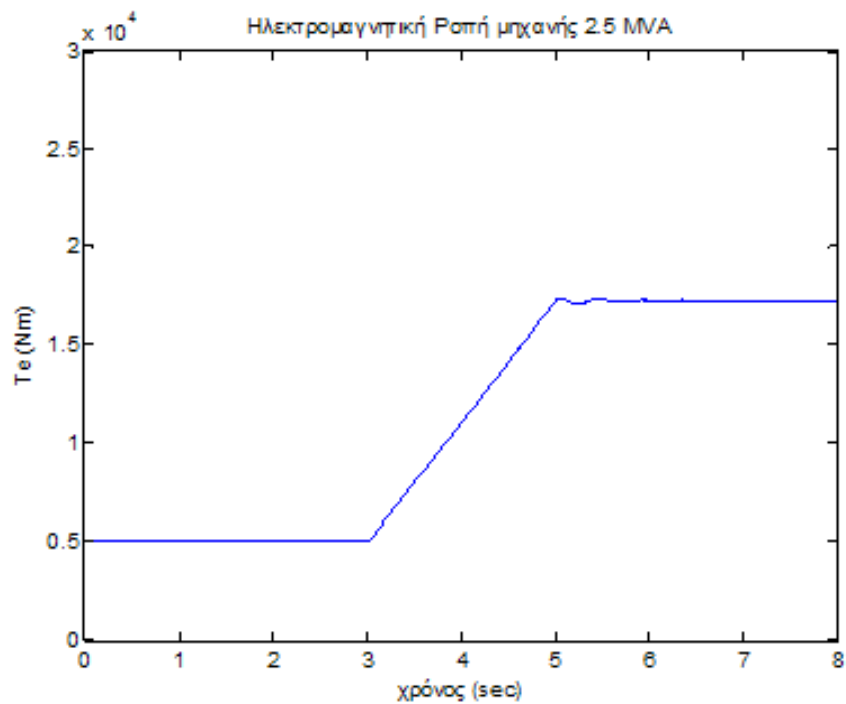
Η ταχύτητα του δρομέα της βοηθητικής γεννήτριας των 2.5 MVA επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή έπειτα από ένα σύντομο χρονικό διάστημα 2 sec. Ο ΡΙ ελεγκτής είναι αυτός που βοηθάει στο να διατηρηθεί σταθερή η ταχύτητα του δρομέα άρα και η συχνότητα λειτουργίας της μηχανής (και κατ' επέκταση του συστήματος).



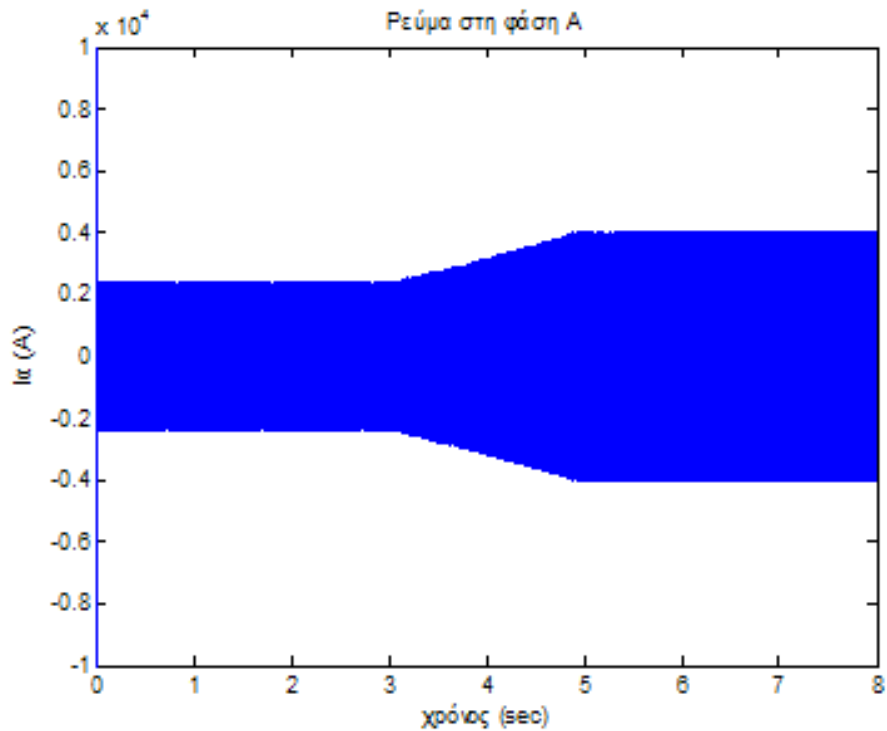
Η ενεργός ισχύς που παράγει η βοηθητική γεννήτρια αυξάνεται βαθμιαία (και ιδανικά) καθώς αναλαμβάνει να τροφοδοτήσει τόσο το φορτίο του πλοίου (το οποίο τροφοδοτούσε από κοινού με την αξονική γεννήτρια μέχρι τα 3 πρώτα sec) όσο και τον κινητήρα πρόωσης.



Αντίστοιχα, η ηλεκτρομαγνητική ροπή της βοηθητικής γεννήτριας αυξάνεται βαθμιαία καθώς αυξάνεται και η ενεργός ισχύς που παράγει για να τροφοδοτήσει το φορτίο του πλοίου και τον κινητήρα πρόωσης.

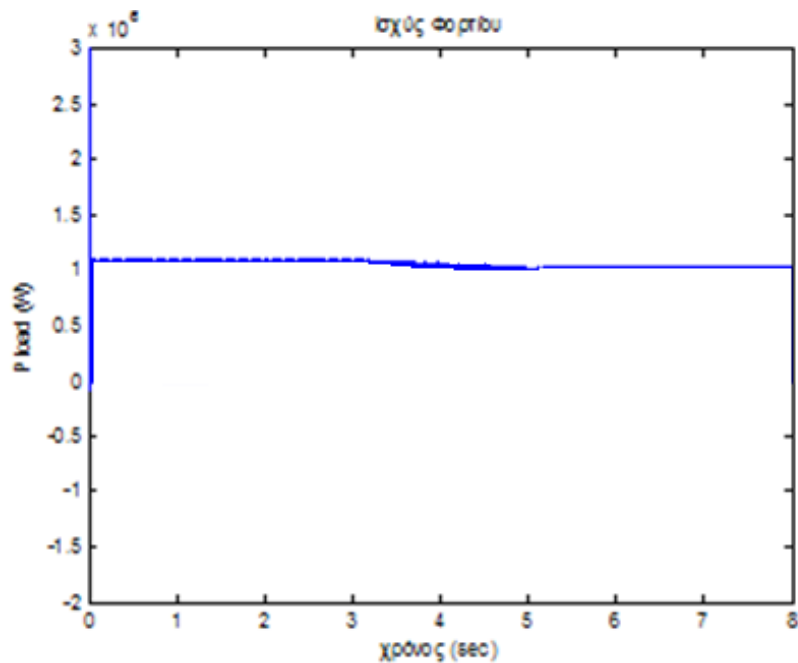


Το ρεύμα της βοηθητικής γεννήτριας αυξάνεται βαθμιαία καθώς αυξάνεται και η ενεργός ισχύς που παράγει για να τροφοδοτήσει το φορτίο του πλοίου και τον κινητήρα πρόωσης.

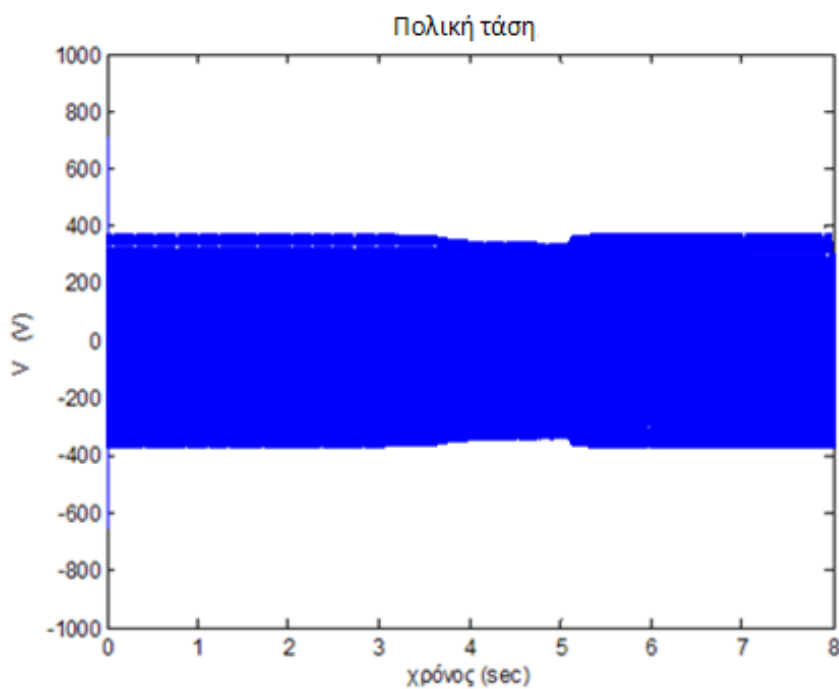


### γ) Ισχύς φορτίου και τάση στο ζυγό

Το φορτίο του ζυγού διατηρείται σταθερό και είναι αυτό που θα αναλάβει να τροφοδοτήσει η βοηθητική γεννήτρια των 2.5 MVA σε πρώτη φάση από κοινού με την αξονική γεννήτρια (μέχρι τα 3 πρώτα sec) και στη συνέχεια εξ ολοκλήρου η ίδια, καθώς η αξονική γεννήτρια έχει μετατραπεί σε κινητήρα πρόωσης.



Η τάση του ζυγού, στον οποίο είναι συνδεδεμένοι η αξονική γεννήτρια και η μικρότερης ισχύος βοηθητική γεννήτρια, διατηρείται σταθερή στα 380 V χάρη στον έλεγχο διέγερσης που έγινε στην ηλεκτρογεννήτρια των 2.5 MVA.





## 8<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

#### 8.1 Συμπεράσματα

Στόχος της εργασίας είναι η σχεδίαση, αναπαράσταση και μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς γεννήτριας που χρησιμοποιείται ως αξονική γεννήτρια σε πλοία. Στο κεφάλαιο αυτό ανακεφαλαιώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας, παρουσιάζονται τα θέματα που αναδείχθηκαν και χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης και επισημαίνονται τα σημεία προαγωγής της επιστήμης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήσαμε προδιαγραφές σχεδίασης μιας σύγχρονης γεννήτριας για την αξιοποίησή της ως αξονικής γεννήτριας συνδεδεμένης απευθείας στον άξονα πρόωσης του πλοίου. Η χρήση των αξονικών γεννητριών στα πλοία, παρουσιάζει τεχνικά πλεονεκτήματα και χρησιμοποιείται ήδη εδώ και αρκετά χρόνια. Ωστόσο, η χαμηλή ποιότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που αυτές παρήγαγαν σε συνδυασμό με την εσφαλμένη εντύπωση ότι αυξάνουν σημαντικά το κόστος κατασκευής του συστήματος πρόωσης, δεν τους επέτρεψαν να διαδοθούν ευρέως. Μεγάλη πρόοδος όμως συντελέστηκε, με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος στα αξονικά συστήματα για τη βελτίωση της ποιότητας της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

Αρχικά σχεδιάστηκε η αξονική γεννήτρια, που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί στα πλοία, έτσι ώστε ακόμα και σε υπερδιέγερση να μην οδηγείται το μαγνητικό της κύκλωμα σε κατάσταση ισχυρού κορεσμού και εν συνεχεία έγινε η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της. Στη διαδικασία του σχεδιασμού της δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή :

- Στην επιλογή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στο στάτη και στο δρομέα της σύγχρονης μηχανής.
- Στις πυκνότητες των ρευμάτων τόσο στα τυλίγματα χαλκού του στάτη όσο και στα τυλίγματα διέγερσης στο δρομέα.
- Στη γεωμετρία του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής.
- Στη χρήση τυλιγμάτων κλασματικού βήματος στο στάτη για τον περιορισμό των ανεπιθύμητων αρμονικών.

Στη συνέχεια εξετάστηκαν χαρακτηριστικά της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας της γεννήτριας όπως η ηλεκτρομαγνητική ροπή και η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη στα τυλίγματα του στάτη. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν αυτά που αναμένονταν λόγω της θεωρητικής προσέγγισης που είχε γίνει : τόσο η ηλεκτρομαγνητική ροπή όσο και η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη στα τυλίγματα του στάτη παρουσίαζαν κυματώσεις που οφείλονται αφενός στην παρουσία αρμονικών και αφετέρου σε αριθμητικά σφάλματα του προγράμματος του FEMM. Η μέση τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, η οποία κυμάνθηκε στα 7.500 Nm, σε συνδυασμό με την αντίστοιχη καμπύλη ισχύος της γεννήτριας έδωσε τιμή γωνίας ισχύος (γωνία δέλτα) ίση με 15 μοίρες. Να σημειωθεί ότι σε μια σύγχρονη γεννήτρια, η τιμή της γωνίας ισχύος κυμαίνεται από 15 έως 20 μοίρες.

Επιπροσθέτως, προσδιορίστηκαν όλοι οι άγνωστοι παράμετροι του δυναμικού μοντέλου της γεννήτριας : οι αυτεπαγωγές στον d και q άξονα στη μόνιμη, μεταβατική και υπομεταβατική κατάσταση, η αυτεπαγωγή λόγω τριβής στον d και q άξονα, η αυτεπαγωγή στον d άξονα του πεδίου διέγερσης, η αυτεπαγωγή λόγω τριβής στον d και q άξονα, η αντίσταση λόγω τριβής στον d και q άξονα και η ωμική αντίσταση στον d άξονα του πεδίου διέγερσης. Κατά τη διαμόρφωση του δυναμικού μοντέλου λήφθηκαν υπόψη οι απώλειες τριβής που προκαλούνται από την περιστροφή του αξονικού συστήματος του πλοίου, καθώς και η αδράνεια της αξονικής γεννήτριας. Στη μεταβολή της μηχανικής ροπής προσπαθήσαμε να προσομοιωθεί η πραγματική λειτουργία του αξονικού συστήματος του πλοίου μεταβάλλοντας με κατάλληλο ρυθμό τη μηχανική ροπή στον άξονα της γεννήτριας. Επιπλέον, έγινε μελέτη τριφασικού βραχυκυκλώματος στη γεννήτρια. Τα στοιχεία που προστατεύουν το κύκλωμα από βραχυκύκλωμα, το διακόπτουν όταν ανιχνεύσουν υψηλές εντάσεις ρευμάτων. Ο χρόνος διακοπής πέραν κάποιας σκόπιμης καθυστέρησης που ρυθμίζεται από τους ηλεκτρονόμους, περιλαμβάνει και χρόνους καθυστέρησης λόγω των φυσικών φαινομένων διακοπής. Κατά τη φάση διακοπής, στην εκκίνηση του φαινομένου απομάκρυνσης των αγωγίμων επαφών του διακόπτη αναπτύσσεται ηλεκτρικό τόξο στον ενδιάμεσο χώρο. Ο φυσικός μηχανισμός για την αποκατάσταση της μόνωσης στο εσωτερικό διακόπτη απαιτεί κάποιο χρόνο. Έτσι, η διάρκεια του τριφασικού βραχυκυκλώματος ήταν 0.08 δευτερολέπτων ή 80msec.

Τέλος, μελετήθηκε η περίπτωση κατά την οποία η αξονική γεννήτρια ισχύος 5 MVA μπορεί να λειτουργήσει και αντίστροφα, δηλαδή ως ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης (τροφοδοτούμενος από βοηθητική γεννήτρια του πλοίου ισχύος 2.5 MVA) σε περιορισμένη ισχύ προκειμένου να αντιμετωπισθούν έκτακτες περιπτώσεις μεγάλης έκτασης βλαβών της κύριας μηχανής πρόωσης. Η μετατροπή της αξονικής γεννήτριας σε κινητήρα έγινε με βηματική μεταβολή, η οποία δεν είναι ρεαλιστική λόγω της αδράνειας των γεννητριών. Παρόλα αυτά, στη μελέτη της λειτουργίας των μηχανών εξετάζονται συχνά τέτοιου είδους μεταβολές για να μελετηθεί η λειτουργία τους σε ακραίες μεταβολές. Κατά τη δυναμική αντιστροφή της αξονικής γεννήτριας σε κινητήρα πρόωσης παρατηρήθηκε :

- Προσωρινή βύθιση της ταχύτητας και της συχνότητας κατά 5% περίπου μέγιστης διάρκειας ενός δευτερολέπτου
- Προσωρινή βύθιση της τάσης στο φορτίο κατά 20% περίπου μέγιστης διάρκειας ενός δευτερολέπτου
- Σε περιπτώσεις ευαίσθητων φορτίων απαιτείται πρόβλεψη είτε σταθεροποιητών τάσης είτε ειδικών ρυθμιστών στροφών και τάσης στη βοηθητική γεννήτρια

## 8.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει τα παρακάτω σημεία που εμφανίζουν πρωτότυπη συνεισφορά :

- Η ανάπτυξη του δυναμικού μοντέλου της αξονικής γεννήτριας με βάση τη λεπτομερή διαμόρφωσή της χρησιμοποιώντας τεχνικές πεπερασμένων στοιχείων.
- Η μελέτη της δυναμικής αντιστροφής της γεννήτριας σε ηλεκτρικό κινητήρα πρόωσης προκειμένου να αντιμετωπισθούν περιπτώσεις βλάβης της κύριας μηχανής πρόωσης του πλοίου.

## 8.3 Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας διαπιστώνεται ότι μπορεί να υπάρξει μελλοντική διερεύνηση του θέματος στα εξής σημεία :

- Κατά την ανάλυση του απλοποιημένου μηχανικού συστήματος της αξονικής γεννήτριας, θεωρήθηκε ότι στην είσοδο της σύγχρονης γεννήτριας η μηχανική ισχύς ήταν είτε σταθερή, είτε μεταβαλλόταν κατά βούληση με κάποια άλλου είδους μεταβολή. Αυτό βέβαια έγινε για λόγους απλοποίησης του συστήματος. Θα ήταν πιο ρεαλιστική η μοντελοποίηση ενός νηζελοκινητήρα ή στροβίλου για την κίνηση της σύγχρονης γεννήτριας καθώς και η μοντελοποίηση του άξονα περιλαμβάνοντας γρανάζια, μειωτήρες.
- Σχεδιασμός του μοντέλου με προηγμένη τεχνική έλεγχου, όπως για παράδειγμα διανυσματικό έλεγχο, με σκοπό το βελτιωμένο έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής επιτυγχάνοντας καλύτερη δυναμική απόκριση και περιορισμό των ανεπιθύμητων αρμονικών.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

```
P=6;
r_ektupos=52.7;
gap_length=1.3;
r_stator_in=r_ektupos+gap_length;
r_gap1=r_ektupos+gap_length/4;
r_gap2=r_ektupos+gap_length/2;
r_gap3=r_ektupos+3*gap_length/4;
r_stator_out=65.8;
tooth_length=r_stator_out-r_stator_in;
theta_pole=2*pi/P;
theta_pole_angle=60;
slot_angle=0.028643833;
theta_slot_angle=slot_angle*theta_pole;
theta_tooth_angle=0.066666667*theta_pole-theta_slot_angle;
x=ones(11,1);
y=ones(11,1);
z=ones(11,1);
openfemm;
opendocument('sxediasmos_gen_2.fem');

rot_step=1;
dk=1;
n=10;

    for j=0:dk:n;

        rot=j*rot_step;

        radius_rot_step=rot_step*pi/180;
        radius_rot=rot*pi/180;
        if(j~=0)

mi_selectsegment((r_gap2+r_gap1)/2*cos(theta_pole/2),(r_gap2+r_gap1)/
2*sin(theta_pole/2));
            mi_selectsegment((r_gap2+r_gap1)/2*cos(-
theta_pole/2),(r_gap2+r_gap1)/2*sin(-theta_pole/2));
            mi_deleteselected;

            mi_selectgroup(1);    %peristrophi dromea kata rot moires
            mi_moverotate(0,0,rot_step);

        % DESIGN AGAIN -----%

            mi_selectnode(r_gap1*cos(-
theta_pole/2+radius_rot),r_gap1*sin(-theta_pole/2+radius_rot));
            mi_copyrotate2(0,0,-rot,1,0);
            mi_selectnode(r_gap1*cos(-theta_pole/2),r_gap1*sin(-
theta_pole/2));
            mi_setnodeprop('None',0);
            mi_clearselected;

mi_selectnode(r_gap1*cos(theta_pole/2+radius_rot_step),r_gap1*sin(the
ta_pole/2+radius_rot_step));
            mi_copyrotate2(0,0,-rot_step,1,0);
```

```

mi_selectnode(r_gap1*cos(theta_pole/2+radius_rot_step),r_gap1*sin(theta_pole/2+radius_rot_step));
mi_deleteselected;

mi_addnode(r_gap1*cos(theta_pole/2+radius_rot),r_gap1*sin(theta_pole/2+radius_rot));
mi_addsegment(r_gap1*cos(-theta_pole/2),r_gap1*sin(-theta_pole/2),r_gap2*cos(-theta_pole/2),r_gap2*sin(-theta_pole/2));

mi_addsegment(r_gap1*cos(theta_pole/2),r_gap1*sin(theta_pole/2),r_gap2*cos(theta_pole/2),r_gap2*sin(theta_pole/2));

mi_addsegment(r_ektupos*cos(theta_pole/2+radius_rot),r_ektupos*sin(theta_pole/2+radius_rot),r_gap1*cos(theta_pole/2+radius_rot),r_gap1*sin(theta_pole/2+radius_rot));

% DESIGN ARC SEGMENTS -----%

mi_addarc(r_gap1*cos(-theta_pole/2),r_gap2*sin(-theta_pole/2),r_gap1*cos(-theta_pole/2+radius_rot),r_gap1*sin(-theta_pole/2+radius_rot),rot,1);

mi_addarc(r_gap1*cos(theta_pole/2),r_gap2*sin(theta_pole/2),r_gap1*cos(theta_pole/2+radius_rot),r_gap1*sin(theta_pole/2+radius_rot),rot,1);

%BOUNDARIES

mi_selectsegment((r_gap2+r_gap1)/2*cos(theta_pole/2),(r_gap2+r_gap1)/2*sin(theta_pole/2));
mi_selectsegment((r_gap2+r_gap1)/2*cos(-theta_pole/2),(r_gap2+r_gap1)/2*sin(-theta_pole/2));
mi_setsegmentprop('ant5',0,1,0,0);
mi_clearselected;

mi_selectsegment((r_ektupos+r_gap1)/2*cos(theta_pole/2+radius_rot),(r_ektupos+r_gap1)/2*sin(theta_pole/2+radius_rot));
mi_setsegmentprop('ant4',0,1,0,1);
mi_clearselected;
mi_selectarcsegment(r_gap1*cos(-theta_pole/2),r_gap1*sin(-theta_pole/2));
mi_setarcsegmentprop(1,'ant9',0,0);
mi_clearselected;

mi_selectarcsegment(r_gap1*cos(theta_pole/2+radius_rot),r_gap1*sin(theta_pole/2+radius_rot));
mi_setarcsegmentprop(1,'ant9',0,1);
mi_clearselected;
end;

%IPOLOGISMOS ROPIS
mi_saveas('temp.fem');
mi_analyze(0);
mi_loadsolution;

```

```

        %ropi katw apo to stath
        mo_seteditmode('contour');
        mo_selectpoint(r_gap3*cos(-theta_pole/2),r_gap3*sin(-
theta_pole/2));

mo_selectpoint(r_gap3*cos(theta_pole/2),r_gap3*sin(theta_pole/2));
        T1=mo_lineintegral(4);
        torque3=6*T1(1,1);
        y(j+1,1)=torque3;
        fprintf ('\n');
        fprintf ('Gia j=%d\n',j);
        fprintf ('H roph pros to meros tou stath einai ish me:%d
N*m\n',torque3);
        mo_clearcontour;

        %ropi panw apo to dromea
        mo_seteditmode('contour');
        mo_selectpoint(r_gap1*cos(-
theta_pole/2+radius_rot),r_gap1*sin(-theta_pole/2+radius_rot));

mo_selectpoint(r_gap1*cos(theta_pole/2),r_gap1*sin(theta_pole/2));

mo_selectpoint(r_gap1*cos(theta_pole/2+radius_rot),r_gap1*sin(theta_p
ole/2+radius_rot));
        T2=mo_lineintegral(4);
        torque1=6*T2(1,1);
        z(j+1,1)=torque1;
        fprintf ('H roph pros to meros tou dromea einai ish me:%d
N*m\n',torque1);
        mo_clearcontour;

        %mesh ropi(mesh diakenou)
        torque=(torque3+torque1)/2;
        x(j+1,1)=torque;
        fprintf ('H roph sto meso tou diakenou einai ish me:%d
N*m\n',torque);
        fprintf ('\n');

        mi_saveas('temp2.fem');
        mo_close;

        if (j~=0)&&(j~=10)
        mi_selectarcsegment(r_gap1*cos(-theta_pole/2),r_gap1*sin(-
theta_pole/2));
        mi_deleteselectd;
        end;

    end;

plot((0:dk:n),x);
xlabel('Γωνία δρομέα (Μοίρες)');
ylabel('Ροπή στο μέσο του διακένου (N*m)');

```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

```
% Memory clean-up
clc;
clear all;
closefem;

% angle through which to spin the rotor in degrees
n = 126;
dk = 5;
Jmax = 1.26;

openfem;
opendocument('oloklhrh_gen.fem');
mi_saveas('new_oloklhrh_motor.fem');

%% Main Routine
for k = 0:dk:(n-1)
    starttime=clock;
    kk = k/dk + 1;

    mi_modifymaterial('A',4,Jmax*cos(k*pi/60))
    mi_modifymaterial('-A',4,-Jmax*cos(k*pi/60))
    mi_modifymaterial('B',4,Jmax*cos((k*pi/60)-2*pi/3))
    mi_modifymaterial('-B',4,-Jmax*cos((k*pi/60)-2*pi/3))
    mi_modifymaterial('C',4,Jmax*cos((k*pi/60)+2*pi/3))
    mi_modifymaterial('-C',4,-Jmax*cos((k*pi/60)+2*pi/3))

    if (k~=0)
        mi_selectnode(4.62,52.82);
        mi_selectnode(-4.62,-52.82);
        mi_copyrotate(0,0,dk,1);
        mi_selectnode(4.62,52.82);
        mi_selectnode(-4.62,-52.82);
        mi_deleteselcted;
        mi_addarc(0,53.025,0,-53.025,180,1);
        mi_addarc(0,-53.025,0,53.025,180,1);
    end;

    mi_createmesh();
    mi_purgemesh()

    mi_analyze(1);
    mi_loadsolution;

    mo_zoomnatural;
    mo_hidemesh();

    mo_selectpoint(0,53.675);
    mo_selectpoint(0,-53.675);
    mo_selectpoint(0,53.675);
    lineint=mo_lineintegral(4);
    torque3(2*k/10+1,1)=lineint(1,1);
    mo_clearcontour;

    mo_selectpoint(0,53.025);
    mo_selectpoint(0,-53.025);
```



```

mo_selectpoint(0,53.025);
lineint2=mo_lineintegral(4);
torque1(2*k/10+1,1)=lineint2(1,1);
mo_clearcontour;

torque(2*k/10+1,1)=(torque3(2*k/10+1,1)+torque1(2*k/10+1,1))/2;

mo_selectpoint(0,53.35);
mo_selectpoint(0,-53.35);
mo_selectpoint(0,53.35);
lineint=mo_lineintegral(4);
torque2(2*k/10+1,1)=lineint(1,1);
mo_clearcontour;

mo_selectblock(1.9,56.9);
mo_selectblock(1.9,63);
pos1=mo_blockintegral(1);
pos2=mo_blockintegral(5);
phi1(2*k/10+1,1)=pos1/pos2;
mo_clearblock;

mo_selectblock(6,56.6);
mo_selectblock(6.5,62.5);
pos12=mo_blockintegral(1);
pos22=mo_blockintegral(5);
phi2(2*k/10+1,1)=pos12/pos22;
mo_clearblock;

mo_selectblock(11,62);
pos13=mo_blockintegral(1);
pos23=mo_blockintegral(5);
phi3(2*k/10+1,1)=pos13/pos23;
mo_clearblock;

mo_selectblock(15,61);
pos14=mo_blockintegral(1);
pos24=mo_blockintegral(5);
phi4(2*k/10+1,1)=pos14/pos24;
mo_clearblock;

mo_selectblock(19.5,60);
pos15=mo_blockintegral(1);
pos25=mo_blockintegral(5);
phi5(2*k/10+1,1)=pos15/pos25;
mo_clearblock;

mo_selectblock(43.6,36.6);
pos16=mo_blockintegral(1);
pos26=mo_blockintegral(5);
phi6(2*k/10+1,1)=pos16/pos26;
mo_clearblock;

mo_selectblock(46,33.6);
pos17=mo_blockintegral(1);
pos27=mo_blockintegral(5);
phi7(2*k/10+1,1)=pos17/pos27;
mo_clearblock;

mo_selectblock(48.3,30.2);

```

```

pos18=mo_blockintegral(1);
pos28=mo_blockintegral(5);
phi8(2*k/10+1,1)=pos18/pos28;
mo_clearblock;

Ja(2*k/10+1)=Jmax*cos(k*pi/65);
Jb(2*k/10+1)=Jmax*cos((k*pi/65)-2*pi/3);
Jc(2*k/10+1)=Jmax*cos((k*pi/65)+2*pi/3);

mi_selectgroup(1);
mi_moverotate(0, 0, -dk);

disp(sprintf('%i of %i :: %f
seconds', 2*k+1, 2*n, etime(clock, starttime)));
end

%% Results
disp(sprintf('average torque (Gap line 1) = %g N*m', mean(torque3)));
disp(sprintf('torque ripple (Gap line 1) = %g N*m', abs(min(torque3)-
max(torque3))));
disp(sprintf('average torque (Gap line 2) = %g N*m', mean(torque1)));
disp(sprintf('torque ripple (Gap line 2) = %g N*m', abs(min(torque1)-
max(torque1))));
disp(sprintf('current density rms = %g A/mm^2', Jmax/sqrt(2)));

for k=1:(2*(n-1))/10

    back_emf1(k)=(phi1(k+1)-phi1(k));
    back_emf2(k)=(phi2(k+1)-phi2(k));
    back_emf3(k)=(phi3(k+1)-phi3(k));
    back_emf4(k)=(phi4(k+1)-phi4(k));
    back_emf5(k)=(phi5(k+1)-phi5(k));
    back_emf6(k)=(phi6(k+1)-phi6(k));
    back_emf7(k)=(phi7(k+1)-phi7(k));
    back_emf8(k)=(phi8(k+1)-phi8(k));
end;

subplot(5,1,1);
plot(0:dk:(n-0.2*dk), torque3);
xlabel('Rotor Angle, Degrees');
ylabel('Torque3, N*m');
title('Torque on Stator side');

subplot(5,1,2);
plot(0:dk:(n-0.2*dk), torque1);
xlabel('Rotor Angle, Degrees');
ylabel('Torque1, N*m');
title('Torque on Rotor side');

subplot(5,1,3);
plot(0:dk:(n-0.2*dk), torque);
xlabel('Rotor Angle, Degrees');
ylabel('Torque, N*m');
title('MESH Torque(me meso oro)');

subplot(5,1,4);
plot(0:dk:(n-0.2*dk), torque2);

```

```

xlabel('Rotor Angle, Degrees');
ylabel('Torque2, N*m');
title('MESH Torque(apeutheias)');

subplot(5,1,5);
plot(0:dk:(n-0.2*dk),Ja,'r');
hold on;
plot(0:dk:(n-0.2*dk),Jb,'g');
plot(0:dk:(n-0.2*dk),Jc,'b');
hold off;
xlabel('Rotor Angle, Degrees');
ylabel('Phase Current Densities, A/mm^2');
title('Phase Current Densities vs. Angle');
legend('a','c','b');
hold off;

back_emf=(back_emf1+back_emf2+back_emf3+back_emf4+back_emf5-
back_emf6-back_emf7-back_emf8);
figure;
plot((0:dk:(n-1.2*dk)),back_emf/0.35997);
xlabel('Γωνία δρομέα (Μηχανικές μοίρες)');
ylabel('EMF (pu)');
title('EMF vs. Γωνία δρομέα');

```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

```
P=6;
NumSlots=15;
Li=102;
f=50;
rot_step=5;
r_ektupos=52.7;
gap_length=1.3;
r_stator_in=r_ektupos+gap_length;
r_gap1=r_ektupos+gap_length/4;
r_gap2=r_ektupos+gap_length/2;
r_gap3=r_ektupos+3*gap_length/4;
r_stator_out=65.8;
tooth_length=r_stator_out-r_stator_in;
theta_pole=2*pi/P;
theta_pole_angle=60;
slot_angle=0.028643833;
theta_slot_angle=slot_angle*theta_pole;
theta_tooth_angle=0.066666667*theta_pole-theta_slot_angle;
Imax=262;
x=ones(2,1);

openfemm;
opendocument('Ld_upologismos.fem');
mi_analyze(0);
mi_loadsolution;

for i=11:1:14
    if (i<14)
        mo_seteditmode('area');
        mo_selectblock((r_stator_in+3*tooth_length/4)*cos((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)),(r_stator_in+3*tooth_length/4)*sin((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)));
        end;
        if (i>13)
            mo_selectblock((r_stator_in+3*tooth_length/4)*cos((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)),(r_stator_in+3*tooth_length/4)*sin((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)));
            mo_selectblock((r_stator_in+tooth_length/4)*cos((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)),(r_stator_in+tooth_length/4)*sin((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)));
            end
        end;
    end;

    pos1=callfemm('mo_blockintegral(1)');
    pos2=callfemm('mo_blockintegral(5)');
    M1=pos1/pos2;
    x(1,1)=M1;
    mo_clearblock;

for i=0:1:3
```

```

    if (i<1)
        mo_selectblock((r_stator_in+3*tooth_length/4)*cos((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)),(r_stator_in+3*tooth_length/4)*sin((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)));
        mo_selectblock((r_stator_in+tooth_length/4)*cos((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)),(r_stator_in+tooth_length/4)*sin((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)));
        end;
    if (i>0)
        mo_selectblock((r_stator_in+tooth_length/4)*cos((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)),(r_stator_in+tooth_length/4)*sin((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)));
        end;
    end;

pos1=callfemm('mo_blockintegral(1)');
pos2=callfemm('mo_blockintegral(5)');
M2=pos1/pos2;
x(2,1)=M2;
M=M1-M2;
K=6*(M/Imax)*10^(3);
fprintf ('H magnhtikh roh sthn A phase einai ish me:%d
Wb(H*A)\n',M);
fprintf ('H Ld einai ish me:%d mH\n',K);
mo_clearblock;
mo_close;

```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

```
P=6;
NumSlots=15;
Li=102;
f=50;
rot_step=5;
r_ektupos=52.7;
gap_length=1.3;
r_stator_in=r_ektupos+gap_length;
r_gap1=r_ektupos+gap_length/4;
r_gap2=r_ektupos+gap_length/2;
r_gap3=r_ektupos+3*gap_length/4;
r_stator_out=65.8;
tooth_length=r_stator_out-r_stator_in;
theta_pole=2*pi/P;
theta_pole_angle=60;
slot_angle=0.028643833;
theta_slot_angle=slot_angle*theta_pole;
theta_tooth_angle=0.066666667*theta_pole-theta_slot_angle;
Imax=262;

openfemm;
opendocument('Lq_upologismos.fem');
mi_analyze(0);
mi_loadsolution;

for i=1:1:8
    if (i<4)
        mo_seteditmode('area');
        mo_selectblock((r_stator_in+3*tooth_length/4)*cos((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)),(r_stator_in+3*tooth_length/4)*sin((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)));
        end;
        if (i>3)&&(i<6)
            mo_selectblock((r_stator_in+3*tooth_length/4)*cos((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)),(r_stator_in+3*tooth_length/4)*sin((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)));
            mo_selectblock((r_stator_in+tooth_length/4)*cos((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)),(r_stator_in+tooth_length/4)*sin((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)));
            end;
            if (i>5)
                mo_selectblock((r_stator_in+tooth_length/4)*cos((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)),(r_stator_in+tooth_length/4)*sin((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)));
                end;
            end;
            pos1=callfemm('mo_blockintegral(1)');
            pos2=callfemm('mo_blockintegral(5)');
            M=pos1/pos2;
```

```

K=3*sqrt(3)*(M/Imax)*10^(3);
fprintf ('H magnhtikh roh sthn B phase einai ish me:%d
Wb(H*A)\n',M);
fprintf ('H Lq einai ish me:%d mH\n',K);
mo_clearblock;

for i=6:1:13
    if (i<9)
        mo_seteditmode('area');
        mo_selectblock((r_stator_in+3*tooth_length/4)*cos((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)),(r_stator_in+3*tooth_length/4)*sin((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)));
        end;
        if (i>8)&&(i<11)
            mo_selectblock((r_stator_in+3*tooth_length/4)*cos((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)),(r_stator_in+3*tooth_length/4)*sin((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)));
            mo_selectblock((r_stator_in+tooth_length/4)*cos((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)),(r_stator_in+tooth_length/4)*sin((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)));
            end;
            if (i>10)
                mo_selectblock((r_stator_in+tooth_length/4)*cos((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)),(r_stator_in+tooth_length/4)*sin((-
theta_pole/2+theta_pole*i/NumSlots+theta_slot_angle/2+theta_tooth_ang
le/2)));
                end;
end;
pos1=callfemm('mo_blockintegral(1)');
pos2=callfemm('mo_blockintegral(5)');
M=pos1/pos2;
K=3*sqrt(3)*(M/Imax)*10^(3);
fprintf ('H magnhtikh roh sthn C phase einai ish me:%d
Wb(H*A)\n',M);
fprintf ('H Lq einai ish me:%d mH\n',K);
fprintf ('\n');
mo_clearblock;
mo_close;

```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

```
clear variables;

% PARAMETROI MEGETHWN
Perunit = 1; % oi parametroi dinontai se pu
Frated = 50;
Poles = 6;
wb=2*pi*Frated;
wbm = wb*(2/Poles);
Prated=4000; %kW
Pfrated= 0.8;
Vrated =11000;
xd = 2.30247; %se Henry
xpd = 0.3201;
xppd = 0.25289;
xq = 0.45867;
xppq = 0.0424;
rs = 0.0056; %stator
xls = 0.3; %stator
rpf = 0.0154; %rotor (tuligmata diegershs)
Tpdo = 7.9;
Tppdo = 0.032;
Tppqo = 0.055;
J_rotor=10;%inertia
Damp = 0.01;

% UPOLOGISMOS MEGETHWN
we = 2*pi*Frated;
wbase = 2*pi*Frated;
wbasem = wbase*(2/Poles);
Sbase = Prated/Pfrated;
Vbase = Vrated*sqrt(2/3);
Ibase = sqrt(2)*(Sbase/(sqrt(3)*Vrated));
Zbase = Vbase/Ibase*10^(-3);
Tbase = Sbase/wbasem;

xm q = xq - xls;
xmd = xd - xls;
xplf = xmd*(xpd - xls)/(xmd - (xpd-xls));
xplkd = xmd*xplf*(xppd-xls)/(xplf*xmd - (xppd-xls)*(xmd+xplf));
xplkq = xm q*(xppq - xls)/(xm q - (xppq-xls));
rpf = (xplf + xmd)/(wbase*Tpdo);
rpkd = (xplkd + xpd - xls)/(wbase*Tppdo);
rpkq = (xplkq + xm q)/(wbase*Tppqo);

H = 0.5*J_rotor*wbasem*wbasem/Sbase;

% Metatroph se pu (an xreiastei)
if(Perunit == 0)
fprintf('Dq0 parametroi se pu\n')

rs = rs/Zbase;
xls = xls/Zbase;
xppd = xppd/Zbase;
xppq = xppq/Zbase;
xpd = xpd/Zbase;
xpq = xpq/Zbase;
xd = xd/Zbase;
```



```

xq = xq/Zbase;
xmd = xmd/Zbase;
xmQ = xmQ/Zbase;
rpf = rpf/Zbase;
rpkd = rpkd/Zbase;
rpkq = rpkq/Zbase;
xplf = xplf/Zbase;
xplkd = xplkd/Zbase;
xplkq = xplkq/Zbase;

end

wb=wbase;
xMQ = (1/xls + 1/xmQ + 1/xplkq)^(-1);
xMD = (1/xls + 1/xmd + 1/xplf + 1/xplkd)^(-1);

P = 0.8;% energos isxus
Q = -0.6; % aergos isxus
Vt = 1. + 0*j; % termatikh tash
thetaeo = angle(Vt); % voltage angle
Vm = abs(Vt);
St = P+Q*j;

It = conj(St/Vt);
Eq = Vt + (rs + j*xq)*It;
delt = angle(Eq);

Eqo = abs(Eq);
I = It*(cos(delt) - sin(delt)*j);
Iqo = real(I);
Ido = -imag(I);
Efo = Eqo + (xd-xq)*Ido;
Ifo = Efo/xmd;

%Arxikes sunthkes stous oloklirwtes
Psiado = xmd*(-Ido + Ifo);
Psiaqo = xmQ*(-Iqo);

Psiqo = xls*(-Iqo) + Psiaqo;
Psido = xls*(-Ido) + Psiado;
Psifo = xplf*Ifo + Psiado;
Psikqo = Psiaqo;
Psikdo = Psiado;

Vto = Vt*(cos(delt) - sin(delt)*j);
Vqo = real(Vto);
Vdo = -imag(Vto);
Sto = Vto*conj(I);
Eqpo = Vqo + xpd*Ido + rs*Iqo;

%Arxikes sunthkes stous oloklirwtes
delto = delt;
thetaro = delto+thetaeo;

Pemo = real(Sto);
Qemo = imag(Sto);
Tmech = Pemo;

```



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] “ Electrical machine analysis using finite elements ”, Nicola Bianchi.
- [2] “ Electric machines analysis and design applying Matlab ”, Jimmie J.Cathey.
- [3] “ Electric machines and transformers ”, Leonard R.Anderson, Jack Macneill.
- [4] “ The performance and design of Alternating Current Machines ”, M.G.Say.
- [5] “ Ηλεκτρικές Μηχανές Μέρος Β’ (Μόνιμη κατάσταση) ”, Ι.Α.Τεγόπουλος.
- [6] “ Ηλεκτρικές μηχανές AC-DC ”, K. Chapman.
- [7] “ Ηλεκτρικές Μηχανές Α ”, Αθ.Σαφάκα.
- [8] “ Ηλεκτρικές Μηχανές Β ”, Αθ.Σαφάκα.
- [9] “ Dynamic simulation of electric machinery using Matlab/Simulink ”, Chee - Mun Ong.
- [10] “ Analysis of electric machinery and drive systems ”, Paul C.Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D.Sudhoff.
- [11] “ Power system stability and control ”, Prabha Kundur.
- [12] “ Electric machinery fundamentals ”, Stephen J.Chapman.
- [13] “ Principles of electric machines and power electronics ”, P.C.Sen.
- [14] “ Finished plan : Onstad Trader ”, Kawasaki Heavy Industries, LTD.
- [15] “ Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και έλεγχος συχνότητας και τάσεως ”, Β.Κ.Παπαδιά, Κ.Βουρνά.
- [16] “ Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας ”, Κ.Βουρνά, Γ.Κονταξή.

[17] “ Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας”, Γ.Β.Γιαννακόπουλος, Ν.Α.Βοβός.

[18] “ Ανάλυση, έλεγχος και ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ”, Ν.Α.Βοβός.

[19] “ Tribology data book, Society of tribologists and lubrication engineers”, E.Booser.

[20] “ Ηλεκτροπρόωση Πολεμικών Πλοίων ”, Χατζηλάου Ι.Κ, Γύπαρης Ι.Κ. Μονογραφία ΣΝΔ, Πειραιάς.

[21] “ Συστήματα ηλεκτροπρόωσης υποβρυχίων του Πολεμικού Ναυτικού ”, Διήμερο ΤΕΕ, Χατζηλάου Ι.Κ, Γαλάνης Γ. , Πετρίδης Ν.

[22] “ ΕΝΕΡΓΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΙΟΥ ”, Κουρτέση Χ. (1998), Πειραιάς.

[23] “ Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ”, Σταύρος Παπαθανασίου.

[24] “ Power system dynamics and stability”, J.Machowski, J.W.Bialek, J.R.Bumby.

[25] “Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος Α μόνιμη κατάσταση λειτουργίας”, Β.Κ.Παπαδιάς.

[26] “Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος Β ασύμμετρες και μεταβατικές καταστάσεις”, Β.Κ.Παπαδιάς.

[27] “Ηλεκτροπρόωση πλοίων και πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο: προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος”, Προυσαλίδης Ι., Χατζηλάου Ι.Κ., Στυβακτάκης Ε., Κανέλλος Φ., Χατζηαργυρίου Ν., Φραγκόπουλος Χ, Σοφράς Η.: Διήμερο ΤΕΕ : «ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΑ ΜΕΣΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ-ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ», 12-13 Ιανουαρίου 2006.

[28] ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΖΗΤΗΜΑΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΟ ΠΛΗΡΩΣ ΕΞΗΛΕΚΤΡΙΣΜΕΝΟ ΠΛΟΙΟ, Δρ Ι. Κ. Χατζηλάου, Καθ/τής ΣΝΔ, Ι. Μ. Προυσαλίδης, Επ. Καθ/τής ΕΜΠ, Δρ Γ. Αντωνόπουλος, ΔΕΣΜΗΕ ΑΕ, Πλωτάρχης (Μ) Ι. Κ. Γύπαρης ΠΝ, MSc MESE, Π. Βαλλιανάτος, HM - ROTEC Engineering Ltd.

[29] “Προσομοίωση Ηλεκτρικού Συστήματος (ΣΗΕ) Πλοίου Μέσω Του Λογισμικού EDSA”, Αριστοτέλης Σ. Κονσολάκης.