

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ  
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ  
ΜΑΓΝΗΤΕΣ SM-Co ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΟΩΣΗ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΠΑΛΑΝΤΖΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ**

**ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ**

**2013**

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ  
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ  
ΜΑΓΝΗΤΕΣ Sm-Co ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΟΩΣΗ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ**

**ΑΜ : 4397**

**ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ :**

Βεβαιώνεται η ολοκλήρωση της παραπάνω πτυχιακής εργασίας

Ο καθηγητής

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια ηλεκτρική μηχανή ή ένας ηλεκτρικός κινητήρας ορίζεται κάθε συσκευή που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική και αντιστρόφως. Ανάλογα με το είδος του φορτίου, την πηγή ισχύος, την ύπαρξη ή μη μετατροπέα και διάφορα άλλα κριτήρια που χρειάζονται ανάλογα με την εφαρμογή, γίνεται επιλογή του είδους κινητήρα που θα χρησιμοποιηθεί στο σύστημα ηλεκτρικής κίνησης.

Οι κινητήρες που συναντιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης διακρίνονται ανάλογα με την τροφοδοσία τους σε δύο κατηγορίες ,ΣΡ και ΕΡ, για συνεχές και εναλλασσόμενο ρεύμα αντίστοιχα.

Εξαιτίας της ανάπτυξης των τελευταίων ετών στην τεχνολογία των υλικών, έχουν προκύψει μόνιμοι μαγνήτες με μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση και υψηλή δύναμη, όπως για παράδειγμα τα κράματα Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου που τοποθετούνται επιφανειακά στον δρομέα. Τα υλικά αυτά έδωσαν τη δυνατότητα αντικατάστασης του ηλεκτρομαγνήτη που συνήθως απαιτούσε τροφοδοσία με ψήκτρες από κάποιον μόνιμο μαγνήτη, ο οποίος δεν έχει ανάγκη ηλεκτρικής τροφοδοσίας.

Αυτές οι μηχανές ονομάζονται σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών και έχουν συγκεντρώσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, ενώ ήδη χρησιμοποιούνται σε πολλές πρακτικές εφαρμογές.

Η χρήση μόνιμων μαγνητών στην κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών προσφέρει μειωμένες απώλειες, ενώ δεν υπάρχει ανάγκη παροχής DC ρεύματος στο δρομέα μέσω ψηκτρών ή δακτυλίων.

Η ηλεκτρική πρόωση μπορεί να αποδειχθεί η καταλληλότερη λύση σε σκάφη με υψηλές απαιτήσεις χωρητικότητας της ηλεκτρικής ισχύος και με μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων.

Πιο συγκεκριμένα, η ηλεκτροπρόωση αποτελεί την βασική επιλογή για την κίνηση των υποβρυχίων. Η χρήση της σε πολεμικά πλοία επιφάνειας προσελκύει το έντονο ενδιαφέρον των ναυτικών χωρών που κατασκευάζουν πολεμικά πλοία και εξετάζεται σαν υποψήφιο σύστημα για την προωστήρια εγκατάσταση της επόμενης γενιάς και των μεγάλων πολεμικών πλοίων. Οι

αυξημένες απαιτήσεις και οι αυστηρές προδιαγραφές των πολεμικών ναυτικών, προϋποθέτουν περαιτέρω ανάπτυξη των υποσυστημάτων της ηλεκτροπρόωσης.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των σύγχρονων μηχανών με μόνιμους μαγνήτες Sm-Co και η χρήση τους για την ηλεκτροπρόωση.

## ABSTRACT

An electric motor is defined as any device that converts electrical energy into mechanical and vice versa. Depending on the type of load, the power source, the existence or not of a non-inverter and various other criteria needed depending on the application, a specific kind of motor is selected to be used in the electric drive system.

The engines that are usually used in the electric drive systems are distinguished by their loading into two categories, DC and AC, for Direct Current and Alternating Current respectively.

Due to the development of the technology of materials in recent years, there were derived permanent magnets with high remaining magnetization and high strength, as for example the alloys of Neodymium-Iron-Boron placed on the rotor's surface. These materials enabled the replacement of the electromagnet that usually required feeding with heat sinks, with a permanent magnet that does not need power supply.

These machines are called modern machines of permanent magnet and have been of great research interest, and they are already used in many practical applications.

The use of permanent magnets in electrical machinery provides low loss and there is no need to provide DC power to the rotor through brushes or rings.

The electric propulsion may prove to be the best solution for vessels with high requirements for electrical capacity and high power auxiliary equipment.

More specifically, the electric propulsion is the main option for the movement of submarines. Its use on surface warships is attracting the keen interest of maritime countries that construct warships and is examined as a candidate for the propulsion system of the next generation of large warships. The increased requirements and strict standards of naval require further development of electric propulsion subsystems.

The subject of this thesis is the study of modern machines with permanent Sm-Co magnets and their use for electric propulsion.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί ιδιαίτερη ανάπτυξη στις σύγχρονες μηχανές και στον τρόπο εφαρμογής τους. Πιο συγκεκριμένα, η ανάπτυξη και η εφαρμογή σύγχρονων μηχανών με μόνιμους μαγνήτες Sm-Co έχει προσφέρει λύση σε πολλά προβλήματα που αντιμετώπιζαν οι ηλεκτρικοί κινητήρες στα πλοία. Επιπλέον, οι σύγχρονες μηχανές με μόνιμους μαγνήτες Sm-Co παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μηχανές και χρησιμοποιούνται ευρέως για την ηλεκτροπρόωση.

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά τις σύγχρονες μηχανές με μόνιμους μαγνήτες Sm-Co και τη χρήση τους στην ηλεκτροπρόωση. Πιο συγκεκριμένα διερευνά τη θεωρία ,τις εφαρμογές, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των σύγχρονων μηχανών με μόνιμους μαγνήτες Sm-Co, καθώς και την τρέχουσα κατάσταση και το μέλλον τους στην ηλεκτροπρόωση.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις σύγχρονες μηχανές και περιγράφεται τόσο η ιστορία τους, όσο και η εξέλιξή τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζουμε τις σύγχρονες μηχανές με μόνιμους μαγνήτες Sm-C και την ανάπτυξή τους.

Τέλος, στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη χρήση των σύγχρονων μηχανών με μόνιμους μαγνήτες Sm-Co για την ηλεκτροπρόωση.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

## 1.1 Η ηλεκτροπρόωση

Οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι παρούσες σε οποιοδήποτε σκάφος, από την τροφοδότηση του εξοπλισμού επικοινωνίας και ναυσιπλοΐας, του συναγερμού και του συστήματος παρακολούθησης, των αντλιών, των ανεμιστήρων, των βαρούλκων, μέχρι την εγκατάσταση υψηλής ισχύος για την ηλεκτρική πρόωση. Η ηλεκτρική πρόωση αποτελεί μία αναδυόμενη περιοχή έρευνας για τους κλάδους της μηχανικής. Ναυπηγοί, μηχανολόγοι και ηλεκτρολόγοι μηχανικοί συνεργάζονται γύρω από κατασκευαστικά, λειτουργικά και οικονομικά ζητήματα. Η κοινή γλώσσα επικοινωνίας και η αμοιβαία κατανόηση μεταξύ των μηχανικών είναι απαραίτητα για την επίτευξη του βέλτιστου σχεδιασμού μιας εγκατάστασης ηλεκτρικής πρόωσης.

Η ηλεκτροπρόωση χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια λόγω της εξέλιξης που παρατηρείται στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα, καθώς και στην εξέλιξη των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος. Οι προσπάθειες εξέλιξης έχουν επικεντρωθεί στο να μειωθεί το αρχικό κόστος και να αυξηθούν οι επιδόσεις των συστημάτων που χρησιμοποιούν συστήματα ηλεκτροπρόωσης.

Η ηλεκτροπρόωση αποτελεί το είδος 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.

Οι κινητήρες ντήζελ, αεριοστρόβιλοι και ατμοστρόβιλοι εξακολουθούν να υπάρχουν στις εγκαταστάσεις ηλεκτροπρόωσης, χωρίς όμως να συμμετέχουν απ' ευθείας στην κίνηση του αξονικού συστήματος. Αντιθέτως, η λειτουργία τους περιλαμβάνει την κίνηση ηλεκτρικών γεννητριών, οι οποίες τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες προώσεως.

Στο σύστημα στο οποίο χρησιμοποιείται η ηλεκτροπρόωση, χρησιμοποιείται επίσης και ένα σύστημα ελέγχου το οποίο είναι υπεύθυνο για την κράτηση-εκκίνηση, την αυξομείωση στροφών και την αλλαγή φοράς περιστροφής των ηλεκτρικών κινητήρων.<sup>[1]</sup>

Η ηλεκτροπρόωση δεν αποτελεί καινούρια έννοια, η ιδέα δημιουργήθηκε περισσότερο από 100 έτη πριν. Επί μεγάλο διάστημα, τα συστήματα ήταν του τύπου Σ.Ρ./Σ.Ρ. (συχνά συστήματα Ward – Leonard) δηλ. παραγωγή συνεχούς τάσης και κίνηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Το

εναλλασόμενο ρεύμα αρχίζει να χρησιμοποιείται στα πλοία στις αρχές της δεκαετίας του 1950, αλλά τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης εξακολουθούν να στηρίζονται σε κινητήρες Σ.Ρ., ελεγχόμενους από διατάξεις με θυρίστορς. Τα τελευταία 20 έτη η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος έφερε επανάσταση στον έλεγχο των ηλεκτρικών κινητήρων. Η ανάπτυξη διατάξεων και τεχνικών ελέγχου κινητήρων E.P., 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 και έτσι στις μέρες μας εκατοντάδες πλοίων χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες ως μέσο πρόωσης. Το 2002 η εγκατεστημένη ισχύς συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης ήταν 6 – 7 GW, εκτός των εγκαταστάσεων σε εφαρμογές πολεμικών σκαφών υποβρυχίων και επιφάνειας <sup>[13], [14]</sup>. Τη δεκαετία του '90, η ανάπτυξη των αζιμουθιακών προωστήρων, προσέφερε στα πλοία ευελιξία στις κινήσεις, ευκολία στις διελεύσεις από περιοχές υψηλής κινητικότητας και επικινδυνότητας και τη δυνατότητα δυναμικής τοποθέτησής τους (Dynamic Positioning – D.P.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης είναι τα εξής:

- ✚ Συνεχής μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της έλικας και της ταχύτητας του πλοίου σε όλο το πεδίο 0- 100 %.
- ✚ Γρήγορη απόκριση κατά τη διάρκεια χειρισμών και δυναμικής τοποθέτησης του σκάφους.
- ✚ Χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών.
- ✚ Οικονομία καυσίμου, καθώς είναι δυνατή η επιλογή των μηχανών που θα λειτουργούν έτσι, ώστε η κάθε μια να λειτουργεί κοντά στο βέλτιστο σημείο.
- ✚ Ελευθερία στην τοποθέτηση των επιμέρους μηχανημάτων του ενεργειακού συστήματος, που προσφέρει ευελιξία στον σχεδιασμό του σκάφους και εξοικονόμηση ωφέλιμου χώρου.
- ✚ Πλήρης εκμετάλλευση της στρεπτικής ροπής σε όλο το πεδίο λειτουργίας.
- ✚ Ευκολία αυτοματισμού.
- ✚ Αυξημένη αξιοπιστία (πολλά συστήματα συνδεδεμένα παράλληλα) και αυξημένη ασφάλεια.
- ✚ Περιορισμός των εκπεμπόμενων ρύπων, καθώς η κατανάλωση καυσίμου είναι μικρότερη, ιδιαίτερα οι εκπομπές  $\text{NO}_x$  είναι αισθητά χαμηλότερες όταν για



παράδειγμα ένας μεσόστροφος κινητήρας Diesel λειτουργεί με σταθερές στροφές, όπως συμβαίνει στα νέα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης.

- ✚ Περιορισμός του κινδύνου ρύπανσης του περιβάλλοντος από ατυχήματα όπως αυτά των δεξαμενοπλοίων, χάρη στην ταχύτερη απόκριση του συστήματος κατά τους χειρισμούς και τη δυναμική τοποθέτηση του σκάφους.<sup>[3]</sup>

Όσον αφορά τα μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης αυτά περιλαμβάνουν κυρίως το υψηλό κόστος επένδυσης. Αυτό γίνεται η προσπάθεια να μειωθεί κατά το δυνατόν, αξιοποιώντας την υπάρχουσα τεχνολογία των ηπειρωτικών ηλεκτρικών δικτύων (Commercial Off The Shelf – COTS), ωστόσο το υψηλό κόστος των κινητήρων και των διατάξεων ελέγχου τους δημιουργεί σημαντικό πρόβλημα.

Επίσης, σημειώνονται υψηλότερες απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, σε σύγκριση με το μηχανικό σύστημα. Για παράδειγμα, σε συμβατικό σύστημα κινητήρα Diesel - έλικα ρυθμιζόμενου βήματος, οι απώλειες του συστήματος μετάδοσης είναι περίπου 4%. Δηλαδή 2% στην έλικα και 2% στον μειωτήρα, όταν η έλικα λειτουργεί στον βέλτιστο συνδυασμό ταχύτητας/βήματος.

Σε εγκατάσταση νηξελο-ηλεκτρικής πρόωσης, το σύστημα μετάδοσης προκαλεί απώλειες 7 - 8%, με 3% στις γεννήτριες, 2% στους μετασχηματιστές και μετατροπείς συχνότητας και 2 - 3% στους προωστήριους ηλεκτροκινητήρες. Επομένως, ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι υψηλότερος στο σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης μόνον όταν κάθε μηχανή λειτουργεί σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής και επί μεγάλα χρονικά διαστήματα στη βέλτιστη περιοχή.

Ακόμη, ένα άλλο πρόβλημα που προκύπτει από την εκτεταμένη χρησιμοποίηση των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος είναι ότι εμφανίζονται προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς αναπτύσσεται ένα μεγάλο πλήθος αρμονικών συνιστωσών ρεύματος και τάσεως. Οι αρμονικές αυτές αφενός προσαυξάνουν τη συνολική κυκλοφορούσα άεργο ισχύ στο ηλεκτρικό δίκτυο αλλά επιπλέον δημιουργούν προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

Έτσι, ο «ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος» που παράγεται επηρεάζει αρνητικά όλες τις ευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις, κυρίως τα κυκλώματα ελέγχου των ίδιων των ηλεκτρονικών ισχύος, ενώ σε περιπτώσεις στρατιωτικών εφαρμογών αυξάνει τα επίπεδα της ηλεκτρομαγνητικής ταυτότητας των πλοίων.

Επίσης, είναι δυνατόν οι αρμονικές παραμορφώσεις των ηλεκτρικών μεγεθών να διεγείρουν ιδιοσυχνότητες για ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων και να εμφανιστούν τα φαινόμενα σιδηρο-συντονισμού στους δρομείς των σύγχρονων γεννητριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η σειρά αυτή των προβλημάτων λόγω του εξηλεκτρισμού των συστημάτων του πλοίου αντιμετωπίζεται με εξειδικευμένες αναλύσεις και μελέτες κυρίως κατά της φάση της σχεδίασης τους ηλεκτρολογικού συστήματος.

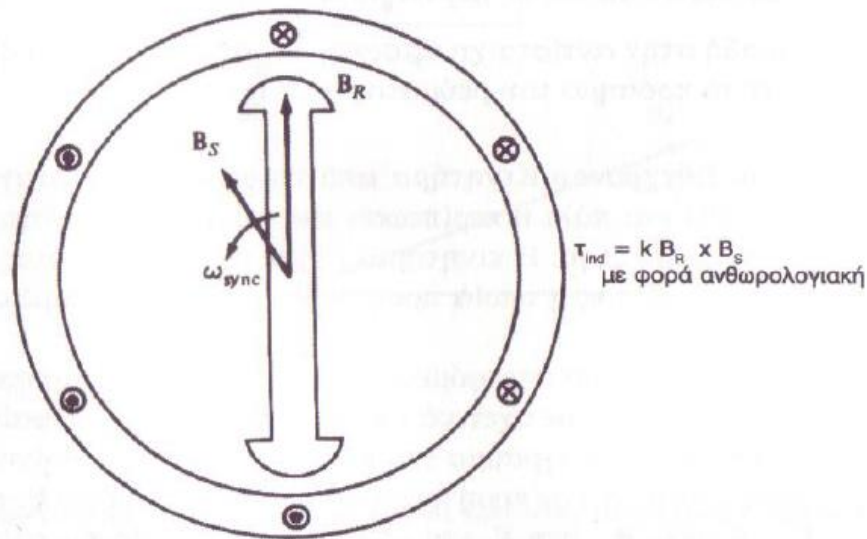
Σε πολλές εφαρμογές, η συνισταμένη πλεονεκτημάτων - μειονεκτημάτων είναι θετική, οπότε η ηλεκτρική πρόωση είναι η ενδεδειγμένη λύση, οδηγώντας σε χαμηλότερο κόστος λειτουργίας του πλοίου.<sup>[3]</sup>

## 1.2 Ηλεκτρικοί Κινητήρες Πρόωσης

Οι περισσότεροι κινητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούνται σήμερα είναι σύγχρονοι και εμφανίζουν απόδοση της τάξης του 96 - 98%. Πιο συγκεκριμένα, τα τελευταία χρόνια έχουν κατασκευαστεί οι σύγχρονοι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες, οι οποίοι εμφανίζουν απόδοση της τάξης του 98%.

Στις σύγχρονες μηχανές, το τυλίγμα διεγέρσεως του δρομέα το οποίο διαρρέεται από συνεχές ρεύμα τώρα έχει αντικατασταθεί από μόνιμους μαγνήτες. Ως αποτέλεσμα παράγεται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σταθερής τιμής που στρέφεται στο χώρο με την ταχύτητα του δρομέα.

Συνεπώς οι σύγχρονες αυτές μηχανές δεν έχουν ανάγκη παροχής σε Σ.Ρ. και επομένως εμφανίζουν αυξημένη απόδοση και μειωμένες απώλειες Joule στα τυλίγματα.<sup>[3]</sup>



**Εικόνα 1: Σύγχρονος κινητήρας πλοίων.**

Μπορεί η ιδέα της χρήσης μονίμων μαγνητών να είχε διατυπωθεί από παλιά, παρόλα αυτά όμως δεν υπήρχαν οι κατάλληλες προϋποθέσεις για την ανάπτυξή τους. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας όμως τα τελευταία χρόνια παρείχε τη δυνατότητα κατασκευής κραμάτων μονίμων μαγνητών (κράματα Σαμαρίου-Κοβαλτίου, Sm-Co και Νεοβιδίου-Σιδήρου-Βορείου, NdFeB).<sup>[3]</sup>

Τα κράματα αυτά χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να διατηρούν σταθερή τη μαγνήτιση τους σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Η ιδιότητά τους αυτή είναι πολύ χρήσιμη για τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό μίας στρεφόμενης μηχανής.

Επίσης, οι συγκεκριμένοι κινητήρες με τη χρήση κατάλληλου τυλίγματος και πόλων δρομέα μπορούν να παράγουν ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, γεγονός που τους παρέχει τη δυνατότητα να συναγωνίζονται τις συμβατικές σύγχρονες μηχανές στα χαμηλά επίπεδα απότομων αιχμών ροπής (torqueripples) και μηχανικών δονήσεων (vibrations).

Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια έχει εκδηλωθεί ένα έντονο ενδιαφέρον για τη χρήση ηλεκτρικών κινητήρων με υπεραγώγιμα υλικά ως κινητήρες πρόωσης. Οι κινητήρες πρόωσης αποτελούνται από υπεραγώγιμο υλικό, το οποίο εμφανίζει μηδενική ηλεκτρική αντίσταση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Επίσης, έχουν πολύ μεγάλη ισχύ ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με τους συμβατικούς κινητήρες και θεωρούνται ιδανικοί για την πρόωση πολεμικών πλοίων.<sup>[2]</sup>

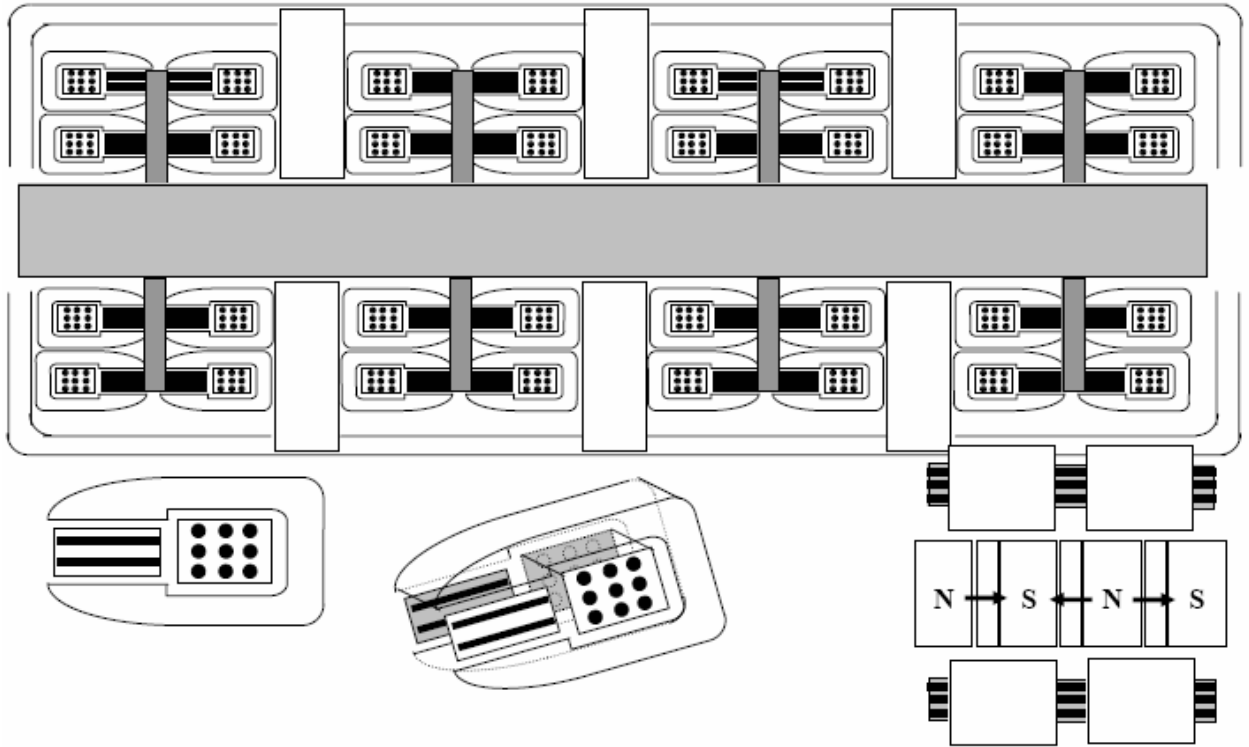
### **1.2.1 Κινητήρες αξονικής ροής**

Οι κινητήρες αυτές χαρακτηρίζονται από την ακτινική διεύθυνση της ωφέλιμης μαγνητικής ροής. Παράδειγμα κινητήρα αξονικής ροής αποτελεί ο κινητήρας PERMASYN της εταιρείας SIEMENS, ο οποίος αποτελείται από μόνιμους μαγνήτες Sm-Co. Ο κινητήρας αυτός χρησιμοποιείται σε υποβρύχια του πολεμικού ναυτικού. <sup>[4]</sup>

Ένα άλλο παράδειγμα κινητήρα αξονικής ροής αποτελεί ο Εξελιγμένος Επαγωγικός Κινητήρας (Advanced Induction Motor-AIM) της ALSTOM. Στα πλεονεκτήματα της χρήσης του συγκεκριμένου κινητήρα συγκαταλέγεται η προσφορά υψηλής πυκνότητας ισχύος και ροπής. Πιο συγκεκριμένα, διαφέρει από τον τρι-φασικό επαγωγικό κινητήρα στο ότι λειτουργεί με 5, 10 ή 15 φάσεις και χρησιμοποιεί τις αρμονικές του μαγνητικού πεδίου για να αυξήσει την ισχύ του κινητήρα. <sup>[4]</sup>

### **1.2.2 Πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής (transversefluxmotors)**

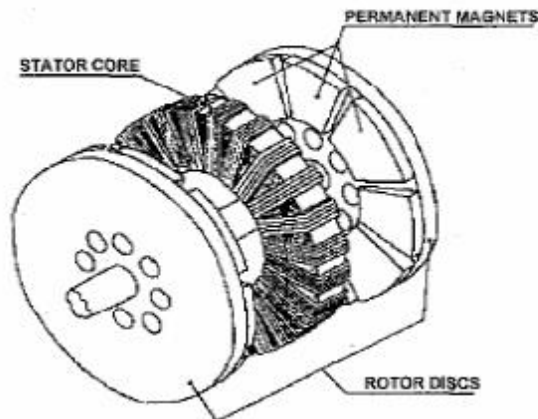
Οι πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής διαθέτουν μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα. Η τοποθέτησή τους γίνεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ρέει η μαγνητική ροή μέσα στο διάκενο σε διεύθυνση κατά την αξονική διεύθυνση και κάθετη- εγκάρσια προς τον άξονα της μηχανής(Εικόνα2).<sup>[5]</sup>



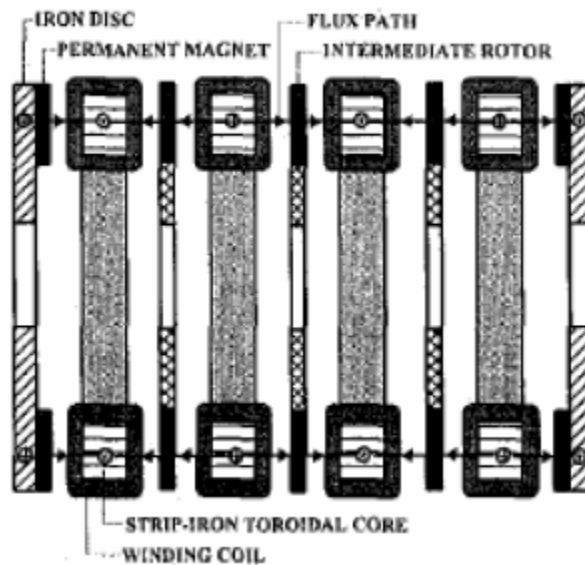
*Εικόνα 2: Κινητήρας εγκάρσιας ροής.*

### 1.2.3 Πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής (axialfluxmotors)

Οι πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής διαθέτουν κι εκείνοι μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως η τοποθέτησή τους γίνεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η μαγνητική ροή να ρέει μέσα στο διάκενο σε διεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα της μηχανής(Εικόνα3,4).<sup>[5]</sup>



*Εικόνα 3: Μηχανή αξονικής ροής.*



*Εικόνα 4: Κάθετη τομή κινητήρα αξονικής ροής με 4 σπονδύλους (modules).*

### 1.3 Μετατροπείς Συχνότητας

Η εκτεταμένη εφαρμογή της ηλεκτρική πρόωσης τα τελευταία χρόνια δεν θα είχε σημειωθεί αν δεν είχαν αναπτυχθεί οι μετατροπείς συχνότητας. Όπως γνωρίζουμε, στις εγκαταστάσεις E.P. η συχνότητα του παραγομένου ρεύματος παραμένει σταθερή. Επομένως, αν ο ηλεκτροκινητήρας πρόωσης τροφοδοτηθεί απ' ευθείας από έναν μετατροπέα συχνότητας και

όχι από το δίκτυο, θα υπάρχει η δυνατότητα να ρυθμίζεται συνεχώς η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα πρόωσης.<sup>[6]</sup>

Οι βασικοί μετατροπείς συχνότητας περιλαμβάνουν τη γέφυρα 6-παλμών. Όμως, τα τελευταία χρόνια έχουν κατασκευαστεί σύνθετοι μετατροπείς με σκοπό να μειωθούν οι αρμονικές παραμορφώσεις. Πιο συγκεκριμένα, ένας αντιστροφέας 12 παλμών αποτελείται από δύο αντιστροφείς 6 παλμών, των οποίων οι αντίστοιχες φάσεις έχουν γωνιακή διαφορά 30°. <sup>[6]</sup>

Οι πιο συνηθισμένοι μετατροπείς συχνότητας είναι οι εξής:

#### **Ζεύγη ανορθωτών – αντιστροφέων SPWM**

Στα ζεύγη ανορθωτών - αντιστροφέων γίνεται ανόρθωση από Ε.Ρ. σε Σ.Ρ. και στη συνέχεια αντιστροφή από Σ.Ρ. σε Ε.Ρ. Στον σύνδεσμο Σ.Ρ. (DC-link) μεταξύ των δύο μετατροπέων παρεμβάλλεται κάποιο στοιχείο που διατηρεί σταθερή την τάση ή το ρεύμα που παρέχει ο μετατροπέας:

α) πηγές ρεύματος (CSI Current Source Inverters) με SPWM: στο DC-link παρεμβάλλεται πηνίο που διατηρεί το ρεύμα τροφοδοσίας σταθερό με αποτέλεσμα ο μετατροπέας εμφανίζεται να λειτουργεί ως πηγή (σταθερού) ρεύματος

β) πηγές τάσεως (VSI Voltage Source Inverters) με SPWM: στο σύνδεσμο Σ.Ρ. παρεμβάλλεται πυκνωτής που διατηρεί την τάση τροφοδοσίας σταθερή με αποτέλεσμα ο μετατροπέας να εμφανίζεται ότι λειτουργεί ως πηγή (σταθερής) τάσεως

γ) συγχρομετατροπείς (synchro-converters) ή LCI (Load Commutated Inverters, LCI): σε αυτή την περίπτωση οι διακόπτες ισχύος σβήνουν μόνον με τη βοήθεια του φορτίου τους, κι επομένως δεν απαιτούνται επιπλέον βοηθητικά κυκλώματα σβέσεως<sup>[3]</sup>

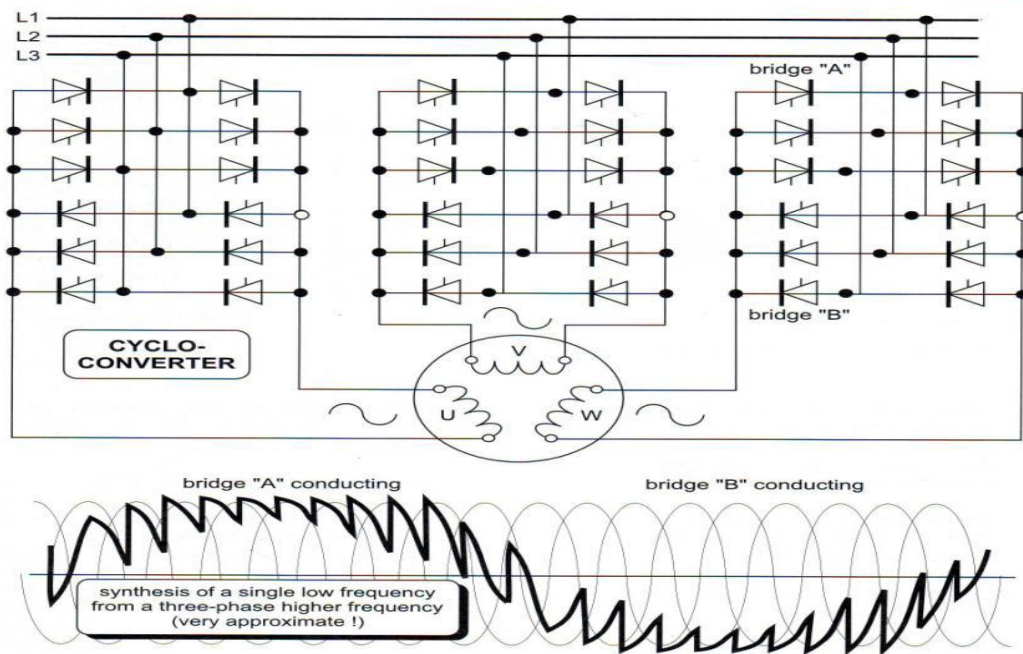
#### **Κυκλομετατροπείς (cycloconverters)**

Στους κυκλομετατροπείς εφαρμόζεται απευθείας μετατροπή από μία μορφή Ε.Ρ. συγκεκριμένου πλάτους και συχνότητας σε άλλη μορφή Ε.Ρ. διαφορετικού πλάτους και συχνότητας.<sup>[3]</sup>

Οι κυκλομετατροπείς μετατρέπουν απευθείας την εναλλασσόμενη ισχύ μιας συχνότητας σε εναλλασσόμενη ισχύ διαφορετικής συχνότητας, ενώ οι συγχρομετατροπείς μετατρέπουν αρχικά την εναλλασσόμενη ισχύ σε συνεχή δηλαδή περιλαμβάνουν αντιστροφή (inverter), και κατόπιν τη συνεχή αυτή ισχύ σε εναλλασσόμενη με διαφορετική συχνότητα από την αρχική.

Οι κυκλομετατροπείς χαρακτηρίζονται από περίπλοκη συνδεσμολογία στα κυκλώματα έναυσης και η συχνότητα εξόδου τους είναι 0 μέχρι το 1/3 της συχνότητας του δικτύου (0-20Hz), ενώ η συχνότητα εξόδου των συγχρομετατροπέων μπορεί να μεταβάλλεται από 0 μέχρι 2 φορές τη συχνότητα του δικτύου (0-120Hz).

Σε γενικές γραμμές οι κυκλομετατροπείς παρουσιάζουν μικρότερο κόστος από τους συγχρομετατροπείς και πλεονεκτούν στο ότι εμφανίζουν λιγότερα σχεδιαστικά προβλήματα.<sup>[3]</sup>



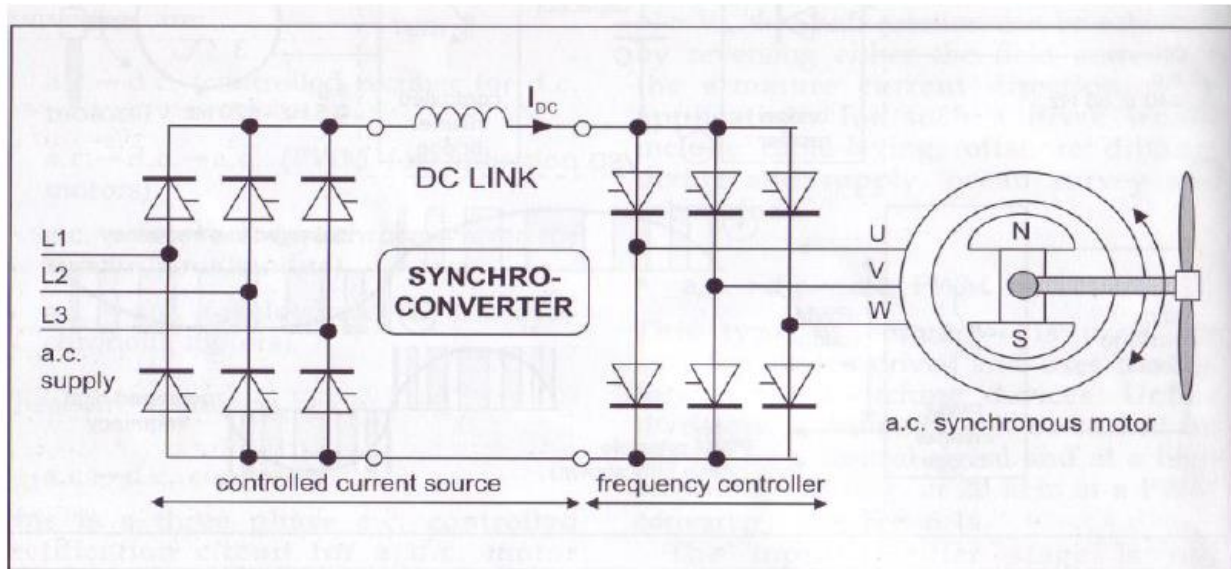
**Εικόνα 5: Κύκλωμα κυκλομετατροπέα.**

### ✚ Συγχρομετατροπείς (synchro-converters)

Στο κύκλωμα του συγχρομετατροπέα ανορθώνεται η αρχική τάση του κινητήρα και το σταθερό συνεχές ρεύμα που προκύπτει μετά το πηνίο (φίλτρο), μετατρέπεται πάλι σε εναλλασσόμενο και τροφοδοτεί τον στάτη του κινητήρα. Η συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης ρυθμίζεται από τη συχνότητα με την οποία δίνονται οι παλμοί στην πύλη των θυρίστορ της δεύτερης γέφυρας. Η ροπή του κινητήρα μπορεί να ελεγχθεί από το μέγεθος του  $I_{DC}$  το οποίο ελέγχεται από τη συχνότητα που δίνονται οι παλμοί στην πύλη των θυρίστορ της γέφυρας



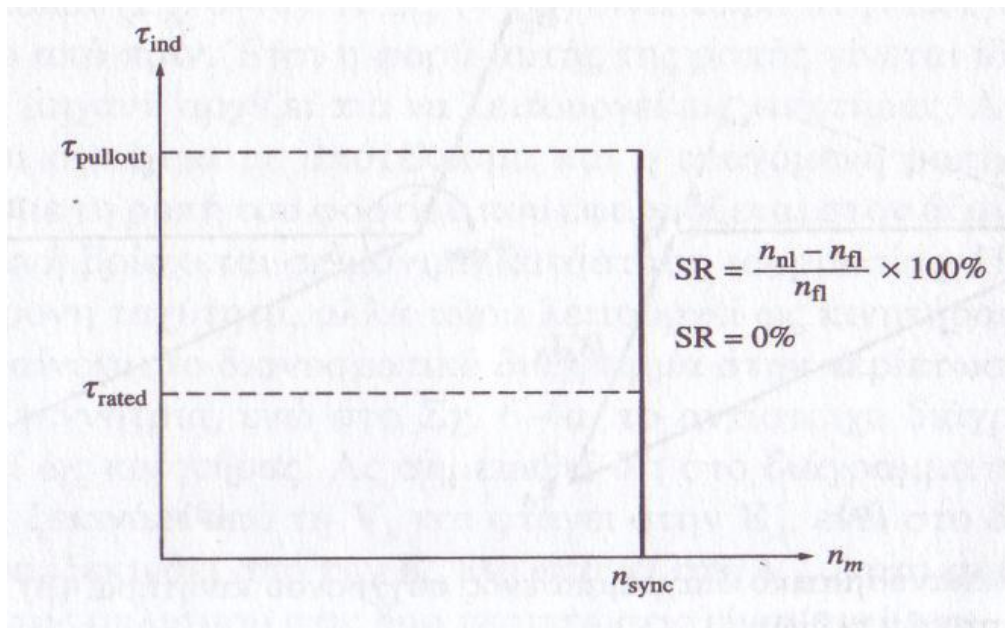
ανόρθωσης (αριστερά), ενώ η ταχύτητα από την συχνότητα των παλμών στα θυρίστορ της γέφυρας που τροφοδοτεί τον στάτη του κινητήρα.<sup>[3]</sup>



*Εικόνα 6: Κύκλωμα Συγχρομετατροπέα.*

#### 1.4 Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας Σύγχρονου Κινητήρα

Η ταχύτητα του κινητήρα δεν εξαρτάται από το φορτίο του, αλλά από τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας. Η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας σύγχρονου κινητήρα φαίνεται στην Εικόνα 7.



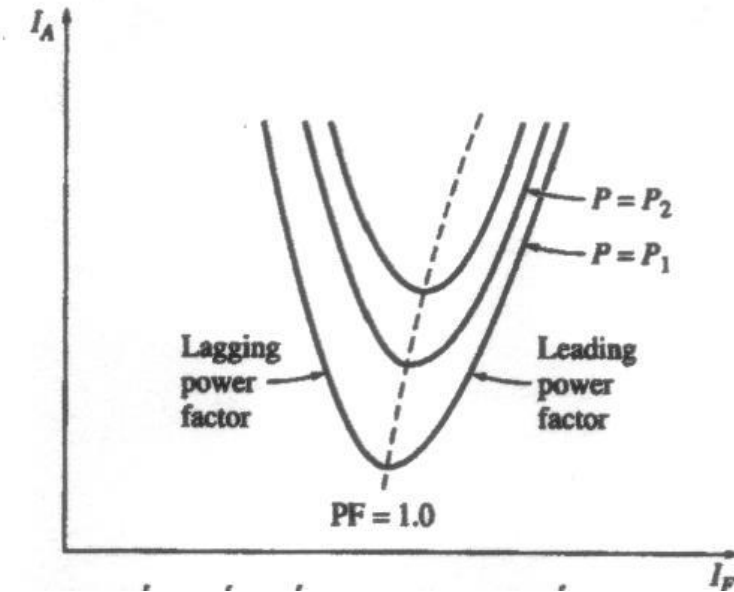
**Εικόνα 7: Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας σύγχρονου κινητήρα.**

Όπως γνωρίζουμε, η ροπή είναι ανάλογη της τάσης τροφοδοσίας και της τάσης διέγερσης. Επιπλέον, είναι ανάλογη της γωνίας μεταξύ των μαγνητικών πεδίων στάτη και δρομέα καθώς περιστρέφονται και η μέγιστη ροπή που μπορεί να προσφέρει ο κινητήρας στον άξονά του λέγεται ροπή ανατροπής.

Σε περίπτωση που η ροπή του φορτίου ξεπεράσει τη ροπή ανατροπής, το πεδίο του στάτη δεν μπορεί να συγκρατήσει τον δρομέα της μηχανής, με αποτέλεσμα ο δρομέας να επιβραδύνεται και το πεδίο του να μένει πολύ πίσω από το πεδίο του στάτη. Οι αλλαγές αυτές προκαλούν αλλαγή και στο πρόσημο της φοράς της ροπής και ως αποτέλεσμα αναπτύσσονται ισχυρές δονήσεις στον κινητήρα, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως απώλεια του συγχρονισμού.

Σε περίπτωση που θέλουμε να προκαλέσουμε αύξηση της ροπής ανατροπής, διατηρώντας σταθερή την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, μπορούμε να επεμβούμε στη διέγερση Σ.Ρ. Η μεταβολή της ροπής ανατροπής είναι ανάλογη της μεταβολής της τάσης διέγερσης, κι επομένως σε περίπτωση υπερδιέγερσης εμφανίζεται μεγάλη ροπή. <sup>[2]</sup>

Στους σύγχρονους κινητήρες οι μεταβολές διέγερσής τους προκαλούν μεταβολές και στον συντελεστή ισχύος. Πιο αναλυτικά, για σχετικά χαμηλές τιμές διέγερσης ο κινητήρας συμπεριφέρεται σαν επαγωγικό φορτίο, για μία μόνο τιμή διέγερσης συμπεριφέρεται σαν καθαρά ωμικό φορτίο και για υψηλές τιμές της διέγερσης συμπεριφέρεται σαν χωρητικό για το δίκτυο φορτίο (Εικόνα 8).



*Εικόνα 8: Γραφική παράσταση του ρεύματος οπλισμού  $I_A$  συναρτήσει του ρεύματος διέγερσής του  $I_F$ .*

Επομένως, όταν ο σύγχρονος κινητήρας είναι σε κατάσταση υπερδιέγερσης προσφέρει στον άξονά του μεγάλη ροπή και συμπεριφέρεται παράλληλα σαν χωρητικό φορτίο. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί και διορθώνει τον συντελεστή ισχύος της εγκατάστασης όπου είναι τοποθετημένος.<sup>[2]</sup>

Τα πλεονεκτήματα χρήσης ενός σύγχρονου κινητήρα είναι τα εξής:

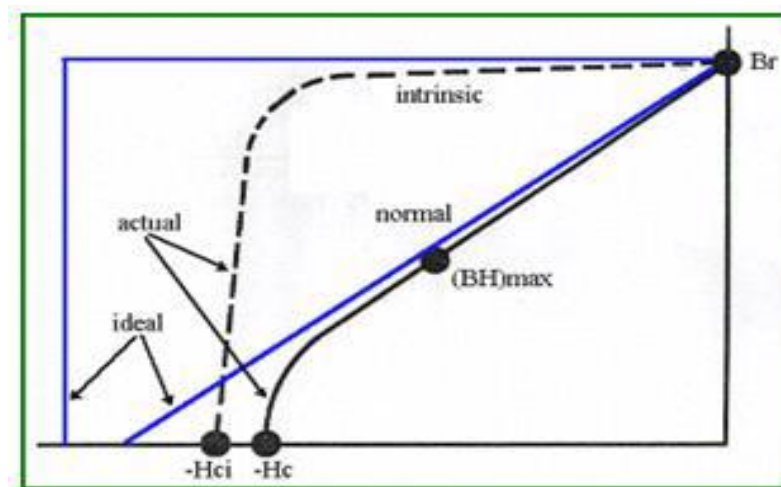
- ✚ Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή και είναι ανεξάρτητη του φορτίου
- ✚ Η μεγάλη απόδοση και όλη η ισχύς του στάτη μεταφέρεται στον δρομέα χωρίς απώλειες
- ✚ Δυνατότητα υψηλής ροπής εξόδου η οποία ελέγχεται εύκολα από το κύκλωμα Σ.Ρ. διέγερσης των περιστρεφόμενων πόλων
- ✚ Βελτίωση του συντελεστή ισχύος της εγκατάστασης<sup>[4]</sup>

Με βάση τα παραπάνω πλεονεκτήματα του σύγχρονου κινητήρα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι αποτελεί τον ιδανικό κινητήρα για ηλεκτρική πρόωση. Το μόνο μειονέκτημά του είναι ότι είναι αντιοικονομικός σε σχέση με τον ασύγχρονο κινητήρα.<sup>[4]</sup>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΕΣ SM-CO

### 2.1 Μαγνητικές ιδιότητες

Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά που τείνουν να διατηρούν τη μαγνήτισή τους απουσία μαγνητικού πεδίου, όπως επίσης σε περίπτωση επιβολής ασθενούς μαγνητικού πεδίου αντίθετα στο δικό τους. Σε αντίθεση με το μαλακό σίδηρο για παράδειγμα, ο βρόχος υστέρησης ενός μόνιμου μαγνήτη έχει μεγάλο εύρος και αρκετά υψηλό πεδίο επαναφοράς. Στην Εικόνα 9 μπορούμε να δούμε την καμπύλη απομαγνήτισής τους.



Εικόνα 9: Καμπύλη απομαγνήτισης μόνιμου μαγνήτη.

Στην καμπύλη απομαγνήτισης διακρίνονται τα παρακάτω μεγέθη: Η παραμένουσα μαγνήτιση,  $B_r$ , είναι ενδεικτική της μέγιστης μαγνητικής ροής που μπορεί να επάγει ο μαγνήτης. Το πεδίο επαναφοράς,  $H_c$ , είναι η τιμή του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου που μηδενίζει τη μαγνητική ροή στο μαγνήτη. Σε περίπτωση που η ένταση του μαγνητικού πεδίου πλησιάσει σε τιμές κοντά στο  $H_c$ , υπάρχει κίνδυνος μερικής ή και ολικής απομαγνήτισής του. Ένα ακόμα μέγεθος μεγάλου ενδιαφέροντος είναι η μέγιστη τιμή της ενέργειας του μαγνήτη,  $BH_{max}$ . Το σημείο λειτουργίας του μαγνήτη στην καμπύλη απομαγνήτισης καθορίζεται από το

εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και τη γεωμετρία του χώρου. Η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ενέργειας εξασφαλίζει τη βέλτιστη αξιοποίηση του μόνιμου μαγνήτη και αυτό λαμβάνεται υπόψη κατά τη σχεδίαση, όταν επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση του όγκου του.<sup>[7]</sup>

### 2.1.1 Οι μόνιμοι μαγνήτες

Οι μόνιμοι μαγνήτες γίνονται από σιδηρομαγνητικά υλικά, όπως ο σίδηρος, το νικέλιο και το κοβάλτιο διατηρούν τις μαγνητικές του ιδιότητες χωρίς εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, ενώ ένας προσωρινός μαγνήτης έχει μαγνητικές ιδιότητες μόνο μέσα σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Ο μαγνητισμός στο ατσάλι έχει σαν αποτέλεσμα ένα μόνιμο μαγνήτη, ενώ ο σίδηρος χάνει τις μαγνητικές του ιδιότητες μόλις αποσύρουμε το μαγνητικό πεδίο. Ένας μόνιμος μαγνήτης είναι ουσιαστικά μία διάταξη αποθήκευσης ενέργειας. Η ενέργεια μεταφέρεται στο υλικό την πρώτη φορά, που θα μαγνητισθεί. Εφ' όσον η διάταξη αυτή σχεδιαστεί σωστά και συντηρείται, η μαγνήτιση, άρα και η ενέργεια, διατηρούνται σταθερές. Με τον τρόπο αυτό η αποθήκευση της ενέργειας είναι μόνιμη. Η ενέργεια αυτή εκφράζεται μέσω της εξωτερικής μαγνητικής επαγωγής και δεν εξαντλείται από την επαναλαμβανόμενη χρήση, καθώς η μαγνητική επαγωγή δεν παράγει έργο στον περιβάλλοντα χώρο.

Οι μαγνητικές ιδιότητες δίνονται στο υλικό κατά την κατασκευή του. Επίσης, πρέπει να μεταφερθούν στο χώρο τοποθέτησής ήδη μαγνητισμένοι. Το μαγνητικό πεδίο υπάρχει μόνο στο εσωτερικό τους και έτσι δεν χρειάζεται σημαντική θωράκιση. Οι μαγνητικές τους ιδιότητες δεν χρειάζονται συντήρηση και για αυτό είναι φθινοί στην συντήρηση. Ένας μόνιμος μαγνήτης μπορεί να απομαγνητιστεί αν τον υποβάλλουμε σε θέρμανση ή κρούση ή με την εισαγωγή του σε σωληνοειδές στο οποίο παρέχουμε εναλλασσόμενο ρεύμα μειούμενης έντασης. Το πεδίο τους είναι σχετικά ανομοιογενές.

Η χρησιμότητα των σιδηρομαγνητών πηγάζει από την υψηλή τους διαπερατότητα, που επιτρέπει την επίτευξη υψηλών τιμών μαγνητικής επαγωγής σε μέτρια μαγνητικά πεδία, την ικανότητά τους να παραμένουν μαγνητισμένα, και να δρουν, έτσι, ως πηγές μαγνητικού πεδίου, και από το γεγονός, ότι η ροπή στρέψης ενός μαγνητικού διπόλου παρουσία μαγνητικού πεδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί στους ηλεκτρικούς κινητήρες.<sup>[7]</sup>

### 2.1.2 Σαμάριο - κοβάλτιο (Sm-Co)

Οι μόνιμοι μαγνήτες Sm-Co αναπτύχθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του '60 σαν αποτέλεσμα έντονης ερευνητικής προσπάθειας για την ανακάλυψη νέων μαγνητικών υλικών με βάση κράματα σπανίων γαιών και των 3d μεταβατικών σιδηρομαγνητικών μετάλλων, σίδηρο, κοβάλτιο και νικέλιο. Γρήγορα αποδείχθηκε, ότι τα κράματα Sm-Co έχουν ισχυρότερη ανισοτροπία (η μεταβολή των φυσικών ή χημικών ιδιοτήτων των κρυσταλλικών σωμάτων ,που οφείλεται στην πυκνότητα τους και στην κανονική διάταξη των μορίων τους στο χώρο) από τα κράματα Sm-Fe(Σαμαρίου– Σιδήρου) και Sm-Ni(Σαμαρίου – Νικελίου), και ότι τα κράματα με τις ελαφριές σπάνιες γαίες παρουσιάζουν μεγαλύτερη μαγνήτιση κόρου.

Τα Sm-Co υλικά βρίσκονται σε ενεργειακά προϊόντα από 16 MGOe έως 33 MGOe. {Η αποθηκευμένη ενέργεια σε έναν μαγνήτη, που ονομάζεται απόδοση μαγνήτη ή μέγιστο ενεργειακό προϊόν (συντομογραφία συχνά BHmax), συνήθως μετριέται σε μονάδες megagauss-oersteds (MGOe). Ένα MGOe είναι περίπου ίση με 7957,74715 J/m<sup>3</sup>.} Η υψηλή αντίσταση σε απομαγνήτιση και η εξαιρετική θερμική σταθερότητα εξασφάλισε στα κράματα Sm-Co, την κύρια επιλογή για τις πιο απαιτητικές εφαρμογές κινητήρων. Επιπλέον, η αντίσταση στη διάβρωση είναι σημαντικά υψηλότερη από ότι, για παράδειγμα, τα κράματα Νεοδύμιου-σιδήρου- βορίου. ( ακόμα συνιστάται για την επίστρωση του μαγνήτη σε όξινες συνθήκες, ). Η αντοχή του στη διάβρωση έχει προσφέρει επίσης ένα υψηλό επίπεδο άνεσης σε όσους επιθυμούν να χρησιμοποιούν μαγνήτες σε ιατρικές εφαρμογές.

Σε μια «ανά λίβρα» βάση το, Sm-Co είναι το πιο ακριβό υλικό μόνιμου μαγνήτη. Ωστόσο, λόγω της υψηλής ενέργειας προϊόντων του, έχει επιτύχει σημαντική εμπορική επιτυχία μειώνοντας τον απαιτούμενο όγκο του υλικού του μαγνήτη για να εκπληρώσει μια συγκεκριμένη εργασία. Τα Sm-Co μπορούν τυπικά να χρησιμοποιηθούν μέχρι 300 ° C, αν και, η πραγματική απόδοση τους σε αυτή τη θερμοκρασία διέπεται σε μεγάλο βαθμό από τον σχεδιασμό του μαγνητικού κυκλώματος.

Το Sm-Co μπορεί να είναι επιρρεπής σε ξεφλούδισμα και δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σαν δομικό στοιχείο σε ένα συγκρότημα. Συγκεντρωτικά έχουμε:

## Πλεονεκτήματα

- υψηλή θερμική σταθερότητα
- δυνατή η μικρογραφία (συγκρινόμενη με τους φερρίτες και τα AlNiCo)
- γενικά, δεν χρειάζεται προστασία από τη διάβρωση

## Μειονεκτήματα

- υψηλή τιμή πρώτων υλών
- Ψαθυρότητα (**Ψαθυρότητα** ονομάζεται η ιδιότητα των υλικών να παρουσιάζουν μικρές παραμορφώσεις πριν τη θραύση τους. Αποτέλεσμα της μικρής παραμόρφωσης είναι η μειωμένη ικανότητα τους να απορροφούν ενέργεια πριν αστοχήσουν.)
- αναγκαιότητα υψηλού μαγνητικού πεδίου για μαγνήτιση στον κόρο

Το πρώτο κράμα, που αναπτύχθηκε ήταν η διμεταλλική ένωση Sm-Co<sub>5</sub> με μαγνήτιση κόρου 780 kA/m, συνεκτικό πεδίο 760 kA/m και μέγιστο ενεργειακό γινόμενο 260 kJ/m<sup>3</sup>.

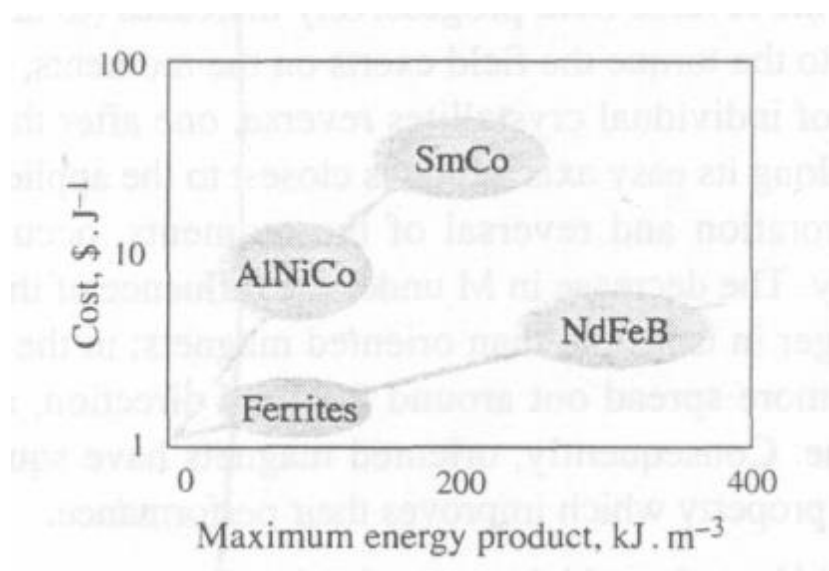
Η μέθοδος μείωση / λιώσιμο και η μέθοδος μείωσης / διάχυσης χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μαγνητών σαμαρίου-κοβαλτίου. Η μέθοδος αναγωγής / τήξης θα περιγραφεί δεδομένου ότι χρησιμοποιείται τόσο για SmCo<sub>5</sub> και Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> παραγωγής. Οι πρώτες ύλες τήκονται σε κλίβανο επαγωγής γεμάτο με αέριο αργόν. Το μίγμα χύνεται μέσα σε ένα καλούπι και ψύχεται με νερό για να σχηματίσει ένα πλίνθωμα. Η ράβδος κονιοποιείται και τα σωματίδια αλέθονται περαιτέρω για την περαιτέρω μείωση του μεγέθους των σωματιδίων. Η προκύπτουσα σκόνη πιέζεται σε μια μήτρα του επιθυμητού σχήματος, σε ένα μαγνητικό πεδίο για να προσανατολίξει το μαγνητικό πεδίο των σωματιδίων. Πυροσυσσωμάτωση εφαρμόζεται σε μία

θερμοκρασία από 1100 ° C-1250 ° C, ακολουθούμενη από επεξεργασία διαλύματος στους 1100 ° C-1200 ° C και σκλήρυνση τελικά εκτελείται στο μαγνήτη σε περίπου 700 ° C-900 ° C.

Παρακάτω δίνεται πίνακας με τις φυσικές ιδιότητες των Sm-co μαγνητών:

Περιγραφή	SmCo 1-5 κράματα	SmCo 2-17 κράματα
Μέτρο elasticity	$23 \times 10^6$ psi	$17 \times 10^6$ psi
Αντοχή στον εφελκυσμό	$6 \times 10^3$ psi	$5 \times 10^3$ psi
Πυκνότητα	8,2 g / cc	8,4 g / cc
Κάθετα στον προσανατολισμό	$13 \times 10^{-6}$ / ° C	$11 \times 10^{-6}$ / ° C
Παράλληλη με τον προσανατολισμό	$6 \times 10^{-6}$ / ° C	$8 \times 10^{-6}$ / ° C
Ηλεκτρική αντίσταση	5 ohm cm	86 ohm cm
Θερμοκρασία Curie	750 ° C	825 ° C
Αναστρέψιμη συντελεστή θερμοκρασίας του υπολειμματικού επαγωγής (-100 ° C έως + 100 ° C)	-0,043 % / ° C	-0.03 % / ° C
Recoil διαπερατότητα	1.05	1.05
Μαχ. θερμοκρασία λειτουργίας *	250 ° C	300 ° C





*Εικόνα 10: Κόστος σε \$ δολάρια ( USD) συναρτήσει του μέγιστου ενεργειακού προϊόντος που παίρνουμε ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιούμε.*

Οι μόνιμοι μαγνήτες χρησιμοποιούνται σε τεχνολογικές εφαρμογές εξαιτίας της ικανότητάς τους να δημιουργούν μαγνητικό πεδίο χωρίς κατανάλωση ενέργειας. Οι παγκόσμιες πωλήσεις σε μόνιμους μαγνήτες είναι της τάξης μεγέθους των \$ 4 δισ. σε αξία και των 400.000 τόνων σε βάρος.<sup>[7]</sup>

## 2.2 Κατηγορίες σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη

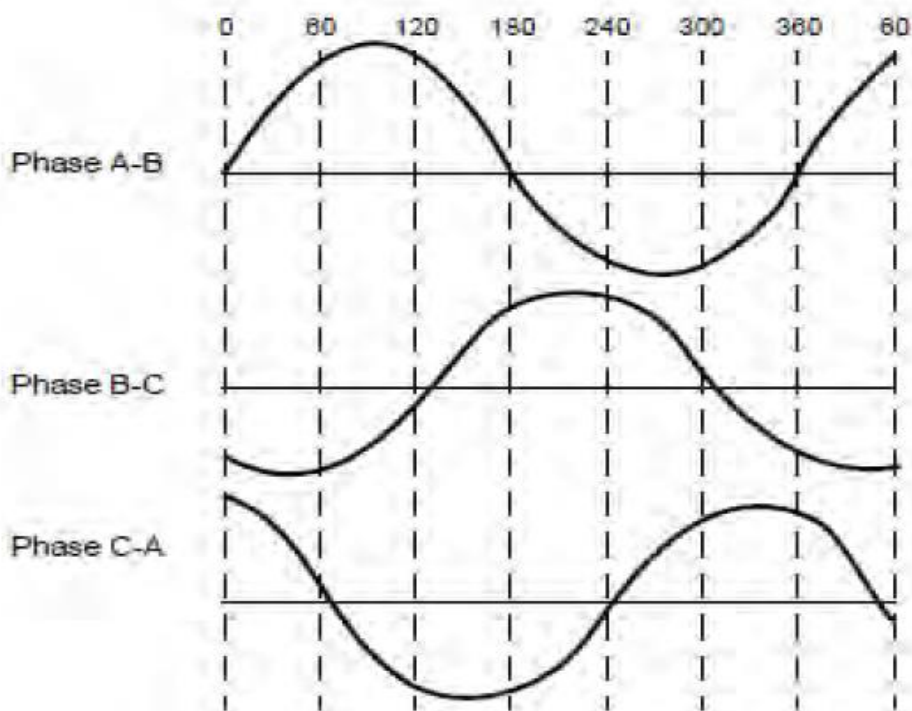
Οι κατασκευαστικοί τύποι σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες με κριτήριο τη μορφή της επαγόμενης τάσης στο στάτη:

- ✚ Σε τραπεζοειδείς ή τετραγωνικού παλμού ή διακοπτικής διέγερσης σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη (trapezoidal ή squarewave ή switched PM synchronous machines)
- ✚ Σε ημιτονοειδείς σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη (sinusoidal PM synchronous machines)

Στις μηχανές της πρώτης κατηγορίας τα φασικά ρεύματα στο στάτη έχουν τετραγωνική μορφή. Σε ένα τριφασικό σύστημα, τετραγωνικοί παλμοί ρεύματος, διάρκειας 120 ηλεκτρικών μοιρών τροφοδοτούν τη μηχανή, στην οποία η τάση εξ' επαγωγής είναι τραπεζοειδής, με το σταθερό τμήμα συγχρονισμένο έτσι ώστε να συμπίπτει με τα διαστήματα όπου το φασικό ρεύμα διατηρεί σταθερή τιμή. Σε αυτόν τον τύπο μηχανών, είναι απαραίτητη η γνώση της θέσης του δρομέα μόνο στα σημεία μετάβασης, δηλαδή κάθε 60 ηλεκτρικές μοίρες σε μια τριφασική μηχανή. Επειδή η εξίσωση ροπής – ταχύτητας που προκύπτει με την εφαρμογή του ελέγχου είναι αντίστοιχη της μηχανής συνεχούς ρεύματος, χαρακτηρίζονται ως «brushless dc machines». Οι μηχανές αυτές δεν έχουν καμία σχέση ως προς την κατασκευή τους, με τις κλασικές μηχανές συνεχούς ρεύματος, ωστόσο μέσω του ελέγχου πετυχαίνουμε να συμπεριφέρονται σαν να είναι μηχανές συνεχούς ρεύματος.<sup>[8]</sup>

Στις μηχανές της δεύτερης κατηγορίας απαιτείται συνεχής γνώση της θέσης του δρομέα, ώστε να τροφοδοτείται η μηχανή με ημιτονοειδείς τάσεις και ρεύματα, με παλμική ρύθμιση της τάσης τροφοδοσίας. Η τάση εξ' επαγωγής είναι ημιτονοειδής ώστε η αλληλεπίδραση με τα ημιτονοειδή ρεύματα να οδηγεί στην παραγωγή σταθερής ροπής με πολύ μικρή ταλάντωση. Οι μηχανές αυτές έχουν τη συμπεριφορά των κλασικών σύγχρονων μηχανών, για αυτό το λόγο καλούνται και «brushless ac» μηχανές. Ωστόσο, επειδή στην περίπτωση χρήσης διανυσματικού ελέγχου εφαρμόζεται σε χρονικά αμετάβλητα μεγέθη, μπορεί να θεωρηθεί ότι τουλάχιστον στο επίπεδο ελέγχου η λειτουργία και των μηχανών αυτών προσεγγίζει τη λειτουργία των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Για αυτό πολλές φορές συγχέονται με τις «brushless dc» μηχανές της προηγούμενης κατηγορίας, αν και δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι και ο χαρακτηρισμός τους ως brushless dc μηχανές είναι εντελώς λάθος.

Οι «brushless dc» μηχανές έχουν ένα απλό και πιο εύκολο υλοποιήσιμο έλεγχο σε σύγκριση με τις «brushless ac» μηχανές, ωστόσο εμφανίζουν μεγαλύτερες ταλαντώσεις ροπής και ο συνολικός βαθμός απόδοσης του κινητήριου συστήματος είναι μικρότερος.<sup>[9]</sup>

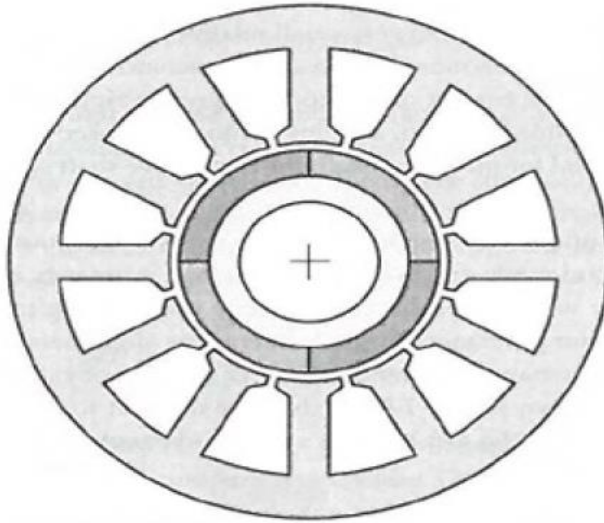


**Εικόνα 11: Τάση εξ' επαγωγής: α) τραπεζοειδής και β) ημιτονοειδής.**

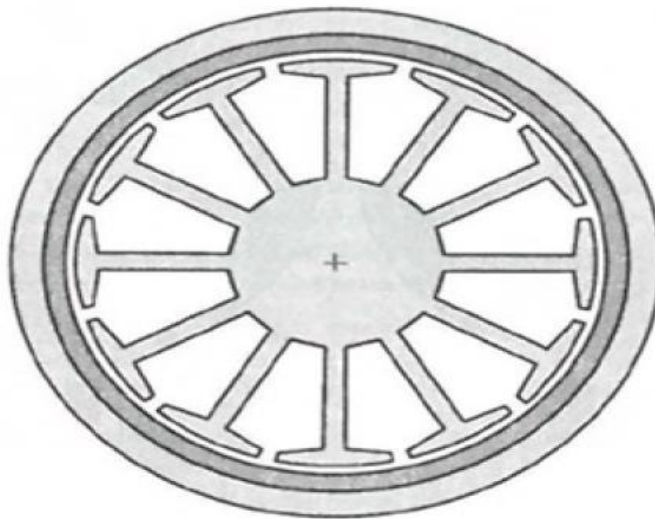
Μια άλλη κατηγοριοποίηση στις σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη, γίνεται με κριτήριο την κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής, από όπου προκύπτουν οι εξής κατηγορίες:

- ✚ Μηχανές ακτινικής ροής (radial flux machines), στις οποίες οι δυναμικές γραμμές μεταξύ δρομέα και στάτη ακολουθούν ακτινική διεύθυνση. Ο δρομέας σε αυτές τις μηχανές μπορεί να είναι εσωτερικός ή εξωτερικός

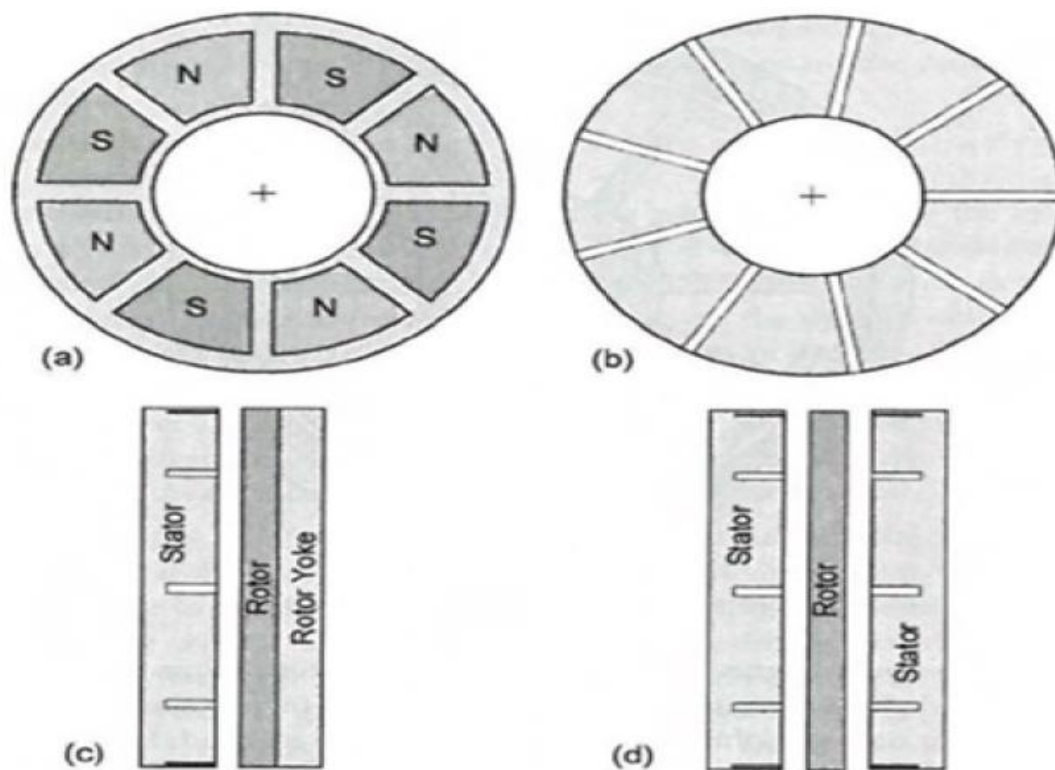
- ✚ Μηχανές αξονικής ροής (axial flux machines), στις οποίες το μαγνητικό πεδίο ακολουθεί πορεία αξονικής διεύθυνσης και τα τυλίγματα είναι προσανατολισμένα σε ακτινική διεύθυνση<sup>[10]</sup>



*Εικόνα 12: Μηχανή ακτινικής ροής εσωτερικού δρομέα.*



*Εικόνα 13: Μηχανή ακτινικής ροής εξωτερικού δρομέα.*



**Εικόνα14: Μηχανές αξονικής ροής: a) δρομέας αυλακώσεις που δημιουργούν αξονική κατανομή του πεδίου, b) στάτης με ακτινικές αυλακώσεις, c) δρομέας ενωμένος με το στάτη, d) δρομέας ανάμεσα σε δύο στάτες.**

Στην Εικόνα 14a) απεικονίζεται ένας δρομέας με μαγνήτες εναλλασσόμενης πολικότητας. Αυτοί οι μαγνήτες δημιουργούν αξονική κατανομή του πεδίου που αλληλεπιδρά με τα τυλίγματα σε ακτινικές αυλακώσεις, όπως εκείνες που απεικονίζονται στην Εικόνα 14b). Σε πολλές εφαρμογές ο δρομέας είναι ενωμένος με το στάτη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14c). Αυτή η διαμόρφωση είναι απλή αλλά χαρακτηρίζεται από ανομοιομορφία. Επιπλέον από τη ροπή, αυτή η διαμόρφωση παρουσιάζει πολύ μεγάλη αξονική δύναμη, λόγω της προσπάθειας των μαγνητών του δρομέα να κλείσουν το διάκενο αέρα. Μετατρέποντας το ζυγό του δρομέα σε ένα δεύτερο στάτη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14d), οι δυνάμεις ισορροπούν και η απόδοση της μηχανής βελτιώνεται.<sup>[10]</sup>

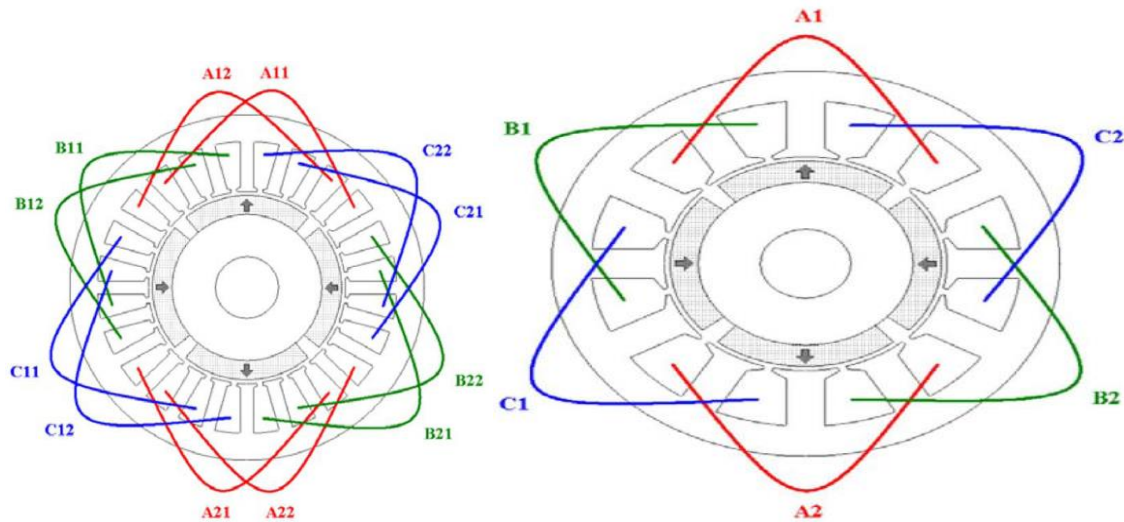
Εκτός από τη χρήση τους σε οδηγούς δίσκων άξονα, οι μηχανές αξονικής ροής δεν έχουν ευρεία χρήση.

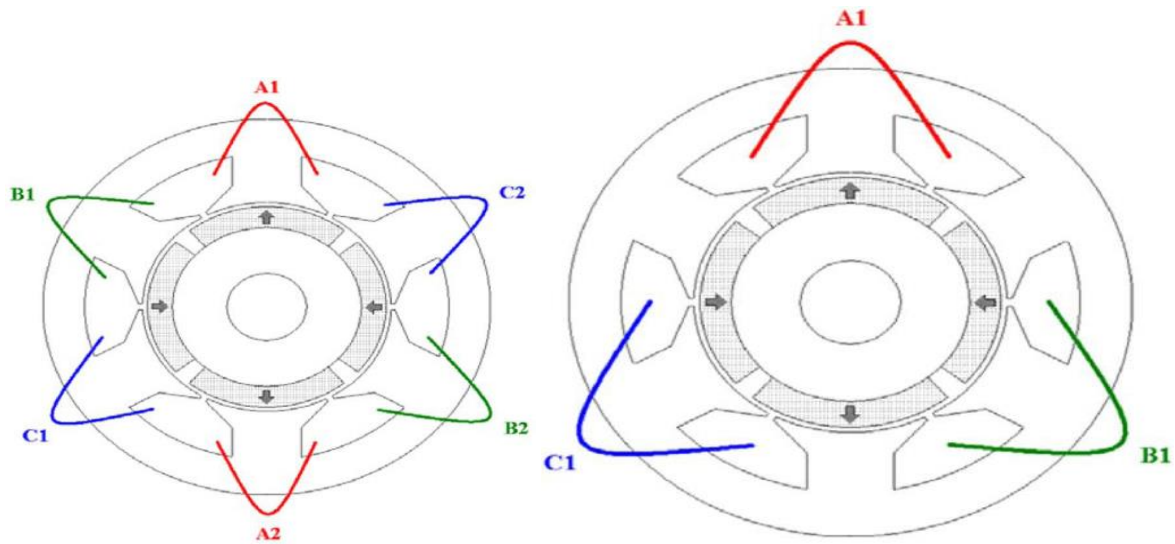
## 2.3 Τεχνολογίες σύγχρονων κινητήρων επιφανειακών μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης

Οι σύγχρονες μηχανές με μόνιμο μαγνήτη μπορεί να είναι μονοφασικές, δύο φάσεων ή τριφασικές. Η πιο διαδεδομένη και κοινή στη χρήση είναι η τριφασική.

Οι διαθέσιμες τοπολογίες τυλιγμάτων για Σύγχρονους Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών (ΣΚΜΜ) (*Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSMs)*) ακτινικής ροής κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- ✚ τυλίγματα με επικαλυπτόμενες κεφαλές, είτε κατανεμημένα (π.χ. δύο αύλακες ανά πόλο και φάση) ή συγκεντρωμένα (μία αύλακα ανά πόλο και φάση) (Εικόνες 15α) και 15β) αντίστοιχα).
- ✚ τυλίγματα με μη επικαλυπτόμενες κεφαλές, τυλιγμένα είτε γύρω από όλα τα δόντια του στάτη, διπλής στρώσης (*all teeth wound, Double Layer (DL) windings*) ή εναλλάξ, απλής στρώσης, (*alternative teeth wound, Single Layer (SL) windings*), τα οποία στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως Συγκεντρωμένα Τυλίγματα Κλασματικού Βήματος (ΣΤΚΒ), (*Fractional-Slot Concentrated-Windings (FSCWs)*) (Εικόνες 15γ) και 15δ) αντίστοιχα).<sup>[10]</sup>





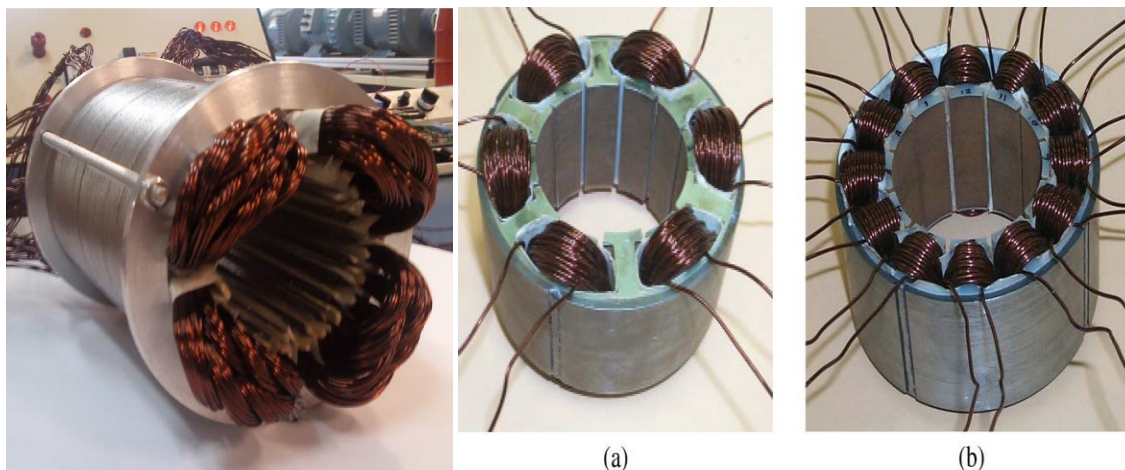
**Εικόνα 15:** Τυπικές διαμορφώσεις τυλιγμάτων στάτη (τετραπολική μηχανή).

- (α) 24 αύλακες, κατανεμημένο τύλιγμα με επικαλυπτόμενες κεφαλές τυλίγματος
- (β) 12 αύλακες, συγκεντρωμένο τύλιγμα με επικαλυπτόμενες κεφαλές τυλίγματος
- (γ) 6 αύλακες, μη επικαλυπτόμενες κεφαλές τυλίγματος, όλα τα δόντια στάτη τυλιγμένα
- (δ) 6 αύλακες, μη επικαλυπτόμενες κεφαλές τυλίγματος, δόντια στάτη εναλλάξ τυλιγμένα

Πρωτότυπα δοκίμια συστημάτων που ενσωματώνουν κλασικό τριφασικό τύλιγμα, όπως και τους παραπάνω τύπους τυλίγματος, φαίνονται στις Εικόνες 16α) – 16γ).

Η χωρική κατανομή μαγνητικής ροής (*Magneto-Motive Force (MMF) distribution*), που οδηγεί σε ημιτονοειδή κυματομορφή. Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης (ΗΕΔ) (*Electro-Motive Force (EMF)*) με μειωμένες αρμονικές χώρου, ή αρμονικές χαμηλής τάξεως χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε μηχανές μονίμων μαγνητών εναλλασσόμενου ρεύματος (*PM brushless ac machines*).<sup>[10]</sup>





**Εικόνα 16:** Οι βασικότερες διαμορφώσεις τυλιγμάτων ΣΚΜΜ για την εφαρμογή του ηλεκτροκίνητου οχήματος.

(α) 24 αύλακες - 8 πόλοι, συγκεντρωμένο τριφασικό τύλιγμα διπλής στρώσης.

(β) 12 αύλακες – 10 πόλοι απλής στρώσης.

(γ) 12 αύλακες – 10 πόλοι διπλής στρώσης.

**Πίνακας 1:** Σύγκριση κατανεμημένων και συγκεντρωμένων τυλιγμάτων.

Κριτήριο σύγκρισης	Κατανεμημένα τυλίγματα	Συγκεντρωμένα τυλίγματα
Τυπικός συντελεστής πληρότητας χαλκού αυλάκων	35% - 45%	50% - 65% (σε συνδυασμό με τμηματικές, συναρμολογούμενες δομές στάτη)
Δομή στάτη	Συνεχή φύλλα μαγνητικής λαμαρίνας	Συνεχή φύλλα από τμηματικές δομές στάτη
Κεφαλές τυλιγματος	Μεγάλου μήκους / Επικαλυπτόμενες	Μικρού μήκους / Μη επικαλυπτόμενες
Αρμονική συνιστώσα χώρου του κύματος ΜΕΔ στάτη που παράγει ροπή	Θεμελιώδης	Υψηλότερης τάξης αρμονική (εκτός της περίπτωσης 0.5 αυλάκων ανά πόλο και φάση)

Ένα από τα πλεονεκτήματα των σύγχρονων μηχανών μονίμου μαγνήτη είναι η ικανότητά τους να επιτυγχάνουν σημαντικά βελτιωμένους συντελεστές πληρότητας αυλάκων, ειδικά όταν συνδυάζονται με συναρμολογούμενες δομές στάτη, αποτελούμενες από επιμέρους δομικά μέρη.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ SM-CO ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ**

### **3.1 Εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης σε μικρά σκάφη**

Εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης έχουμε όπως είναι φυσικό και σε μικρότερα σκάφη, όπως σε μικρού και μεσαίου μεγέθους σκάφη αναψυχής, σε ιστιοπλοϊκά, σε αλιευτικές βάρκες κ.ά.. Χρησιμοποιούνται σαν βοηθητική αλλά και σαν κύρια πρόωση. Τα συστήματα πρόωσης είναι όμοια με αυτά των ηλεκτροκίνητων πλοίων, βέβαια μειώνεται κατά πολύ η ονομαστική ισχύς λειτουργίας και ο βαθμός πολυπλοκότητας τους.

Τα μικρά σκάφη μέχρι 6 – 7 μέτρα χρησιμοποιούν αμιγώς ηλεκτρική πρόωση, όπου μπαταρίες ή και κυψέλες καυσίμου τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες. Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος Σ.Ρ/Σ.Ρ ή Σ.Ρ./Ε.Ρ., αναλόγως τον ηλεκτρικό κινητήρα της εφαρμογής, ελέγχουν τις στροφές της έλικας. Η ντιζελοηλεκτρική πρόωση χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερα σκάφη και έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την αντίστοιχή της στα πλοία.

Η χρήση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος Σ.Ρ. είναι ευρέως διαδεδομένη στις εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης χαμηλής ισχύος όπως και των σύγχρονων κινητήρων, κυρίως μονίμου μαγνήτη και για τα δύο είδη κινητήρων. Δε λείπουν όμως και οι ασύγχρονοι κινητήρες. Η μηχανή πρόωσης συνδέεται απευθείας ή μέσω μειωτήρων (τροχαλίες – ιμάντες) με τον άξονα της έλικας. Η αζιμουθιακή πρόωση (azimuth thrusters) σε αυτά τα συστήματα βρίσκει εφαρμογή κυρίως στην βοηθητική πρόωση (bow thrusters) σκαφών αναψυχής. Διαδεδομένοι είναι και οι εξωλέμβιοι ηλεκτρικοί κινητήρες, στους οποίους ο ηλεκτρικός κινητήρας μπορεί να είναι έξω από το νερό, αντίστοιχα με τους συμβατικούς εξωλέμβιους κινητήρες, αλλά και μέσα στο νερό.

### **3.2 Εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης**

Ενώ παλαιότερα η ηλεκτρική πρόωση έβρισκε μόνον 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. Γενικά, η ηλεκτρική πρόωση μπορεί να αποδειχθεί η καταλληλότερη λύση στις ακόλουθες κατηγορίες εφαρμογών:

#### Σκάφη με μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων

Σκάφη με δικά τους μέσα φόρτο – εκφόρτωσης, πυροσβεστικά σκάφη, μεγάλα δεξαμενόπλοια, κ.ά. έχουν μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων, που δε συμπίπτει χρονικά με τη μέγιστη ισχύ πρόωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν ορισμένα δεξαμενόπλοια (π.χ. εκείνα που μεταφέρουν πετρέλαιο από τις εξέδρες εξόρυξης στη στεριά), τα οποία ξοδεύουν μεγάλο μέρος του χρόνου στη φόρτωση (4– 10 μέρες) ενώ το ταξίδι είναι σχετικά σύντομο. Κατά τη διάρκεια της φόρτωσης η ηλεκτρική ισχύς, που απαιτείται για την κίνηση των διαφόρων μηχανημάτων, μπορεί να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ισχύ πρόωσης. Αναφέρεται, π.χ., η περίπτωση δεξαμενοπλοίου με ισχύ πρόωσης 19000 kW, και απαιτήσεις ισχύος 17000 kW – 22000kW κατά τη διάρκεια της φόρτωσης. Τα 6800 kW απαιτούνται από τις έλικες πλευρικής ώσης (τρεις στην πλώρη και δύο στην πρύμνη), που χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση του σκάφους στην κατάλληλη θέση (δυναμική τοποθέτηση – dynamic positioning – D.P.). Ας σημειωθεί ότι το πλοίο θα πρέπει να μπορεί να φορτώνει ακόμη και με κύματα ύψους 5 – 7 m. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το συγκρότημα ηλεκτρογεννητριών προσφέρει ισχύ είτε για πρόωση είτε για την κίνηση αντλιών ή μεγάλων μηχανημάτων διακίνησης φορτίου.

#### Σκάφη με μεγάλα φορτία ενδιαίτησης και έντονη διακύμανση της ισχύος πρόωσης

Τέτοιες συνθήκες παρουσιάζονται σε μεγάλα επιβατηγά πλοία και ιδιαίτερα στα κρουαζιερόπλοια, όπου οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις άνεσης και εξυπηρέτησης των επιβατών συντελούν σε αύξηση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος, η οποία αρχίζει να αποτελεί σοβαρό ποσοστό της ισχύος πρόωσης φθάνοντας το 30 – 40 %. Επιπλέον, τα σύγχρονα κρουαζιερόπλοια έχουν μέγιστη ταχύτητα 21 –22 κόμβων, στην οποία ταξιδεύουν κατά πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, ενώ κατά το μεγαλύτερο χρόνο κινούνται με ταχύτητα 9 – 14 κόμβων. Σκάφη εξοπλισμένα με πολλές ταχύστροφες μη αναστρέψιμες μηχανές. Οι αεριοστροβίλοι και πολλές ταχύστροφες μηχανές Diesel έχουν σταθερή φορά περιστροφής και συχνά εγκαθίστανται δύο, τρεις ή και περισσότερες μονάδες, που παράγουν την απαιτούμενη συνολική ισχύ. Σε τέτοιες περιπτώσεις η ηλεκτρική πρόωση προσφέρει έναν εύκολο τρόπο (ηλεκτρικής και όχι μηχανικής) σύνδεσης ενός κινητήρα πρόωσης με πολλές κύριες μηχανές, καθώς και ρύθμισης της ταχύτητας και της φοράς περιστροφής της έλικας.

#### Υποβρύχια και βαθυσκάφη

Ηλεκτρική ενέργεια αποθηκευμένη σε συσσωρευτές καθώς και συστήματα κυμαλών καυσίμου πρόσφατης τεχνολογίας χρησιμοποιούνται για την κίνηση ενός ή περισσότερων κινητήρων πρόωσης του σκάφους με σχετικά χαμηλή ταχύτητα.

Ειδικά στα πολεμικά πλοία, η ηλεκτροπρόωση αποτελεί την 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 προωστήρια εγκατάσταση της επόμενης γενιάς και των μεγάλων πολεμικών πλοίων. Οι αυξημένες απαιτήσεις και οι αυστηρότερες - σε σχέση με τα εμπορικά πλοία - προδιαγραφές των πολεμικών ναυτικών, (τόσο από περιορισμούς χώρου αλλά και απαιτήσεις του προωστήριου συστήματος), προϋποθέτουν περαιτέρω ανάπτυξη των υποσυστημάτων της ηλεκτροπρόωσης.<sup>[11]</sup>



*Εικόνα 17: Το πρώτο ηλεκτρικό πλοίο στόχος της ελληνογαλλικής κοινοπραξίας.*

### **3.2 Ποιότητα Ισχύος**

Στα συστήματα ηλεκτρικών πλοίων, όπως και σε όλες τις εφαρμογές που χρησιμοποιούν μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος αναπτύσσεται μεγάλο πλήθος αρμονικών συνιστωσών

ρεύματος και τάσεως. Οι αρμονικές αυτές προσανξάνουν τη συνολική κυκλοφορούσα άεργο ισχύ στο ηλεκτρικό δίκτυο, δημιουργούν όμως προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Ο παραγόμενος «ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος» επηρεάζει αρνητικά όλες τις ευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις –πρωτίστως τα κυκλώματα ελέγχου των ίδιων των ηλεκτρονικών ισχύος – ενώ σε περιπτώσεις στρατιωτικών εφαρμογών αυξάνει τα επίπεδα της ηλεκτρομαγνητικής υπογραφής των πλοίων. Βέβαια, αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με χρήση κατάλληλων φίλτρων που περιορίζουν το αρμονικό περιεχόμενο ή με εξεζητημένες τεχνικές έναυσης-σβέσης των διακοπών.<sup>[11]</sup>

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι βασικότεροι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρική πρόωση.

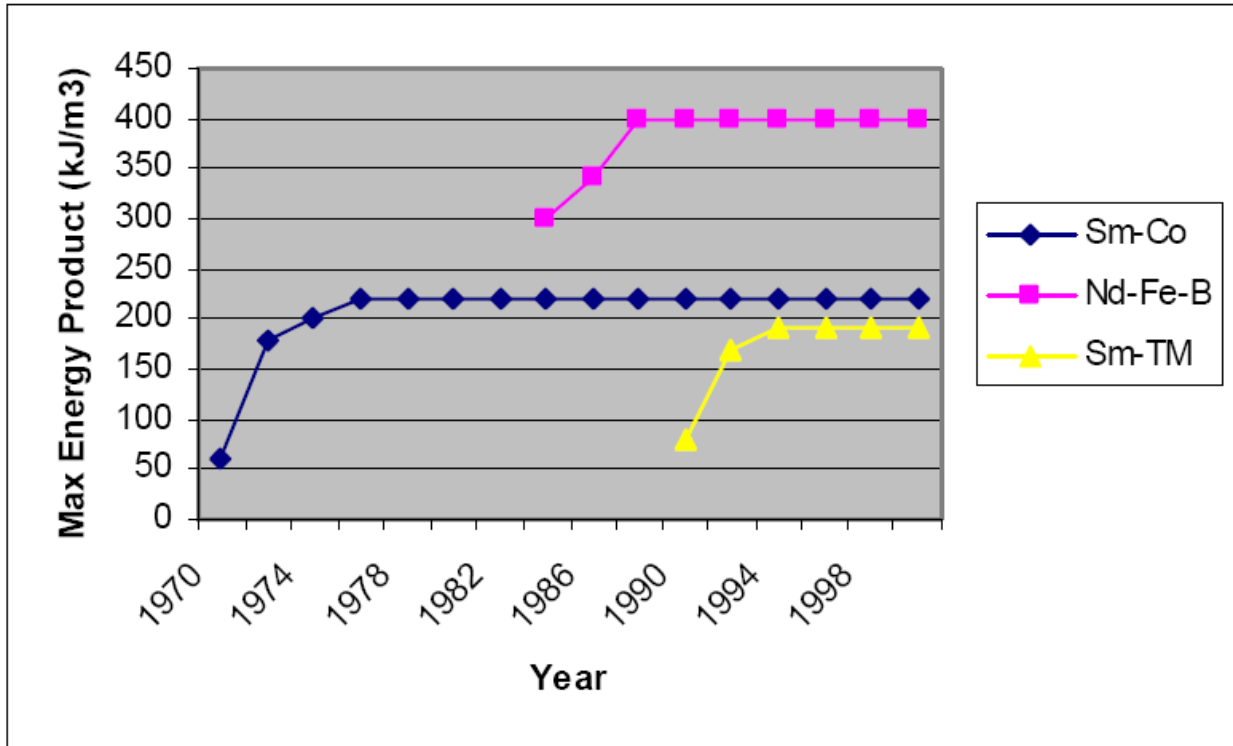
**Πίνακας 2: Συγκεντρωτική παρουσίαση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος για ηλεκτρική πρόωση.**

Μετατροπέας	Διάταξη	Μέγιστη ισχύς	Κυριαρχούσες αρμονικές
Ανορθωτής		>6 MVA	6.n.f <sub>i</sub>
Αντιστροφέας CSI		1 MVA	(3k±1).f <sub>o</sub>
Αντιστροφέας LCI		>30 MVA	(3k±1).f <sub>o</sub>
Αντιστροφέας VSI		2 MVA	(3k±1).f <sub>o</sub>
Αντιστροφέας PWM		2 MVA (IGBT) 6 MVA (GTO)	2.n.f <sub>o</sub>
Κυκλομετατροπέας		>30 MVA	6.n.f <sub>i</sub> ±(2.p+1).f <sub>o</sub>

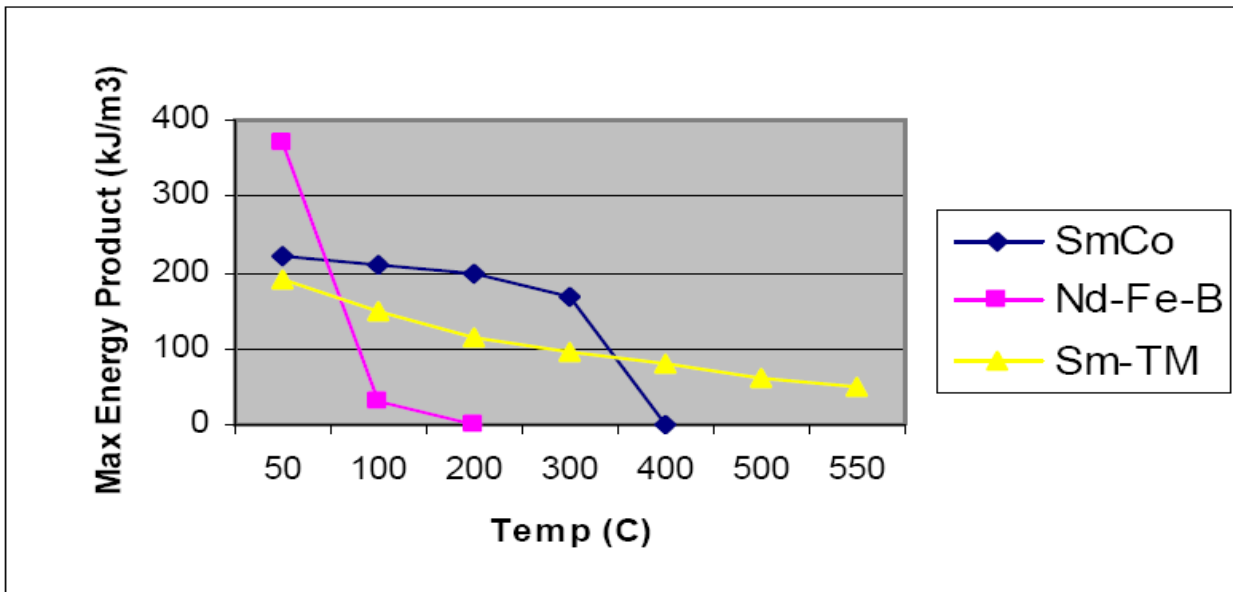
*n=1,2,3,... k=2,4,6,... p=0,1,2,3,... f<sub>i</sub>=συχνότητα εισόδου f<sub>o</sub>=συχνότητα εξόδου*

### 3.3 Χρήση μόνιμων μαγνητών

Οι σύγχρονοι κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη δεν έχουν ανάγκη από μια έξτρα παροχή Σ.Ρ. για το τύλιγμα διέγερσης, ακόμη μειώνονται και οι συνολικές θερμικές απώλειες (Joule), έτσι εξηγείται και ο μεγάλος βαθμός απόδοσης. Η ιδέα της χρήσης μονίμων μαγνητών είναι παλιά αλλά η τεχνολογική πρόοδος τα τελευταία χρόνια είναι που κατέστησε δυνατή την κατασκευή κραμάτων μόνιμων μαγνητών (κράματα σαμαρίου – κοβαλτίου, SmCo και νεοβιδίου – σιδήρου – βορείου, NdFeB) που έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν σταθερή τη μαγνήτισή τους για αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, όπως είναι αυτές που αναπτύσσονται στο εσωτερικό μίας στρεφόμενης μηχανής (Εικόνα 18, 19).<sup>[3]</sup>



Εικόνα 18: Εξέλιξη τεχνολογίας μονίμων μαγνητών τα τελευταία 30 χρόνια.

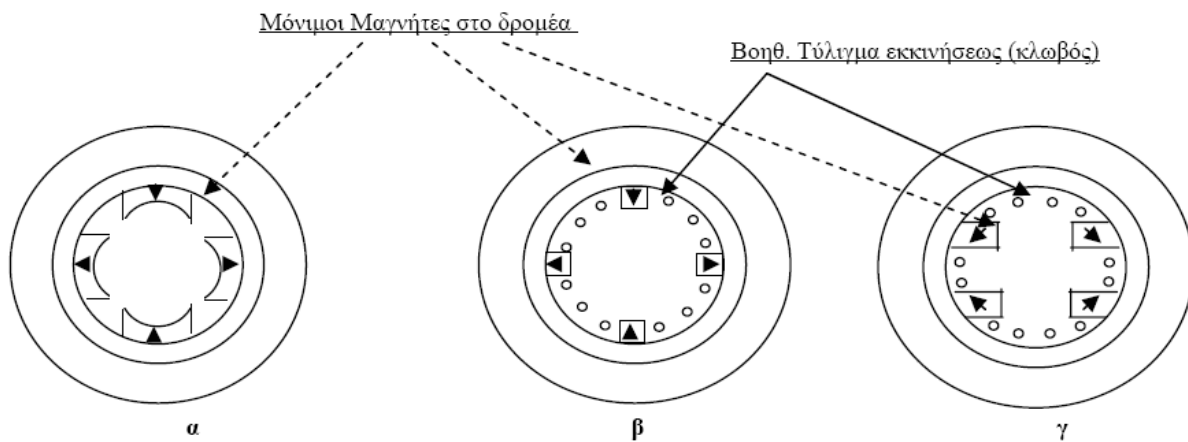


Εικόνα 19: Επιδόσεις μονίμων μαγνητών ως προς τη θερμοκρασία μαγνήτισης.

Τα τελευταία χρόνια ερευνάται η χρησιμοποίηση ηλεκτρικών κινητήρων με υπεραγωγία υλικά ως κινητήρες πρόωσης, κυρίως στην Αμερική. Οι κινητήρες αυτοί, λόγω του ότι το

υπεραγώγιμο υλικό παρουσιάζει μηδενική ηλεκτρική αντίσταση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, έχουν πολύ μεγάλη ισχύ ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με τους συμβατικούς κινητήρες.

Θεωρούνται έτσι ιδανικοί για την πρόωση πολεμικών πλοίων όπου ο χώρος είναι περιορισμένος σε συνδυασμό με τις αυξημένες ανάγκες ισχύος. Η εταιρεία American Super conductor Inc. χρηματοδοτείται από το Αμερικανικό Πολεμικό Ναυτικό για να κατασκευάσει έναν κινητήρα πρόωσης ονομαστικής ισχύος 25 MW.<sup>[3]</sup>



*α) οι μόνιμοι μαγνήτες στην εξωτερική επιφάνεια του δρομέα*

*β) οι μόνιμοι μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα*

*γ) οι μόνιμοι μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα με διεύθυνση ροής εγκάρσια στον άξονα*

**Εικόνα 20: Διατάξεις σύγχρονων κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες.**

Οι προηγμένοι κινητήρες Ε.Ρ. είναι κινητήρες στους οποίους η ωφέλιμη μαγνητική ροή είναι κατά την ακτινική διεύθυνση δηλαδή όπως στις συνήθεις συμβατικές ηλεκτρικές μηχανές.

Αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις τέτοιων κινητήρων είναι ο κινητήρας PERMASYN της εταιρείας SIEMENS, με μόνιμους μαγνήτες SmCo που βρίσκει εφαρμογές πρόωσης μεταξύ άλλων σε υποβρύχια του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού.

Οι μόνιμοι μαγνήτες χρησιμοποιούνται ως εναλλακτική πηγή πεδίου διέγερσης στις σύγχρονες μηχανές, αντικαθιστώντας το τύλιγμα πεδίου που τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Ο μόνιμος μαγνήτης έχει αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια, η οποία διατηρείται αν δεν επιβληθεί πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο αντίθετα σε αυτόν. Ο μόνιμος μαγνήτης δεν παρέχει ισχύ, αλλά την προϋπόθεση για ανάπτυξη ροπής. Η ισχύς παρέχεται από το τύλιγμα του τυμπάνου της μηχανής. Στην περίπτωση χρήσης τυλίγματος για τη δημιουργία του πεδίου διεγέρσεως, η ενέργεια του πεδίου αυτού διατηρείται. Το βασικό του όμως μειονέκτημα είναι οι ωμικές απώλειες λόγω της αντίστασης των πηνίων.<sup>[12]</sup>

Αποτελούν σήμερα μια εκ των πλέον πρόσφορων τεχνολογιών για ενσωμάτωση σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Η συνδυασμένη πρόοδος της τεχνολογίας των υλικών μόνιμου μαγνήτη, όπως και των τεχνικών σχεδίασης και κατασκευής, έχει επιτρέψει την ανάδειξη ουσιαστικών πλεονεκτημάτων σε σχέση με τις κλασσικές τοπολογίες, ενώ ταυτόχρονα έχει μειώσει σημαντικά τα κόστη κατασκευής. Στα πλεονεκτήματά τους συμπεριλαμβάνονται η υψηλή πυκνότητα ισχύος, η υψηλή απόδοση, οι μικρότερες κεφαλές τυλίγματος και ο υψηλός συντελεστής πληρότητας, ειδικά όταν συνδυάζονται με συναρμολογούμενους στάτες, αποτελούμενους από επιμέρους δομικά μέρη (*segmented stators structures*). Επίσης, οι κινητήρες αυτοί ευνοούν τη μείωση των αρμονικών ροπής λόγω αρμονικών χώρου και την εφαρμογή εξασθένισης πεδίου σε συνδυασμό με την αυξημένη αξιοπιστία λειτουργίας.

Συνοπτικά, η χρήση μόνιμων μαγνητών στην κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών προσφέρει μειωμένες απώλειες, ενώ δεν υπάρχει πλέον ανάγκη παροχής DC ρεύματος στο δρομέα μέσω ψηκτρών ή δακτυλίων.

Ένα μειονέκτημά τους είναι η σταθερή τιμή της μαγνήτισής τους, δεν υπάρχει δηλαδή δυνατότητα μεταβολής της διέγερσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως, κρίνεται σκόπιμο να υπάρχει έλεγχος διέγερσης (*field weakening*). Επιπλέον, υπάρχει κίνδυνος απομαγνήτισης των μόνιμων μαγνητών λόγω επιβολής ισχυρού εξωτερικού πεδίου, πολύ υψηλής θερμοκρασίας ή έπειτα από έντονη μηχανική καταπόνηση. Παρόλα αυτά, η χρήση τους διαδίδεται όλο και περισσότερο, ιδιαιτέρως λόγω της ανακάλυψης του κράματος NdFeB που ήρθε να αντικαταστήσει το ακριβότερο, SmCo.<sup>[12]</sup>



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ηλεκτροπρόωση αποτελεί μία αρκετά δελεαστική επιλογή για τα πλοία που συνεχώς κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια μεταξύ των άλλων λόγω και της γενικά εντατικής εξέλιξης όλων των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων και κυρίως στον τομέα των διατάξεων ελέγχου των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος. Η έρευνα κατά την τρέχουσα περίοδο επικεντρώνεται στη μείωση του αρχικού κόστους επένδυσης αλλά και στην αύξηση των επιδόσεων του συνολικού συνδυασμού των διατάξεων που αξιοποιούνται από συστήματα ηλεκτροπρόωσης.

Η παροχή μόνιμου μαγνητικού πεδίου χωρίς τη χρήση ηλεκτρικού ρεύματος και περίπλοκων περιελίξεων με χάλκινο σύρμα κτλ. είναι κάτι που προσφέρεται απεριόριστα από τους μόνιμους μαγνήτες. Αυτή η ιδιότητα των μόνιμων μαγνητών βρίσκει εφαρμογές σε διάφορα ήδη ηλεκτρικών κινητήρων. Με τη χρησιμοποίηση των μόνιμων μαγνητών μπορούν να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν ηλεκτρικοί κινητήρες μικρότερου όγκου και μάζας, χαμηλού θορύβου και μεγαλύτερης ισχύος.

Ιδίως οι μόνιμοι μαγνήτες Sm-Co χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να διατηρούν σταθερή τη μαγνήτιση τους σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Η ιδιότητά τους αυτή είναι πολύ χρήσιμη για τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό μίας στρεφόμενης μηχανής.

Επίσης, όπως προαναφέραμε οι συγκεκριμένοι κινητήρες με τη χρήση κατάλληλου τυλίγματος και πόλων δρομέα μπορούν να παράγουν ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο,

γεγονός που τους παρέχει τη δυνατότητα να συναγωνίζονται τις συμβατικές σύγχρονες μηχανές στα χαμηλά επίπεδα απότομων αιχμών ροπής και μηχανικών δονήσεων.

Από όλα τα παραπάνω μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι οι συγκεκριμένοι μαγνήτες αποτελούν σήμερα μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία η οποία μπορεί να ενσωματωθεί σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Η τεχνολογία των υλικών μόνιμου μαγνήτη χαρακτηρίζεται από σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις κλασικές τεχνολογίες, ενώ έχει μειώσει σε μεγάλο βαθμό τα κόστη κατασκευής. Επιπλέον, προσφέρουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλή απόδοση, μικρότερες κεφαλές τυλίγματος και υψηλό συντελεστή πληρότητας. Τέλος, η χρήση μόνιμων μαγνητών στην κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών προσφέρει μειωμένες απώλειες, ενώ δεν υπάρχει πλέον ανάγκη παροχής DC ρεύματος στο δρομέα μέσω ψηκτρών ή δακτυλίων.

Συμπερασματικά οι σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών Sm-Co προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα και παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στην ηλεκτροπρόωση.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]:Μπατιστάτος Ν. (1999), «Ανάλυση Συστημάτων Νηξελοηλεκτρικής Πρόωσης Πλοίων», Διπλωματική Μεταπτυχιακή Εργασία ΔΠΜΣ «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας», Αθήνα, Οκτώβριος.
- [2]: Φραγκόπουλος Χ., Προυσαλίδης Ι (2005): «Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου – Τόμος Α΄: Ηλεκτρολογικό μέρος», Διδακτικές σημειώσεις για φοιτητές της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
- [3]: Προυσαλίδης Ι., Χατζηλάου Ι.Κ., Στυβακτάκης Ε., Κανέλλος Φ., Χατζηαργυρίου Ν., Φραγκόπουλος Χ, Σοφράς Η. (2006): «Ηλεκτροπρόωση πλοίων και πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο: προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος», Διήμερο ΤΕΕ : «ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΑ ΜΕΣΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ-ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ», 12-13 Ιανουαρίου.
- [4]: Bose B.K. (1997), *Power Electronics and Variable Frequency Drives: Technology and Applications*, IEEE Press, New York.
- [5]: Bucknall R. W. G., Doherty K. P., Haines N. A. (1997), The matrix converter: the ultimate electric drive technology, Proceedings of “*Electric Warship: Power, Control, System Protection*” Seminar, ImarE, United Kingdom.
- [6]: Gieras J.F., Wing M (1997), *Permanent Magnet Motor Technology – Design and Application*, Marcel Dekker Inc, New York.

[7]: "Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges": Ayman M. EL-Refaie, Senior Member, IEEE (IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2010).

[8]: Paul P. Acarnley and John F. Watson, Review of Position-Sensorless Operation of Brushless Permanent - Magnet Machines, IEEE transactions of industrial electronics, 2006.

[9]: Padmajara Yedamale: Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, Microchip, 2003.

[10]: Duane Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design", Second Edition , Magna Physics Publishing, 2003.

[11]: "ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΖΗΤΗΜΑΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΟ ΠΛΗΡΩΣ ΕΞΗΛΕΚΤΡΙΣΜΕΝΟ ΠΛΟΙΟ": Ι.Μ. Προυσαλίδης, Γ. Αντωνόπουλος, Ι. Κ. Γύπαρης, Π. Βαλλιανάτος (2006).

[12]: Neodymium magnet, Wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium\\_magnet](http://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium_magnet)

[13] A. K. Adnanes, «Maritime electrical installations and diesel – electric propulsion», Tutorial Report/Textbook, ABB Marine AS, Oslo, Norway, 2003.

[14] Ι. Κ. Χατζηλάου, Ι. Μ. Προυσαλίδης, Γ. Αντωνόπουλος, Ι. Κ. Γύπαρης, Π. Βαλλιανάτος, «Εξελίξεις στην ηλεκτροπρόωση πλοίων και ανασκόπηση ζητημάτων σχεδιασμού στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο», Διήμερο ΤΕΕ: «Ηλεκτροκίνητα Μέσα Μεταφοράς στην Ελλάδα – Υφιστάμενη Κατάσταση και Προοπτικές», Αθήνα, 12 – 13 Ιανουαρίου 2006

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	3
ABSTRACT.....	5
ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ .....	7
1.1 Η ηλεκτροπρόωση .....	7
1.2 Ηλεκτρικοί Κινητήρες Πρόωσης .....	10
1.2.1 Κινητήρες αξονικής ροής.....	12
1.2.2 Πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής (transversefluxmotors) .....	12
1.2.3 Πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής (axialfluxmotors).....	13
1.3 Μετατροπείς Συχνότητας.....	14
1.4 Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας Σύγχρονου Κινητήρα .....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΕΣ SM-CO .....	20
2.1 Μαγνητικές ιδιότητες.....	20
2.1.1 Οι μόνιμοι μαγνήτες.....	21
2.1.2 Σαμάριο - κοβάλτιο (Sm-Co).....	22
2.2 Κατηγορίες σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη .....	25
2.3 Τεχνολογίες σύγχρονων κινητήρων επιφανειακών μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης .....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ SM-CO ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ .....	33
3.1 Εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης σε μικρά σκάφη .....	33

3.2 Εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης.....	33
3.2 Ποιότητα Ισχύος .....	35
3.3 Χρήση μόνιμων μαγνητών.....	37
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	41
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	43