

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Όνομα σπουδαστή: Ασημινάκης Γεώργιος

Αριθμός Μητρώου σπουδαστή: 4929

Σχολή: Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών (Σ.Τ.ΕΦ)

Τμήμα: Μηχανολογίας

Επιβλέπων καθηγητής: κ. Γεώργιος Ρουμπελάκης

Θέμα πτυχιακής εργασίας: **Εφαρμογή ηλεκτρικών μηχανών σε συστήματα ηλεκτρικής έλξης (ηλεκτρικός σιδηρόδρομος).**



ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2012

Περιεχόμενα :

Περίληψη της εργασίας αυτής.	Σελ.: 6
Πρόλογος.....	7
<u>Κεφάλαιο 1 : Ηλεκτροκίνητη έλξη συρμών</u>	
1.1 Κινητήρια συστήματα έλξης.....	8
1.2 Εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης παγκοσμίως.....	11
1.3 Τύποι ηλεκτρικών πηγών στην ηλεκτροκίνηση.....	14
<u>Κεφάλαιο 2 : Μετασχηματιστές (Μ/Σ) και επεξεργασία ηλεκτρικής ενέργειας.</u>	
2.1 Μετασχηματιστές.....	15
2.1.1 Μετασχηματιστές τύπου πυρήνα – μανδύα.....	18
2.1.2 Ιδανικός μετασχηματιστής.....	18
2.1.3 Μονοφασικός μετασχηματιστής.....	20
2.1.4 Τριφασικός μετασχηματιστής.....	23
2.1.5 Απώλειες μετασχηματιστή.....	28
2.1.6 Απόδοση μετασχηματιστή.....	28
2.2 Διανομή παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.....	29
2.3 Επεξεργασία ηλεκτρικής ενέργειας.....	32
2.3.1 Μετατροπή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) σε συνεχές (DC), για ανάλογους κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC).....	33
2.3.2 Μετατροπή εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος δικτύου για ανάλογους κινητήρες (AC).....	38

Κεφάλαιο 3 : Κινητήρες συνεχούς ρεύματος Σ.Ρ (DC)

3.1 Εισαγωγή	Σελ.: 39
3.2 Αρχή λειτουργίας.....	39
3.3 Κατασκευαστικά μέρη μηχανής συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ).....	42
3.4 Εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ) και τύποι αυτών.....	46
3.4.1 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ) ξένης διέγερσης (Ξ.Δ) και παράλληλης διέγερσης (Π.Δ).....	51
3.4.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ) διέγερσης σειράς (Δ.Σ).....	61
3.4.3 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ) σύνθετης διέγερσης (Σ.Δ).....	68
3.5 Ρύθμιση στροφών (ταχύτητας περιστροφής) κινητήρων συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ) ανάλογα με την ροπή φορτίου....	73
3.6 Παράλληλη λειτουργία κινητήρων συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ).....	79

Κεφάλαιο 4 : Μηχανική σύνδεση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ) με τον άξονα του συρμού έλξης.

4.1 Εισαγωγή.....	81
4.2 Βοηθητικά συστήματα ηλεκτροκίνητου συρμού.....	81
4.3 Ηλεκτρική τροφοδοσία κινητήρα συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ) και συνεργασία αυτού.....	83
4.4 Πέδηση συρμού ηλεκτροκίνητης έλξης.....	92

Κεφάλαιο 5 : Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες
εναλλασσόμενου ρεύματος (επαγωγικοί κινητήρες) σε
εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης.

Εισαγωγή.	Σελ.: 95
5.1 Στοιχεία ηλεκτροκίνητης έλξης με κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (E.P).....	95
5.1.1 Παντογράφος.....	97
5.2 Κατασκευαστικά στοιχεία (μέρη) επαγωγικών κινητήρων.	100
5.3 Ισχύς και ροπή επαγωγικών κινητήρων και υπολογισμός αυτών.	105
5.4 Επιλογή κινητήρων σε εφαρμογή έλξης συρμού.....	106
5.5 Χαρακτηριστική καμπύλη ταχύτητας περιστροφής σαν συνάρτηση επαγόμενης ροπής και ισχύος στους ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες.....	110
5.6 Εκκίνηση ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων.....	113
5.7 Ρύθμιση και έλεγχος ταχύτητας περιστροφής (στροφών) ασύγχρονων κινητήρων.....	115

Κεφάλαιο 6 : Σύγκριση των διαφορετικών εφαρμογών στην
ηλεκτροκίνητη έλξη και συμπεράσματα από αυτές.

6.1 Σύγκριση των ηλεκτρικών κινητήρων έλξης.....	119
6.2 Συμπεράσματα από τα παραπάνω.....	123
6.3 Βιβλιογραφία.....	126

Ευχαριστίες : Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εισηγητή και επιβλέποντα καθηγητή κ. Γιώργο Ρουμπελάκη, για το ενδιαφέρον του, την συνέπεια του και τις γνώσεις του, οι οποίες ήταν πολύτιμες για να ολοκληρωθεί η εργασία αυτή. Επίσης ευχαριστώ την οικογένεια μου που στάθηκε δίπλα μου για το διάστημα στο οποίο μελετούσα και εργαζόμουν για την παρακάτω εργασία.

Περίληψη :

Στην παρακάτω απλή εργασία έγινε μια προσπάθεια στο να μελετηθεί η συμπεριφορά των ηλεκτρικών κινητήρων σε φορτίο σιδηροδρομικού συρμού έλξης. Αυτό φαίνεται στο κεφάλαιο 3 στο οποίο περιγράφονται οι τύποι των κινητήρων συνεχούς ρεύματος και η συμπεριφορά τους καθώς και στο κεφάλαιο 5 όπου αντίστοιχα περιγράφονται οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (επαγωγικοί κινητήρες). Ξεκινώντας την εργασία στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια αναφορά στην χρήση της ηλεκτροκίνητης έλξη σήμερα καθώς και μια σύγκριση αυτής με συρμούς έλξης συμβατικών καυσίμων (diesel). Επίσης στο κεφάλαιο 2 εξετάζεται το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία τροφοδοτεί τους κινητήρες έλξης και το πώς γίνεται η μετατροπή της σε κατάλληλη μορφή. Παράλληλα στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται απλοϊκά ο τρόπος μηχανικής σύνδεσης του άξονα των ηλεκτρικών κινητήρων με τον σιδηροδρομικό συρμό έλξης. Τέλος στο κεφάλαιο 6 γίνεται μια σύγκριση των ηλεκτρικών μηχανών για τις οποίες εξετάστηκε η συμπεριφορά τους σε αυτήν την εφαρμογή και κάποια συμπεράσματα που προκύπτουν.

Πρόλογος :

Σιδηρόδρομος καλείται το σύστημα μεταφοράς επιβατών και εμπορευμάτων με τη βοήθεια τροχοφόρων οχημάτων ειδικά κατασκευασμένων για να τρέχουν επί σιδηροτροχιών. Μια χαρακτηριστική διαδρομή σιδηροδρόμου αποτελείται από δύο παράλληλες ράγες χάλυβα . Τα οχήματα που ταξιδεύουν στις ράγες καλούνται συρμοί και διακρίνονται σε εμπορικούς και επιβατικούς . Επίσης ανάλογα με την πηγή ισχύος της κινητήριας μονάδας τους που χρησιμοποιούνται σήμερα διακρίνονται σε συρμούς με πηγή ισχύος **ντίζελ(diesel locomotive)** και συρμούς με πηγή ισχύος **ηλεκτρικό ρεύμα (electric locomotive)**.

Η σιδηροδρομική γραμμή αποτελείται από δύο χαλύβδινες σιδηροτροχιές, τοποθετημένες σε στρωτήρες. Το κατάστρωμα της γραμμής, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τη μορφολογία του εδάφους, μπορεί να είναι σε όρυγμα ή σε επίχωμα με σταθερές στηρίξεις. Για να κατανεμηθεί το φορτίο των συρμών στο έδαφος, οι τροχιές στερεώνονται στους στρωτήρες, που τοποθετούνται πάνω σε υποστηρίγματα από στρώμα λίθων, σε κατάλληλο πάχος.

Πλάτος μίας γραμμής είναι η απόσταση μεταξύ των κεφάλων των σιδηροτροχιών. Λειτουργούν δίκτυα με 30 περίπου διαφορετικά πλάτη από 0,60 m μέχρι 1,67 m, αλλά κανονικό εύρος θεωρείται το 1,43 m, που εφαρμόζεται στο μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης και της Αμερικής, την Κίνα και σε ορισμένες γραμμές της Ιαπωνίας. Για να διατηρηθεί η μεγάλη ταχύτητα στις καμπύλες αυτών επιβάλλεται η εξωτερική γραμμή να βρίσκεται πιο ψηλά από την εσωτερική για να εξουδετερώνουν τα αποτελέσματα της φυγόκεντρης δύναμης. Η μέγιστη υπερύψωση όμως δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 22 εκ. Στόχος του κάθε σιδηροδρόμου είναι να εξασφαλιστεί η ασφαλής και άνετη μετακίνηση επιβατών και εμπορευμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗ ΕΛΞΗ ΣΥΡΜΩΝ.



1.1 Κύρια Συστήματα έλξης

Η κατηγοριοποίηση των συστημάτων έλξης γίνεται με βάση την κινητήρια μονάδα, όπου ονομάζεται κάθε είδους αυτοκινούμενο όχημα, που χρησιμοποιείται για να κινεί σιδηροδρομικά βαγόνια πάνω στις γραμμές. Στις μέρες μας υπάρχουν δύο κύριες πηγές ισχύος μιας κινητήριας μονάδας:

- (i) το πετρέλαιο (καύσιμο ντιζελ)
- (ii) το ηλεκτρικό ρεύμα.

(i) Η **ντιζελάμαξα** (*diesel locomotive*) φέρει φορτίο καυσίμου, αλλά το προϊόν του ντιζελοκινητήρα δεν μπορεί να μεταβιβαστεί απευθείας στους τροχούς, έτσι για αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα μηχανικής, ηλεκτρικής ή υδραυλικής μετάδοσης.

Η **ντηζελο-ηλεκτρική** κινητήρια μονάδα είναι στην πραγματικότητα μια ηλεκτράμαξα, που φέρει τη δική της γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, η χρήση της παρέχει στους σιδηροδρόμους κάποια από τα πλεονεκτήματα της ηλεκτροκίνησης, αποφεύγοντας το κόστος κατασκευής υποσταθμών διανομής και συστήματος τροφοδοσίας. Όμως, σε σύγκριση με τα συστήματα ηλεκτροκίνητης έλξης η ντηζελοηλεκτρική κινητήρια μονάδα παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα: η απόδοσή της περιορίζεται εν γένει στην αντίστοιχη του ντηζελοκινητήρα της, αναπτύσσοντας έτσι λιγότερη ισχύ ανά κινητήρια μονάδα. Έτσι για να καλυφτούν οι σύγχρονες ανάγκες των ανθρώπων για μεταφορές με μεγαλύτερη άνεση και υψηλές ταχύτητες εφαρμόστηκε το φαινόμενο της ηλεκτροκίνητης έλξης στο οποίο θα αναφερθούμε αναλυτικά. Η πρώτη πετυχημένη εφαρμογή της **ηλεκτροκίνητης έλξης** ήταν το 1879, όταν μια ηλεκτράμαξα κινήθηκε κατά τη διάρκεια μιας έκθεσης στο Βερολίνο.

Περί το τέλος της δεκαετίας του 1920 σχεδόν κάθε Ευρωπαϊκή χώρα είχε τουλάχιστον ένα μικρό ποσοστό ηλεκτροκίνητου σιδηροδρομικού δικτύου.



Φωτογραφία 1.1

Μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, η ηλεκτροκίνηση αναπτύχθηκε ραγδαία και σε άλλες χώρες. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 οι ηλεκτροκινούμενες γραμμές αποτελούσαν σημαντικό ποσοστό του συνολικού μήκους του εθνικού σιδηροδρομικού δικτύου, σε χώρες όπως:

η Ελβετία (99,6 %),
η Ολλανδία (69 %),
το Βέλγιο (62 %),
η Σουηδία (62 %),

η Νορβηγία (60 %),
η Ιταλία (59 %),
η Αυστρία (57 %),
η Ιαπωνία (56 %),
η Γαλλία (37 %) και
η Βρετανία (30 %).

Η ηλεκτροκίνηση θεωρείται γενικώς ως ο οικονομικότερος και αποτελεσματικότερος τρόπος λειτουργίας ενός σιδηροδρομικού δικτύου, υπό τον όρο ότι:

- Υπάρχει διαθέσιμη φτηνή ηλεκτρική ενέργεια
- Η πυκνότητα της σιδηροδρομικής κυκλοφορίας δικαιολογεί την απαιτούμενη επένδυση.

Τα συστήματα ηλεκτροκίνητης έλξης έναντι της κίνησης συρμού με ντιζελοκινητήρα παρουσιάζουν τα εξής

πλεονεκτήματα :

- Προκειμένου να εκκινήσουν την έλξη ενός βαρέως συρμού ή να ανέβουν μια έντονη κλίση με μεγάλη ταχύτητα, μπορούν να καταφύγουν στους πόρους του δικτύου ηλεκτροκίνησης, ώστε να αναπτύξουν ισχύ πολύ μεγαλύτερη από την ονομαστική τους. Ένας τυπικός σύγχρονος ηλεκτρικός συρμός ονομαστικής ισχύος 6.000 HP έχει παρατηρηθεί να αναπτύσσει για μικρή περίοδο ισχύ μέχρι 10.000 HP, κάτω από συνθήκες αντίστοιχες με τις προαναφερθείσες.
- Επιπλέον, οι ηλεκτρικές μηχανές είναι πιο αθόρυβες κατά τη λειτουργία τους από άλλους τύπους κινητηρίων μονάδων και δεν παράγουν καπνό ή καυσαέρια.

- Οι ηλεκτράμαξες χρειάζονται λιγότερο χρόνο στο μηχανοστάσιο για συντήρηση, το κόστος συντήρησής τους είναι χαμηλό και έχουν μεγαλύτερη ωφέλιμη ζωή .

Τα μεγαλύτερα προβλήματα (**μειονεκτήματα**) που παρουσιάζει η ηλεκτροκίνητη σιδηροδρομική λειτουργία συνδέονται με:

- (**α**) τις μεγάλες δαπάνες κατασκευής και συντήρησης των μόνιμων εγκαταστάσεων της ηλεκτροκίνησης, τις γραμμές τροφοδοσίας στους συρμούς από τους Υ/Σ έλξης και τους υποσταθμούς της ΔΕΗ.
- (**β**) το υψηλό κόστος μόνωσης των καλωδίων υψηλής τάσης που απαιτείται στις μεγάλες επιταχύνσεις και ταχύτητες κυκλοφορίας, που απαιτούνται σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης.

1.2 Εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης παγκόσμια.

Οι απαιτήσεις του κοινού σε άνεση , ασφάλεια και κυρίως υψηλότερες ταχύτητες των συρμών συνέβαλαν στην ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρικών τρένων τα τελευταία χρόνια σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες αλλά και σε ολόκληρο τον κόσμο. Ιστορικά μια χώρα πρωτοπόρος στις εφαρμογές ηλεκτροκίνησης ήταν και είναι η Ιαπωνία από το 1920. Έτσι ολοκληρωμένα μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο εμφανίζονταν οι πρώτες γραμμές υψηλής ταχύτητας , γραμμές Σινκασέν , οι οποίες τροφοδοτούσαν ένα σύστημα ηλεκτροκίνησης με συνεχές ρεύμα DC των 1500 V ή με εναλλασσόμενο ρεύμα AC 25 kV. Έτσι τις τελευταίες δυο δεκαετίες το σύστημα έχει τελειοποιηθεί πλήρως με ένα ικανοποιητικό δίκτυο σε αρκετά σημεία της χώρας. Αρκετά σημαντική θεωρούνταν η χρήση της ηλεκτροκίνησης στην Ινδία όπου από το 2006 το 80 % των εμπορικών εφαρμογών γίνεται με την χρήση αυτής καθώς

επίσης και το 85 % των επιβατικών μετακινήσεων. Το δίκτυο που κυρίως έχει εφαρμογή στην χώρα αυτή είναι εναλλασσόμενου ρεύματος(AC) τάσης 25kV.

Ιστορικά να αναφερθεί ότι σε πολλές χώρες της πρώην ΕΣΔΔ υπήρχαν πολλές εφαρμογές ηλεκτροκίνησης , όπως βεβαία και στην σημερινή Ρωσία και όχι μόνο. Από την δεκαετία του 1960 όταν η βιομηχανία στην τότε ΕΣΔΔ άνθιζε ξεκίνησε η ευρεία εφαρμογή ηλεκτρικών σιδηρόδρομων , χωρίς αυτό να σημαίνει ότι πριν ήταν εντελώς ανύπαρκτοι. Έτσι τότε κυρίως σε δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος(AC) με τάση 25kV χρησιμοποιούνταν συρμοί έλξης όπως τον τύπο VL60 που φαίνεται παρακάτω με κινητήρες AC ή DC ρεύματος.



Φωτογραφία 1.2

Σε αντίθεση με τις ΗΠΑ η χρήση ηλεκτροκίνησης στην Ευρώπη ήταν και είναι αρκετά διαδεδομένη. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει σημαντικά έργα υποδομής στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες και χρησιμοποιούνται τρένα υψηλής ταχύτητας TGV κ'

ICE , με μια μέση ταχύτητα 160 km/h ,όπως εκείνο της φωτογραφίας 1.2.



Φωτογραφία 1.3



Φωτογραφία 1.4.

Τα κυριότερα μέρη μιας εγκατάστασης ηλεκτρικού σιδηροδρόμου - χωρίς την τροφοδοσία με εναέρια γραμμή - είναι οι μετασχηματιστές , τα ηλεκτρονικά ισχύος στους υποσταθμούς ανόρθωσης και βεβαία οι διάφοροι τύποι

ηλεκτρικών κινητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τους οποίους θα αναφερθούμε αναλυτικά σε αυτή την εργασία.

1.3 Τύποι ηλεκτρικών πηγών στην ηλεκτροκίνηση.

Επιπλέον, η ηλεκτρική πηγή μπορεί να ανήκει σε δύο εν γένει τύπους:

- συνεχούς ρεύματος (*direct current-DC*) ή
- Εναλλασσόμενου ρεύματος (*alternating current- AC*).

Ηλεκτρική τάση **συνεχούς (DC)** ρεύματος είναι εκείνη που διατηρεί την πολικότητά της (όπως αυτή μιας μπαταρίας).

Η αντίστοιχη **εναλλασσόμενου** ρεύματος εναλλάσσει πολικότητα (όπως αυτή της οικιακής παροχής των 220 V).

Το παρακάτω στο σχήμα 1 κύμα εναλλασσόμενου ρεύματος είναι το περισσότερο χρησιμοποιούμενο, **ημιτονοειδούς** μορφής.



Σχήμα 1.1

Το εναλλασσόμενο ρεύμα εισάγει επίσης μια νέα παράμετρο, αυτή της **συχνότητας**, που αποτελεί μέτρο του αριθμού των κύκλων ανά δευτερόλεπτο και μετράται σε *Hertz (Hz)*.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ (Μ/Σ) ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .

2.1 Μετασχηματιστές.

Για να τροφοδοτηθεί ένα σύστημα ηλεκτροκίνητης έλξης απαιτείται μεγάλη ηλεκτρική ενεργός ισχύς για την λειτουργία των κινητήρων. Η ισχύς αυτή δεν μπορεί να μεταφερθεί απ'ευθείας από τα ηλεκτρικά εργοστάσια στην κατανάλωση των κινητήρων καθώς γίνεται μια επεξεργασία αυτής με στόχο να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες . Έτσι η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς που θέλω να μεταφέρω για να την εκμεταλλευτώ είναι γινόμενο τάσης (U) και έντασης (I) του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι ηλεκτρικές απώλειες τις οποίες θέλω να ελαχιστοποιήσω όσο γίνεται είναι ανάλογες του τετραγώνου της έντασης του ρεύματος γραμμής. Έτσι λοιπόν για να μεταφέρω την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ που θέλω χρησιμοποιώ κάποιες συσκευές που ονομάζονται

μετασχηματιστές (Μ/Σ). Οι μετασχηματιστές είναι ηλεκτρικές διατάξεις που ανυψώνουν την τάση του ρεύματος μερικές χιλιάδες volts σε βάρος της έντασης αυτού ώστε να μεταφέρω το γινόμενο ισχύος που θέλω με τις μικρότερες απώλειες.

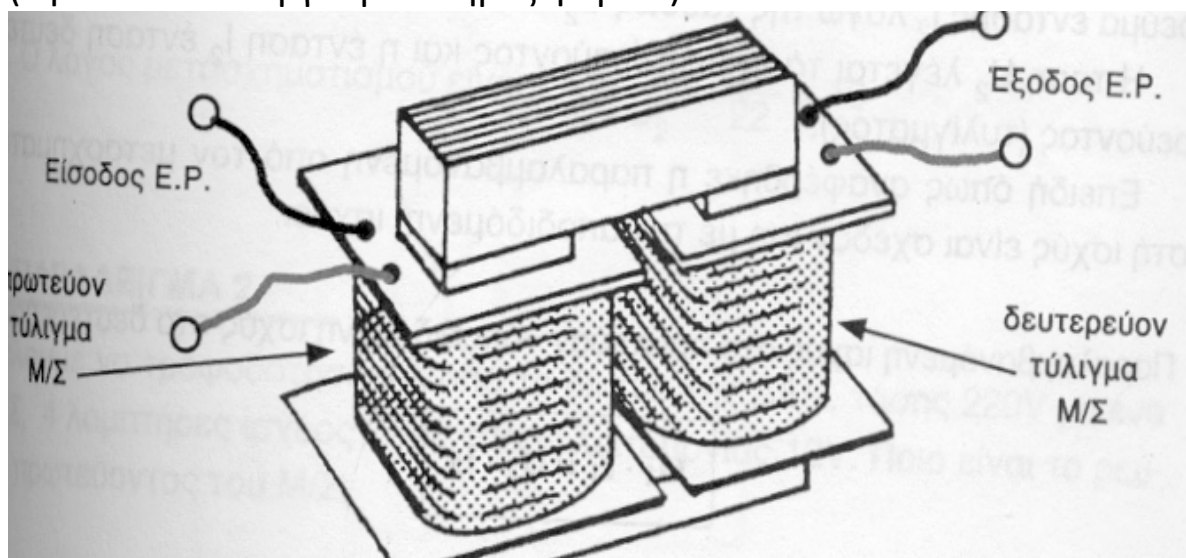
Σε εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης με χρήση ηλεκτρικών κινητήρων έχουν μεγάλη χρησιμότητα καθώς μεταφέρουν την ηλεκτρική ισχύ που απαιτείται ως τον υποσταθμό της ΔΕΗ , υποβιβάζοντας την υψηλή τάση του εναλλασσόμενου ρεύματος(AC) σε μέση τάση , έτοιμη να τροφοδοτήσει τον υποσταθμό έλξης.

Όπως καταλαβαίνουμε η χρησιμότητα τους στην σύγχρονη ζωή είναι καθοριστική καθώς αν δεν υπήρχαν τότε για να ελαχιστοποιούσα τις απώλειες ρεύματος σε ένα δίκτυο μεταφοράς θα έπρεπε να χρησιμοποιούσα αρκετά μεγαλύτερες διατομές αγωγών κάτι που συνεπάγεται υψηλότερο κόστος.

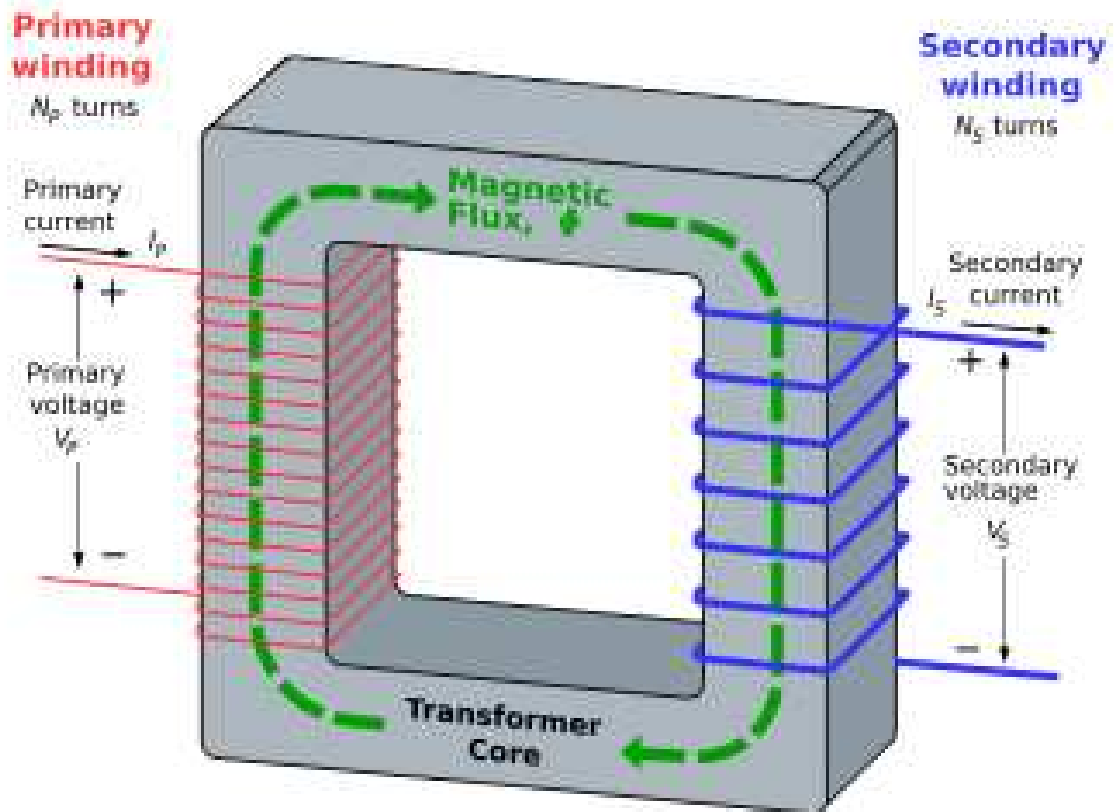
Ο Μ/Σ μετατρέπει εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια ενός επιπέδου τάσης μιας συχνότητας σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια άλλου επιπέδου τάσης ίδιας συχνότητας

μέσω της επίδρασης ενός μαγνητικού πεδίου. Η διάταξη αυτή αποτελείται από δυο ή περισσότερα πηνία που τυλίγονται γύρω από ένα κοινό σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τα πηνία αυτά δεν είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους και η μόνη σύζευξη που υπάρχει μεταξύ των σπειρών είναι το κοινό μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του πυρήνα.

Το πρωτεύον τύλιγμα, το τύλιγμα εισόδου του συνδέεται με μια πηγή εναλλασσομένου ρεύματος ενώ το δευτερεύον τύλιγμα, τύλιγμα εξόδου του, συνδέεται με το φορτίο (εφόσον λειτουργεί με πλήρες φορτίο).



Σχήμα 2.1



Σχήμα 2.2

Στο παραπάνω σχήμα 2.2 φαίνεται η αρχή λειτουργίας ενός απλού **μονοφασικού** μετασχηματιστή. Το κόκκινο τύλιγμα είναι το πρωτεύον του το οποίο τροφοδοτείται με τάση δικτύου (V_p) η οποία προκαλεί μια εναλλασσόμενη ένταση ρεύματος (i_p), έτσι δημιουργείται το μαγνητικό πεδίο με εναλλασσόμενη (μεταβαλλόμενη) μαγνητική ροή Φ η οποία κλείνει κύκλωμα μέσα από τον πυρήνα και διαπερνά το δευτερεύον (μπλε) τύλιγμα μετασχηματισμένη (V_s), τέμνοντας τις σπείρες του δευτερεύοντος.

Οι μετασχηματιστές διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο ψύξης τους, την τροφοδοσία τους από το δίκτυο και ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής.

2.1.1 Μετασχηματιστές τύπου πυρήνα-μανδύα

Ως προς τον τρόπο κατασκευής τους έχω τους μετασχηματιστές **τύπου πυρήνα**, όπου τα τυλίγματα του τοποθετούνται γύρω από τις δυο πλευρές ενός ορθογωνίου πυρήνα από φύλλα χάλυβα. Επίσης έχω τους μετασχηματιστές **τύπου μανδύα** όπου η κατασκευή του πραγματοποιείται σε ένα πυρήνα με τρία σκέλη (κορμούς) όπου τα τυλίγματα του Μ/Σ τοποθετούνται στο μεσαίο σκέλος (κορμός του) ο οποίος έχει διπλάσια διατομή από τους ακραίους, οι οποίοι χρησιμεύουν για να κλείνουν το μαγνητικό κύκλωμα. Και στις δυο περιπτώσεις οι πυρήνες κατασκευάζονται από λεπτά δυναμοελάσματα ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους, με σκοπό τη μείωση των μαγνητικών απωλειών (δινορευμάτων).

2.1.2 Ιδανικός μετασχηματιστής. (Ideal Transformer).

Ιδανικός μετασχηματιστής θεωρείται το **φανταστικό μοντέλο Μ/Σ** το οποίο δεν εμφανίζει απώλειες κατά τη λειτουργία του, άρα ο βαθμός απόδοσης του τείνει στην μονάδα. Εξετάζεται, παρόλο που δεν υπάρχει, γιατί είναι πρότυπο για κάθε πραγματικό Μ/Σ. Ο Μ/Σ αυτός δεν απορροφά ρεύμα κατά τη λειτουργία του χωρίς φορτίο.

Ισχύς στους ιδανικούς Μ/Σ :

Η ισχύ εισόδου του να ισούται με την ισχύ εξόδου του. Έτσι

$$\text{λοιπόν : } P_{in} = V_p \cdot I_p \cdot \cos(\theta_p)$$

όπου (θ_p) η γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους τα διανύσματα της τάσης και του ρεύματος στο πρωτεύον τύλιγμα.

Αντίστοιχα η ισχύ που προσφέρει ο Μ/Σ στο δευτερεύον

$$\text{τύλιγμα του είναι } P_{out} = V_s \cdot I_s \cdot \cos(\theta_s)$$

όπου (θ_s) η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων τάσης και έντασης στο δευτερεύον τύλιγμα.

Έτσι επειδή οι φάσεις των τάσεων και των ρευμάτων σε ένα ιδανικό Μ/Σ δεν επηρεάζονται ισχύει : $\theta_p = \theta_s = \theta$ δηλαδή ο συντελεστής ισχύος $\cos(\theta)$ του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος ενός ιδανικού Μ/Σ είναι ίδιος.

$$\text{Αρα : } P_{\text{out}} = V_s \cdot I_s \cdot \cos\theta$$

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις μετασχηματισμού που ισχύουν

$$V_s = V_p / \alpha \quad I_s = I_p \cdot \alpha \quad \text{κ' } N_p / N_s = \alpha \quad \text{έχω :}$$

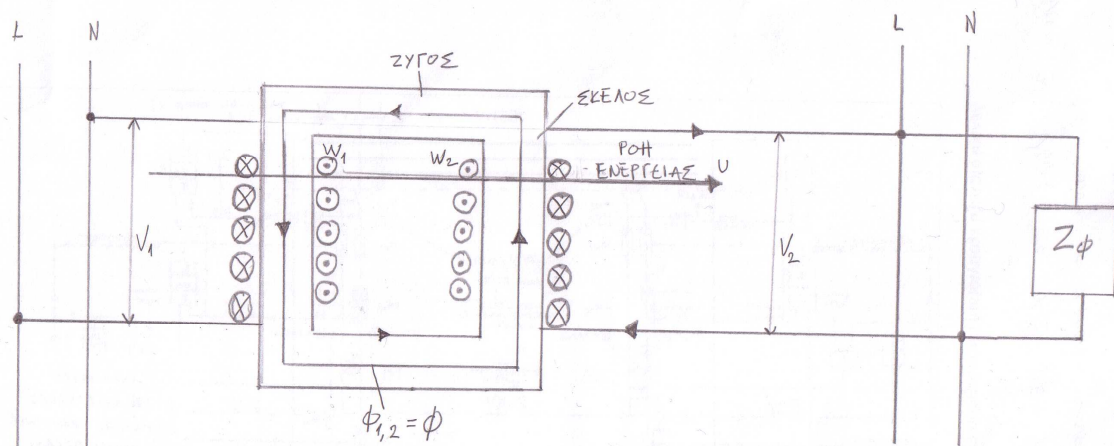
$$P_{\text{out}} = V_p / \alpha \cdot (I_p \cdot \alpha) \cdot \cos\theta \rightarrow P_{\text{out}} = V_p \cdot I_p \cdot \cos\theta = P_{\text{in}}$$

όπου α είναι ο λόγος μετασχηματισμού .

Με τα παραπάνω αποδεικνύεται ότι η ενεργός ισχύ εξόδου ενός ιδανικού μετασχηματιστή ισούται με την ισχύ εισόδου του.

Στους ιδανικούς Μ/Σ οι τάσεις V_p , V_s καθώς και οι εντάσεις ρεύματος I_p , I_s παρουσιάζουν μεταξύ τους ίδιες φάσεις πράγμα που σημαίνει ότι ο λόγος μετασχηματισμού επηρεάζει μόνο τα μέτρα των τάσεων και των ρευμάτων του Μ/Σ και όχι τις φάσεις τους.

Στο παρακάτω σχήμα 2.3 φαίνεται η αρχή λειτουργίας ενός μονοφασικού ιδανικού μετασχηματιστή με φορτίο.



Σχήμα 2.3

όπου Z_ϕ το φορτίο μου.

Στο σχέδιο του σχήματος 2.3 ο Μ/Σ τροφοδοτείται από το δίκτυο μου στο πρωτεύον τύλιγμα του W_1 για να μεταφέρει

την ροή ενεργείας με την μαγνητική ροή $\Phi_{1,2}=\Phi$. Η φορά περιέλιξης των τυλιγμάτων του πρέπει να είναι τέτοια ώστε εάν στους ομώνυμους ακροδέκτες του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος εισέλθει ρεύμα, η μαγνητική ροή που θα δημιουργηθεί από το πρωτεύον Φ_1 και από το δευτερεύον Φ_2 σε οποιοδήποτε σημείο του πυρήνα να έχει την ίδια φορά.

2.1.3 Μονοφασικός μετασχηματιστής.

Ο πραγματικός μονοφασικός Μ/Σ τροφοδοτείται από το δίκτυο με εναλλασσόμενο ρεύμα μιας φάσης. Κατασκευαστικά δεν διαφέρει από τον ιδανικό Μ/Σ αλλά σε αυτόν υπάρχουν ηλεκτρικές και μαγνητικές απώλειες. Έτσι τα τυλίγματα του παρουσιάζουν ωμική (R) και επαγωγική (X_L) αντίσταση. Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στον νόμο του Faraday :

$$e_{ind} = N d\phi/dt$$

όπου N είναι ο αριθμός των σπειρών

$d\phi$ είναι η μέση τιμή της ροής ανά σπείρα πηνίου.

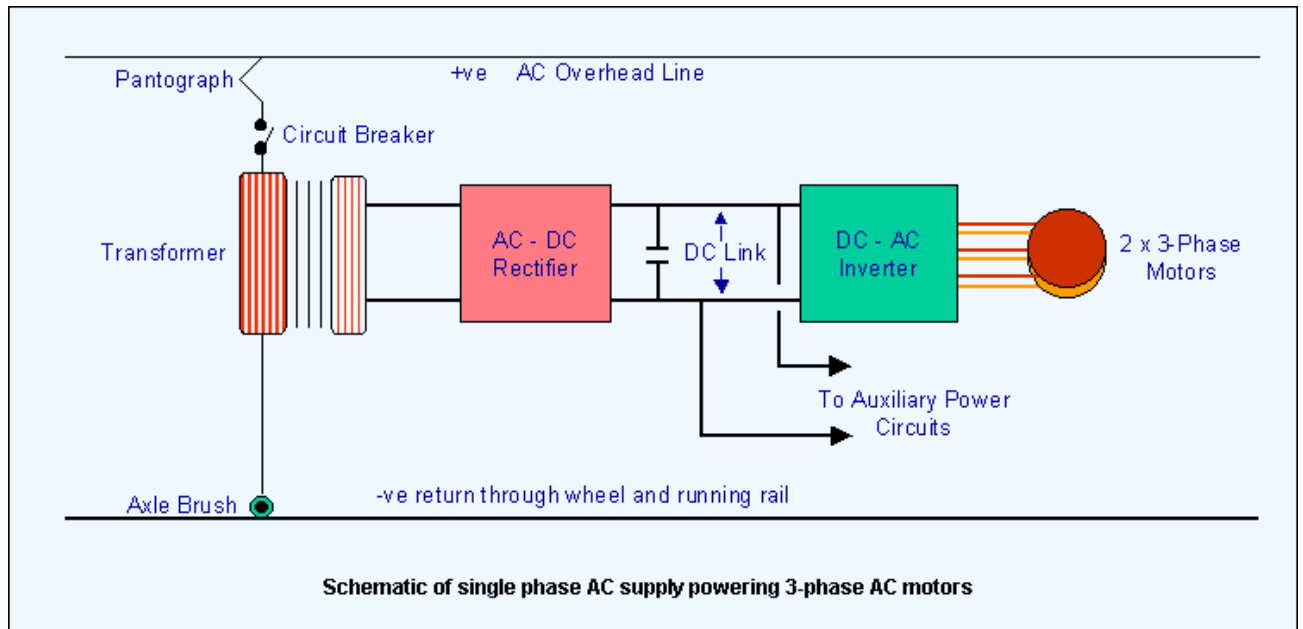
Ο νόμος του Faraday εκφράζει τον τρόπο με τον οποίο αντιδρά ο Μ/Σ αν η τάση του δικτύου εφαρμοστεί στο πρωτεύον τύλιγμα του, όπου αυτές οι δυο τάσεις πρέπει να ισούνται. Η παραπάνω σχέση του Faraday αν λυθεί ως προς την μέση τιμή ροής που διαρρέει το πρωτεύον τύλιγμα του Μ/Σ θα προκύψει η σχέση : $\phi = 1/N \int v_p(t) dt$

που σημαίνει ότι η μέση τιμή της ροής που διαρρέει το πρωτεύον τύλιγμα είναι ανάλογη του ολοκληρώματος της τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του με συντελεστή αναλογίας το αντίστροφο του αριθμού των σπειρών του.

Παραπάνω στο σχήμα 2.3 φαίνεται η σύνδεση ενός μονοφασικού Μ/Σ με το δίκτυο, με την διάφορα ότι εκείνος είναι ιδανικός. Στους πραγματικούς Μ/Σ κάποιο ποσοστό της ροής του πρωτεύοντος τυλιγματος δεν μεταφέρετε στο δευτερεύον τύλιγμα και αυτό γίνεται επειδή κάποιες από τις δυναμικές γραμμές του πεδίου ξεφεύγουν από τον πυρήνα

προς τον αέρα που τον περιβάλλει. Έτσι λοιπόν το τμήμα της ροής που 'χάνεται' από το πρωτεύον και δεν μεταφέρεται στο δευτερεύον ονομάζεται ροή διαρροής (ϕ_{LP}). Έτσι η ροή του πρωτεύοντος χωρίζεται στην αμοιβαία ροή (ϕ_M), που παραμένει στον πυρήνα και συνδέει τα δυο τυλίγματα, και τη ροή διαρροής: $\phi_p = \phi_M + \phi_{LP}$
 Ακριβώς τα ίδια ισχύουν και για το δευτερεύον τύλιγμα και έχω και εδώ: $\phi_s = \phi_M + \phi_{LS}$

Σε εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης χρησιμοποιούνται μονοφασικοί μετασχηματιστές, με εφαρμογή ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων (επαγωγικών κινητήρων) για την κίνηση του συρμού τρένου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4. Τότε το δίκτυο διανομής τάσης της ΔΕΗ μεταφέρει και διανέμει στον υποσταθμό μονοφασικό ρεύμα εναλλασσόμενης τάσης, το οποίο με κατάλληλη μετατροπή, την οποία θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο, τροφοδοτεί επαγωγικούς κινητήρες.



Σχήμα 2.4 : τροφοδοσία ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα έλξης συρμού.

Η συνδεσμολογία μονοφασικού Μ/Σ με φορτίο είναι εκείνη που φαίνεται στο σχήμα 2.3 με την διάφορα ότι πρόκειται για

ιδανικό ενώ εμένα με ενδιαφέρει η συμπεριφορά του πραγματικού Μ/Σ. Ως λειτουργία Μ/Σ με φορτίο χαρακτηρίζεται εκείνη στην οποία η παραγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη E_2 στο τύλιγμα του δευτερεύοντος εφαρμόζεται στα άκρα κατανάλωσης, επομένως υπάρχει κυκλοφορία ρεύματος μέσα σε αυτή. Τα δυο πηνία του Μ/Σ διαρρέονται από εναλλασσόμενα ρεύματα που δημιουργούν μαγνητικές ροές οι οποίες εμπλέκουν τα πηνία αυτά. Κατά την λειτουργία ενός πραγματικού Μ/Σ με φορτίο το ρεύμα I_2 που διαρρέει το δευτερεύον τύλιγμα του δημιουργεί μια μαγνητική ροή Φ_2 αντίθετης φοράς από αυτή του πρωτεύον τυλίγματος Φ_1 . Η μαγνητική ροή του δευτερεύοντος έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένιση του μαγνητικού πεδίου στο τύλιγμα εισόδου και την εμφάνιση μαγνητικής ροής σκέδασης στο τύλιγμα του πρωτεύοντος.

Για να καταλάβουμε την φύση του φορτίου στο δευτερεύον τύλιγμα του Μ/Σ χρειάζεται να βρούμε την διακύμανση τάσης ($\epsilon\%$) = $(V_{02} - V_2)/V_2 \cdot 100$

όπου : V_{02} η τάση στα άκρα του δευτερεύοντος όταν δεν υπάρχει φορτίο

V_2 η τάση στα άκρα του δευτερεύοντος με φορτίο.

Έτσι λοιπόν αν : $\epsilon < 0$ χωρητικό φορτίο

$\epsilon \approx 0$ ωμικό φορτίο

$\epsilon > 0$ επαγωγικό φορτίο.

Εν κατακλείδι, για τους πραγματικούς μονοφασικούς μετασχηματιστές αφού είδα πως μπορώ να διακρίνω το είδος του φορτίου, ισχύει η ισότητα $V_1/V_2 = W_1/W_2 = I_2/I_1$

όπου W σπείρες περιέλιξης τυλίγματος

δείκτης 1 αναφέρεται στο πρωτεύον

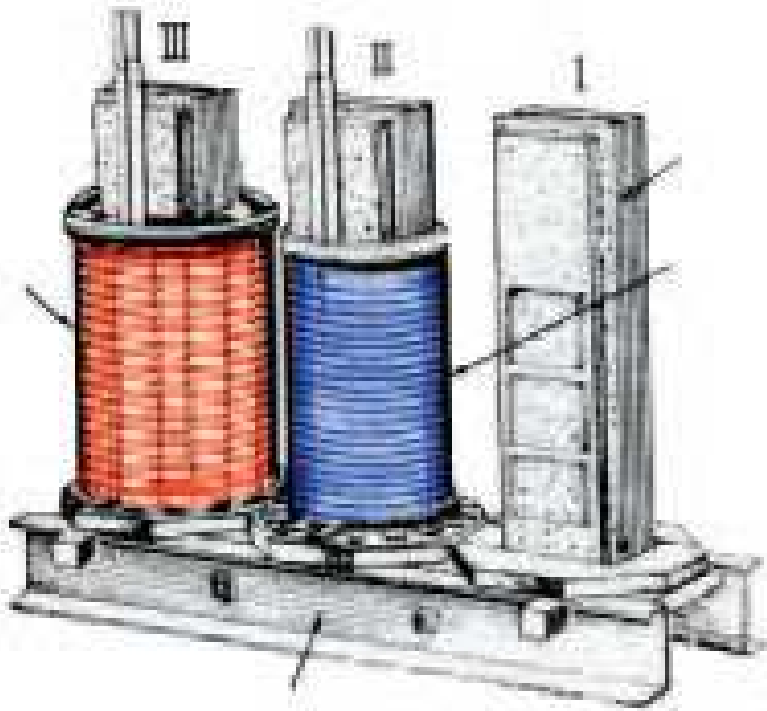
δείκτης 2 για το δευτερεύον τύλιγμα.

Άρα με βάση την παραπάνω ισότητα (διαβάζοντας τα μεγέθη των αριθμητών \uparrow και των παρονομαστών \downarrow) αν θέλω να έχω έναν Μ/Σ ανύψωσης τάσης τότε εκείνος θα ανυψώνει την τάση στο δευτερεύον τύλιγμα του και θα υποβιβάζει με την ίδια

αναλογία την ένταση ρεύματος που κυκλοφορεί σε αυτό. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο καθώς μειωμένη ένταση σημαίνει και μειωμένες απώλειες ρεύματος κατά τη διανομή του. Επίσης συμπεραίνω ότι το τύλιγμα χαμηλής τάσης και μεγάλης έντασης έχει μικρό αριθμό σπειρών και αγωγό μεγάλης διατομής ενώ το τύλιγμα υψηλής τάσης και μικρού ρεύματος έχει πολλές σπείρες σε αγωγό μικρής διατομής.

2.1.4 Τριφασικός Μετασχηματιστής

Σε πολλές κυρίως βιομηχανικές εφαρμογές η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται με την μορφή ρεύματος τριών φάσεων (τριφασικό). Το τριφασικό ρεύμα παρέχει μεγαλύτερη ισχύ ανά μονάδα βάρους μετάλλου καθώς επίσης η ισχύς που προσφέρεται σε ένα τριφασικό φορτίο είναι συνεχώς σταθερή και όχι παλλόμενη, όπως εκείνη των μονοφασικών συστημάτων. Έτσι λόγω χρήσης του σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές όπως και στην τροφοδοσία υποσταθμού έλξης της ΔΕΗ εξετάζουμε τους **τριφασικούς μετασχηματιστές**. (όπως φαίνεται στην φωτογραφία 2.1 αμέσως παρακάτω.)



Φωτογραφία 2.1

όπου I , II , III είναι οι τρεις κορμοί του Μ/Σ. Η κάτω βάση ονομάζεται κάτω ζύγωμα ενώ αντίστοιχα υπάρχει και στην πάνω τους πλευρά το άνω ζύγωμα. Το κόκκινο τυλιγμά είναι εκείνο της υψηλής τάσης ενώ το μπλε χαμηλής τάσης. Η αρχή λειτουργίας τους είναι ίδια περίπου με τους μονοφασικούς Μ/Σ με τη διαφορά ότι εδώ μέσα στον πυρήνα έχω τρεις κορμούς

Κατά την κατασκευή των Μ/Σ αυτών δίνεται μεγάλη σημασία στην μόνωση των συρμάτων των τυλιγμάτων. (με ειδικό χαρτί presspan ή σμάλτο.) Η κατασκευή των τυλιγμάτων του σε συνδυασμό με την καλή μόνωση παρέχουν στον μετασχηματιστή μεγάλη ικανότητα αντοχής στην δυναμική καταπόνηση του βραχυκυκλώματος.

Οι τριφασικοί Μ/Σ χωρίζονται σε κάποιες κατηγορίες :

A) ως προς τον τρόπο ψύξης.

B) ως προς την πιθανή συνδεσμολογία των τυλιγμάτων τους.

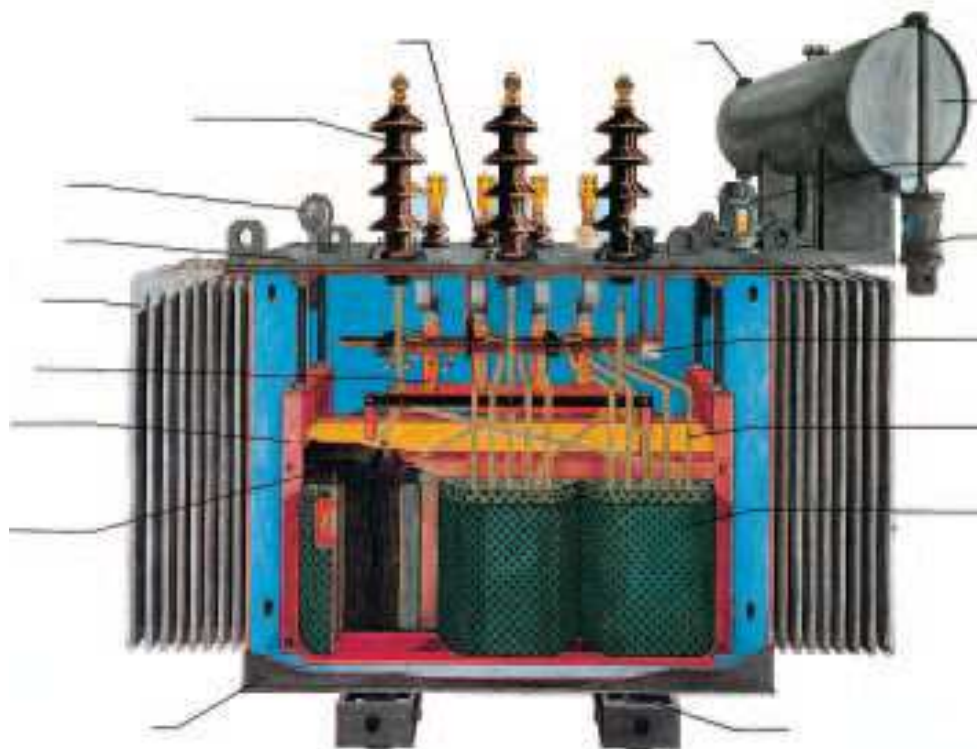
A) ανάλογα με τον τρόπο ψύξης τους χωρίζω στους μετασχηματιστές **χυτορίνης (ξηρούς)** και τους Μ/Σ **λαδιού**.

Οι ξηροί Μ/Σ (φαίνεται στη φωτογραφία 2.2) αποτελούν μια οικολογική λύση για την διανομή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον. Επίσης καταλαμβάνουν τα 2/3 του χώρου ενός αντίστοιχου Μ/Σ λαδιού και είναι πιο ακίνδυνοι και οικονομικότεροι. Η απλή κατασκευή τους επιτρέπει την αντικατάσταση των πηνίων του επί τόπου. Το βασικό τους μειονέκτημα, και λόγος για τον οποίο έχουν καθιερωθεί περισσότερο οι Μ/Σ λαδιού είναι ότι η ψύξη τους γίνεται με φυσικό ή βεβιασμένο ξηρό αέρα, και για αυτό δεν είναι κατάλληλοι για ρεύμα μεγάλης ισχύος. (μεγίστη ισχύ τους 150 kW).

Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της ανάπτυξης μεγάλης θερμότητας στα ενεργά μέρη τους κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους χρειάζεται καλύτερη ψύξη αυτών. Για το λόγο αυτό για διανομή μεγάλης ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται κυρίως οι Μ/Σ λαδιού (δες την φωτογραφία 2.3).



φωτογραφία 2.2



Φωτογραφία 2.3: Μ/Σ ελαίου.

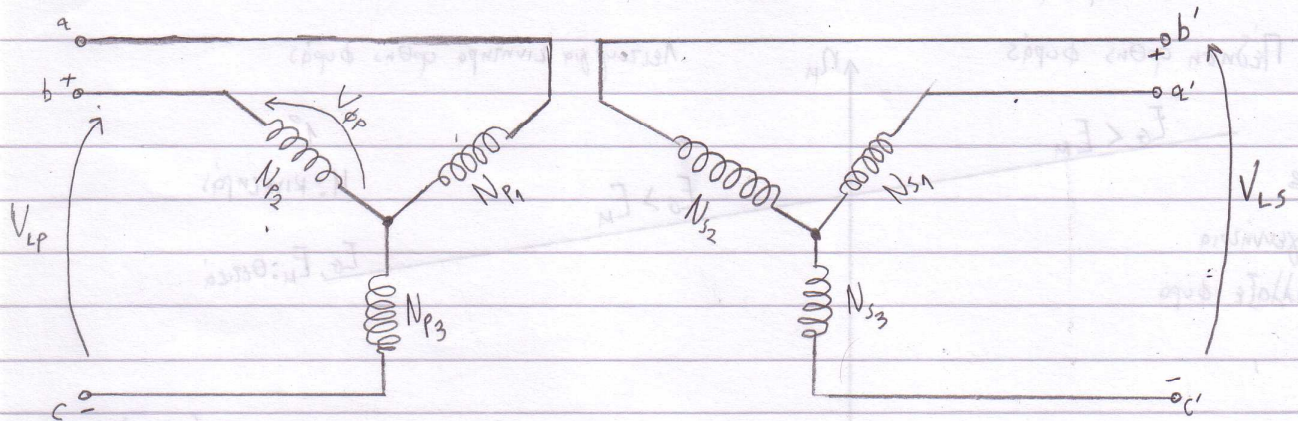
Η βασική διαφορά του ελαίου από τον Μ/Σ χυτορίνης είναι ότι για την ψύξη του χρησιμοποιείται λάδι και όχι ατμοσφαιρικός αέρας. Όπως φαίνεται και από το σχήμα ο Μ/Σ λαδιού περιλαμβάνει περισσότερα μέρη από τους ξηρούς Μ/Σ πράγμα που συνεπάγεται και υψηλότερο κόστος.

Β) Ως προς την συνδεσμολογία των τυλιγμάτων τους οι τριφασικοί Μ/Σ χωρίζονται στα εξής ζεύγη

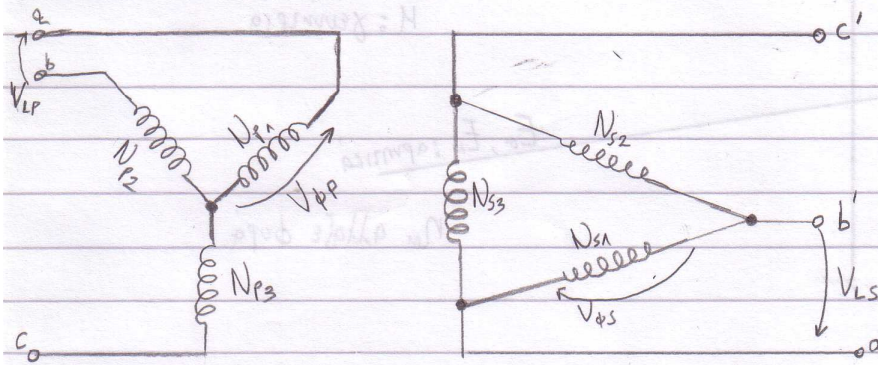
1. Αστέρας – Αστέρας (Υ-Υ)
2. Αστέρας – Τρίγωνο (Υ-Δ)
3. Τρίγωνο – Αστέρας (Δ-Υ)
4. Τρίγωνο – Τρίγωνο (Δ-Δ)

Στο σχήμα 2.5 αμέσως παρακάτω φαίνονται οι παραπάνω συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων τους.

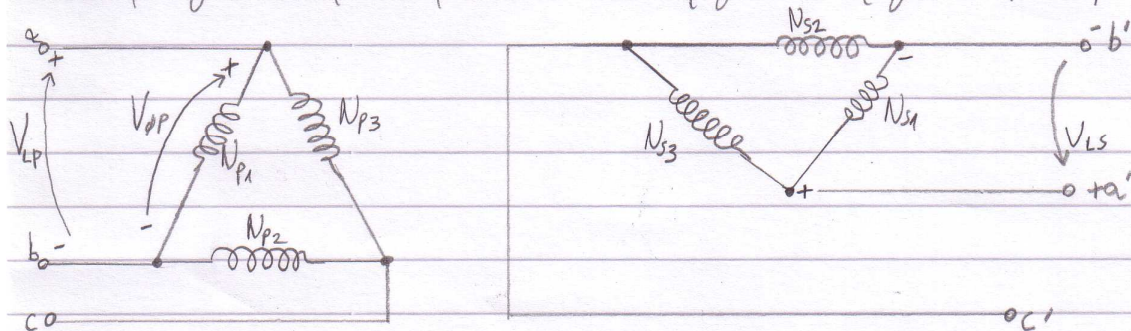
Συνδεσμολογία 3φ μετασχηματιστών κατά αστέρα - αστέρα (Y-Y)



Συνδεσμολογία 3φ μετασχηματιστών κατά αστέρα - τρίγωνο (Y-Δ)



Συνδεσμολογία 3φ μετασχηματιστών κατά τρίγωνο - τρίγωνο (Δ-Δ)



Σχήμα 2.5 : συνδεσμολογία τυλιγμάτων μετασχηματιστή τριών φάσεων.

2.1.5 Απώλειες μετασχηματιστή.

Η ακρίβεια οποιουδήποτε μοντέλου πραγματικού Μ/Σ εξαρτάται από τις απώλειες του, οι βασικότερες αυτών είναι :

1. *Απώλειες χαλκού (I^2R) ή ηλεκτρικές απώλειες.* Αυτές μετατρέπονται σε θερμότητα στις αντιστάσεις του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος του. Είναι ανάλογες με το τετράγωνο του ρεύματος στα τυλίγματα του.

2. *Μαγνητικές απώλειες,* οι οποίες χωρίζονται στις εξής κατηγορίες :

2α) *απώλειες δινορρευμάτων.* Είναι θερμικές απώλειες που καταναλώνονται στην αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα και είναι ανάλογες με το τετράγωνο της τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του μετασχηματιστή.

2β) *Απώλειες υστέρησης.* Έχουν να κάνουν με την αναδιάταξη των μαγνητικών τμημάτων στο εσωτερικό του πυρήνα η οποία συμβαίνει σε κάθε ημιπερίοδο της τάσης εισόδου. Η μεταβολή τους με το χρόνο είναι μια μη γραμμική συνάρτηση της τάσης που εφαρμόζεται στο Μ/Σ.

3. *Ροη διαρροής.* Πρόκειται για τις μαγνητικές ροές Φ_{LP} κ' Φ_{LS} που αναλύθηκαν παραπάνω, οι οποίες ξεφεύγουν από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει και εμφανίζονται μόνο στα ένα από τα δυο τυλίγματα.

2.1.6 Απόδοση μετασχηματιστών.

Ο βαθμός απόδοσης (η) ενός Μ/Τ δηλαδή ο λόγος της ισχύος P_2 που αποδίδει στο δευτερεύον τύλιγμα του προς την ισχύ P_1 που απορροφά το πρωτεύον τύλιγμα του από το δίκτυο δίνεται από την παρακάτω σχέση : $\eta = P_2 / (P_2 + P_{\text{απωλειών}})$

Για να προσδιοριστούν οι συνθήκες για τις οποίες υπάρχει ένας συγκεκριμένος βαθμός απόδοσης ενός Μ/Σ πρέπει να είναι γνωστή η ένταση του δευτερεύοντος του I_2 και και ο συντελεστής ισχύος του φορτίου του (συνφ).

2.2 Διανομή παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής ενώ η μεταφορά της σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής στις περιοχές καταναλώσεως γίνεται με τις γραμμές υψηλής τάσεως (στην Ελλάδα συνήθως των 150 KV) , οι οποίες μεταφέρουν την ενέργεια σε κατάλληλα σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς μέσης τάσης. Για την μεταφορά αυτή και για να αποφύγω τις μεγάλες απώλειες και διατομές καλωδίων ανυψώνω την τάση και μεταφέρω την ενέργεια , (με σταθερή συχνότητα συνήθως 50 Hz) αφού μιλάμε για εναλλασσόμενο ρεύμα , ως τον υποσταθμό της ΔΕΗ όπου υποβιβάζεται σε μέση τάση , συνήθως 25 ή 20 kV (όπως φαίνεται στο σχέδιο 2.1).

Στο δίκτυο διανομής χρειάζεται η λειτουργία για τον ίδιο σκοπό περισσότερων από ένα Μ/Σ ισχύος άρα τότε συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα . Για να μπορούν να παραλληλιστούν οι Μ/Σ μεταξύ τους θα πρέπει :

1) Να υπάρχουν ίδια μεγέθη υψηλής και χαμηλής τάσης μεταξύ τους καθώς και ίδια ομάδα συνδεσμολογίας αυτών.

2) Ίδια τάση βραχυκύκλωσης με ανοχή +10%.

Τάση βραχυκύκλωσης (U_k) Μ/Σ ονομάζουμε την τάση που θα πρέπει να εφαρμόζεται στο πρωτεύον τύλιγμα του ώστε με βραχυκυκλωμένο το δευτερεύον να έχω και στα δυο το ονομαστικό ρεύμα φόρτισης.

$$U_k\% = (\text{πραγματική τάση στα άκρα πρωτεύοντος } U_{1k} / \text{ονομαστική τάση Μ/Σ } U_{1N}) * 100$$

3) Ίδια διαδοχή φάσεων στην είσοδο και την έξοδο.

Άρα με τον παραλληλισμό τους οι Μ/Σ συμπεριφέρονται σαν μεγάλης ισχύος και συνεισφέρουν με την ισχύ τους στην αυξημένη ζήτηση.

Η μεταφορά της ενεργείας ως τον Υ/Σ γίνεται με την μορφή τριφασικής εναλλασσόμενης τάσης με ίσα τα μεγέθη των τριών φάσεων και με γωνιακές μεταξύ τους αποκλίσεις 120° .

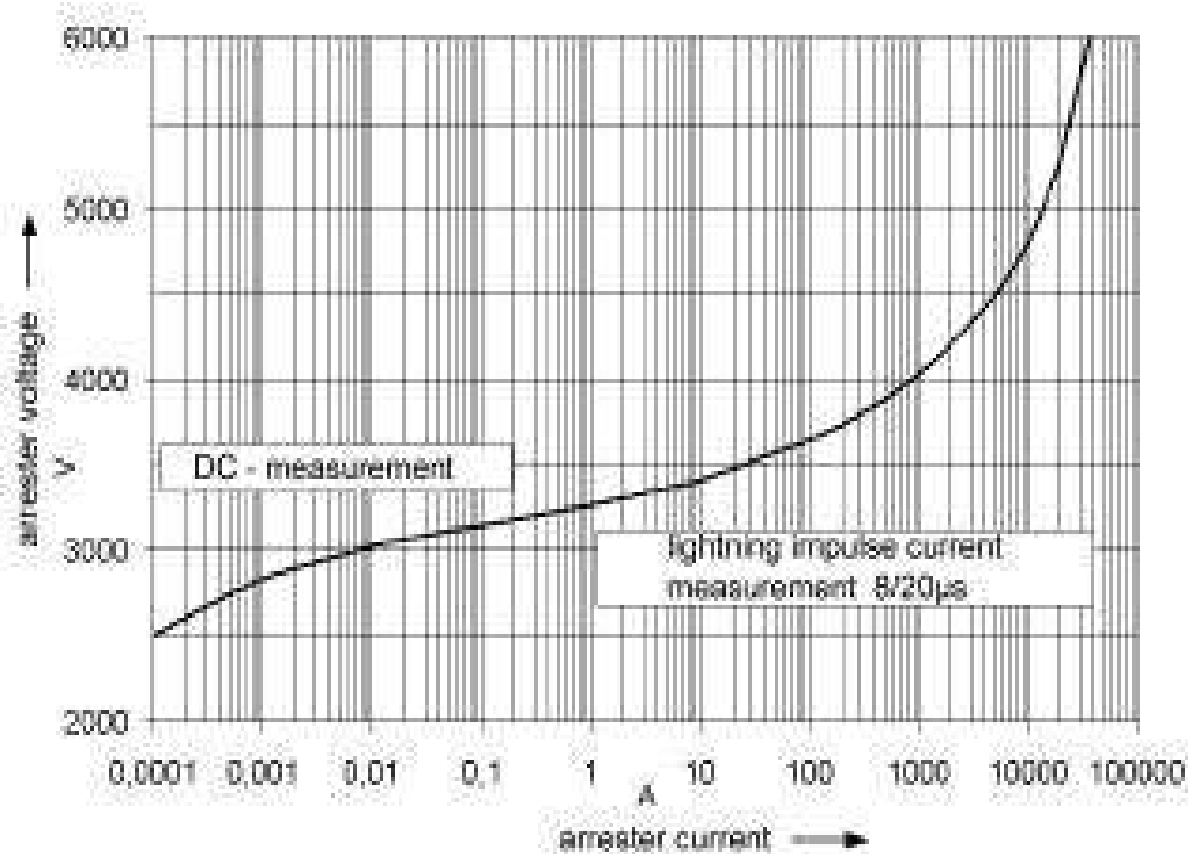
Ο Υ/Σ της ΔΕΗ μέσης τάσης είναι κοινός, ανεξάρτητα από τους κινητήρες που χρησιμοποιούνται (AC ή DC ρεύματος), και τα κυριότερα μέρη που αποτελείται ένας τυπικός Υ/Σ μέσης τάσης είναι :

- Διακόπτες απόζευξης υψηλής τάσης για την διακοπή της τάσης της γραμμής των 150 kV.
- Αποζευκτές για τους Μ/Σ ισχύος στην πλευρά των 150 kV που πλαισιώνουν τον διακόπτη.
- Στο δευτερεύον τύλιγμα του Μ/Σ ισχύος, μέσης τάσης 25 kV εγκαθίστανται κεντρικοί διακόπτες διακοπής αυτής.
- Ένας διασυνδεδεμένος διακόπτης των 25 kV. Όταν λειτουργούν και οι δυο Μ/Σ 150/25 kV ο διασυνδεδεμένος διακόπτης σε κατάσταση ομαλής λειτουργίας μένει ανοιχτός καθώς οι Μ/Σ αυτοί δεν μπορούν να παραλληλιστούν.

- Αλεξικέραυνα γραμμής (MO varistors).

Η αρχή λειτουργίας ενός μεταλλικού οξειδίου αλεξικέραυνου (MO varistors) υπέρτασης είναι ουσιαστικά βασισμένη στην έντονα μη γραμμική χαρακτηριστική τάσης - ρεύματος συγκεκριμένων κεραμικών στοιχείων, αποκαλούμενα MO varistors, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.6.

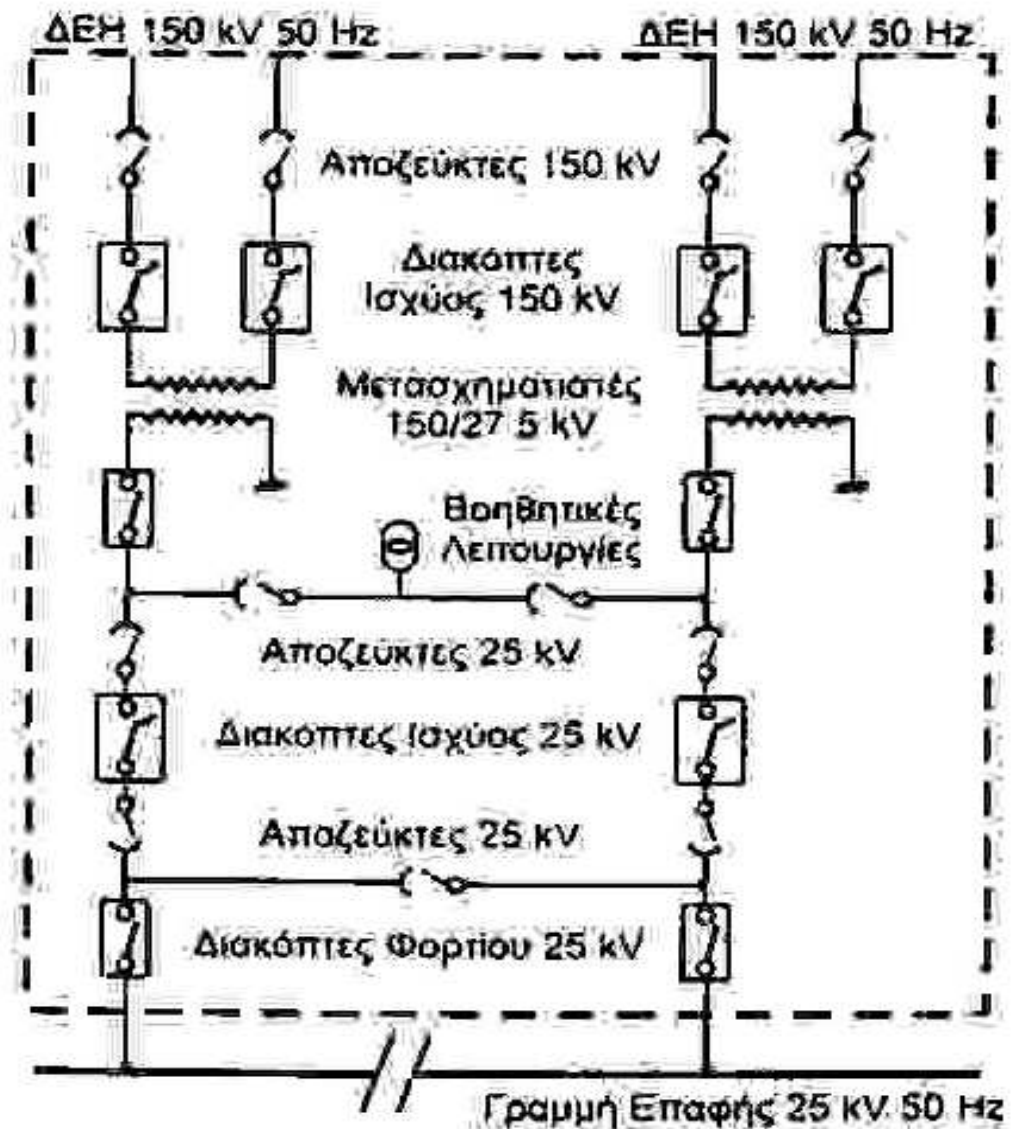
Αυτά τα MO varistors περιορίζουν την τάση που ενεργεί πάνω τους, η οποία είναι μεγαλύτερη κατά πολύ του ρεύματος, και έτσι προστατεύεται κατά αυτόν τον τρόπο ο παράλληλα συνδεδεμένος εξοπλισμός απέναντι σε μια καταπόνηση υψηλής τάσης.



σχήμα 2.6.

Φαίνεται καθαρά στο σχήμα 2.6 η χαρακτηριστική ενός αλεξικέρανου τάσης – έντασης υπέρτασης.

Στο σχήμα αμέσως παρακάτω 2.7 φαίνονται ορισμένα κύρια μέρη ενός τυπικού υποσταθμού ΔΕΗ μέσης τάσης με μετατροπή AC 150/25 kV $f = 50$ Hz



Σχήμα 2.7: τυπικός υποσταθμός ΔΕΗ μέσης τάσης.

2.3 Επεξεργασία ηλεκτρικής ενέργειας.

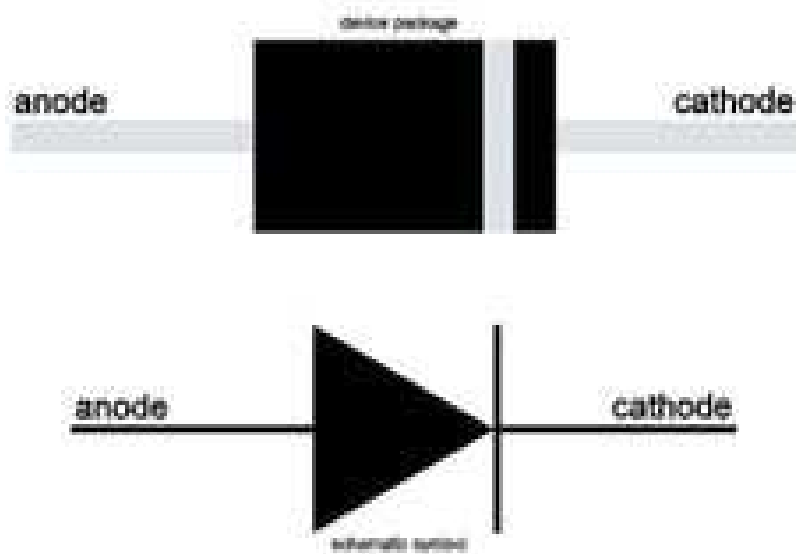
Εφόσον η παραγόμενη ηλ. ενέργεια υψηλής τάσης υποβιβαστεί σε μέση τάση πρέπει να μεταβιβαστεί εκ νέου σε χαμηλή τάση, για την τροφοδοσία του υποσταθμού έλξης του ΟΣΕ και από εκεί καταλήγει στους ηλεκτρικούς κινητήρες, αφού έχει γίνει η επεξεργασία της σε κατάλληλη μορφή. Η μορφή της ενέργειας χαμηλής τάσης εξαρτάται από το είδος των ηλεκτρικών κινητήρων που θα χρησιμοποιήσω. (AC – DC ρεύματος). Οι κυριότεροι τύποι ηλεκτρικών μηχανών που

χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης είναι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες(επαγωγικοί) που τροφοδοτούνται με AC ρεύμα και κινητήρες με ρεύμα DC .

2.3.1 Μετατροπή εναλλασσομένου ρεύματος σε συνεχές για τους DC κινητήρες.

Όταν έχω κίνηση συρμών με κινητήρες DC , χρειάζεται μετατροπή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσης τάσης AC σε χαμηλής τάσης τριών φάσεων ίδιας συχνότητας και μετά με ανόρθωση το μετατρέπω σε συνεχές ρεύμα (DC).

Ο ανορθωτής είναι το πρώτο στάδιο μετατροπής της εναλλασσόμενης ηλεκτρικής ενέργειας(AC) σε συνεχή (DC) και θέλω να το κάνω με όσο το δυνατόν χαμηλότερο μέτρο εξομάλυνσης της ροής. Ο ανορθωτής είναι μια διάταξη ημιαγωγικών στοιχείων - των διόδων - και ο τύπος αυτού που χρησιμοποιείται συχνά είναι ο πλήρης ανορθωτής με διάταξη διόδων σε κύκλωμα γέφυρας πλήρους ανόρθωσης (σχήμα 2.7) Η δίοδος (diode), φαίνεται στο σχήμα 2.6, είναι ένα ημιαγωγικό στοιχείο που σχεδιάστηκε ώστε να άγει μόνο κατά μια κατεύθυνση , και άγει από την άνοδο προς την κάθοδο και όχι προς την αντίθετη κατεύθυνση.



Σχήμα 2.8 : δίοδος

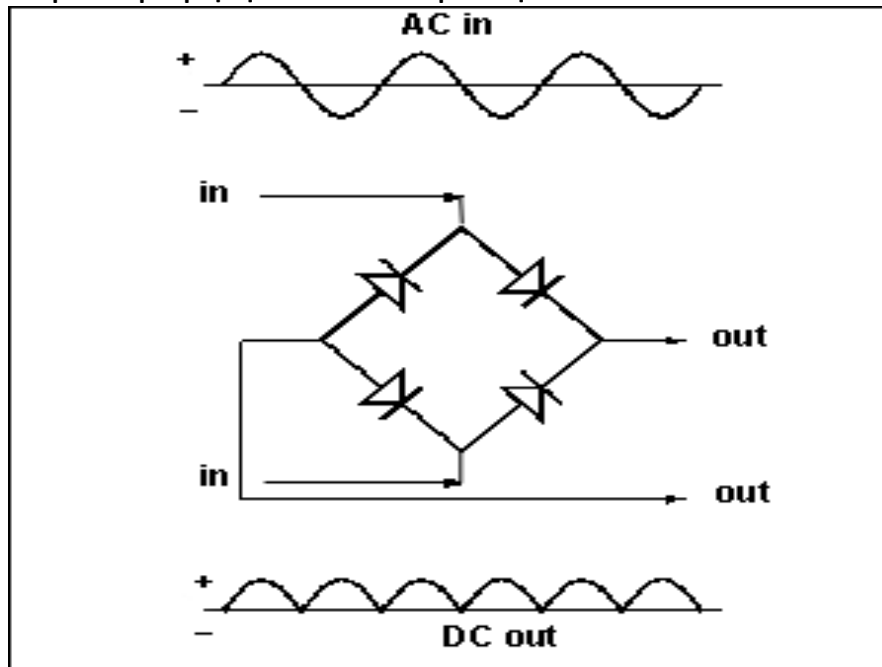
Οι προδιαγραφές κάθε διόδου εξαρτώνται από το ποσό ενέργειας που μπορούν να καταναλώσουν με ασφάλεια και από την μέγιστη ανάστροφη τάση με την οποία μπορούν να λειτουργούν χωρίς να καταρρέουν. Η ισχύς που καταναλώνεται από μια diode σε συνθήκες ορθής πόλωσης είναι ίση με την πτώση τάσης στα άκρα της επί το ρεύμα που την διαρρέει.

Το μέτρο της εξομάλυνσης ροής ενός κυκλώματος ανορθωτή μας το δίνει η κυμάτωση (ripple) της εξόδου του, που είναι ο λόγος της ενεργού τιμής των εναλλασσομένων συνιστωσών προς την συνεχή τιμή τάσης :

$$r = U_{ac\ rms}/U_{dc} * 100 (\%) \Leftrightarrow r = \sqrt{(U_{rms}/U_{dc})^2 - 1} * 100\%$$

όπου : $U_{dc} = 1/T \int v_o(t) dt$.

Η διάταξη ανόρθωσης που συνήθως χρησιμοποιείται είναι κύκλωμα γέφυρας πλήρους ανόρθωσης, και επιθυμώ όσο το δυνατόν χαμηλότερη κυμάτωση ώστε και η παραγόμενη κυματομορφή να είναι ομαλή.



Σχήμα 2.9 : κύκλωμα ανόρθωσης τάσης.

Το κύκλωμα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9 αποτελείται από 4 διόδους. Οι diodes που έχουν φορά προς τα κάτω άγουν κατά την θετική ημιπερίοδο της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου

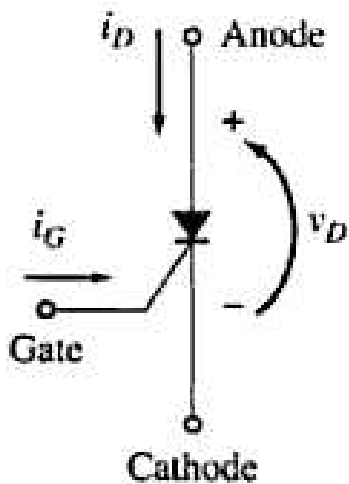
ενώ οι δίοδοι που έχουν φορά προς τα άνω άγουν κατά την αρνητική ημιπερίοδο της τάσης εισόδου AC. Με τον παραπάνω ανορθωτή η τάση εξόδου περιέχει ακόμα εναλλασσόμενες συνιστώσες με συχνότητα 120 Hz. Έτσι λοιπόν για να πετύχω καλύτερη εξομάλυνση της τάσης εξόδου χρησιμοποιώ φίλτρα διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων στην έξοδο του ανορθωτή .

Οι δυο τύποι φίλτρων για εξομάλυνση τάσης εξόδου από τον ανορθωτή μπορεί να είναι :

- Πυκνωτές συνδεδεμένοι παράλληλα στις γραμμές τροφοδοσίας που εξομαλύνουν τις μεταβολές της εναλλασσόμενης τάσης.
- Πηνία που συνδέονται σε σειρά πάνω στις γραμμές τροφοδοσίας και εξομαλύνουν τις μεταβολές του εναλλασσομένου ρεύματος.

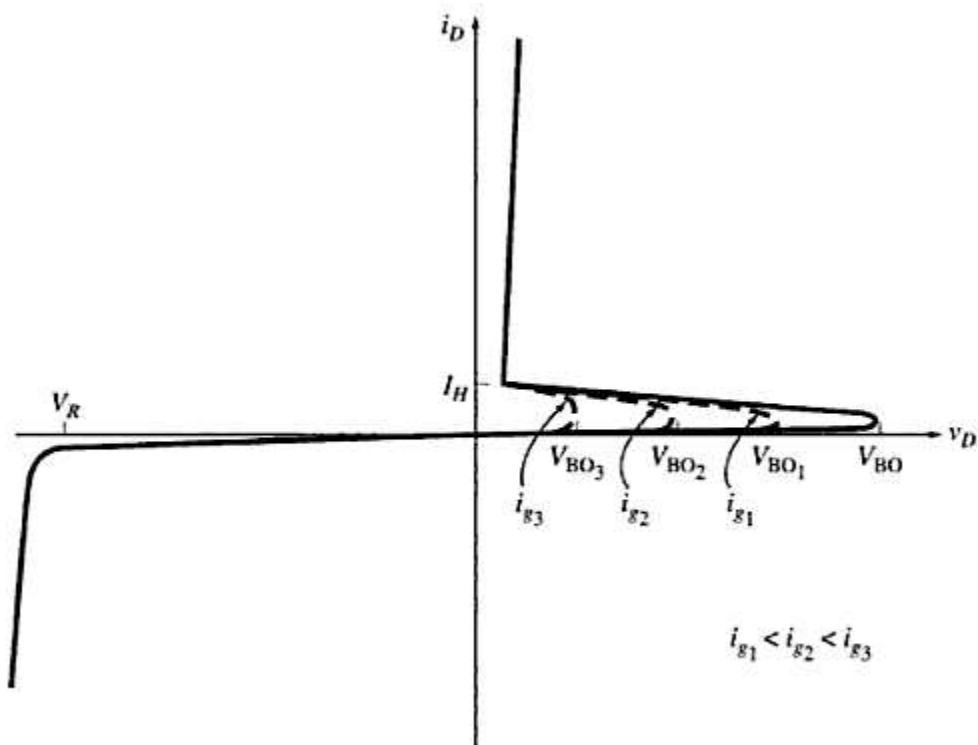
Το κύκλωμα ανορθωτή του σχήματος 2.9 έχει το μειονέκτημα ότι η τάση εξόδου είναι συγκεκριμένη για μια δεδομένη τάση εισόδου και για να αντιμετωπιστεί αυτό αντικαθιστώ τις δίοδους του κυκλώματος με ελεγχόμενους ανορθωτές πυριτίου(SCR).

Ο ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου είναι μια ελεγχόμενη διάδος και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές έλεγχου κινητήρων διότι η ορθή τάση κατάρρευσης του εξαρτήματος έχει την δυνατότητα να ρυθμίζεται από το ρεύμα που εφαρμόζεται στην πύλη του (i_g). Το κυκλωματικό του σύμβολο φαίνεται αμέσως παρακάτω στο σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10 : κυκλωματικό σύμβολο SCR

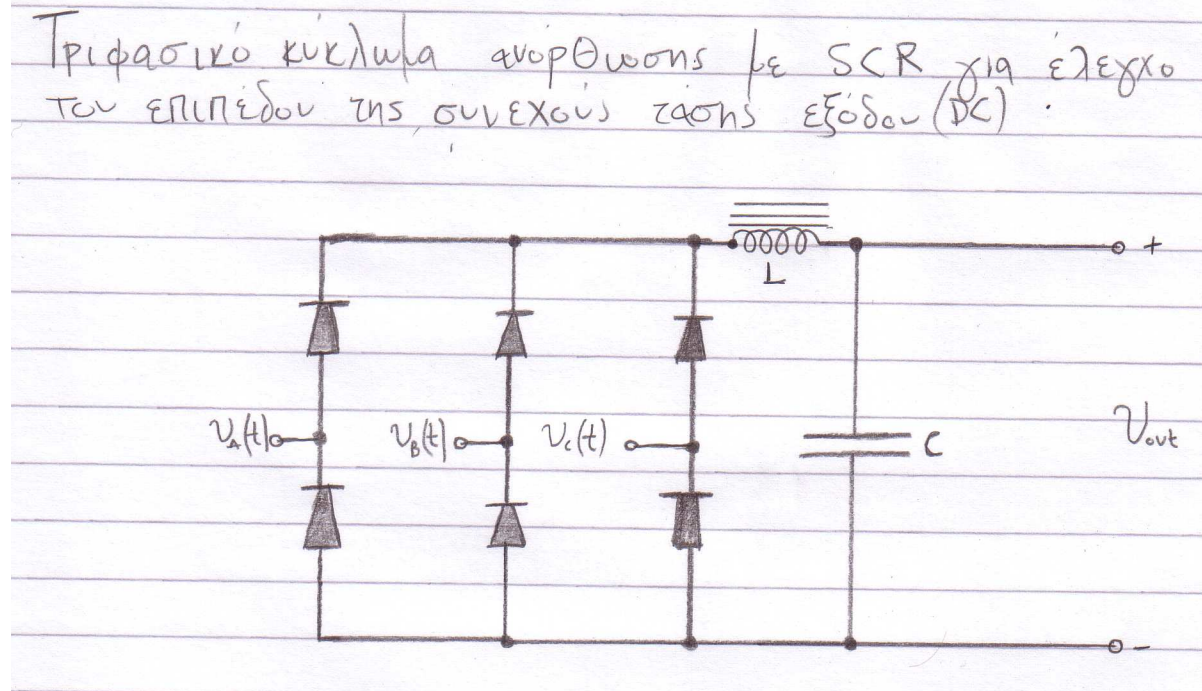
Η χαρακτηριστική καμπύλη v - i του ελεγχόμενου ανορθωτή πυριτίου (SCR) είναι του σχήματος 2.11 παρακάτω :



Σχήμα 2.11

Από την καμπύλη βλέπω ότι όσο το ρεύμα $i_g \uparrow$ τότε ανάλογα τόσο η τάση $V_{BO} \downarrow$.

Αν σε έναν SCR η ορθή τάση κατάρρευσης χωρίς ρεύμα στην πύλη είναι μεγαλύτερη από την τάση του κυκλώματος $V_{BO} > V_D$ τότε αυτός θα άγει μόνο όταν στη πύλη εφαρμοστεί κάποιο ρεύμα i_g . Έτσι όταν γίνει η έναυση του SCR άγει ως το ρεύμα $i_D < I_H$



Σχήμα 2.12

Στο παραπάνω σχήμα 2.12 φαίνεται ένα τριφασικό κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης όπου οι διόδους έχουν αντικατασταθεί με ελεγχόμενους ανορθωτές πυριτίου. Η μέση συνεχής τάση εξόδου του παραπάνω κυκλώματος εξαρτάται από τον χρόνο στον οποίο σκανδαλίζονται οι SCR κατά την διάρκεια των θετικών ημιπεριόδων τους. Αν οι SCR δεν σκανδαλίζονται τότε η τάση εξόδου θα είναι 0 Volt. Για κάθε άλλη τιμή της γωνίας έναυσης μεταξύ 0° και 180° η συνεχής τάση εξόδου θα βρίσκεται κάπου μεταξύ της μέγιστης τιμής και των 0 Volt. Όταν στο κύκλωμα ανόρθωσης χρησιμοποιούνται ελεγχόμενοι ανορθωτές πυριτίου έναντι διόδων χρειάζεται παρεμβολή φίλτρου στην έξοδο καθώς η συνεχής τάση εξόδου περιέχει αρκετές αρμόνικες.

2.3.2 Μετατροπή εναλλασσομένου ρεύματος δικτύου σε εναλλασσόμενο(AC) για ανάλογους κινητήρες.

Σε εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης χρησιμοποιούνται πολλές φορές ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες για την έλξη συρμών. Έτσι η ηλεκτρική ενεργεία του δικτύου που έχει μετασχηματιστεί σε μέσης τάσης ως τον υποσταθμό της ΔΕΗ δέχεται μια επεξεργασία πριν τροφοδοτήσει AC κινητήρες. Έτσι λοιπόν η ηλεκτρική ενέργεια μέσης τάσης από τον υποσταθμό της ΔΕΗ μεταφέρεται στον κύριο μετασχηματιστή του κινητήριου οχήματος ο οποίος διαθέτει τέσσερις περιελίξεις έλξης . Έτσι το ρεύμα μετά τον μετασχηματισμό από εναλλασσόμενο τριών φάσεων μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο μιας φάσης . Στη συνέχεια το μονοφασικό AC μετατρέπεται από τον ανορθωτή τεσσάρων τεταρτημορίων (4QS) σε συνεχή τάση(DC)για το ενδιαμέσο κύκλωμα. Άρα τώρα η συνεχής πλέον τάση οδηγείται στον μεταλλάκτη εύρους παλμών (PWR) ο οποίος μετατρέπει την συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη πάλι τριών φάσεων ημιτονοειδούς ρεύματος με μεταβλητό πλάτος και συχνότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (DC)

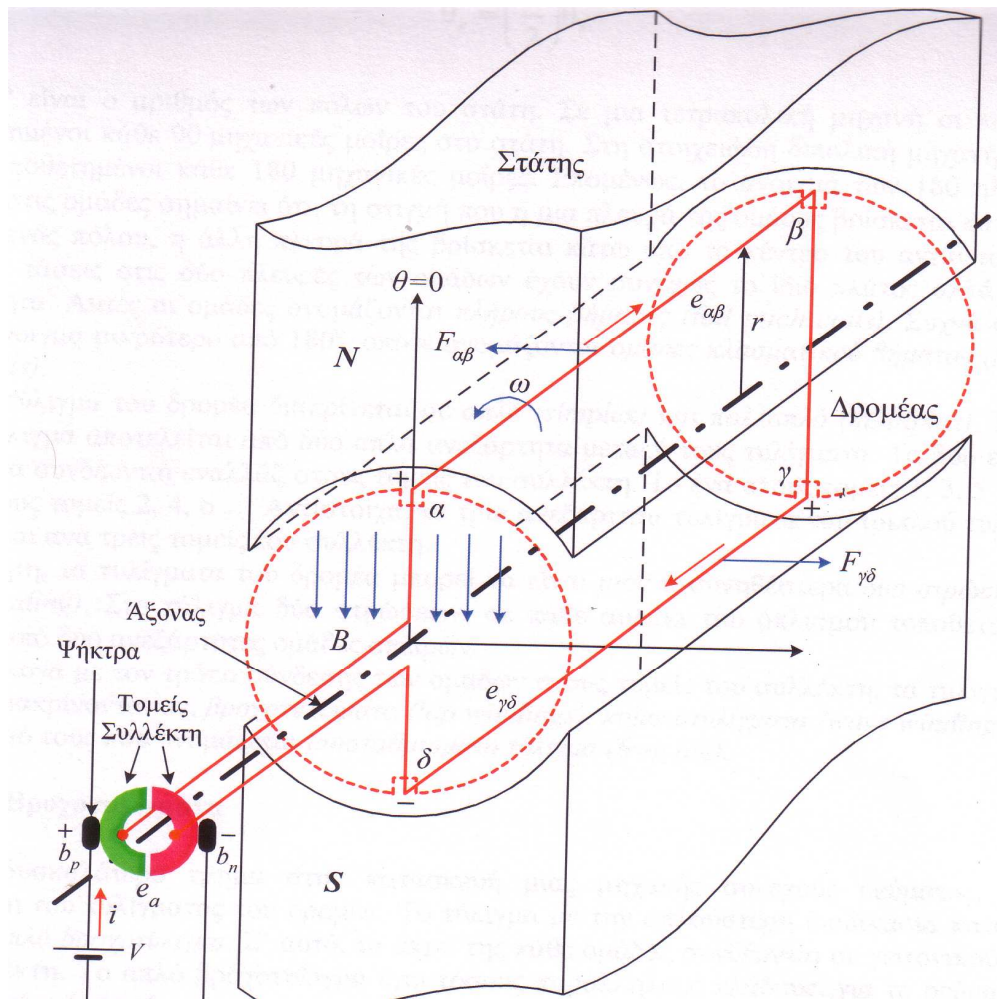
3.1 Εισαγωγή : Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι μηχανές που τροφοδοτούνται από συνεχές ρεύμα που μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική δημιουργώντας ροπή ($M_{εσ}$). Χρησιμοποιούνται σε μεταβολές όπου θέλω μια σταθερή ταχύτητα αλλά και εκεί που επιθυμώ μεγάλες μεταβολές ταχύτητας .

Έχουν μεγάλη χρησιμότητα καθώς μπορούν να ελέγξουν εύκολα την ταχύτητα τους , αυξομειώνοντας αυτή εύκολα ανάλογα με τις απαιτήσεις , και έχουν καλή δυναμική συμπεριφορά. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης , παρόλο που τελευταία τους έχουν αντικαταστήσει σε ορισμένες εφαρμογές οι επαγωγικοί κινητήρες .

3.2 Αρχή λειτουργίας : Η αρχή λειτουργίας των κινητήρων Σ.Ρ είναι ότι ρευματοφόρος αγωγός του δρομέα (I_p) μέσα σε μαγνητικό πεδίο του στάτη $\Phi(i_e)$ δέχεται μια δύναμη , δύναμη Laplace , επομένως παράγεται ροπή (δηλαδή κίνηση) καθώς περιστρέφεται ο δρομέας του κινητήρα και η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική : $M_{εσ} = C_m * I_p * \Phi(i_e)$ (3.1)
Συνέπεια των δυνάμεων Laplace είναι η ανάπτυξη ροπών (T) :

$$T_{\alpha\beta} = T_{\gamma\delta} = B * r * i * l$$

Άρα η συνολική ροπή που αναπτύσσεται στο πλαίσιο του όταν αυτό βρίσκεται κάτω από τους πόλους είναι : $T = T_{\alpha\beta} + T_{\gamma\delta} = 2 * B * r * i * l = \Phi * i * C_T$, που είναι ίδια με την σχέση (3.1)



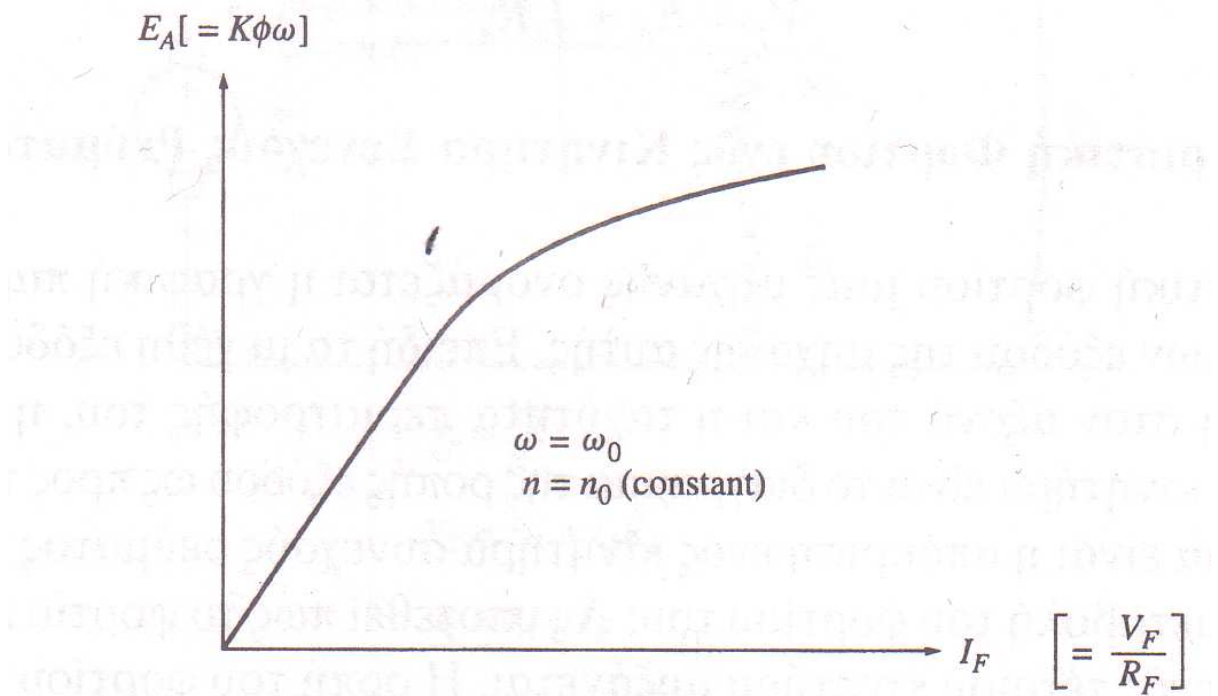
Σχήμα 3.1

Η κυματομορφή της ροπής που παράγει ο κινητήρας είναι ίδια της τάσης εξόδου για μια γεννήτρια Σ.Ρ. με κοινή φορά περιστροφής αντίθετη από την κίνηση των δεικτών του ρολογιού.

Το ρεύμα διέγερσης i_e είναι πολύ σημαντικό για έναν κινητήρα καθώς είναι εκείνο που προκαλεί την μαγνητική ροή Φ , η οποία πάντα πρέπει να υπάρχει για να παράγεται ροπή (περιστροφή) στον κινητήρα. Ένας κινητήρας Σ.Ρ δεν πρέπει ποτέ να μένει χωρίς ρεύμα διέγερσης i_e καθώς δεν θα υπάρχει μαγνητική ροή και θα έχει αρνητικές συνέπειες. (γραφική $N(r\mu) - i_e(A)$ παρακατω.) Ισχύει ότι η μαγνητική ροή είναι ανάλογη του ρεύματος διέγερσης που την προκαλεί $\Phi(i_e) = \lambda * i_e$

και αυτή είναι μια υπόθεση που την κάνω πάντα όταν εξετάζω κινητήρες Σ.Ρ.

Κατά την λειτουργία ενός κινητήρα Σ.Ρ στο εσωτερικό του επάγεται μια τάση (E_A), η οποία είναι ανάλογη της ροής (Φ) που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της μηχανής – επομένως και του ρεύματος διέγερσης – καθώς και ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα (ω). Έτσι η εσωτερική τάση του κινητήρα δίνεται από την καμπύλη μαγνήτισης του, που φαίνεται αμέσως παρακάτω, αν θεωρήσω ότι η ταχύτητα περιστροφής ω (ή n) είναι σταθερή.



Σχήμα 3.2 : καμπύλη μαγνήτισης κινητήρα Σ.Ρ

Μελετώντας την καμπύλη μαγνήτισης του σχήματος 3.2 για έναν κινητήρα Σ.Ρ βλέπω ότι θέλω να λειτουργεί κοντά στο σημείο κορεσμού της καμπύλης (‘γόνατο’ αυτής) έτσι ώστε με μεγάλη αύξηση του ρεύματος διέγερσης να δημιουργείται μικρή αύξηση της εσωτερικής τάσης του κινητήρα, σε λειτουργία με πλήρες φορτίο, αρκεί να μην οδηγεί σε αστάθεια σε αυτό το σημείο.

3.3 Κατασκευαστικά μέρη μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Μια μηχανή συνεχούς ρεύματος, κινητήρας ή γεννήτρια περιλαμβάνει τα ίδια κατασκευαστικά μέρη. Οι μηχανές στρεφόμενων μερών αποτελούνται από τον ακίνητο **στάτη** και τον κινούμενο **δρομέα (rotor)** .

Ο στάτης είναι το ακίνητο μέρος μιας μηχανής Σ.Ρ και έχει ως προορισμό στο εσωτερικό του να δημιουργείται η καθορισμένη μαγνητική ροή , απαραίτητη για την λειτουργία του. Επίσης με τους αγωγούς τροφοδοσίας ρυθμίζει την ηλεκτρική συμπεριφορά της μηχανής ως γεννήτρια ή κινητήρα. Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται ο στάτης είναι :

1. Το **ζύγωμα**. Αποτελεί τον κορμό της ηλεκτρικής μηχανής και κατασκευάζεται από χυτοσίδηρο. Έχει κυλινδρικό σχήμα και προορισμό τη δημιουργία στο εσωτερικό του κλειστού μαγνητικού κυκλώματος.

2. Τους **κύριους μαγνητικούς πόλους**. Εκείνοι με την σειρά τους αποτελούνται από τρία κύρια μέρη: α) τον **πυρήνα** των μαγνητικών πόλων που κατασκευάζεται από ελάσματα λεπτού πάχους σκληρού σιδηρομαγνητικού υλικού , μονωμένα μεταξύ τους.

β) τον **κορμό** όπου στο πλάι του περιμετρικά τοποθετείται το τύλιγμα ενώ στο κάτω μέρος του υπάρχει το πέδιλο που έχει ως προορισμό να εξασφαλίσει όσο το δυνατόν πιο ομογενές μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής.

γ) το **τύλιγμα** περιμετρικά των πόλων (τύλιγμα διέγερσης κινητήρα). Κατά την κατασκευή του τυλίγματος πρέπει να είναι καλά μονωμένο περιμετρικά του πόλου όπου στερεώνεται ενώ τα άκρα του μένουν ελεύθερα ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ηλεκτρικής σύνδεσης του.

3. Οι **βοηθητικοί πόλοι**. Έχουν ως προορισμό την εξομάλυνση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής όταν βέβαια λειτουργεί με φορτίο.

4. Τα **καλύμματα (καπάκια) της μηχανής** . Αν η μηχανή έχει δυο τότε είναι και τα δυο κλειστά ή το ένα από τα δυο έχει πλέγμα

που παρέχει την δυνατότητα έλεγχου και ψύξης της μηχανής ανάλογα με το βαθμό προστασίας της. Κύριος στόχος των καλυμμάτων είναι να στηρίζουν τον άξονα για να εξασφαλίζεται η περιστροφή του στα έδρανα .

5. Τα έδρανα (ρουλεμάν) στήριξης του κινητού μέρους στο σταθερό μέρος.

6. Ο ψυκτροφορέας με τις ψήκτρες. Εκείνες είναι κατασκευασμένες από άνθρακα , απλό ή μεταλλικό γραφίτη. Οι ψήκτρες τοποθετούνται μέσα σε θήκες όπου εφάπτονται πάνω στο συλλέκτη. Σκοπός τους είναι να μετατρέπουν τις εναλλασσόμενες συνιστώσες ρεύματος σε συνεχή τάση και να διανέμουν όσο το δυνατόν ομοιόμορφα το ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης του επαγωγικού τύμπανου , ώστε εκείνο να δέχεται δύναμη συνεχώς και να στρέφεται ο δρομέας.

7. Το κιβώτιο ακροδεκτών , όπου εκεί καταλήγουν οι ακροδέκτες των βασικών τυλιγμάτων μιας μηχανής και πραγματοποιούνται οι διάφορες συνδέσεις.

8. Το περίβλημα της μηχανής . Είναι κατασκευασμένο από χυτοσίδηρο και προστατεύει τον κινητήρα από μηχανικές καταπονήσεις.

Ο **δρομέας (rotor)** βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο των πόλων του κινητήρα και έχει ως προορισμό να δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο παράγοντας ροπή στα άκρα του. Τα κυριότερα τμήματα του κινητού μέρους ενός κινητήρα Σ.Ρ , δηλαδή του δρομέα του , είναι τα εξής :

1. Ο άξονας. Είναι κατασκευασμένος από ατσάλι και πάνω σε αυτόν στερεώνεται το επαγωγικό τύμπανο.

2. Το επαγωγικό τύμπανο. Περιλαμβάνει τον **πυρήνα** και το **τύλιγμα** . Ο πυρήνας κατασκευάζεται από ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού που είναι μονωμένα μεταξύ τους και προσαρμόζονται στον άξονα με ειδικές σφήνες. Ο πυρήνας παρέχει έναν δρόμο μικρής μαγνητικής αντίστασης για να περνούν οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου των πόλων και αυτός φέρει το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου.

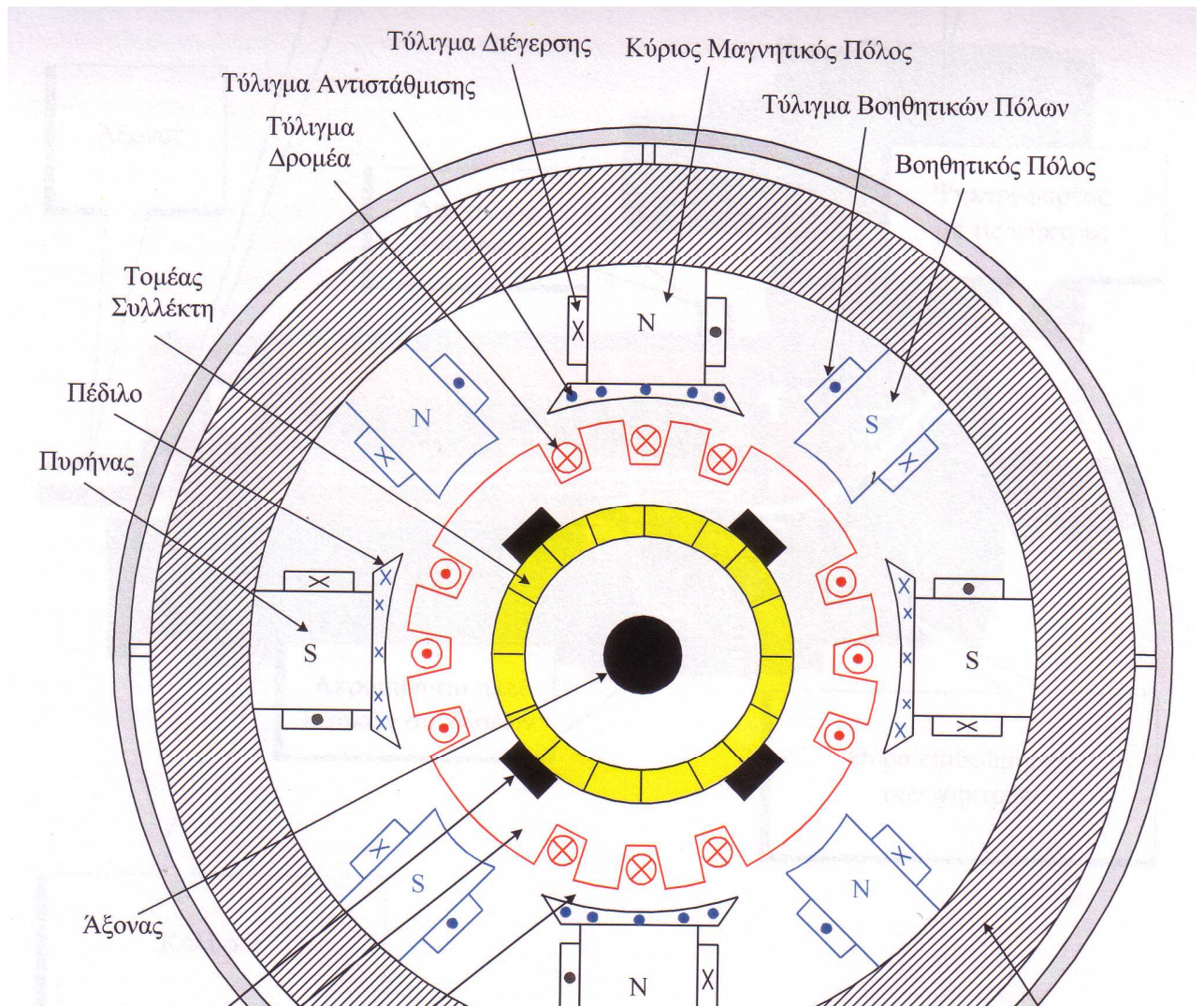
Το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου αποτελείται από πολλές σπείρες κ ψιλό σύρμα που συνδέονται παράλληλα στους τομείς του συλλέκτη. Για κινητήρες μεγάλης ισχύος είναι κατασκευασμένο από επισμαλτωμένο αγωγό χαλκού ορθογωνικής διατομής και χρειάζεται για να δέχεται το αποτέλεσμα , δηλαδή την ροπή(κίνηση) που παράγει ο κινητήρας.

3. *Ο συλλέκτης* . Αποτελείται από τομείς , κομμάτια μονωμένα μεταξύ τους , κατασκευασμένα από ορείχαλκο. Εκείνος 'συλλέγει' το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου. Πάνω του εφάπτονται οι ψήκτρες , πιεσμένες από ελατήρια , όπου συλλέκτης – ψήκτρες διανέμουν κατάλληλα το ρεύμα στο τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου , ώστε εκείνο να δέχεται συνεχώς και ομαλά δύναμη ώστε να στρέφεται ο δρομέας.

4. *Ο ανεμιστήρας* , ο οποίος τοποθετείται για την ψύξη των τυλιγμάτων του κινητήρα.

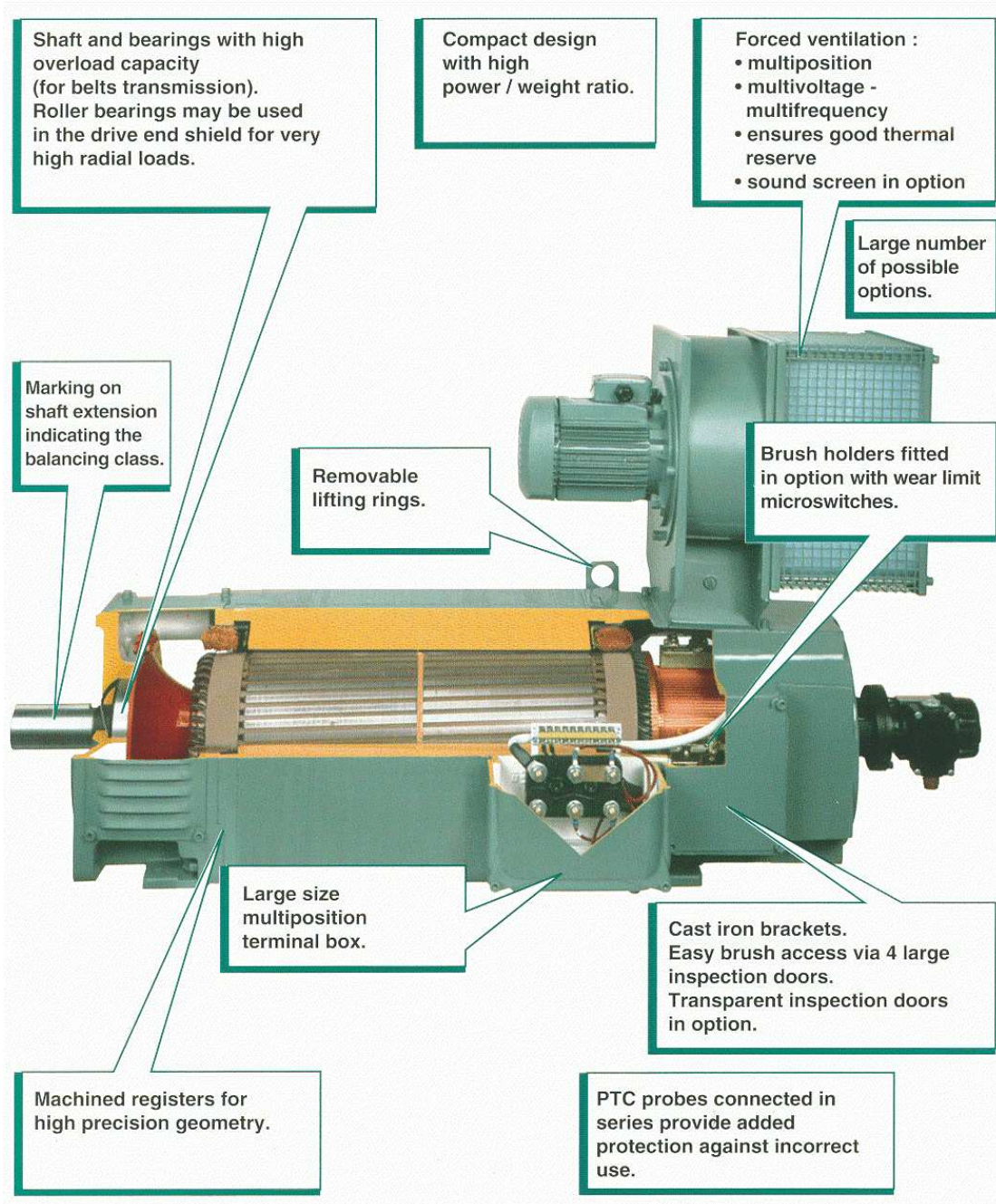
5. *Το σύστημα μετάδοσης κίνησης* για σύνδεση του άξονα του κινητήρα με το φορτίο.

Στην φωτογραφία 3.1 αμέσως παρακάτω φαίνεται σε τομή ένας κινητήρας Σ.Ρ.



Φωτογραφία 3.1 : τομή κινητήρα Σ.Ρ

Στην φωτογραφία 3.2 αμέσως παρακάτω φαίνεται ένας κινητήρας Σ.Ρ μεγάλης ισχύος της Leroy-Somer



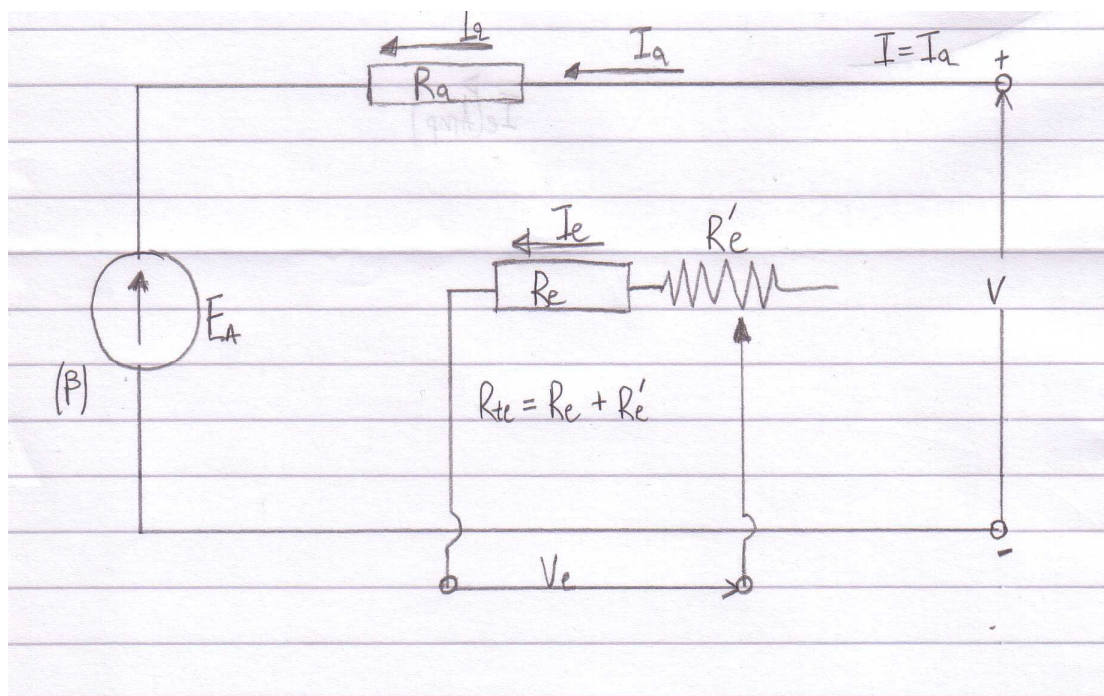
Φωτογραφία 3.2

3.4 Εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος και τύποι αυτών.

Το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου R_p (ή R_α) των κινητήρων αυτών τροφοδοτείται με ρεύμα I_p όποτε αρχίζει να περιστρέφεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο των πόλων του κινητήρα. Η περιστροφή αυτή του δρομέα έχει ως συνέπεια οι

αγωγοί του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου να τέμνουν τις μαγνητικές γραμμές του πεδίου του στάτη -που δημιουργείται από το ρεύμα διέγερσης (I_e) – ώστε να δημιουργείται στους αγωγούς μια ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΑΗΕΔ) E_A από επαγωγή , με φορά αυτής αντίθετη από εκείνη του ρεύματος που διαρρέει τους αγωγούς. Επομένως το φαινόμενο της γεννήτριας αναπτύσσεται δευτερογενώς στο εσωτερικό ενός κινητήρα Σ.Ρ , άρα η τάση $E_A = C_e \cdot n \cdot \Phi(I_e)$. Έτσι προκύπτει ότι η τάση τροφοδότησης ενός κινητήρα Σ.Ρ είναι $U = E_A + I_P \cdot R_P$

Όπως φαίνεται η διαφορά τάσης τροφοδοσίας (U) με την αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (ΑΗΕΔ) E_A μας δίνει το ρεύμα του δρομέα. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα για ένα κινητήρα ανεξάρτητης (ξένης) διέγερσης.



Σχήμα 3.3 : κινητήρας Σ.Ρ ξένης διέγερσης.

Η εκκίνηση είναι βασικό πρόβλημα για όλα τα είδη ηλεκτρικών κινητήρων και για αυτό θα πρέπει να προστατεύονται από τα προβλήματα κατά την εκκίνηση τους. Η ένταση του ρεύματος (I_A) που απορροφά το επαγωγικό τύμπανο την στιγμή

που ο κινητήρας υπερνικήσει τις τριβές στον άξονα του και τίθεται σε κίνηση είναι : $I_A = (U_{\Delta}-0)/R_P$

Δηλαδή I_A είναι η ένταση εκκίνησης του κινητήρα ή ένταση αιχμής η οποία λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές. Συνέπεια της μεγάλης έντασης εκκίνησης (I_A ή $I_{PEKKIV.}$) είναι να αναπτύσσεται μεγάλη θερμότητα στα τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου → άρα δημιουργείται κίνδυνος καταστροφής τους → προβλήματα στο δίκτυο τροφοδοσίας λόγω βύθισης τάσης. Για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα του μεγάλου ρεύματος εκκίνησης ($I_{PEKKIV.}$) το κάνουμε συμφώνα με τη σχέση:

$$I_{PEKKIV.} = U_{\Delta}/R_P$$

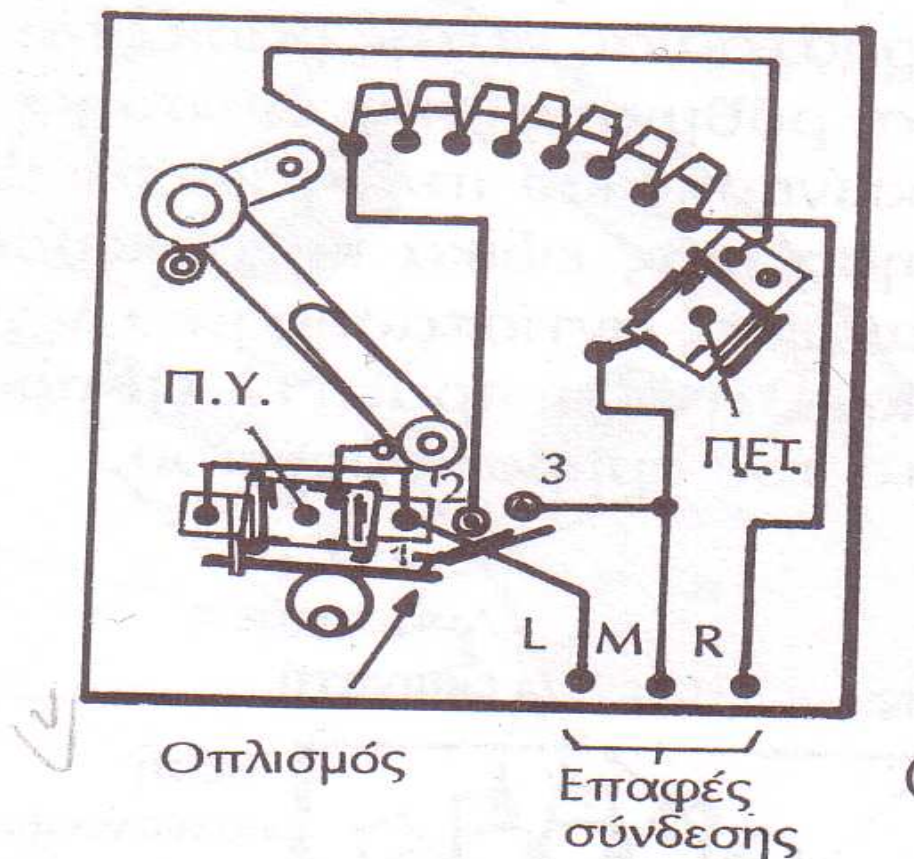
Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση έχω δυο επιλογές :

α) $U_{\Delta}(\downarrow)$, πράγμα δύσκολο καθώς μετά την ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή , η συνεχής (DC) θέλω να είναι σταθερή ώστε να μπορώ να συγκρίνω τον κάθε τύπο κινητήρα Σ.Ρ με έναν άλλο.

β) $R_P(\uparrow)$. αυτό επιτυγχάνεται όταν συνδέσω σε σειρά - προσωρινά - με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου αντιστάσεις ($R_{PEKKIV.}$) έτσι ώστε με την απόκτηση των πρώτων στροφών του δρομέα , δηλαδή την δημιουργία ΑΗΕΔ στο τύλιγμα του επαγ. τυμπάνου , και μετά από αυτή οι αντιστάσεις αρχίζουν τμηματικά να αφαιρούνται.

Όταν αφαιρεθούν οι πρόσθετες αντιστάσεις του εκκίνητη σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ο κινητήρας θα έχει την κανονική του (ονομαστική) ταχύτητα και θα απορροφά από το δίκτυο την ονομαστική τιμή έντασης ρεύματος (I_N) , η οποία πλέον εξαρτάται από το φορτίο του. { $I_{EKKIV.} = U/(R_P+R_{EKKIV.})$ }

Για να ρυθμίσω το $I_{EKKIV.}$ με την παραπάνω μέθοδο συνήθως χρησιμοποιείται μια ειδικά κατασκευασμένη κατά βαθμίδες αντίσταση , το ονομαζόμενο ελ-εμ-αρ(LMR), που φαίνεται στο σχήμα 3.4

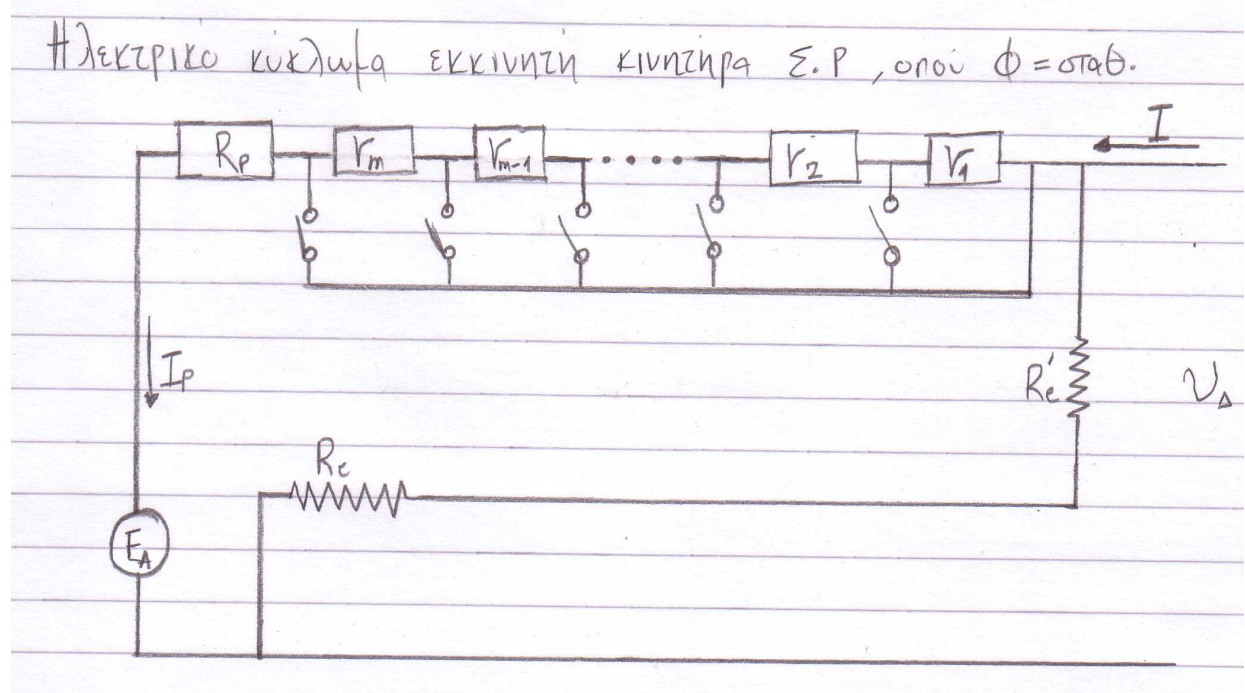


Σχήμα 3.4 : εκκινητής τύπου LMR

Ο εκκινητής, όπως φαίνεται από το σχήμα 3.4, περιλαμβάνει το σημείο έλλειψης τάσης (Π.Ε.Τ) το οποίο παρέχει την δυνατότητα εκκίνησης ενός κινητήρα με τις αντιστάσεις του εκκινητή να παρεμβάλλονται στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Επίσης κατά την διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα συγκρατεί τον στρόφαλο που διαθέτει ο εκκινητής ώστε όλες οι βαθμίδες των αντιστάσεων να είναι εκτός κυκλώματος. Επιπλέον σ' αυτόν υπάρχει το πηνίο υπερέντασης (Π.Υ) το οποίο συνδέεται σε σειρά με το κύκλωμα τροφοδοσίας του κινητήρα και διακόπτει την τροφοδοσία του όταν διαρρέεται από ένταση ρεύματος μεγαλύτερη από την κανονική του για την οποία είναι ρυθμισμένο να λειτουργεί.

Σε εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης συρμών όπου έχω μεγάλο μηχανικό φορτίο στον άξονα του κινητήρα → έχω ρεύμα που ο κινητήρας 'τραβά' από το δίκτυο (↑) έτσι → αν το ρεύμα αυξηθεί υπερβολικά περά από τα κατασκευαστικά του όρια θα καεί η ασφάλεια που προστατεύει τον κινητήρα → το ρεύμα

αυξάνεται περισσότερο και είναι επικίνδυνο να καταστρέψει τις περιελίξεις του επαγωγικού τυμπάνου του κινητήρα. Ένα απλό κυκλωματικό διάγραμμα ενός εκκινητή συνδεδεμένο σε κινητήρα Σ.Ρ παράλληλης διέγερσης φαίνεται στο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5

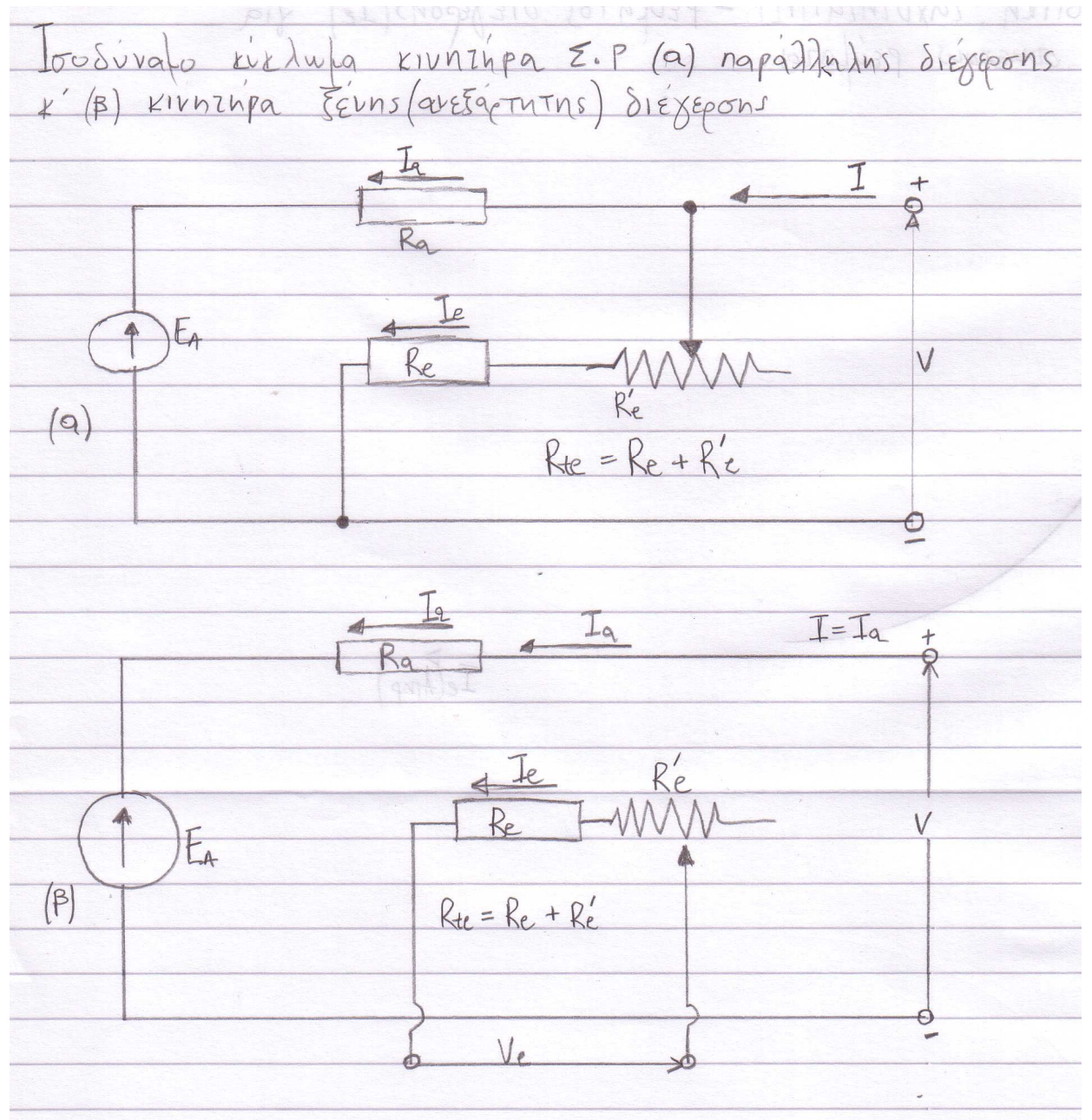
Όπως βλέπω στο κυκλωματικό διάγραμμα του σχήματος 3.5 φαίνονται οι αντιστάσεις εκκίνησης $r_1 - r_2 - \dots - r_{m-1} - r_m$ συνδεδεμένες σε σειρά με ξεχωριστό διακόπτη για την απομόνωση της κάθε βαθμίδας. Υποθέτω σε όλη την διάρκεια της εκκίνησης ότι η μαγνητική ροή είναι σταθερή. Θα πρέπει να προσέξω ώστε η ελάττωση του ρεύματος εκκίνησης να μην είναι πολύ μεγάλη \rightarrow θα παράγεται από τον κινητήρα πολύ μικρή ροπή εκκίνησης \rightarrow θα έχω μεγάλο χρόνο εκκίνησης, κάτι μη επιθυμητό.

Οι κατηγορίες των κινητήρων συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, και σε περιπτώσεις ηλεκτροκίνητης έλξης είναι οι παρακάτω:

1. Κινητήρας ξένης (ανεξάρτητης) και παράλληλης διέγερσης.
2. Κινητήρας με μόνιμο μαγνήτη.

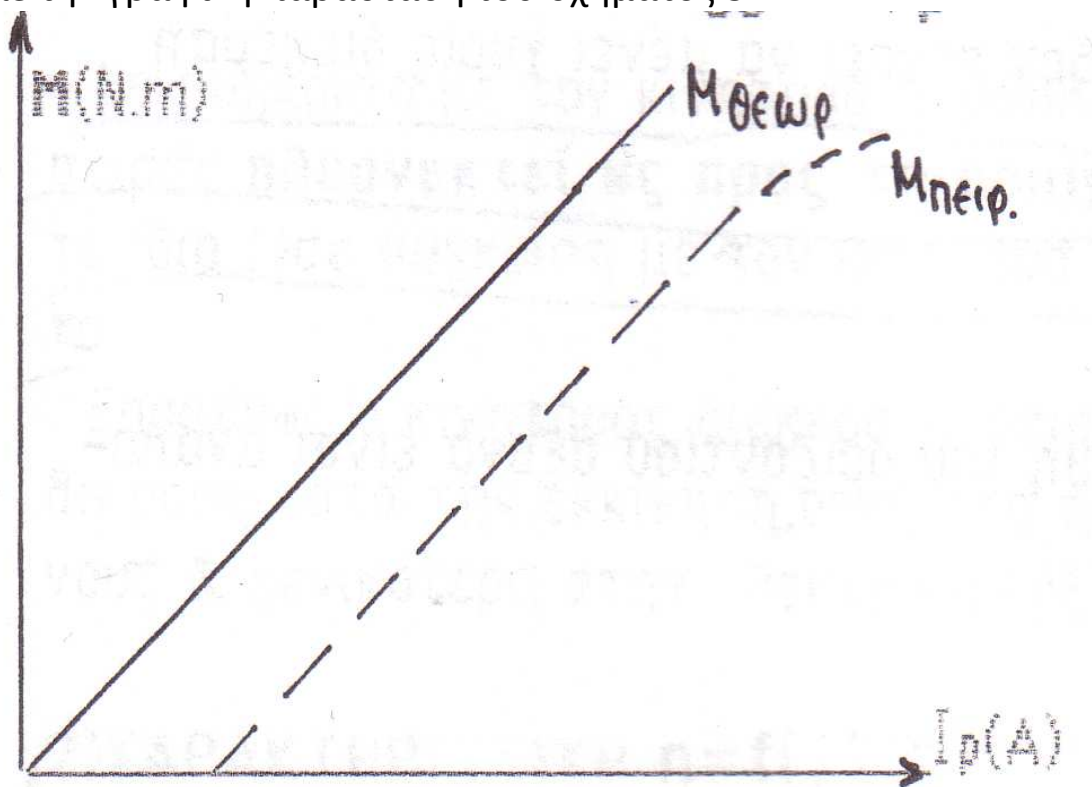
- 3. Κινητήρας διέγερσης σειράς.
- 4. Κινητήρας σύνθετης διέγερσης.

3.4.1 Κινητήρες ξένης (ανεξάρτητης) και παράλληλης διέγερσης.



Σχήμα 3.6 : κυκλωματικό σύμβολο κινητήρα παράλληλης διέγερσης(α) κ' ξένης διέγερσης (β)

Από το σχήμα 3.6 βλέπω ότι το κύκλωμα διέγερσης για τον κινητήρα παράλληλης διέγερσης(Π.Δ) τροφοδοτείται από το κυκλωμα του επαγωγικού τυμπάνου του ενώ για κινητήρα ξένης διέγερσης(Ξ.Δ) το κύκλωμα διέγερσης είναι μια ανεξάρτητη πηγη συνεχους τασης. Οι κινητήρες αυτοι εξετάζονται μαζί καθώς έχουν κοινές γραφικές παραστάσεις αν έχω σαν κοινο δεδομενο ότι η ταση διεγερσης τους είναι σταθερη. Ετσι για εκεινους Π.Δ η συνεχης ταση δικτυου τροφοδοσιας ισούται με ταση διεγερσης ενώ στους Ξ.Δ η ταση διεγερσης ισουται με την ταση της εξωτερικης πηγης. Οι κινητηρες ξένης διέγερσης έχουν μονιμο τροφοδοτικο συνεχούς ρεύματος που δινει στο κυκλωμα την ταση διέγερσης , οι οποια είναι παντα σταθερη. Εξετάζοντας την σχεση που μου περιγραφει την αρχη λειτουργιας των κινητηρων Σ.Ρ : $M_{εσ} = C_m \cdot I_p \cdot \Phi(i_e)$ για την κατηγορία αυτή προκύπτει ότι αφού η τάση διέγερσης είναι σταθερή \rightarrow ρεύμα διέγερσης είναι σταθερό \leftrightarrow η μαγνητική ροη παραμένει σταθερή $\rightarrow M_{εσ} = \alpha \cdot I_p$ η ευθεία αναλογία ροπής και ρεύματος τύμπανου εκφράζεται με την γραφική παράσταση του σχήματος 3.7.



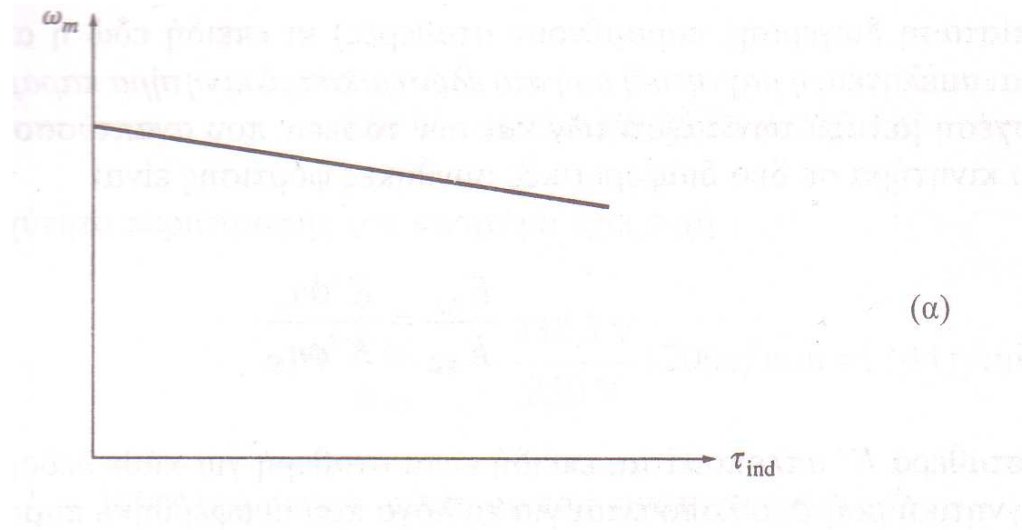
Σχήμα 3.7: γραφική ροπής – ρεύματος επαγωγικού τυμπάνου.

Η θεωρητική γραφική παράσταση παραπάνω είναι γνησίως αύξουσα από την αρχή των αξόνων - ανάμεσα στην ροπή που παίρνω από τον άξονα ενός κινητήρα ($M_{εσ.}$) και το ρεύμα επαγωγικού τύμπανου (I_p) - αλλά στην πράξη η πειραματική ευθεία μας δείχνει ότι υπάρχει μια περιοχή (νεκρή ζώνη) ρεύματος (I_p) που δεν μπορεί να αποδώσει ροπή \leftrightarrow όταν ($M_{εσ.}$) σχεδόν μηδενική πρακτικά θα πρέπει να υπάρχει κάποιο ρεύμα (I_p). Επίσης συγκρίνοντας τις δυο ευθείες η πειραματική μας δείχνει ότι για να πάρω μια συγκεκριμένη τιμή ροπής στρέψης το ρεύμα (I_p) θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη τιμή από εκείνη της θεωρητικής. Οι κινητήρες αυτοί μπορούν να παρακολουθήσουν τις μεταβολές της ροπής που εφαρμόζεται στον άξονα του φορτίου. Έτσι λοιπόν θεωρώ πως το φορτίο που εφαρμόζεται στον άξονα ενός τέτοιου κινητήρα αυξάνεται. Τέτοια περίπτωση σε εφαρμογή ηλεκτροκίνητης έλξης με την χρήση αυτών των κινητήρων μπορεί να υπάρξει σε τμήμα δικτύου με ανηφόρα σταθερής κλίσης. Τότε η ροπή του φορτίου M_{load} σε σχέση με την ροπή που παράγει ο κινητήρας $M_{εσ.}$ θα είναι μεγαλύτερη, $M_{load} > M_{εσ.}$, και όταν συμβεί αυτό η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (ω ή n) θα αρχίσει να ελαττώνεται. Όταν η ταχύτητα περιστροφής του ελαττώνεται ($n \downarrow$) τότε η τάση που παράγεται στο εσωτερικό τους μειώνεται ($E_A \downarrow$), καθώς είναι ανάλογα σύμφωνα με την σχέση $E_A = C_e \cdot n \cdot \Phi(I_e) \rightarrow$ έτσι το ρεύμα του επαγωγικού τυμπάνου του I_A (ή I_p) αυξάνεται $I_A = (U_T - E_A \downarrow) / R_A$. Η αύξηση του ρεύματος επαγωγικού τύμπανου προκαλεί παραγωγή μεγαλύτερης ροπής αναλογικά, όπως φαίνεται στην γραφική του σχήματος 3.7, από τον κινητήρα. Έτσι η ροπή του κινητήρα γίνεται ίση με την ροπή του φορτίου που εφαρμόζεται στον άξονα του.

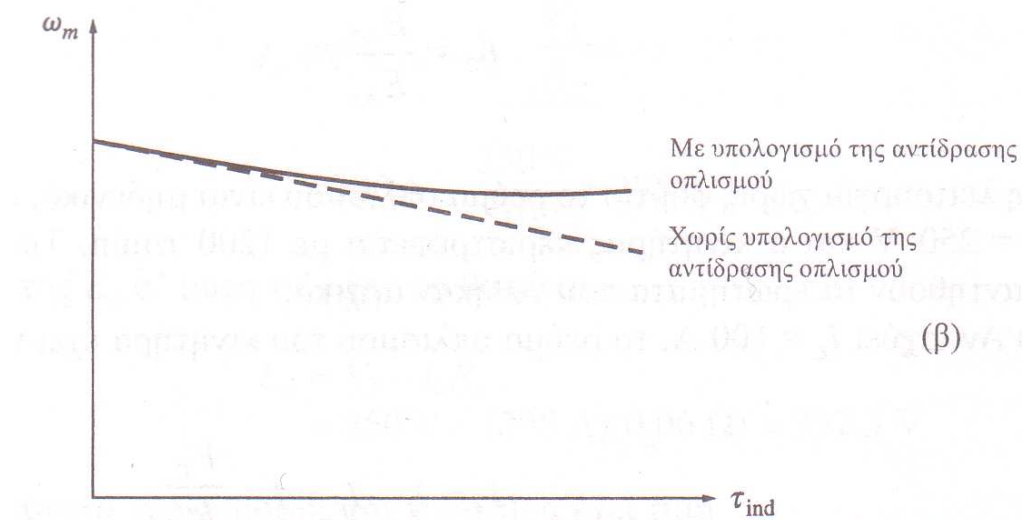
Στο παρακάτω σχήμα 3.8 φαίνεται η χαρακτηριστική παράσταση σε άξονες n ή $\omega(\text{rpm}) - M_{\text{εξ}}$ ή $\tau_{\text{ind}}(\text{Nt} \cdot \text{m})$, όπου φαίνεται η σχέση ταχύτητας περιστροφής και ροπής που παράγει ο κινητήρας – η ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος επαγωγικού τύμπανου (I_p). Τα δυο μεγέθη αυτά είναι χαρακτηριστικά καθώς το γινόμενο τους μας δίνει την ισχύ του κινητήρα. Η σχέση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα είναι : $n = U_{\Delta} - (R_p \cdot I_p) / C_e \cdot \Phi(i_e)$ (σε r.p.m)

Η εξίσωση αυτή είναι μια ευθεία με αρνητική κλίση όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8(α) , και για να ισχύει αυτή παίρνω δεδομένα : $U_{\Delta} = \text{σταθ.}$, $i_e = \text{σταθ.}$ $\leftrightarrow \Phi = \text{σταθερή}$.

Επιπλέον το φαινόμενο αντίδρασης του επαγωγικού τύμπανου στο εσωτερικό του κινητήρα επηρεάζει την γραφική παράσταση του σχήματος 3.8(β). Αν ένας κινητήρας παρουσιάζει αντίδραση οπλισμού, με την αύξηση του φορτίου του \rightarrow υπάρχει εξασθένιση μαγνητικής ροής \leftrightarrow μείωση μαγνητικής ροής Φ στο εσωτερικό του κινητήρα. Όπως φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση $\Phi \downarrow$ σημαίνει $n(\text{rpm}) \uparrow$, χωρίς αντίδραση οπλισμού. Για να αποφύγω $\Phi \downarrow$ τότε ο κινητήρας θα πρέπει στο εσωτερικό του να έχει τυλίγματα αντιστάθμισης ,τα οποία αν υπάρχουν η ροη(Φ) διατηρείται σταθερή.



(α)



(β)

Σχήμα 3.8 : χαρακτηριστική ταχύτητας περιστροφής (στροφών) – ροπής για κινητήρα Σ.Ρ παράλληλης και ξένης διέγερσης.

Η χαρακτηριστική του σχήματος 3.8(α) ροπής – ταχύτητας είναι μια ευθεία με αρνητική κλίση ,γνησίως φθίνουσα. Η ευθεία αυτή σχεδιάστηκε καθώς όπως φαίνεται στην παραπάνω εξίσωση με άξονα ότι όσο I_p ανάλογο της $M_{εσ} \uparrow \rightarrow$ οι στροφές , ταχύτητα περιστροφής ,(rpm) \downarrow διαδοχικά. Αρα από την γραφική(α) του σχήματος 3.8 για εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης βλέπω ότι οι κινητήρες αυτοί δεν είναι κατάλληλοι για τμήματα σιδηρόδρομου με έντονη ανηφορική κλίση, καθώς εκεί που απαιτείται αύξηση της ροπής οι στροφές , ταχύτητα

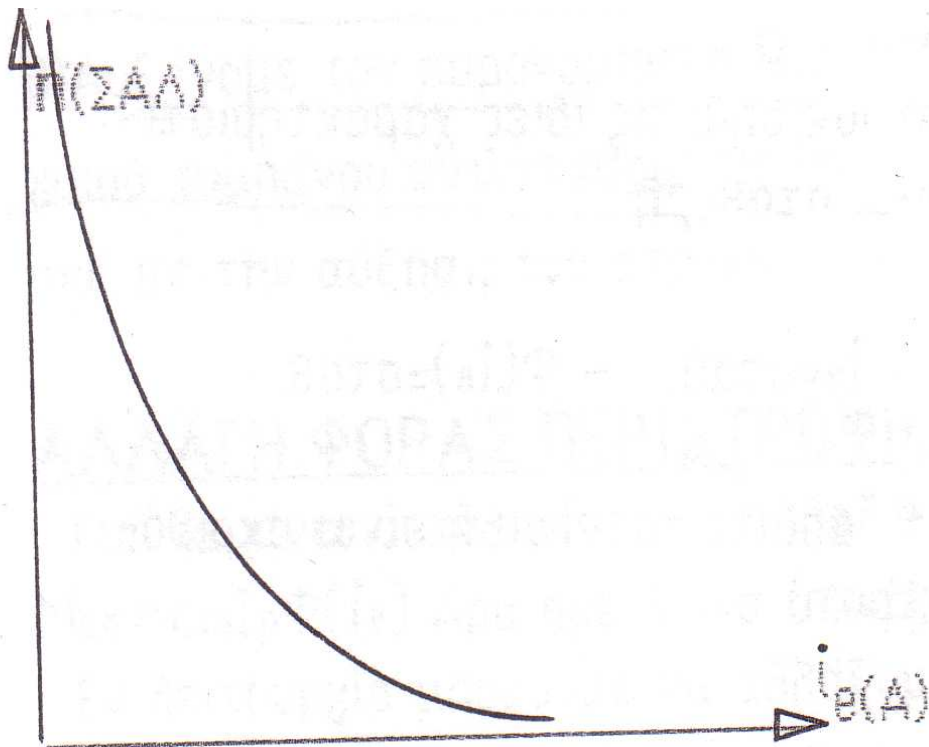
περιστροφής, (rpm) μειονεκτεί → μπορεί να επιτευχθεί ηλεκτροκίνητη έλξη σε εφαρμογές υψηλής ροπής αλλά με μειωμένες στροφές. Αυτό είναι φυσιολογικό καθώς η ισχύς μιας μηχανής είναι γινόμενο ροπής*ταχύτητας περιστροφής, άρα δεν γίνεται να πλεονεκτεί και στα δυο μεγέθη. Είναι κατάλληλοι για τμήματα σιδηροδρομικού δικτύου σταθερής ευθείας, και με μικρή σχετικά ανηφορική κλίση. Σε τμήματα δικτύου χωρίς κλίση, με σταθερή ροπή στρέψης κ' ρεύμα επαγωγικού τύμπανου, μπορεί να μας δώσει ηλεκτροκίνητη έλξη με σταθερές στροφές κινητήρα (rpm) αλλά πρέπει να προσέξω ώστε τα μεγέθη και η χαρακτηριστική που σχεδιάζω για το τμήμα εκείνο να μην οδηγήσει σε αστάθεια του κινητήρα.

Συμπεραίνω ότι οι κινητήρες αυτοί είναι κατάλληλοι για τμήματα δικτύου με ευθεία μεγάλης διάρκειας, χωρίς να έχω σταμάτημα-ξεκίνημα συρμού, καθώς δεν μου εξασφαλίζουν αρκετά μεγάλη ροπή κατά την εκκίνηση του. Επίσης η σταθερή ταχύτητα σε ευθεία τμήματα ή με μικρές αυξομειώσεις ροπής δημιουργεί μικρή φθορά σε αυτούς → χαμηλό κόστος συντήρησης. Επιπλέον όταν ο κινητήρας δεν χρειάζεται να 'τραβά' ρεύμα από το δίκτυο καθώς δεν έχει ανάγκη φορτίου για την κίνηση συρμού (σε τμήματα δικτύου με κατηφορική κλίση) τότε $I_p \downarrow$ κ' $n(\text{rpm}) \downarrow$, όποτε το I_p παίρνει αρνητικές τιμές. Έτσι με αρνητικές τιμές του $I_p \sim M_{ec}$, σημαίνει ότι η γραφική συνεχίζεται προς τα αριστερά στο αρνητικό τεταρτημόριο. Σε αυτή την περίπτωση η μηχανή μου δουλεύει σαν γεννήτρια και τα χαρακτηριστικά της έχουν ομοιότητες με την επαγωγική γεννήτρια.

Η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας με αντίδραση οπλισμού του σχήματος 3.8(β) μου δείχνει από ένα σημείο και μετά για

αύξηση της ροπής(αρα και του ρεύματος του επαγωγικού τύμπανου) δεν προκαλείται μείωση της ταχύτητας περιστροφής , αλλά αντίθετα διατηρείται σταθερή και από ένα σημείο και μετά αυξάνεται λίγο (δες την γραφική 3.8(β) στο 'γόνατο' της. Άρα τώρα με αντίδραση οπλισμού στο εσωτερικό του κινητήρα προκαλείται εξασθένιση μαγνητικής ροής και τη γραφική αυτή δεν την εξετάζω , όπως και τον κινητήρα με αντίδραση οπλισμού , καθώς μας οδηγεί σε αστάθεια → άρα δεν είναι κατάλληλος σε εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης καθώς δεν υπάρχει ευχέρεια στην ρύθμιση ταχύτητας περιστροφής.

Η γραφική παράσταση του σχήματος 3.9 σε άξονες : ταχύτητα περιστροφής(n) – ρεύμα διέγερσης(i_e) είναι μια υπερβολή 2^{ης}ταξης , η οποία είναι κοινή και για κινητήρες Σ.Ρ διέγερσης σειράς.



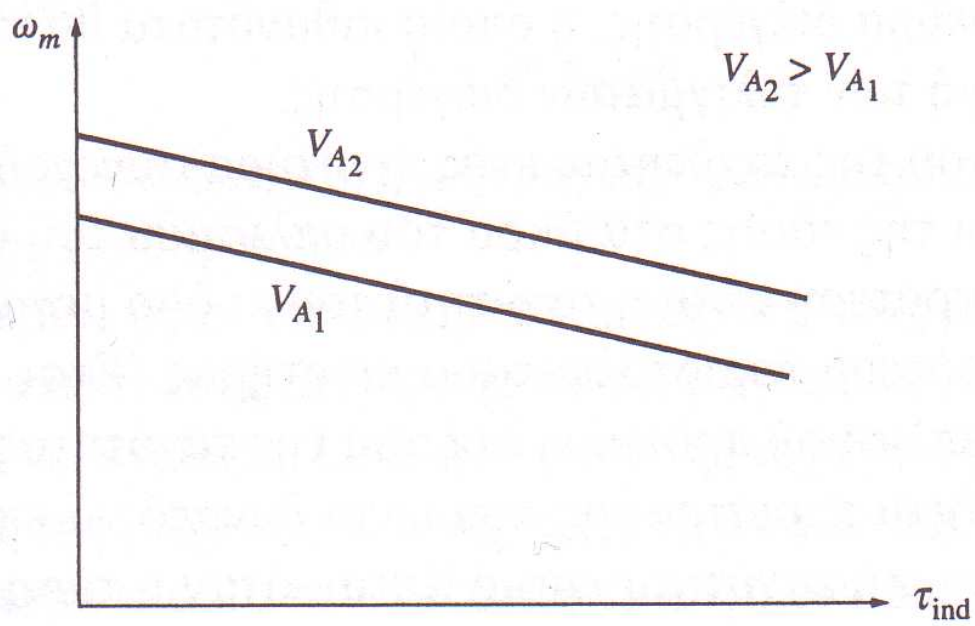
Σχήμα 3.9 : στροφές – ρεύμα διέγερσης για κινητήρες Σ.Ρ

Από την γραφική του σχήματος 3.9 βλέπω ότι όσο περισσότερο αυξάνεται η διέγερση του επαγωγικού τυμπάνου τόσο μειώνονται οι στροφές. Από την παραπάνω γραφική βλέπω ότι ένας κινητήρας Σ.Ρ δεν πρέπει ποτέ να μένει χωρίς ρεύμα διέγερσης $i_e(I_e)$ καθώς $\rightarrow i_e \rightarrow 0$ (αρχή των αξόνων) τότε $n \rightarrow \infty$ άρα έχω καταστροφή του κινητήρα.

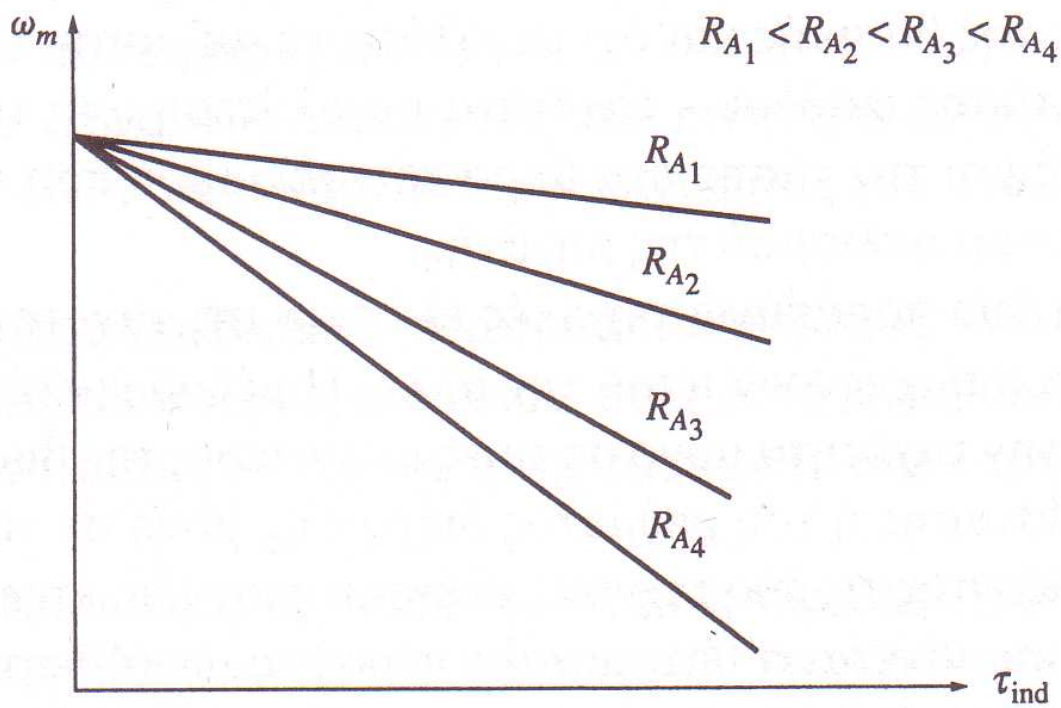
Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των κινητήρων Σ.Ρ είναι ότι μπορώ να ρυθμίσω σχετικά εύκολα την ταχύτητα περιστροφής τους (n), και μπορώ να το κάνω με δυο κύριους τρόπους σύμφωνα με την εξίσωση(a) :

$$n = \frac{U_{\Delta} - (R_p * I_p)}{C_e * \Phi(i_e)} \quad (\text{σε r.p.m}).$$

Έλεγχος ταχύτητας με ρύθμιση της τάσης του επαγωγικού τυμπάνου (E_A): Η τάση επαγωγικού τυμπάνου στο εσωτερικό του κινητήρα –εξίσωση γεννήτριας – είναι: $E_A = C_e * n * \Phi(I_e)$. Κατά αυτό τον τρόπο αυξάνοντας την αντίσταση του επαγωγικού τυμπάνου $R_p \uparrow$ και με σταθερή τάση δικτύου τότε το ρεύμα του επαγωγικού τυμπάνου μειώνεται $I_p \downarrow = (U_{\Delta} - E_A) / R_p \uparrow \rightarrow (I_p \downarrow) \leftrightarrow (E_A \downarrow) \leftrightarrow$ από εξίσωση γεννήτριας : $(\downarrow E_A) = C_e * (\downarrow n) * \Phi(I_e)$. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται μόνο για ρύθμιση ταχύτητας κινητήρα σε τιμές μικρότερες της ονομαστικής , όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση του σχήματος 3.10 σε άξονες ταχύτητα περιστροφής - ροπή στρέψης, με $\Phi = \text{σταθ}$. Η μέθοδος αυτή δεν χρησιμοποιείται για μεγαλύτερες τιμές της τάσης οπλισμού \rightarrow αύξηση ταχύτητας (rpm) καθώς μ' αυτόν τον τρόπο καταστρέφεται το κύκλωμα οπλισμού. Όπως βλέπω στην γραφική του σχήματος 3.10 οι χαρακτηριστικές είναι παράλληλες μεταξύ τους, φθίνουσες με σταθερή κλίση σύμφωνα με την εξίσωση(a).



Σχήμα 3.10



Σχήμα 3.11

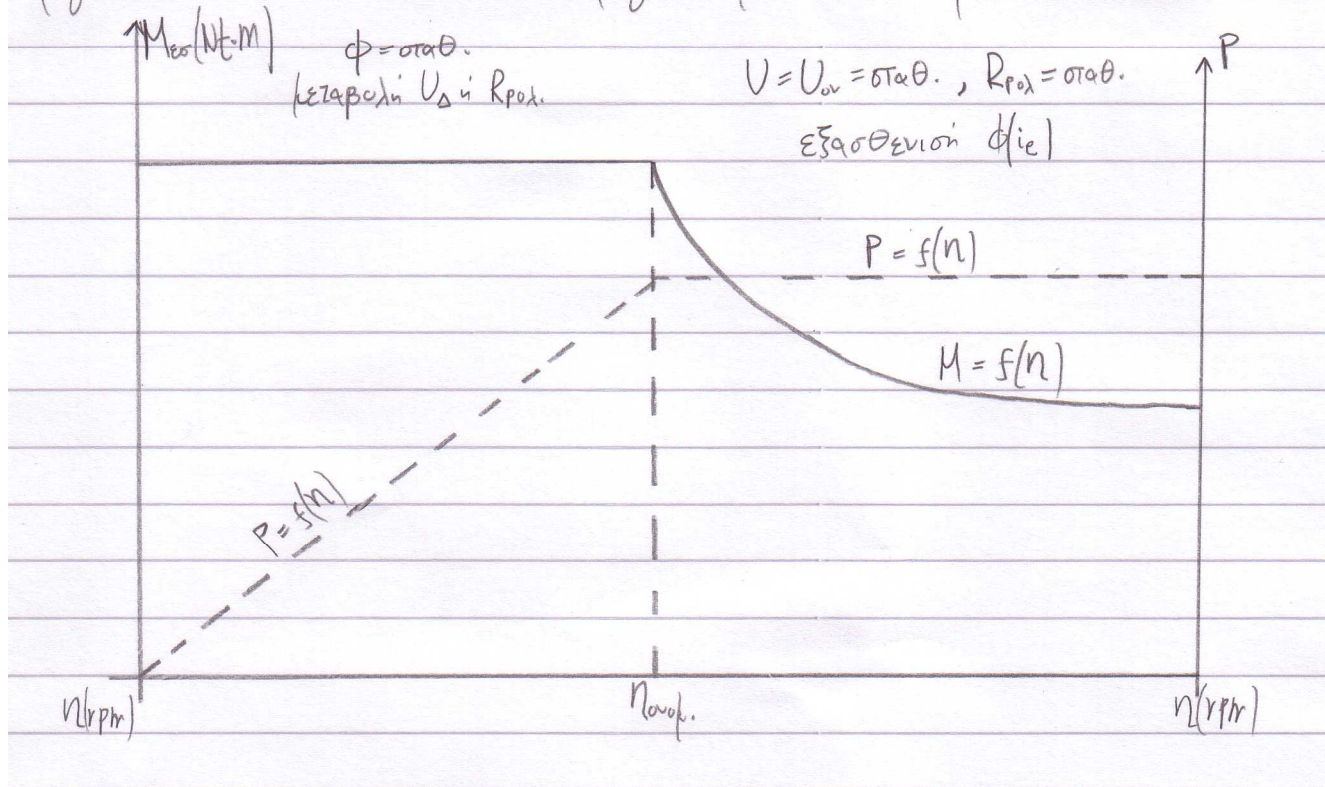
Έλεγχος ταχύτητας με ρύθμιση της μαγνητικής ροής (Φ): από την εξίσωση(a): $n = U_{\Delta} - (R_p * I_p) / C_e * \Phi (i_e)$ (σε r.p.m) προκύπτει

$\Phi \downarrow \rightarrow n \text{ (r.p.m)} \uparrow$, κάτι που φαίνεται από την γραφική του παραπάνω σχήματος με $U = \text{σταθ}$.

Από την γραφική του σχήματος 3.11 βλέπω ότι όσο μειώνεται η μαγνητική ροή $\Phi \downarrow$ τόσο αυξάνεται η κλίση των γραφικών, καθώς η φυσική γραφική έχει την ομαλότερη και μικρότερη κλίση. Όταν το ρεύμα διέγερσης αυξάνεται και γίνεται μεγαλύτερο από το ονομαστικό (i_e) $\uparrow \rightarrow n \text{ (r.p.m)} \downarrow$ αλλά αυτός ο τρόπος σε αντίθεση με τον παραπάνω δεν χρησιμοποιείται για μείωση της ταχύτητας περιστροφής καθώς $\Phi \uparrow \leftrightarrow (i_e) \uparrow$ που την προκαλεί και είναι ανάλογη αυτού $\rightarrow n \text{ (r.p.m)} \downarrow$ έτσι όμως δημιουργείται υπερθέρμανση του τυλίγματος διέγερσης \leftrightarrow και καταστροφή αυτού.

Στους κινητήρες ξένης διέγερσης οι μέθοδοι ελέγχου της ταχύτητας του κινητήρα με ρύθμιση της τάσης οπλισμού και ρύθμιση της μαγνητικής ροής, δρουν συμπληρωματικά. Όταν απαιτείται η ρύθμιση της ταχύτητας του κινητήρα σε μεγάλο εύρος, οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα. Σε ταχύτητες μικρότερες της ονομαστικής, η μαγνητική ροή διατηρείται στην ονομαστική τιμή και η ταχύτητα ελέγχεται με τη ρύθμιση της τάσης του οπλισμού. Σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής, η τάση του οπλισμού διατηρείται στην ονομαστική τιμή και η μαγνητική ροή μειώνεται από την ονομαστική, όπως φαίνετε στη γραφική του σχήματος 3.12.

Περιοχές λειτουργίας κινητήρα Σ.Ρ ξένης κ' παραλληλίας διέγερσης με σταθερή μέγιστη ροπή σε ταχύτητες μικρότερες της ονομαστικής και σταθερή μέγιστη ισχύ σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής.



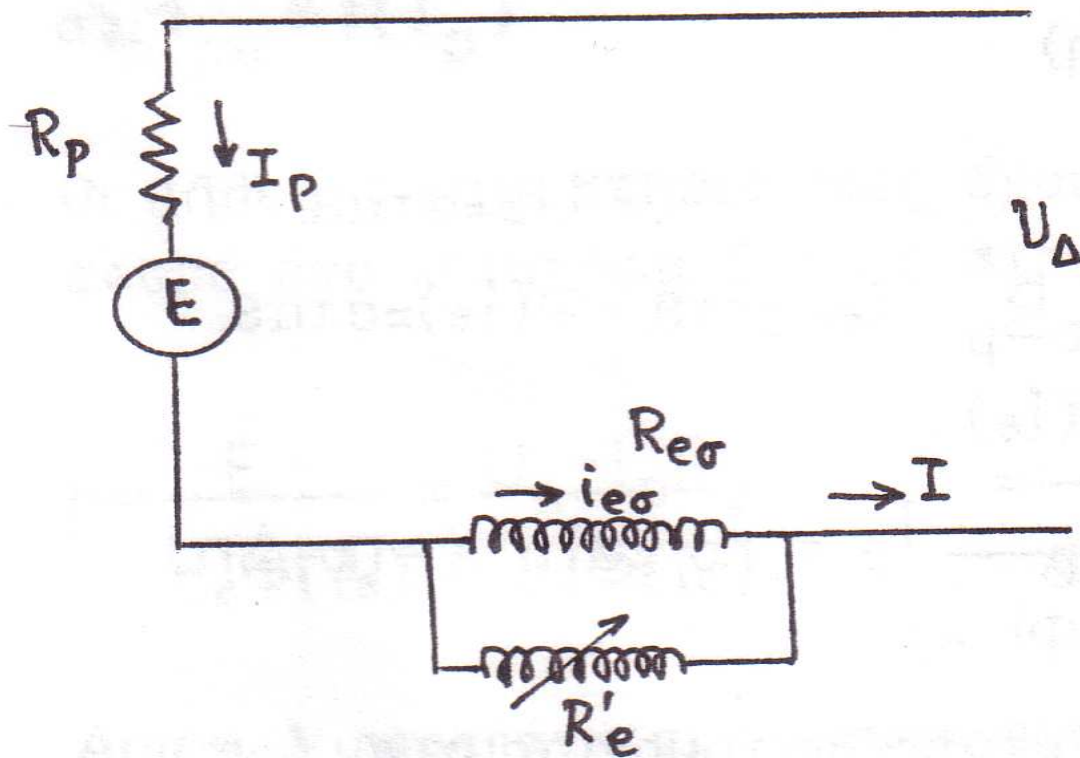
Σχήμα 3.12

3.4.2 Κινητήρες Σ.Ρ διέγερσης σειράς(Δ.Σ).

Ονομάζονται έτσι καθώς σε αυτούς τους κινητήρες Σ.Ρ το τύλιγμα του επαγωγικού τύμπανου συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα διέγερσης, ενώ πολλές φορές για λόγους ρύθμισης παράλληλα με την αντίσταση διέγερσης συνδέεται μια άλλη αντίσταση.

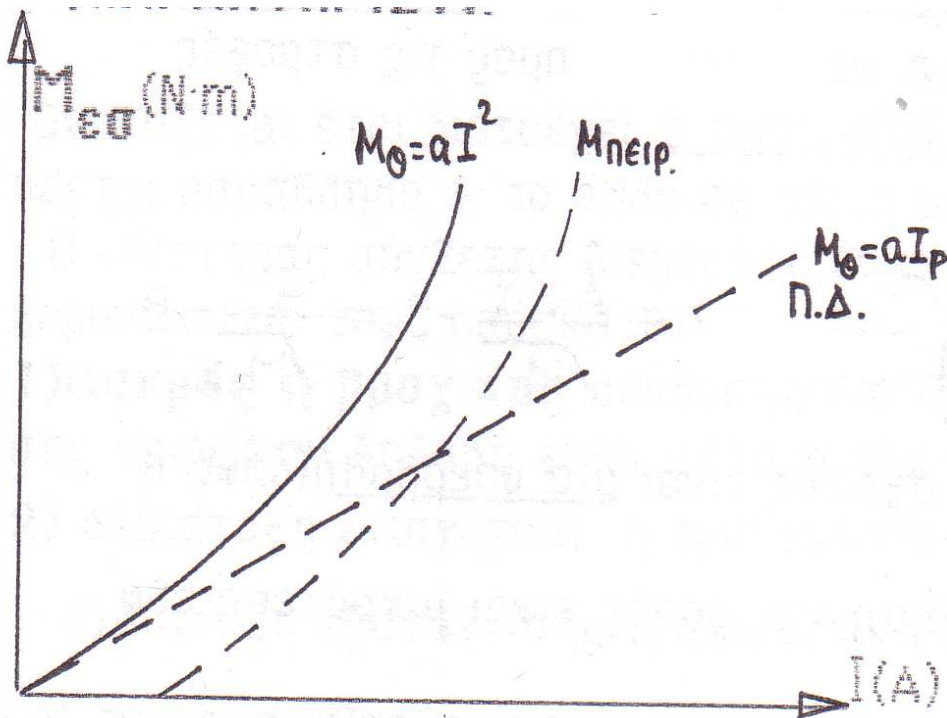
Στο σχήμα 3.13 φαίνεται το κυκλωματικό σύμβολο κινητήρα διέγερσης σειράς καθώς και η χαρακτηριστική ροπής – ρεύματος. Από το κυκλωματικό σχέδιο φαίνεται ότι το ρεύμα του επαγωγικού τύμπανου $I_p(I_A)$ ισούται με το ρεύμα

διέγερσης $i_e(I_e)$. Και εδώ θεωρώ δεδομένο ότι η τάση δικτύου είναι σταθερή. Έτσι λοιπόν υπάρχει **μια** χαρακτηριστική ρεύματος (I) – ταχύτητας περιστροφής (n) .



Σχήμα 3.13: κυκλωματικό σύμβολο κινητήρα διέγερσης σειράς.

Στην παράσταση του σχήματος 3.14 αμέσως παρακάτω φαίνεται η γραφική ροπής – ρεύματος.

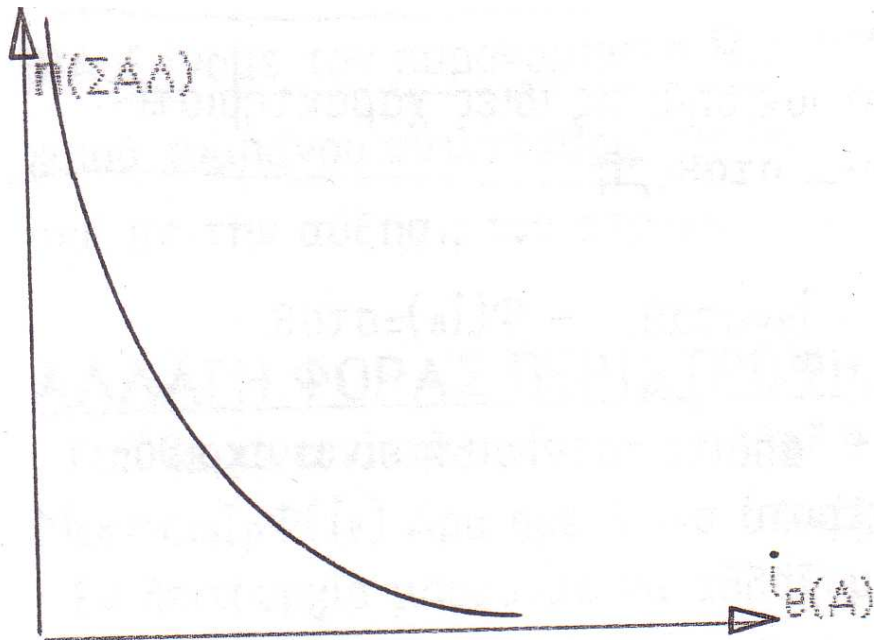


Σχήμα 3.14

Η παραπάνω γραφική μου δίνει τη ροπή που παράγει ο κινητήρας συνάρτηση του ρεύματος και είναι μια παραβολή. Η πειραματική καμπύλη δεν περνά από την αρχή των αξόνων λόγω μη γραμμικότητας του συστήματος ως μηχανικό, δηλαδή στην πραγματικότητα υπάρχει μια περιοχή ρεύματος από την αρχή των αξόνων που δεν μου αποδίδει καθόλου ροπή – νεκρή ζώνη. Εξετάζοντας την θεωρητική παραπάνω καμπύλη βλέπω ότι για μια πολύ μικρή περιοχή ρεύματος η ροπή αυξάνεται ανάλογα και από εκεί και μετά μια μικρή αύξηση ρεύματος προκαλεί κατά πολύ μεγαλύτερη αύξηση ροπής. Αυτό ισχύει για μια ορισμένη περιοχή ρεύματος, αρκετά μεγάλη από το σημείο A ως το B την οποία θα ονομάσω ιδανική περιοχή, όπου $I \uparrow \rightarrow M_{\text{εσ.}} \uparrow \uparrow \uparrow$. Από το σημείο B και μετά όσο αυξάνεται το ρεύμα η ροπή αυξάνεται ελάχιστα, έως και καθόλου. Στο σημείο όπου έχω αύξηση ρεύματος χωρίς να παράγεται αντίστοιχα ροπή σημαίνει ότι είναι περιοχή αστάθειας και δεν πρέπει να δουλεύει ο κινητήρας σε αυτήν.

Άρα συγκρίνοντας αυτήν την χαρακτηριστική με την αντίστοιχη του παράλληλης διέγερσης, φαίνεται και στο σχήμα παραπάνω, βλέπω ότι πλεονεκτεί σαφώς ως προς την ροπή, δουλεύοντας βέβαια στην ιδανική περιοχή. Άρα συμπεραίνω ότι ο κινητήρας Σ.Ρ διέγερσης σειράς είναι κατάλληλος και μπορεί να έχει ευρεία χρήση σε εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης, καθώς μετά από κάθε σταμάτημα συρμού για την εκκίνηση του ξανά ο κινητήρας 'τραβά' μεγάλο ρεύμα από το δίκτυο ($I_{pεκκ.} \uparrow \uparrow$), και για να υπάρξει κίνηση από την αδράνεια της ακινησίας θέλω αύξηση ροπής εκείνη τη στιγμή. Επιπλέον σε τμήματα δικτύου με μη σταθερή ανηφορική κλίση είναι κατάλληλος εξαιτίας της μη σταθερά αυξανόμενης ροπής στην ιδανική περιοχή της καμπύλης αυτής. Σε αυτά τα τμήματα δικτύου για να έχω το πλεονέκτημα $M_{εσ.} \uparrow \rightarrow$ θα πρέπει $n(rpm) \downarrow$ για να έχω σταθερή ισχύ κινητήρα.

Στον κινητήρα Δ.Σ η χαρακτηριστική ταχύτητας $n(rpm)$ - με το ρεύμα $I(Amp.)$ είναι μια υπερβολή, και εδώ ισχύει ότι I_p (ή I_A) = $i_e = I$. Έτσι η γραφική που φαίνεται στο σχήμα 3.15 - υπερβολή-είναι ίδια με εκείνη σε άξονες $n(rpm)$ - $i_e(amp)$ για τους κινητήρες Π.Δ.



Σχήμα 3.15

Από την γραφική του σχήματος 3.15 καταλαβαίνω ότι γενικά ένας οποιοσδήποτε κινητήρας Σ.Ρ δεν πρέπει ποτέ να μένει χωρίς ρεύμα διέγερσης καθώς όσο μικρότερο το i_e οι στροφές αυξάνονται και όταν $i_e \rightarrow 0$ τότε οι στροφές (rpm) τείνουν στο άπειρο \leftrightarrow καταστροφή του κινητήρα. Άρα ένα παραπάνω στους κινητήρες Δ.Σ όπου I_p (ή I_A) = $i_e = I$, αν μείνουν χωρίς ρεύμα (ρεύμα φορτίου) \leftrightarrow δηλαδή χωρίς φορτίο στον κινητήριο άξονα τους τότε θα καταστραφούν.

Άρα συμπεραίνω ότι κινητήρας Δ.Σ που δουλεύει χωρίς φορτίο καταστρέφεται γι' αυτό προσέχω ώστε η σύνδεση στον άξονα του κινητήρα να γίνεται με όσο το δυνατόν ασφαλέστερο τρόπο και σταθερά. Έτσι σε αντίθεση με τον κινητήρα Π.Δ - ο οποίος σε τμήματα σιδηροδρομικού δικτύου χωρίς φορτίο, τμήματα με κατηφόρα, δουλεύει και έχει την ικανότητα όταν το I_p παίρνει αρνητικές τιμές να δουλεύει σαν γεννήτρια- δεν μπορεί να δουλέψει όταν το ρεύμα φορτίου πλησιάζει το

μηδέν , δηλαδή σε εφαρμογές όπου δεν χρειάζεται να ‘τραβά’ ρεύμα από το δίκτυο.

Για να εξετάσω την γραφική ροπής($M_{εσ}$)-ταχύτητας(n σε rpm) υποθέτω όπως και παραπάνω ότι η καμπύλη μαγνήτισης του κινητήρα είναι γραμμική. Έτσι για να την σχεδιάσω σε άξονες n (rpm)- $M(Nt*m)$ και να αποδείξω την μορφή της χρησιμοποιώ τις παρακάτω σχέσεις :

$$(b) M_{εσ} = C_m * I_p * \Phi(i_e) \rightarrow M_{εσ} = \Phi * I^2 * c \rightarrow I^2 = M_{εσ} / \Phi * c \leftrightarrow I_p = \sqrt{(M_{εσ} / \Phi * c)}$$

$$(c) E_A = C_e * n * \Phi(i_e).$$

$$(d) U_{\Delta} = E + I_p(R_p + R_{εσ}) \leftrightarrow$$

$$U_{\Delta} = \Phi * c * n + \sqrt{(M_{εσ} / \Phi * c)} * (R_p + R_{εσ}).$$

Η ανάλυση παρακάτω έχει σαν αρχή ότι η καμπύλη μαγνήτισης του κινητήρα είναι γραμμική, επομένως ισχύει ότι η μαγνητική ροή είναι ανάλογη του ρεύματος διέγερσης(εδώ το ρεύμα είναι κοινό) που την προκαλεί :

$$\Phi(i_e) = \lambda * i_e .$$

Αφού $I_p = i_e = I$ τότε $I_p = \Phi / \lambda$, συνδυάζοντας αυτό με την (b) θα έχω :

$$(\Phi / \lambda)^2 = (M_{εσ} / \Phi * c) \rightarrow \Phi^2 / \lambda^2 = M_{εσ} / \Phi * c \rightarrow M * \lambda^2 / \lambda^2 = \Phi^3 * c / \lambda^2 \leftrightarrow M^{-1} = (\Phi^3 * c / \lambda^2)^{-1} \leftrightarrow M^{-1} = (\Phi^2 * c / \lambda) \rightarrow M = (\lambda / c) * \Phi^2 \rightarrow \Phi = \sqrt{c / \lambda} * \sqrt{M}$$
 και αυτή είναι η (e).
 Άρα αντικαθιστώντας (d) κ’ (e) θα έχω :

$$U_{\Delta} = \lambda * \sqrt{c / \lambda} * \sqrt{M} * n + \sqrt{(M / c * \lambda)} * (R_p + R_{εσ}). \rightarrow$$

$$\sqrt{c * \lambda} * \sqrt{M} * n = U_{\Delta} - \sqrt{M / \lambda} * c * (R_p + R_{εσ}) \rightarrow$$

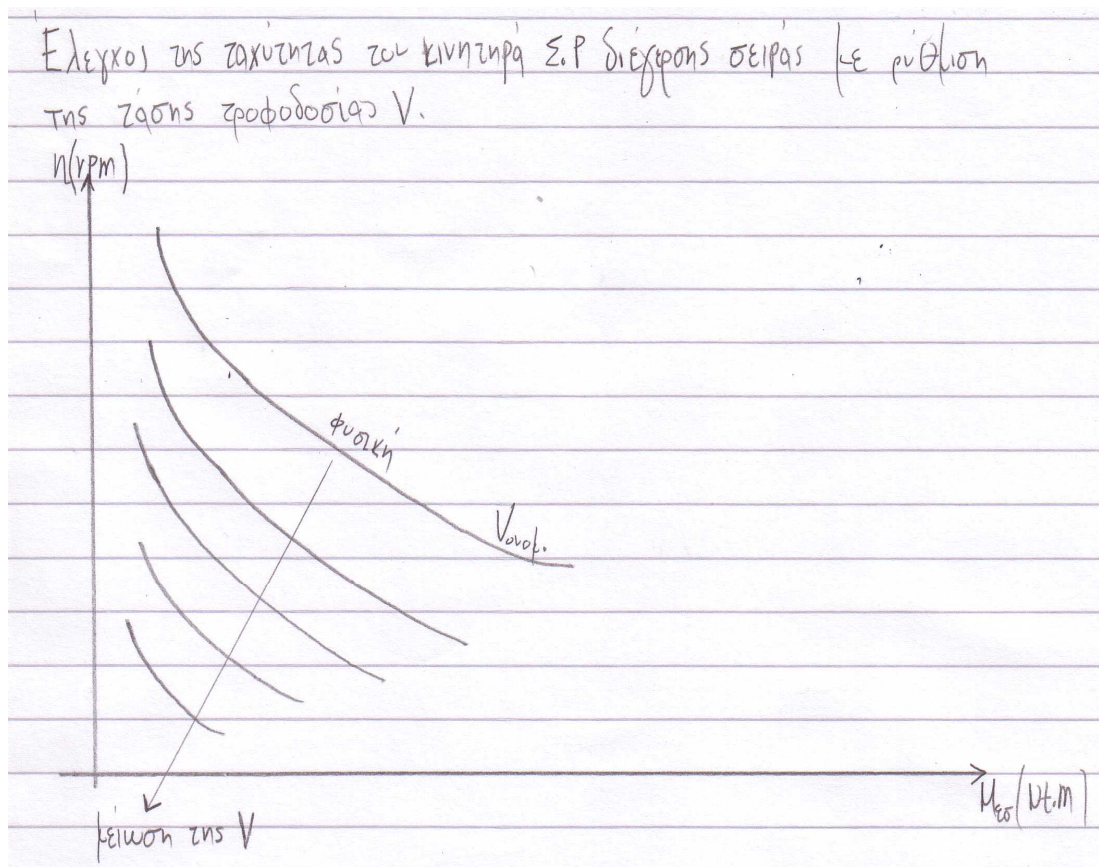
άρα η τελική σχέση που προκύπτει ανάμεσα σε ροπή-ταχύτητα περιστροφής είναι :

$$n = U_{\Delta} / \sqrt{c * \lambda} * \sqrt{M} - (R_p + R_{εσ}) / c * \lambda. (f).$$

Από την παραπάνω σχέση(f) προκύπτει ότι η ταχύτητα ενός κινητήρα Δ.Σ μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα προς την τετραγωνική ρίζα της ροπής του. Η τετραγωνική ρίζα της ροπής των κινητήρων αυτών είναι ανάλογη του ρεύματος τους, έτσι όταν η ροπή πλησιάζει την μηδενική τιμή της η ταχύτητα γίνεται άπειρη. Έτσι η σχέση(f) περιγράφεται γραφικά σε άξονες $n(\text{rpm})-M(\text{Nt} \cdot \text{m})$ και είναι μια υπερβολή όπως η παραπάνω καμπύλη-αφου το ρεύμα είναι ανάλογο της τετρ. ρίζας της ροπής-με την διαφορά ότι όλη η καμπύλη μετατοπίζεται λίγο προς τα 'κάτω', δηλαδή προς το 4^ο τεταρτημόριο. (κάτω από τα θετικά του άξονα X).

Ο πιο διαδεδομένος και αποτελεσματικός τρόπος ρύθμισης της ταχύτητας των κινητήρων Δ.Σ όπως φαίνεται από την σχέση (f) είναι με ρύθμιση της τάσης τροφοδοσίας.

Μειώνοντας την τάση από την ονομαστική τιμή της (φυσική χαρακτηριστική) μειώνεται και η ταχύτητα του κινητήρα ανεξάρτητα από την ροπή του φορτίου του. Επειδή εδώ η μαγνητική ροη δεν μπορεί να ελεγχθεί η ονομαστική τιμή ταχύτητας του πρέπει να επιλέγεται ίση με την μέγιστη επιθυμητή ταχύτητα του συστήματος. Άρα με την μέθοδο αυτή όπως φαίνεται αμέσως παρακάτω στη γραφική του σχήματος 3.16 μπορώ να ρυθμίσω την ταχύτητα του κινητήρα μόνο μειώνοντας την, αφού μειώσω την τάση τροφοδοσίας.



Σχήμα 3.16.

3.4.3 Κινητήρες Σ.Ρ σύνθετης διέγερσης (Σ.Δ)

Οι κινητήρες αυτοί διαθέτουν δυο τυλίγματα διέγερσης, ένα τύλιγμα συνδεδεμένο σε σειρά με το τύλιγμα του επαγωγικού τύμπανου και ένα άλλο συνδεδεμένο παράλληλα. Στον κινητήρα αυτόν ισχύει ο νόμος τάσεων του Kirchhoff :

$$U_{\Delta} = I_p(R_p + R_{e_s}) + E_A$$

$$I = I_e + I_p \quad \text{κ' } I_e = U / R_e + R_{e_s}$$

όπου $R_e + R_{e_s}$ είναι η συνολική αντίσταση διέγερσης.

Οι κινητήρες αυτοί διακρίνονται σε μακράς ή βραχείας σύνδεσης, ανάλογα με το ποια είναι η θέση του τυλίγματος διέγερσης σειράς μέσα ή έξω από τον βρόγχο. Επίσης

διακρίνονται ως προς την μαγνητική ροή Φ που παίρνω ανάλογα με την διάταξη σύνδεσης του παράλληλου ($i_{\text{επαρλ.}}$) με το εν σειρά ($i_{\text{εσειρ.}}$) τύλιγμα διέγερσης. Έτσι έχω :

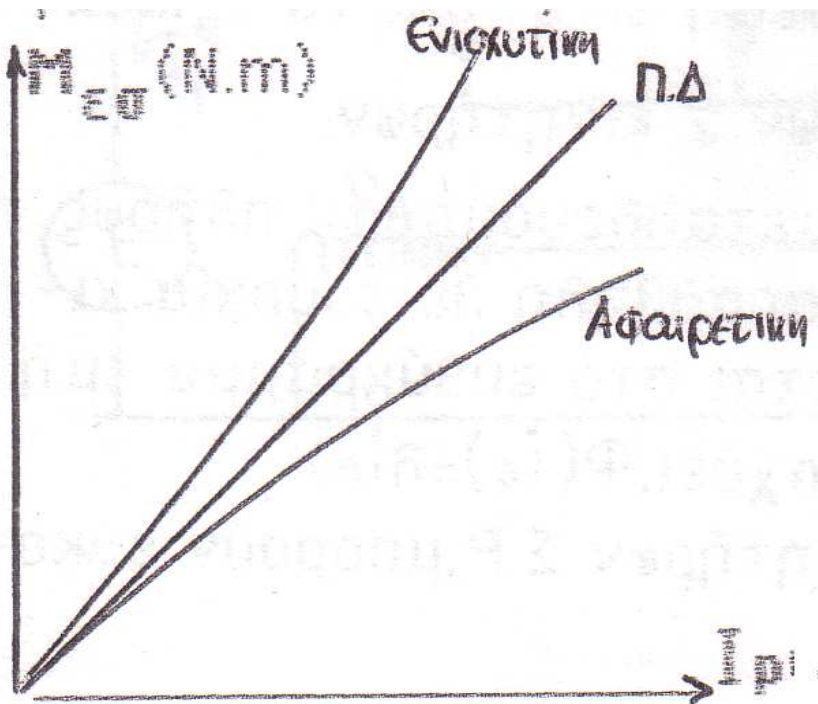
α) **την προσθετική (ενισχυτική) διάταξη**, όπου η ολική μαγνητική ροή είναι άθροισμα της ροής που προκαλεί το τύλιγμα διέγερσης σειράς με εκείνο που είναι παράλληλα ως προς το τύλιγμα του επαγωγικού τύμπανου.

$$\Phi_{\text{ολ.}} = \Phi(i_{\text{επαρλ.}}) + \Phi(i_{\text{εσειρ.}})$$

β) **διάταξη αφαιρετική (εξασθένησης)**, όπου η ολική μαγν. ροή είναι η διαφορά εκείνης που προκαλείται από το τύλιγμα διέγερσης σειράς με το παράλληλο. $\Phi_{\text{ολ.}} = \Phi(i_{\text{επαρλ.}}) - \Phi(i_{\text{εσειρ.}})$

Η αφαιρετική διάταξη (εξασθένησης) μειώνει την μαγνητική ροή όσο αυξάνεται το ρεύμα του επαγωγικού τυμπάνου όπως και οι στροφές, οι οποίες αυξάνονται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση : $n = U_{\Delta} - (R_p * I_p) / C_e * \Phi(i_e)$ (σε r.p.m).

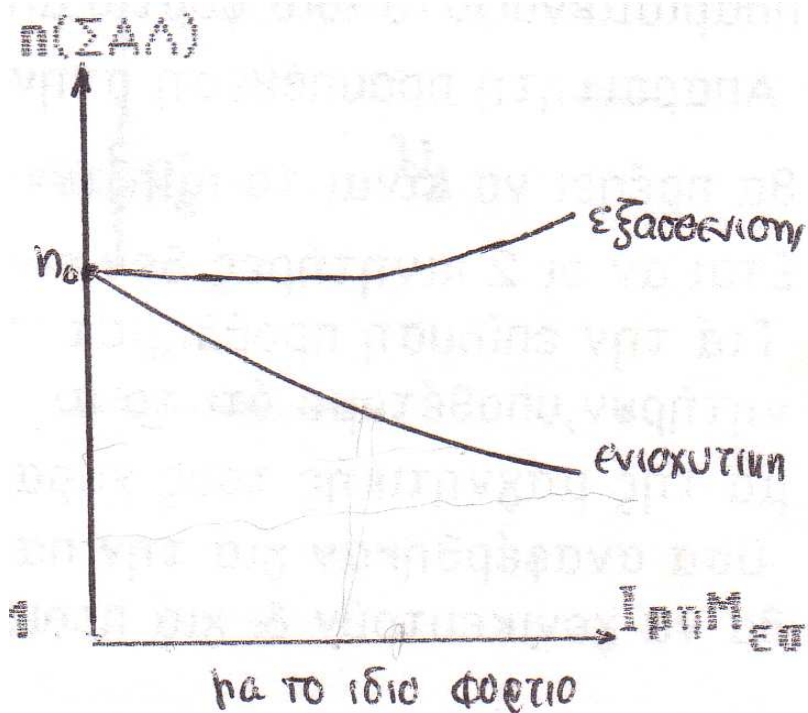
Στους κινητήρες Σ.Ρ σύνθετης διέγερσης με αφαιρετική διάταξη το ρεύμα φορτίου (I_p) δεν είναι ευθεία ανάλογο με την ροπή ($M_{\text{εσ}}$), και αυτό φαίνεται από την γραφική του σχήματος 3.17



Σχήμα 3.17

Από την γραφική του σχήματος 3.17 βλέπω ότι στην αφαιρετική διάταξη όταν $I_p \uparrow \uparrow$ τότε $M_{εσ.} \uparrow \rightarrow$ από την εξίσωση αμέσως παραπάνω $n(\text{rpm}) \uparrow \rightarrow \Phi \downarrow$

Από κάποιο σημείο και μετά αύξηση του ρεύματος φορτίου - αύξηση του φορτίου σε περιοχές έλξης με ανηφορική κλίση - δεν οδηγεί σε αύξηση της ροπής οπότε οδηγούμαστε σε αστάθεια. Η αστάθεια αυτή φαίνεται εντονότερα στην παρακάτω καμπύλη του σχήματος 3.18 όπου σε άξονες ταχύτητα περιστροφής - ροπής αύξηση της ροπής δεν μεταβάλλει σε κανένα σημείο την ταχύτητα, παρά μόνο σε κάποιο σημείο (γόνατο αυτής) αύξηση της ροπής δημιουργεί μικρή αύξηση ταχύτητας περιστροφής. Η παρακάτω γραφική(5) μας δείχνει την αστάθεια της αφαιρετικής διάταξης (εξασθένησης) και είναι ο λόγος που δεν έχει πρακτική εφαρμογή.



Σχήμα 3.18

Σε κινητήρα Σ.Δ με ενισχυτική διάταξη (προσθετική) τα μεγέθη ροπή - ρεύμα φορτίου (επαγωγικού τυμπάνου) δεν είναι ευθεία ανάλογα μεταξύ τους, αλλά από ένα σημείο και μετά μικρή αύξηση του ρεύματος επαγωγικού τυμπάνου $I_p \uparrow$ δημιουργεί μεγαλύτερη αύξηση ροπής $M_{εσ} \uparrow \uparrow$, συγκρίνοντας με την γραφική Π.Δ, όπως φαίνεται στην γραφική του σχήματος 3.17.

Η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας περιστροφής για κινητήρες Σ.Δ με ενισχυτική διάταξη φαίνεται στην γραφική του σχήματος 3.18, και βλέπω ότι είναι μια καμπύλη με αρνητική κλίση, χωρίς να είναι συνεχής και ομοιόμορφη φθίνουσα όπως εκείνη των κινητήρων Π.Δ.

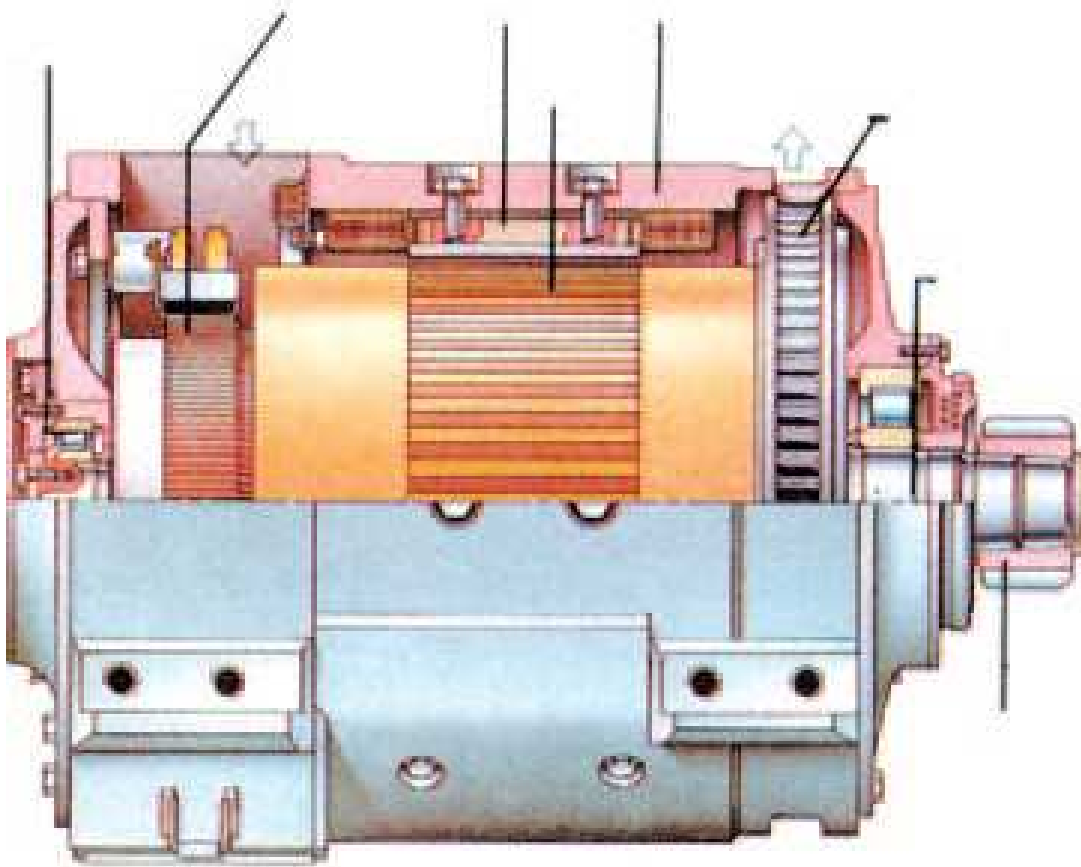
Από το σχήμα 3.18 βλέπω ότι για μικρές τιμές ροπής - η οποία είναι ανάλογη με το ρεύμα φορτίου – εάν αυξηθεί λίγο τότε η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται αρκετά ενώ όσο αυξάνεται η ροπή η μείωση της ταχύτητας (rpm) γίνεται μικρότερη, έως

όπου φτάσω σε μια περιοχή μεγάλης ροπής (αρα και ρεύματος φορτίου) όπου $M_{\varepsilon\sigma} \uparrow$ δεν προκαλεί $n(\text{rpm}) \downarrow$, όπου και είναι περιοχή αστάθειας.

Άρα συμπεραίνω ότι ο κινητήρας με ενισχυτική (προσθετική) διάταξη δουλεύει σε περιοχές σχετικά μικρής ροπής – άρα και το ρεύμα που τραβά από το δίκτυο είναι μικρό – τότε η επίδραση του τυλίγματος σειράς είναι ασθενής και η συμπεριφορά του ταιριάζει περισσότερο με κινητήρα Π.Δ. Αντίθετα όταν το ρεύμα φορτίου έχει μεγάλη τιμή, η επίδραση του τυλίγματος σειράς είναι έντονη και τότε ο κινητήρας ενισχυτικής διάταξης συμπεριφέρεται σαν κινητήρας Δ.Σ καθώς όταν $I_p \uparrow \leftrightarrow M_{\varepsilon\sigma} \uparrow$.

Σε τμήματα δικτύου ηλεκτροκίνητης έλξης όπου δεν έχω φορτίο (εν κενό λειτουργία), περιοχές με κατηφορική κλίση τότε η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα έχει μια καθορισμένη τιμή και συμπεριφέρεται σαν κινητήρας Π.Δ

Στην παρακάτω φωτογραφία 3.3 βλέπω σε τομή έναν κινητήρα Σ.Ρ αυτόψυκτο.



Φωτογραφία 3.3: αυτόψυκτος κινητήρας Σ.Ρ

3.5 Ρύθμιση στροφών (ταχύτητας περιστροφής) ενός κινητήρα Σ.Ρ ανάλογα με την ροπή φορτίου.

Για κάθε τύπο κινητήρα Σ.Ρ έχω αναφέρει τις τεχνικές ρύθμισης της ταχύτητας τους, για αυτό δεν θα αναφερθώ αναλυτικά. Η ρύθμιση των στροφών σε έναν κινητήρα Σ.Ρ γίνεται γενικά από την εξίσωση:

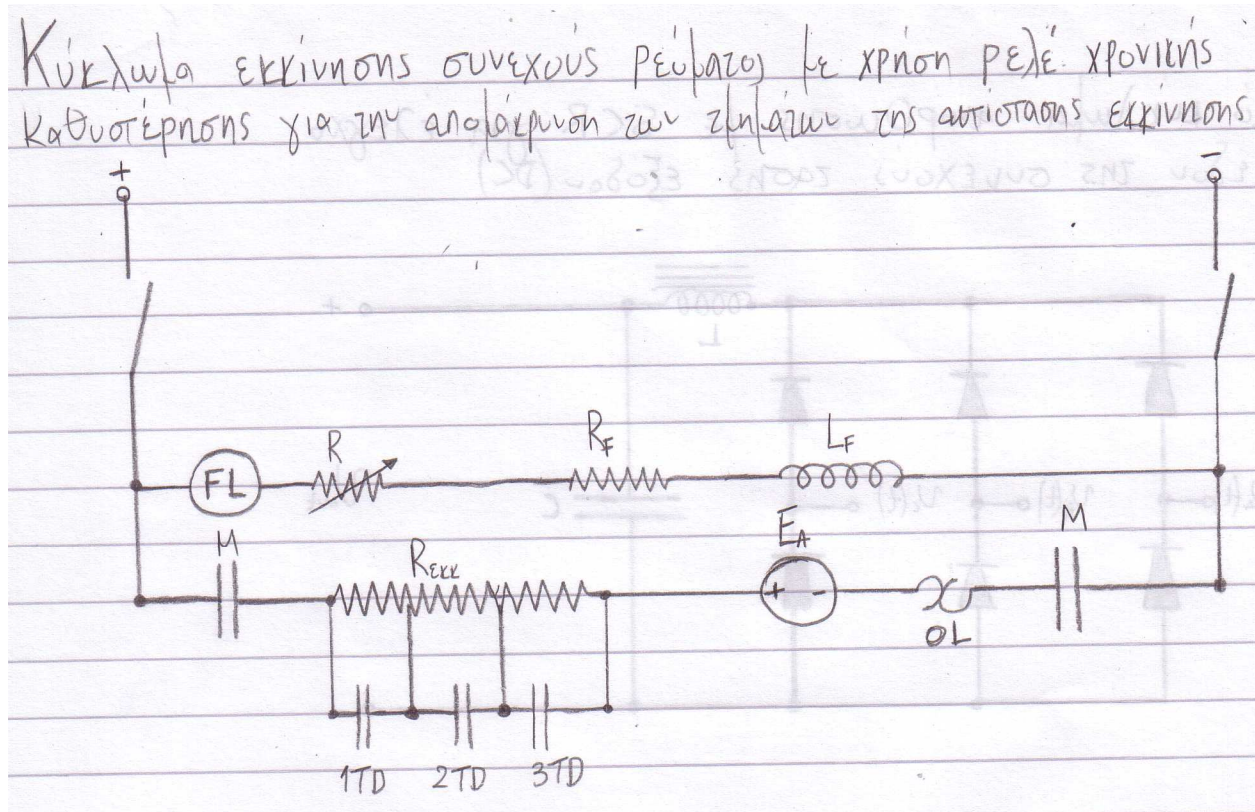
$$n = U_{\Delta} - (R_p * I_p) / C_e * \Phi(i_e) \quad (\text{σε r.p.m})$$

Έτσι μπορώ από την εξίσωση αυτή :

α) με μεταβολή της τάσης U_{Δ} τροφοδοσίας που είναι ένας εύκολος τρόπος.

β) με μεταβολή του ρεύματος διέγερσης i_e συνδέοντας μια μεταβλητή αντίσταση R'_e

γ) με μεταβολή της αντίστασης του επαγωγικού τύμπανου R_p . Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στην εκκίνηση των κινητήρων συνδέοντας σε σειρά με το τύλιγμα του επαγωγικού τύμπανου αντιστάσεις εκκίνησης, οι οποίες στη συνέχεια αφαιρούνται όπως έχω αναφέρει σε παραπάνω ενότητα και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.19.

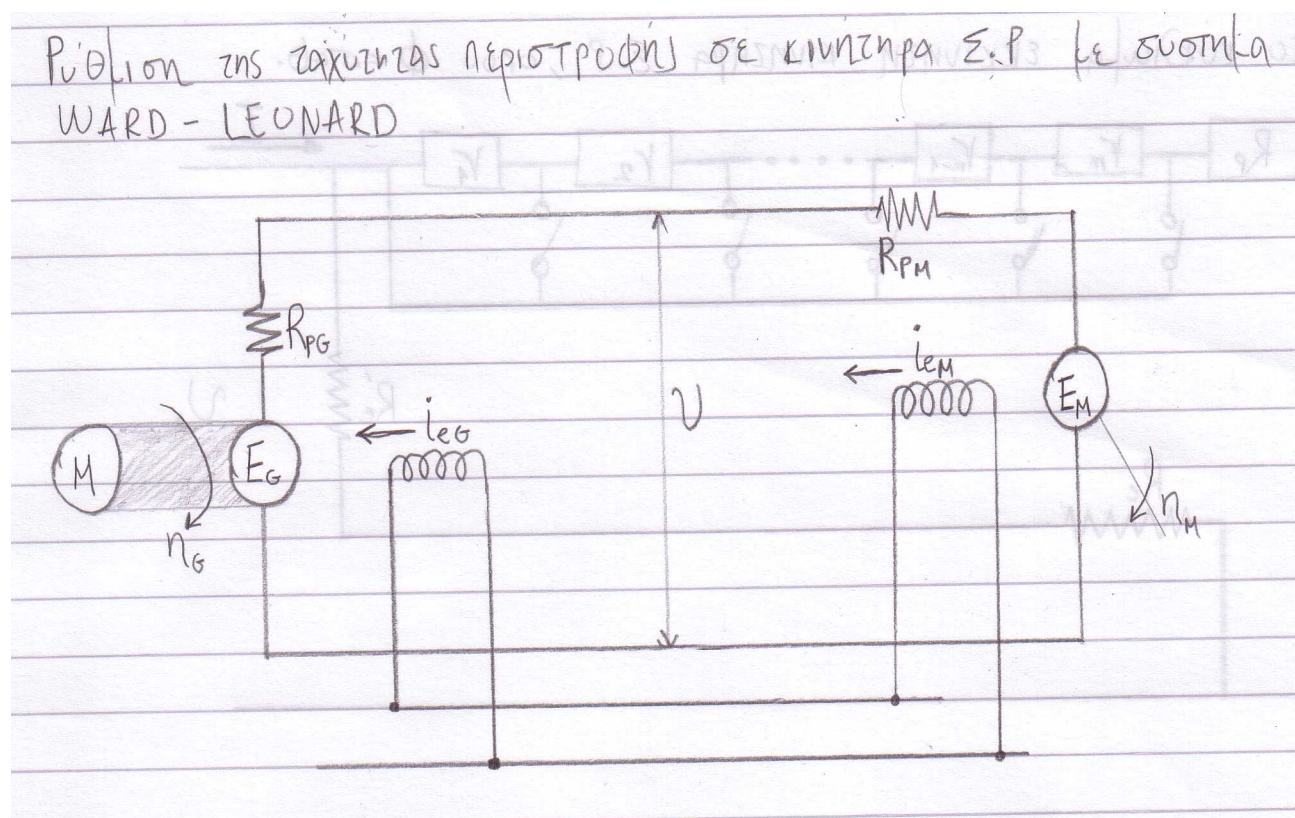


Σχήμα 3.19

Στο σχέδιο του σχήματος 3.19 φαίνεται ένα απλοποιημένο κύκλωμα εκκίνησης συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιεί ρελέ χρονικής καθυστέρησης για την διαδοχική απομάκρυνση των τμημάτων της αντίστασης εκκίνησης. Έτσι μόλις κλείσουν οι επαφές του και τροφοδοτείται με ρεύμα με την εκκίνηση του κινητήρα το ρελε 1TD ενεργοποιείται και μετά από κάποιο χρόνο οι επαφές του κλείνουν – αφού όλα τα ρελε που χρησιμοποιούνται στο παραπάνω κύκλωμα είναι κανονικά ανοιχτά (normally open) – αφαιρώντας έτσι ένα τμήμα της

αντίστασης εκκίνησης. Τότε ενεργοποιείται το ρελε 2TD του οποίου οι επαφές κλείνουν μετά από ένα χρονικό διάστημα απομακρύνοντας το δεύτερο τμήμα της αντίστασης εκκίνησης, ενώ αντίστοιχα το ίδιο συμβαίνει και με το τρίτο ρελε 3TD. Ο συμβολισμός OL του κυκλώματος αναφέρεται σε θερμικό διακόπτη υπερφόρτισης με κανονικά κλειστές επαφές, ενώ FL (field loss relay) πρόκειται για ρελε που προστατεύει τον κινητήρα από την απώλεια της διέγερσης.

Μια άλλη διάταξη που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής ενός κινητήρα Σ.Ρ είναι η διάταξη Ward-Leonard, το κυκλωματικό σύμβολο της διάταξης φαίνεται στο σχήμα 3.20.



Σχήμα 3.20: έλεγχος ταχύτητας περιστροφής κινητήρα Σ.Ρ με διάταξη Ward-Leonard.

Στην διάταξη του σχήματος 3.20 υπάρχει ένας κινητήρας M_{otor} ο οποίος μπορεί να είναι AC ή DC και είναι κινητήρια μηχανή για την γεννήτρια DC, με την οποία είναι συνδεδεμένοι στον ίδιο άξονα. Έτσι αφού η γεννήτρια G πάρει ταχύτητα περιστροφής παράγει συνεχή τάση την οποία μεταφέρει και τροφοδοτεί τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος στο άλλο άκρο, ο οποίος έχει τάση οπλισμού E_M και είναι εκείνος που συνδέεται με το φορτίο ηλεκτροκίνητης έλξης. Ο έλεγχος των στροφών(rpm) τροφοδοσίας του κινητήρα DC της διάταξης γίνεται με μεταβολή του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας DC i_{eg} , το οποίο επιτρέπει την μεταβολή του αριθμού στροφών από πολύ μικρές τιμές μέχρι τις ονομαστικές. Με μεταβολή του i_{eg} της γεννήτριας DC από την αρχή λειτουργίας τους

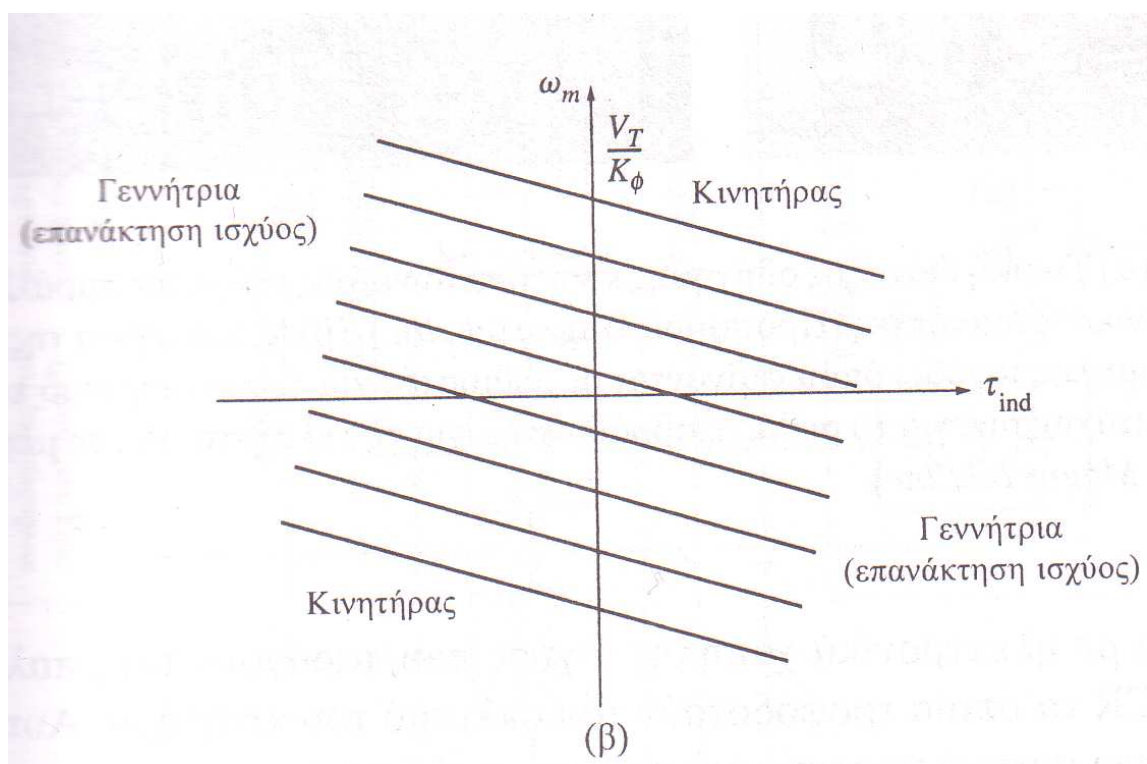
$$E_A = C_e \cdot n \cdot \Phi(I_e) \rightarrow n = E_A / C_e \cdot \Phi(I_e)$$

βλέπω ότι στροφές (rpm) και ρεύμα διέγερσης είναι αντιστρόφως ανάλογα. Επίσης από την σχέση $E_A = C_e \cdot n \cdot \Phi(I_e)$ βλέπω ότι ρεύμα διέγερσης γεννήτριας και η τάση που επάγεται στα άκρα της είναι ανάλογα μεταξύ τους \leftrightarrow άρα με μεταβολή $i_{eg} \rightarrow E_A \rightarrow$ ρυθμίζω την ένταση ρεύματος του επαγωγικού τύμπανου στο κύκλωμα του κινητήρα DC \leftrightarrow άρα ρυθμίζω την ροπή του κινητήρα Σ.Ρ. Από τα παραπάνω βλέπω ότι μπορώ να ελέγξω και τις δυο συνιστώσες της μηχανικής ισχύς του κινητήρα Σ.Ρ, καθώς μηχανική ισχύς είναι γινόμενο ροπής και ταχύτητας περιστροφής. Αν θέλω να ρυθμίσω τις στροφές (ταχύτητα) του κινητήρα Σ.Ρ για τιμές μεγαλύτερες της ονομαστικής του τότε δεν το κάνω από το ρεύμα διέγερσης της γεννήτριας αλλά από εκείνο του ίδιου του κινητήρα. Η διάταξη αυτή μας προσφέρει έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα όχι μόνο κατά την ορθή φορά περιστροφής αλλά και την ανάστροφη καθώς και σε εφαρμογές ανάκτησης ισχύος του κινητήρα, όπως βλέπω παρακάτω σε περιοχές λειτουργίας τεσσάρων

τεταρτημορίων. Αν αντιστραφεί η φορά του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας αντιστρέφεται η πολικότητα της τάσης που παράγεται στα άκρα της \leftrightarrow αντιστρέφεται η πολικότητα της τάσης επαγωγικού τυμπάνου του κινητήρα Σ.Ρ. Έτσι μετά από αυτό αν το ρεύμα διέγερσης του κινητήρα Σ.Ρ δεν αλλάξει την φορά περιστροφής του τότε θα αντιστραφεί η φορά της ροπής ($M_{εσ}$) του και της ταχύτητας περιστροφής του ($n \text{ rpm}$), και τα δυο μεγέθη θα πάρουν αρνητικό πρόσημο αλλά η μηχανική ισχύς που είναι γινόμενο του παραμένει θετική: $(-M_{εσ}) * (-n \text{ rpm}) = +P$.

Αυτό σημαίνει ότι αφού αντιστρέφεται η φορά περιστροφής των δυο διανυσμάτων ροπής -ταχύτητας και η ισχύς που παίρνω είναι θετική τότε η μηχανή συνεχίζει να δουλεύει σαν κινητήρας, αλλά με ανάστροφη φορά και η λειτουργία του περιγράφεται στο τρίτο τεταρτημόριο του διαγράμματος από το σχήμα 3.21, που βρίσκεται στην επόμενη σελίδα. Αν αλλάξει φορά και πρόσημο μόνο το ένα από τα δυο μέρη του γινομένου τότε η ισχύς παίρνει αρνητικό πρόσημο, και αυτό σημαίνει ότι η μηχανή μου δουλεύει πλέον σαν γεννήτρια επιστρέφοντας μέρος της ισχύος στο σύστημα συνεχούς τροφοδοσίας. Αυτό φαίνεται στο δεύτερο τεταρτημόριο της γραφικής παράστασης τεσσάρων τεταρτημορίων και είναι η γραφική απεικόνιση εφαρμογής ηλεκτροκίνητης έλξης κατηφορικής κλίσης. Έτσι σε τέτοια εφαρμογή το ρεύμα επαγωγικού τύμπανου δεν 'τραβά' από το δίκτυο καθώς η βαρύτητα μπορεί να υπερνικήσει τις τριβές και να δώσει κίνηση \leftrightarrow ροπή. Άρα το ρεύμα του επαγωγικού τυμπάνου που είναι ανάλογο της ροπής παίρνει αρνητικές τιμές, ενώ όσο αυξάνεται η κατηφορική κλίση του τμήματος αυξάνονται και οι στροφές. Έτσι αφού το μέγεθος της ροπής είναι αρνητικό η

ισχύς της μηχανής είναι αρνητική \leftrightarrow δουλεύει σαν γεννήτρια Σ.Ρ και με την ροπή πέδησης ρυθμίζει την ταχύτητα σε αυτή την φάση. Τώρα με αλλαγή της φοράς του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας χωρίς να έχω αλλαγή φοράς ρεύματος διέγερσης του κινητήρα Σ.Ρ θα αλλάξει φορά η ταχύτητα περιστροφής του, αλλά θέλω να έχω θετική ροπή (ρεύμα επαγωγικού τυμπάνου) \leftrightarrow δουλεύει σαν γεννήτρια με $-n(\text{rpm})$ και αυτό φαίνεται στο 4^ο τεταρτημόριο του σχήματος 3.21.



Σχήμα 3.21

Η λειτουργία της διάταξης Ward-Leonard έχει ως κύριο πλεονεκτήματα ότι μπορώ να **ρυθμίσω την ταχύτητα** του κινητήρα φορτίου σε διάφορες τιμές της και να χρησιμοποιήσω την μηχανή ως γεννήτρια σε εφαρμογές όπου δεν θέλω μηχανική ισχύ για κίνηση φορτίου.

Τα μειονεκτήματα που έχει η διάταξη αυτή είναι :

α) έχει **υψηλό κόστος** λόγω των τριων μηχανών που χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα Σ.Ρ

β) **μικρός βαθμός απόδοσης** σε σχέση με αυτόν της μια μηχανής.

Για να μπορώ να επιλέξω έναν κινητήρα Σ.Ρ θα πρέπει η χαρακτηριστική ροπής($M_{εσ}$) – ταχύτητα περιστροφής (n rpm) του φορτίου να ταιριάζει με εκείνη του κινητήρα. Στις εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης όπου δεν μπορώ να έχω σταθερή χαρακτηριστική ($M_{εσ}$) – (n rpm) είναι αναγκαία μεταξύ της πηγής τροφοδοσίας Σ.Ρ και της μηχανής τροφοδοσίας Σ.Ρ η χρήση ενός μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας ισχύος ελέγχει την ροή ενέργειας από την πηγή με σταθερή τάση αφού έχει γίνει η μετατροπή της σε Σ.Ρ. Ο μετατροπέας ισχύος αποτελείται από ημιαγωγικούς διακόπτες ισχύος, ηλεκτρονικά ισχύος, αναφορά που έχω κάνει στο κεφ.2.

3.6 Παράλληλη λειτουργία κινητήρων Σ.Ρ

Σε εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης όπου στον ίδιο άξονα εκατέρωθεν έχω συνδέσει δύο κινητήρες παράλληλα μεταξύ τους για την κίνηση του φορτίου μου. Στην λειτουργία αυτή κοινό μέγεθος είναι οι στροφές του φορτίου (n rpm) ενώ κατανέμεται –μοιράζεται η ροπή $M_{εσ}$, ανάλογα με την χαρακτηριστική τους ταχύτητα περιστροφής(στροφές) – ροπή. Στην σύνδεση κινητήρων παράλληλα υπερφορτίζεται εκείνος του οποίου η χαρακτηριστική $N(\text{rpm})-M_{εσ}(nt*m)$ έχει την μικρότερη κλίση. Ευκολότερα παραλληλίζονται (συνεργάζονται) οι κινητήρες που έχουν μεγαλύτερη κλίση στην χαρακτηριστική $N(\text{rpm})-M_{εσ}(nt*m)$, καθώς όσο μικρότερη

η κλίση της χαρακτηριστικής τόσο πιο δύσκολα γίνεται η ρύθμιση στροφών και μπορεί να οδηγηθώ σε αστάθεια. Έτσι από την μελέτη του κάθε τύπου κινητήρα ξεχωριστά βλέπω πως δυσκολότερα παραλληλίζονται οι κινητήρες Σ.Ρ ξένης και παράλληλης διέγερσης ενώ ευκολότερα οι κινητήρες διέγερσης σειράς. Η ηλεκτρική σύνδεση των κινητήρων που είναι μηχανικά στον ίδιο άξονα μπορεί να γίνει παράλληλα και σε σειρά. Απαραίτητη προϋπόθεση στην εν σειρά σύνδεση είναι ότι το μέγιστο ρεύμα επαγωγικού τυμπάνου θα πρέπει να είναι το ελάχιστο των επιμέρους μέγιστων ρευμάτων τυμπάνου που έχει ο καθένας από αυτούς τους κινητήρες ξεχωριστά. Έτσι αν δύο κινητήρες δεν είναι ίδιας ισχύος ακριβώς τότε τον ένα δεν τον εκμεταλλευόμαστε πλήρως. Στην παράλληλη λειτουργία κινητήρων όπως και σε κάθε τύπο κινητήρα Σ.Ρ υποθέτω ότι η μαγνητική ροή είναι ανάλογη του ρεύματος διέγερσης που την προκάλεσε.

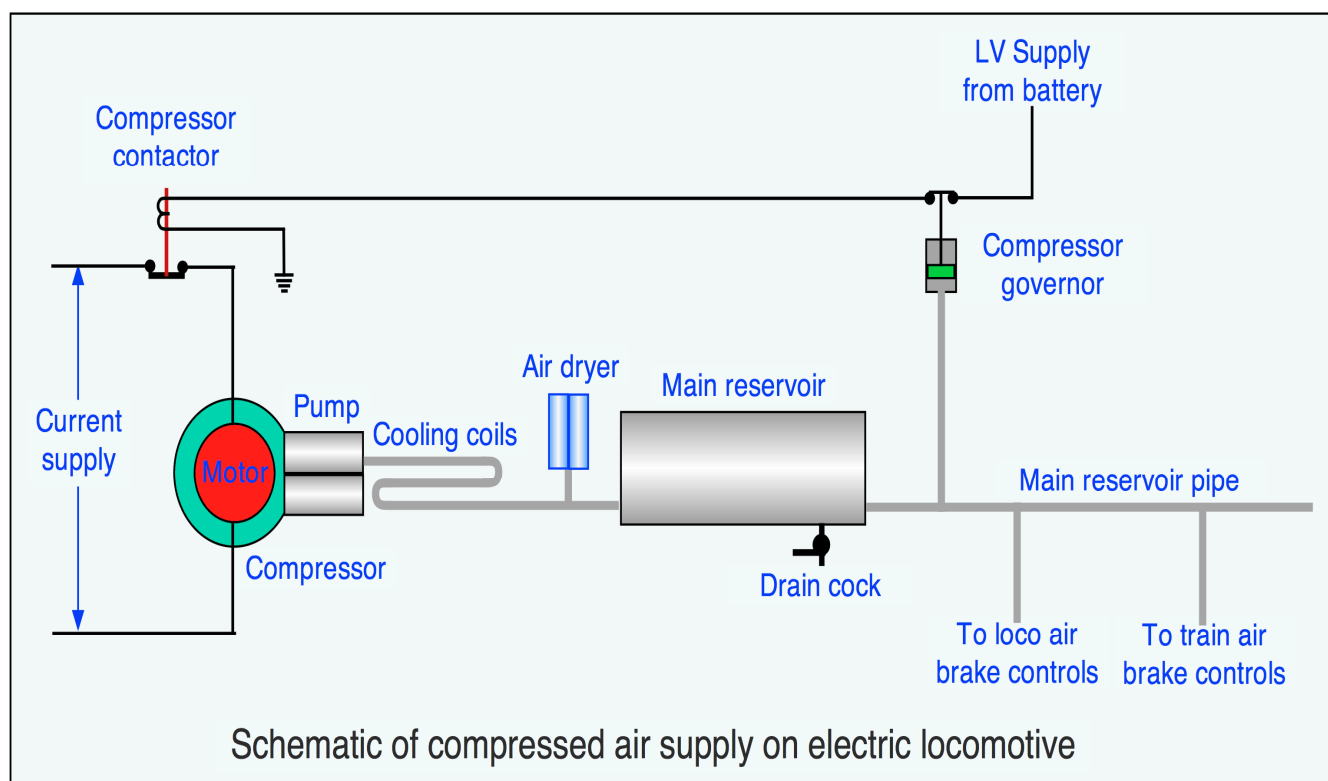
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ **ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (Σ.Ρ) ΜΕ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΟΥ ΣΥΡΜΟΥ** **ΕΛΞΗΣ.**

4.1 Εισαγωγή : Στο κεφάλαιο αυτό θα δούμε το πώς συνεργάζονται οι ηλεκτρικοί κινητήρες Σ.Ρ με τον άξονα του κινητήριου συρμού, αφού πρώτα στο κεφάλαιο 3 εξετάσαμε και είδαμε αναλυτικά τον κάθε τύπο κινητήρα Σ.Ρ. Θα δούμε ότι η τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας των κινητήρων γίνεται με τρίτη σιδηροτροχιά(third rail), όπου είναι εφικτή. Επίσης εκτός από τον ηλεκτρικό κινητήρα Σ.Ρ και την τροφοδοσία αυτού θα δούμε μια μικρή και περιληπτική αναφορά σε κάποια βοηθητικά συστήματα του ηλεκτροκίνητου συρμού, τα οποία υπάρχουν και είναι απαραίτητα αλλά δεν αφορούν την ηλεκτροκίνητη έλξη. Επιπλέον προς το τέλος θα γίνει μια μικρή αναφορά στον τρόπο πέδησης κινητήριου συρμού έλξης.

4.2 Βοηθητικά συστήματα ηλεκτροκίνητου συρμού.

Τα σύγχρονα επιβατικά τρένα παρέχουν διάφορες υπηρεσίες επί της σιδηροδρομικής αμαξοστοιχίας για τις οποίες χρησιμοποιείται πεπιεσμένος αέρας (compressed air) και υδραυλικά υγρά (hydraulic fluids), ενώ μεγάλη χρησιμότητα έχουν οι συσσωρευτές(batteries), που υπάρχουν σε κάθε ηλεκτροκίνητο συρμό έλξης όπως και η γεννήτρια Σ.Ρ. Οι συσσωρευτές χρησιμοποιούνται στους συρμούς έλξης καθώς εφαρμόζουν πάντα στην πηγή χαμηλή τάση (low voltage) αναμονής, και αυτό γίνεται για να μπορούν να 'ζωντανέψουν' και να εκκινήσουν οχήματα που βρίσκονται στην νεκρή περιοχή έλξης. Οι συσσωρευτές όπως και η γεννήτρια Σ.Ρ χρησιμοποιείται για τον φωτισμό του κάθε συρμού όταν

εκείνος είναι σταθμευμένος, καθώς και για άλλες δευτερεύουσες βοηθητικές λειτουργίες. Το κύκλωμα του πεπιεσμένου αέρα που υπάρχει έχει ευρεία χρήση στις αυτόματες πόρτες του συρμού καθώς μέσω αυτού μπορούν να ενεργοποιηθούν ηλεκτρικοί διακόπτες ή ρελέ. Στο σχήμα 4.1 παρακάτω φαίνεται η εφαρμογή πεπιεσμένου αέρα στην ηλεκτροκίνητη έλξη συρμού. Απαραίτητη προϋπόθεση του αέρα σε κάθε τέτοια εφαρμογή είναι να είναι ξηρός, χωρίς καθόλου υγρασία, και γι'αυτό γίνεται ξήρανση μετά την συμπίεση.



σχήμα 4.1 : διάγραμμα συμπιεσμένου αέρα.

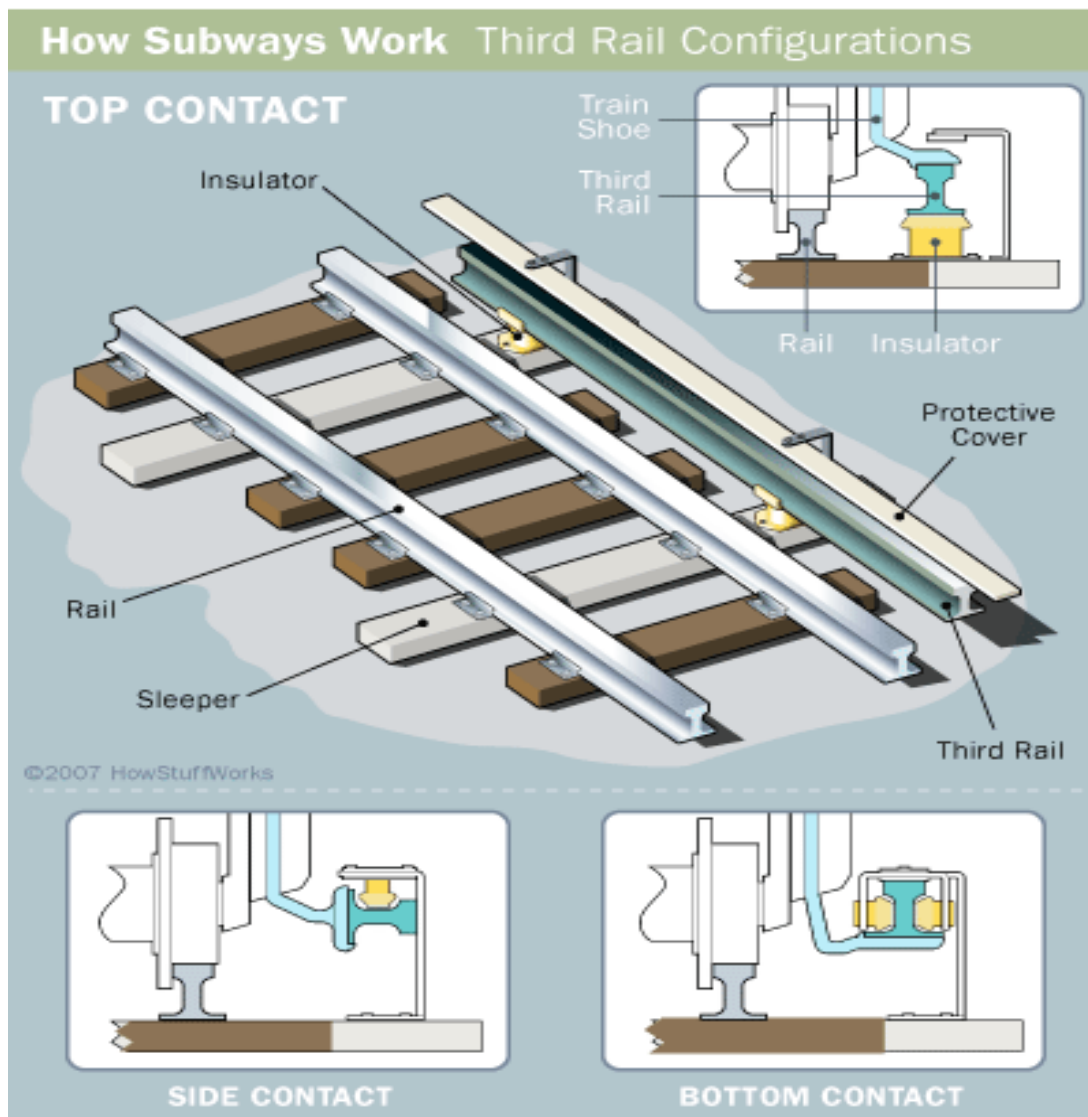
Στο σχήμα 4.1 βλέπω ότι στην τροφοδοσία χαμηλής τάσης από την μπαταρία όπου συνδέεται ένας ρυθμιστής συμπιεσμένου αέρα καθώς και ένα ρελέ του συμπιεστή. Ο κινητήρας που είναι συνδεδεμένος μηχανικά στον ίδιο άξονα με την αντλία παράγει ροπή έτσι ώστε η αντλία (συμπιεστής) να δημιουργεί συμπιεσμένο αέρα, ο οποίος αφού διέλθει από τον ξηραντήρα

αέρα (air dryer) καταλήγει στη κύρια δεξαμενή πιεσμένου αέρα (main reservoir) για να ξεκινήσει αργότερα η διανομή του προς διάφορες εφαρμογές. Οι εφαρμογές αυτές καθώς και τα υπόλοιπα βοηθητικά συστήματα τροχαίου υλικού δεν αφορούν την εφαρμογή της ηλεκτροκίνητης έλξης, γι' αυτό αναφέρονται παραπάνω πολύ περιληπτικά.

4.3 Ηλεκτρική τροφοδοσία κινητήρα Σ.Ρ και συνεργασία αυτού.

Σε εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης με χρήση κινητήρων Σ.Ρ για την κίνηση συρμού έχει επικρατήσει η τροφοδοσία αυτών με τρίτη σιδηροτροχιά Σ.Ρ (third rail), η οποία εγκαθίστανται παράλληλα με τις σιδηροτροχιές του ηλεκτρικού συρμού. Η τροφοδοσία του συρμού με τρίτη σιδηροτροχιά πλεονεκτεί ως προς την εναέρια τροφοδοσία για κινητήρες Σ.Ρ. Με την χρήση αυτής μπορώ να μεταφέρω μεγαλύτερη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης είναι και πιο συμπαγή από την εναέρια. Επίσης με αυτόν τον τρόπο τροφοδοσίας η μέγιστη ταχύτητα του συρμού δεν μπορεί να υπερβεί τα 160 km/hr, ταχύτητα αρκετά μεγάλη για ηλεκτρική κίνηση συμβατικού τρένου, ιδιαίτερα στην Ελλάδα.

Στο παρακάτω σχήμα 4.2, φαίνεται η τρίτη σιδηροτροχιά, και το πώς αυτή συνδέεται με τον κινητήρα κίνησης του συρμού.



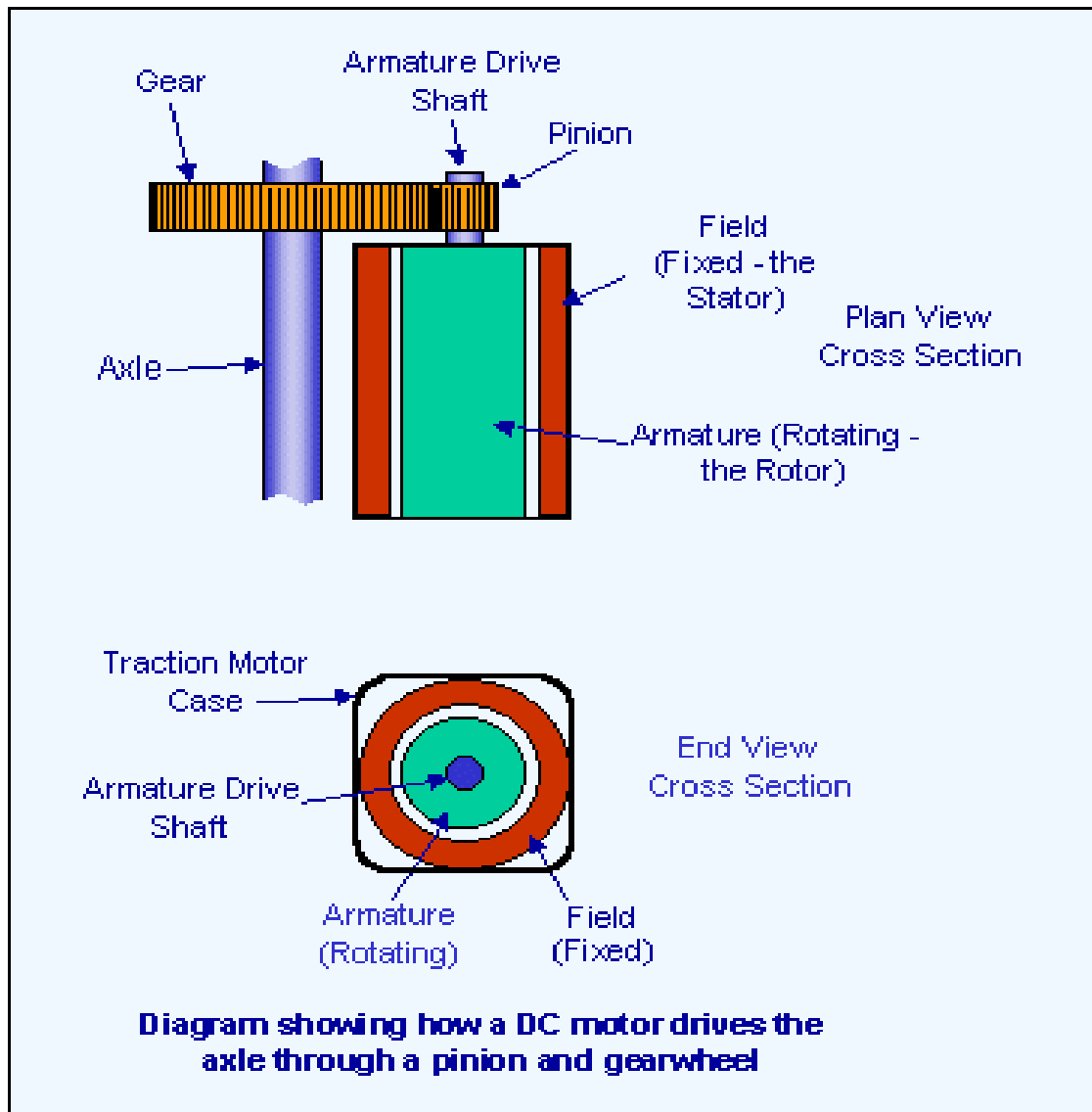
Σχήμα 4.2

Στο σχήμα 4.2 φαίνονται οι δυο σιδηροδρομικές τροχιές(rails) και οι στρωτήρες στους οποίους αυτές στηρίζονται(sleepers). Στο δεξί μέρος των τροχιών υπάρχει η τρίτη γραμμή (third rail) που τροφοδοτεί τον κινητήρα με ρεύμα Σ.Ρ. Η τρίτη σιδηροτροχιά στηρίζεται στους μονωτήρες(insulator) ενώ στο πάνω μέρος της είναι καλυμμένη από ένα προστατευτικό κάλυμμα (protective cover). Στην εφαρμογή αυτή το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται από την τρίτη σιδηροτροχιά → στον κινητήρα

Σ.Ρ του συρμού → από εκεί μέσω των σιδηροδρομικών ραγών επιστρέφει πίσω στον υποσταθμό έλξης. Αυτός ο τρόπος τροφοδοσίας των κινητήρων Σ.Ρ του συρμού έχει το μειονέκτημα ότι δεν μπορεί να λειτουργήσει σε περιοχές με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, πάγο και χιόνι. Όπως βλέπω στο σχήμα 4.2, η επαφή του ακροδέκτη του κινητήρα Σ.Ρ με την ρευματοφόρο σιδηροτροχιά γίνεται με τρεις συνδέσεις. Ο τρόπος σύνδεσης από την κορυφή (top contact) είναι ο πιο καθιερωμένος παρόλο που έχει το μειονέκτημα ότι η τροχιά ρεύματος είναι εκτεθειμένη με οτιδήποτε έρχεται σε επαφή με αυτήν, κάτι που περιορίζεται λίγο με την χρήση προστατευτικού καλύμματος. Η πλάγια επαφή (side contact) πλεονεκτεί λίγο ως προς την σύνδεση κορυφής καθώς δεν είναι τόσο εκτεθειμένη ενώ εκείνη που επηρεάζεται λιγότερο από τις καιρικές συνθήκες είναι η σύνδεση από κάτω (bottom contact). Η τρίτη σιδηροτροχιά τροφοδοτεί τους κινητήρες έλξης του συρμού με συνεχή τάση σταθερής τιμής με την τάση λειτουργίας του. Στο εσωτερικό του συρμού πιθανόν να υπάρχουν μετασχηματιστές έλξης οι οποίοι παραλαμβάνουν ρεύμα συνεχής τάσης από τους τροχούς του συρμού (αφού έχουν τροφοδοτηθεί από την τρίτη σιδηροτροχιά) και το μετατρέπουν στην ίδια τάση λειτουργίας των κινητήρων Σ.Ρ έλξης, αν αυτό δεν έχει γίνει από τον υποσταθμό έλξης.

Στο κεφάλαιο 3 έχουν αναφερθεί αναλυτικά τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένας κινητήρας Σ.Ρ, και την χρήση του καθενός. Όπως είδαμε τα κύρια μέρη του είναι ο ακίνητος στάτης – στο εσωτερικό του οποίου παράγεται η μαγνητική ροή Φ – και ο δρομέας (rotor) που είναι και το κινητό μέρος αυτού. Ο δρομέας περιέχει τον κύριο άξονα του – στον οποίο στηρίζεται το επαγωγικό τύμπανο με το τύλιγμα το οποίο

δέχεται την δύναμη → ροπή . Έτσι ο άξονας του δρομέα συνδέεται με το μηχανικό φορτίο στο οποίο θέλω να μεταφέρω την μηχανική ροπή, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.

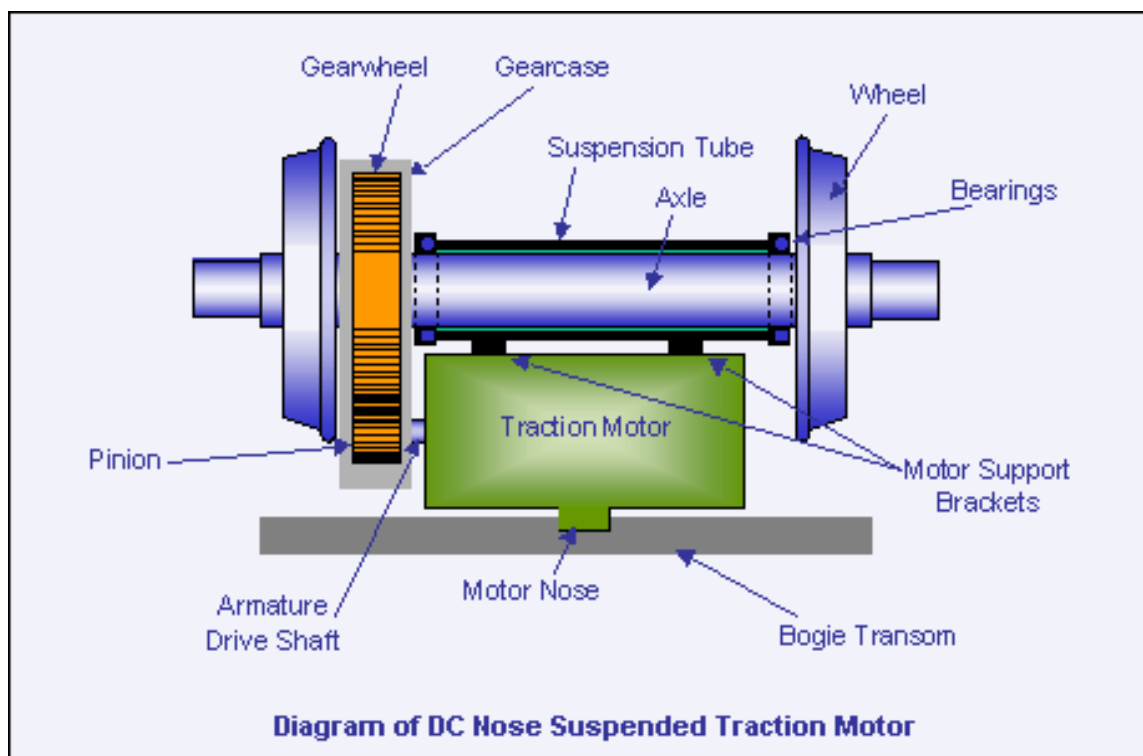


Σχήμα 4.3

Στο κάτω μέρος του σχήματος 4.3 φαίνεται σε τομή ο κινητήρας Σ.Ρ, ο οποίος στο πάνω μέρος της συνεργάζεται με ένα γρανάζι μετάδοσης κίνησης. Με κόκκινο χρώμα στο εξωτερικό μέρος του κινητήρα παρουσιάζεται το ακίνητο μέρος του - ο στατης (field). Στο εσωτερικό του με ανοιχτό

μπλε είναι το κινητό μέρος του - ο δρομέας (armature-rotating) , ενώ στο εσωτερικό του δρομέα είναι ο άξονας του (armature drive shaft). Όπως βλέπω στο σχήμα 4.3 στο εξωτερικό μέρος του άξονα του δρομέα εφαρμόζεται και συνδέεται περιμετρικά ένας μικρός οδοντωτός τροχός (pinion), το οποίο συνεργάζεται με έναν κύριο οδοντωτό τροχό (γρανάζι - gear). Το γρανάζι αυτό είναι πρεσαρισμένο πάνω στον κύριο άξονα του συρμού έλξης στον οποίο μεταφέρει και την περιστροφική ταχύτητα που του έχει μεταδοθεί από το μικρό οδοντωτό τροχό (pinion).

Στο σχήμα 4.4 βλέπω ότι ο κινητήρας έλξης μου(traction motor), κινητήρας Σ.Ρ, εδράζεται πάνω στο φορείο στήριξης(bogie transom) - η λεπίδα στήριξης του κινητήρα Σ.Ρ (motor nose).

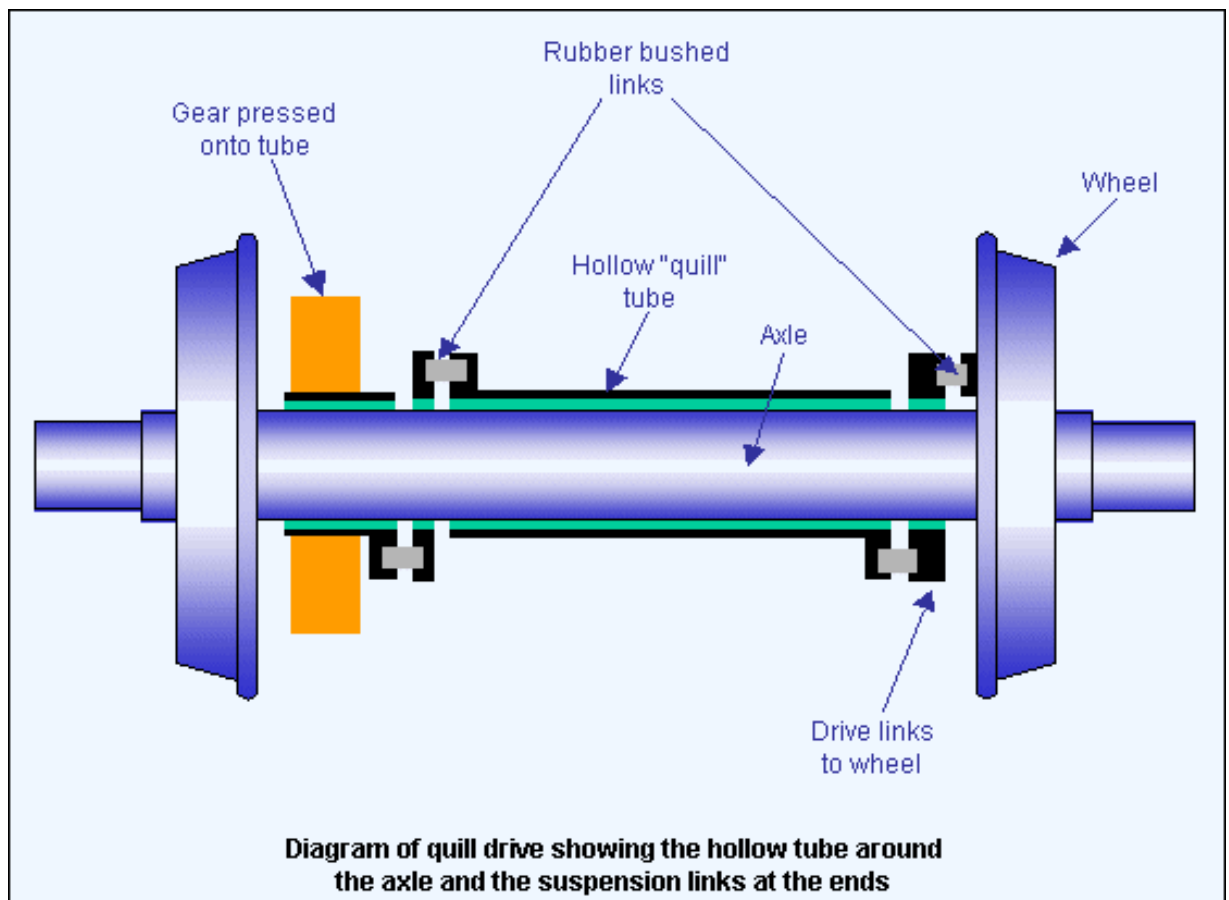


σχήμα 4.4

Από το σχήμα 4.4 βλέπω ότι ο κινητήρας δημιουργεί ροπή ↔ κίνηση την οποία θα μεταδώσει μέσω του 'πινίον'(pinion) στο

κινητήριο γρανάζι. Το γρανάζι είναι πρεσαρισμένο πάνω στον άξονα κίνησης - όπως και οι κινητήριοι τροχοί στο άκρο του άξονα. Έτσι αφού μεταδίδεται κίνηση στον κύριο άξονα μεταδίδεται και στους τροχούς επιτυγχάνοντας έτσι την κίνηση του συρμού. Έτσι από τον άξονα του κινητήρα έλξης μεταδίδεται η κίνηση στους τροχούς κίνησης, υπολογίζοντας πάντα τις μηχανικές απώλειες που υπάρχουν και τις απώλειες μετάδοσης κίνησης. Στο σχήμα 4.4 βλέπω ότι ο κύριος άξονας του συρμού στηρίζει τον κινητήρα Σ.Ρ έλξης με κάποια μηχανοκίνητα στηρίγματα υποστήριξης, ενώ περιβάλλεται από έναν άξονα αναστολής εξωτερικά του και ανάμεσα στους δυο άξονες υπάρχουν έδρανα ολίσθησης. Τα έδρανα ολίσθησης ελαττώνουν την τριβή \leftrightarrow και την φθορά, με την βοήθεια και χρήση κατάλληλου λιπαντικού, που δημιουργείται από την κίνηση του κύριου άξονα και του εξωτερικού άξονα του (περιβλήματος του).

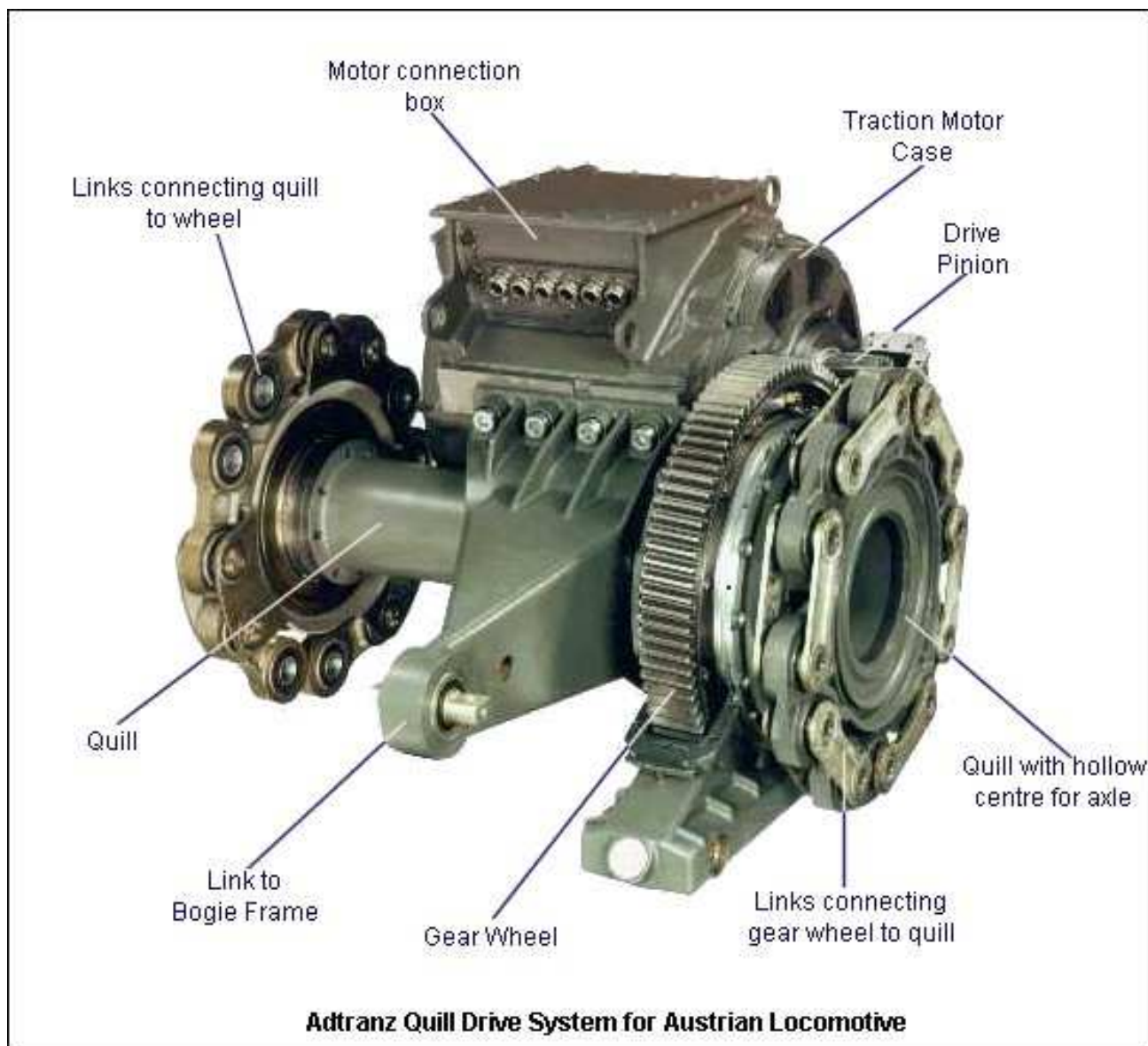
Στο σχήμα 4.4 όπου ο κινητήρας έλξης συνδέεται με μια λεπίδα στο φορείο στήριξης αλλά αυτός ο τρόπος έχει το μειονέκτημα ότι μέρος του βάρους του κινητήρα έλξης επιβαρύνει τον άξονα έλξης και τους κινητήριους τροχούς.



Σχήμα 4.5

Στο σχήμα 4.5 φαίνεται η μετάδοση κίνησης ότι γίνεται με ένα διαφορετικό τρόπο από το σχήμα 4.4, με 'δίσκο φτερού', και όχι από τον κύριο άξονα του συρμού. Ο οδοντωτός τροχός μεταδίδει κίνηση από τον κινητήρα Σ.Ρ που βρίσκεται στο ένα άκρο του άξονα και στα δυο άκρα του. Έτσι ο 'δίσκος φτερού', από το ένα άκρο που βρίσκεται το γρανάζι μέσω συνδέσμων από καουτσούκ μεταφέρει την κίνηση στον κινητήριο τροχό στο άλλο άκρο του άξονα. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου του σχήματος 4.5 είναι ότι ολόκληρο το βάρος του κινητήρα εφαρμόζεται στο πλαίσιο του φορείου ↔ καλύτερη έδραση του κινητήρα έλξης.

Παρακάτω στην φωτογραφία 4.1 φαίνεται στην πραγματικότητα ένας κινητήρας Σ.Ρ που χρησιμοποιείται στο σιδηροδρομικό δίκτυο της Αυστρίας.

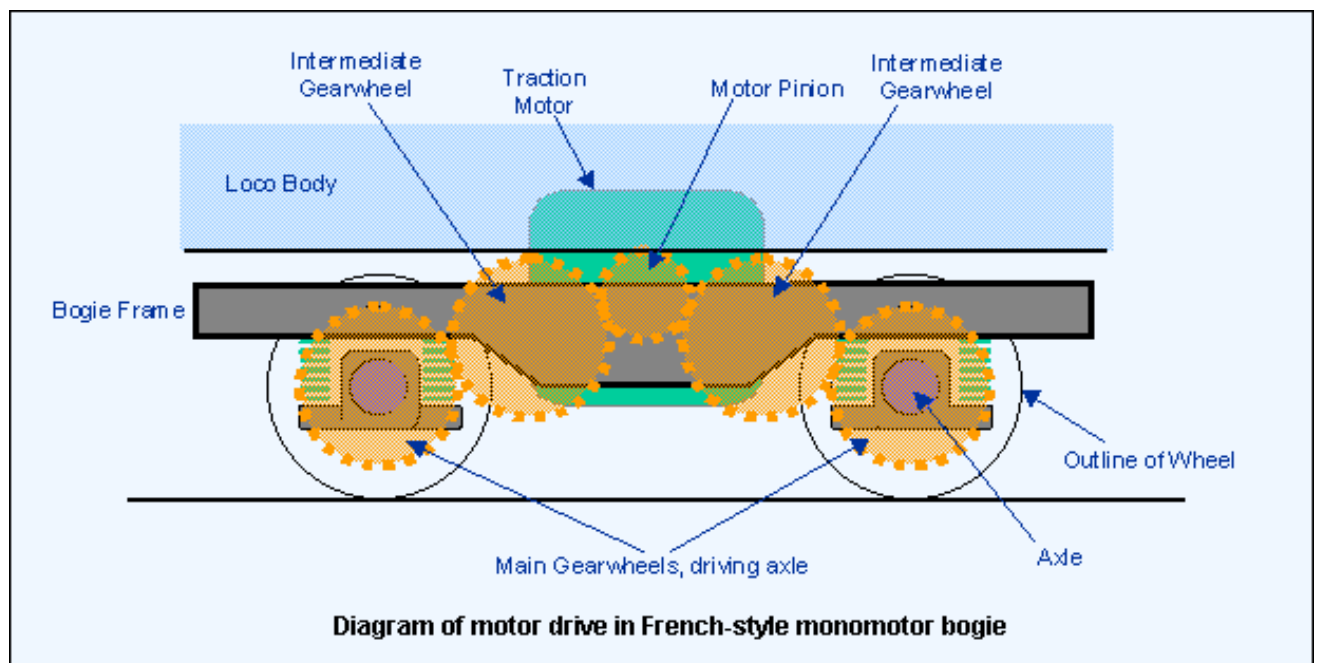


φωτογραφία 4.1

Στην φωτογραφία 4.1 φαίνεται το κάθε τμήμα του κινητήρα Σ.Ρ. Βλέπω την θήκη του κινητήρα έλξης (traction motor case) καθώς και το κιβώτιο σύνδεσης του με το ηλεκτρικό δίκτυο (motor connection box). Στον άξονα του κινητήρα διακρίνεται το 'πινιόν' (pinion drive) μετάδοσης περιστροφικής κίνησης από τον δρομέα του κινητήρα στον κύριο οδοντωτό τροχό

(gear wheel) και από εκεί → μεταδίδει πρώτα στους συνδέσμους που βρίσκονται πλησιέστερα του (links connection gear wheel to quill) για την σύνδεση τους με τον κινητήριο τροχό, στην συνέχεια στο άλλο άκρο του άξονα. Οι σύνδεσμοι που φαίνονται στα δυο άκρα του άξονα συνδέουν περιμετρικά τους τον άξονα που του έχει μεταδοθεί η κίνηση με τους κινητήριους τροχούς έλξης αφού ανάμεσα σ'αυτά τα δυο τμήματα παρεμβάλλονται έδρανα ολίσθησης ώστε να μειώνεται η τριβή. Ο κινητήρας της φωτογραφίας 1 μπορεί να προσαρμοστεί και να τοποθετηθεί παράλληλα με τον κύριο άξονα ή μπορεί να προσαρμοστεί σχηματίζοντας ορθή γωνία ως προς αυτόν .

Στο σχήμα 4.6 φαίνεται ένας συρμός έλξης σε σύστημα ηλεκτροκίνησης στην Γαλλία και η μηχανική σύνδεση του κινητήρα με τους κινητήριους τροχούς.



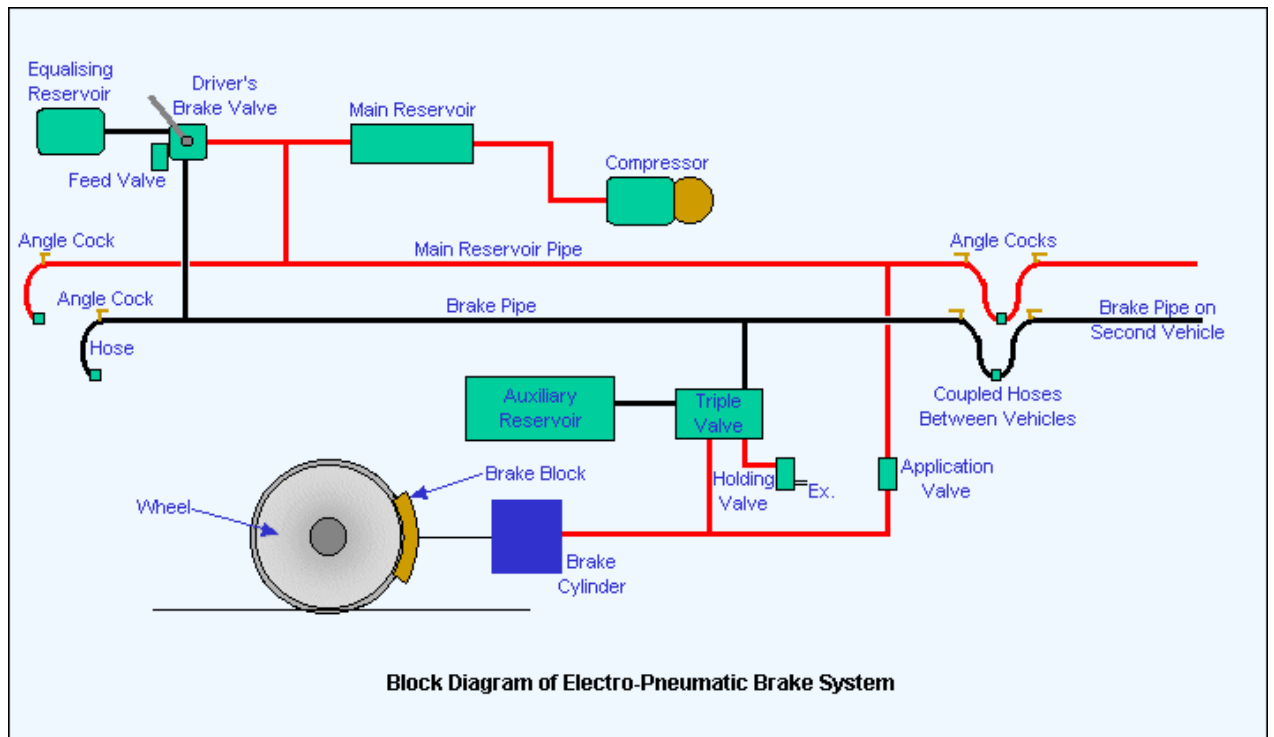
Σχήμα 4.6

Η μετάδοση περιστροφικής κίνησης από τον άξονα του κινητήρα Σ.Ρ στον άξονα που φέρει τους τροχούς έλξης του

συρμού πρέπει να γίνεται με όσο το δυνατόν σταθερό τρόπο, και για αυτό επιλέγονται οι οδοντωτοί τροχοί. Η συνεργασία των οδοντωτών τροχών είναι μια σταθερή και ασφαλής μέθοδος μετάδοσης κίνησης παρόλο που δεν επιτυγχάνεται ο μέγιστος βαθμός μετάδοσης κίνησης που θα μπορούσε να επιτευχθεί. Άλλες μέθοδοι όπως η μετάδοση με ιμάντα παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευκολία κατασκευής ↔ χαμηλότερο κόστος αλλά έχουν το μειονέκτημα ότι δεν είναι σταθερή μέθοδος και ενδεχόμενη μη συνεργασία των ιμάντων με τον κινητήρα έλξης οδηγεί στην λειτουργία του εν κενό, χωρίς φορτίο ↔ οι στροφές του (rpm) τείνουν στο άπειρο ↔ καταστροφή του κινητήρα.

4.4 Πέδηση συρμού ηλεκτροκίνητης έλξης.

Στις περισσότερες εφαρμογές ηλεκτρικής έλξης η πέδηση των συρμών γίνεται με εφαρμογή κυκλώματος πιεσμένου αέρα, ηλεκτροπνευματικού κυκλώματος. Ο συμπιεσμένος αυτός αέρας μεταφέρεται σε όλους τους συρμούς της αμαξοστοιχίας, από την κυρία δεξαμενή του (main reservoir), όπου είναι αποθηκευμένος. Προσπαθώ ώστε η παροχή πιεσμένου αέρα να είναι σταθερή πριν τροφοδοτήσει τον κινητήριο τροχό του κάθε συρμού έλξης, ώστε η πέδηση να είναι ομοιόμορφη στα μπροστά και τα τελευταία τμήματα της αμαξοστοιχίας. Αυτό είναι σημαντικό καθώς όταν δεν υπάρχει σταθερή παροχή σε κάθε τμήμα ↔ δεν υπάρχει και ομοιόμορφη πέδηση των συρμών με κίνδυνο αποσύνδεσης των μπροστά και πίσω τμημάτων. Στην σχήμα 4.7 παρακάτω βλέπω ένα κύκλωμα ηλεκτροπνευματικής πέδησης συρμού έλξης.

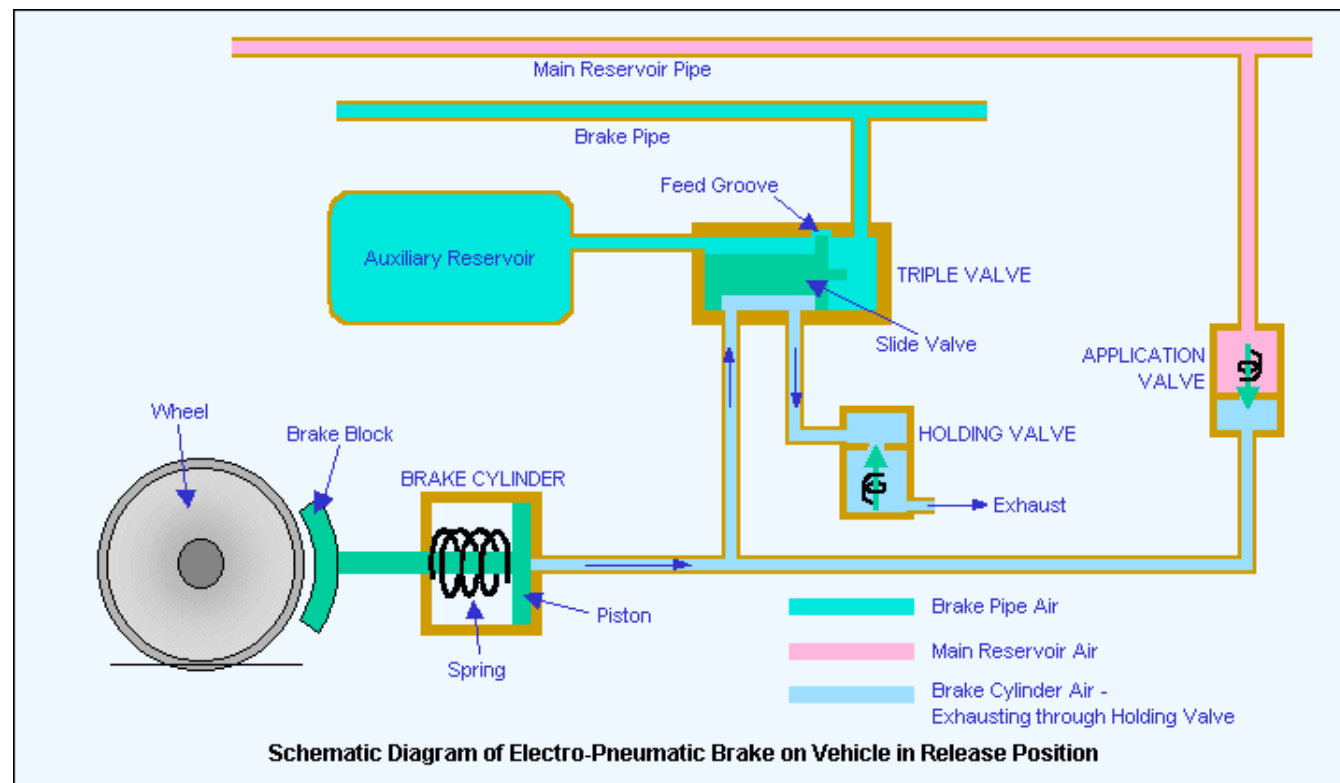


Σχήμα 4.7

Η σωλήνα με κόκκινο χρώμα του σχήματος 4.7 οδηγεί τον πιεσμένο αέρα από τον συμπιεστή που τον παράγει στην κύρια δεξαμενή αποθήκευσης του. Από εκεί στην συνέχεια οδηγείται στον κύλινδρο της βαλβίδας πέδησης (brake cylinder), αφού πρώτα διέλθει από μια ρυθμιστική βαλβίδα (application valve), η οποία παίρνει εντολή από ένα ρελέ ώστε όταν ο χειρίστης του συρμού θέλει να φρενάρει τον συρμό, η ρυθμιστική βαλβίδα παίρνει εντολή από το ρελέ και ανοίγει ώστε να περάσει αέρας για να τροφοδοτηθεί η βαλβίδα πέδησης. Ένα μέρος του αέρα αυτού που δεν απορροφάται αρχικά από την βαλβίδα πέδησης ή απορροφάται και αποδίδει την μηχανική ενέργεια του στο κύλινδρο της βαλβίδας πέδησης, επιστρέφοντας πίσω διέρχεται μέσω την τρίοδης βάννας(triple valve) οδηγείται στη δευτερεύουσα δεξαμενή(auxiliary

reservoir) ή εξέρχεται έξω (exhaust) μέσω βαλβίδας (holding valve).

Παρακάτω στο σχήμα 4.8 φαίνεται ένα διάγραμμα όμοιο με του σχήματος 4.7



Σχήμα 4.8

Στο σχήμα 4.8 βλέπω ένα ηλεκτροπνευματικό διάγραμμα πέδησης κινητήριου τροχού συρμού έλξης, όμοιο με του σχήματος 4.7, αλλά περισσότερο ευδιάκριτο λόγω διαφορετικών χρωματισμών.

Με το κεφάλαιο αυτό τελειώνει η αναφορά μου στην ηλεκτροκίνητη έλξη με κινητήρες Σ.Ρ και στο επόμενο κεφάλαιο θα εξετάσουμε κινητήρες και μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος για αυτές τις εφαρμογές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ **(ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ) ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΛΞΗΣ ΣΥΡΜΟΥ.**

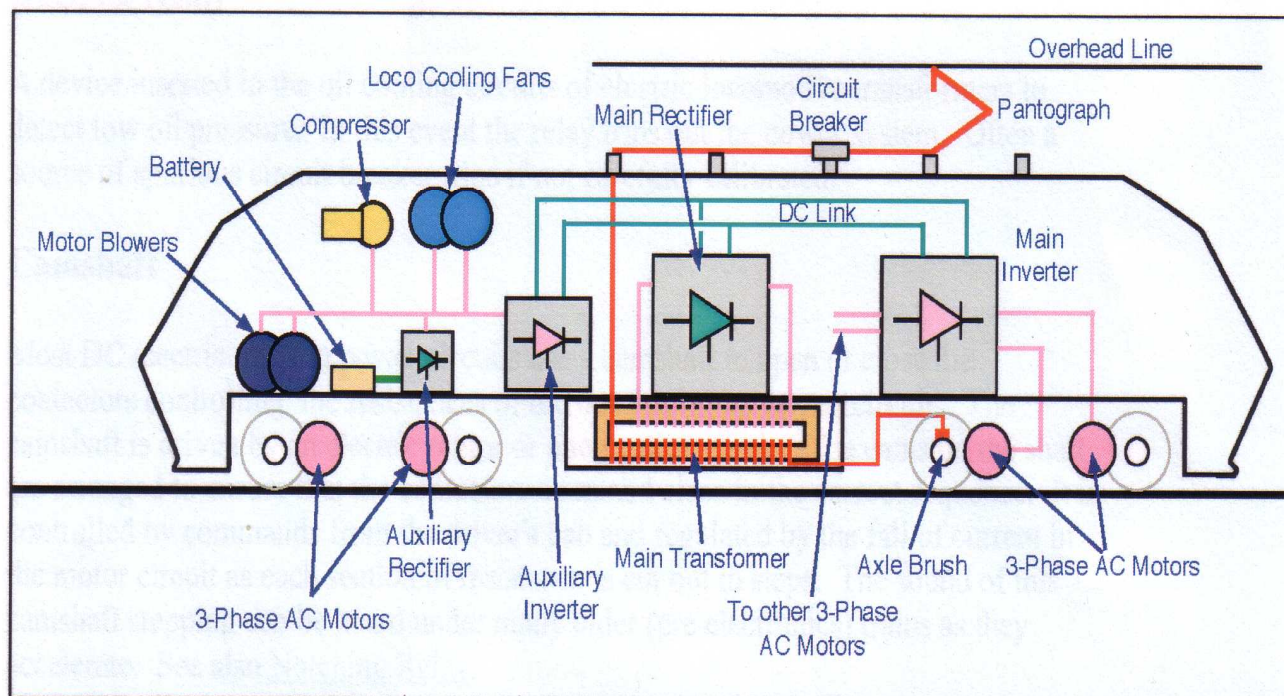
Εισαγωγή: Οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες – επαγωγικοί – χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, μία από αυτές είναι η ηλεκτροκίνητη έλξη συρμού αμαξοστοιχίας. Ο επαγωγικός κινητήρας εφευρέθηκε από τον Nicola Tesla, και η μεταφορά ενέργειας από το στάτη στον περιστρεφόμενο δρομέα γίνεται με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Οι επαγωγικοί κινητήρες παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα τα οποία τους κάνουν να έχουν ευρεία εφαρμογή. Ορισμένα από αυτά είναι ότι απαιτούν λιγότερη συντήρηση καθώς έχουν χαμηλότερο κόστος από αντίστοιχους κινητήρες ίδιας ισχύος Σ.Ρ. Επιπλέον παρουσιάζουν την δυνατότητα προσωρινής υπερφόρτισης τους με φορτίο κατά πολύ μεγαλύτερο από εκείνο της ονομαστικής τιμής τους. Παράλληλα ρυθμίζουν εύκολα την ροπή τους και την ταχύτητα περιστροφής τους, όπως θα δούμε αναλυτικά παρακάτω. Οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται πολύ από το 1990 και μετά στο σιδηροδρομικό δίκτυο της Γαλλίας και της Ιαπωνίας.

5.1 Στοιχεία ηλεκτροκίνητης έλξης με κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος(E.P)

Η ηλεκτρική ενέργεια που τροφοδοτεί τους επαγωγικούς κινητήρες είναι τριφασική ημιτονοειδούς ρεύματος με μεταβλητό πλάτος και συχνότητα. Ο εναέριος αγωγός (overhead line) μεταφέρει τριφασικό E.P μέσω του παντογράφου (pantograph) στο πρωτεύον τύλιγμα του κύριου

μετασχηματιστή (main transformer) του συρμού (διακρίνεται στην φωτογραφία 1 με κόκκινο χρώμα). Στο δευτερεύον τύλιγμα εκείνου το Ε.Ρ μεταφέρεται στο ενδιάμεσο κύκλωμα σε έναν κύριο ανορθωτή τάσης (main rectifier) που μετατρέπει το ρεύμα σε συνεχές και από εκεί μεταφέρεται ξανά σε ένα κύριο και ένα βοηθητικό ανορθωτή (main inverters) για να μετατραπεί ξανά σε τριφασικό Ε.Ρ μεταβλητού πλάτους και συχνότητας έτοιμο να τροφοδοτήσει τους τέσσερις κινητήρες έλξης (3-phase AC motors) που διακρίνονται στον συρμό της φωτογραφίας 1. Ο βοηθητικός ανορθωτής (auxiliary inverter) τροφοδοτεί με Ε.Ρ εκτός από τους δύο κινητήρες έλξης και τα υπόλοιπα μέρη του συρμού που την χρειάζονται, όπως ο συμπιεστής (compressor), οι ανεμιστήρες ψύξης (loco cooling fans) καθώς και τα μοτέρ των ανεμιστήρων (motor blowers).

Electric Locomotive Parts



φωτογραφία 1

Φωτογραφία 1: μέρη ηλεκτροκίνητου συρμού έλξης.(electric locomotive parts).

5.1.1 Παντογράφος (Pantograph)

Ο παντογράφος είναι ο συνδετήριος μηχανισμός που συνδέει το εναέριο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας με τον κύριο μετασχηματιστή του συρμού έλξης. Στις εφαρμογές έλξης με κινητήρες Σ.Ρ ο μηχανισμός αυτός δεν υπάρχει καθώς η τροφοδοσία του κινητήριου συρμού γίνεται με την τρίτη σιδηροτροχιά (third rail). Ο παντογράφος κατά την κίνηση του συρμού βρίσκεται σε συνεχή επαφή με το εναέριο καλώδιο τροφοδοσίας, καθώς αποτελείται από την επίδραση δύο ελατηρίων αέρος (φωτογραφία 2).



Φωτογραφία 2

Εκείνος ασκεί δύναμη στο εναέριο καλώδιο καθώς έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, μία δύναμη που αυξάνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα κίνησης του συρμού έλξης. Έτσι λοιπόν το εναέριο καλώδιο τροφοδοσίας δέχεται μια μετατόπιση κατά τον

οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα όταν ο συρμός έλξης κινείται. Οι περισσότεροι συρμοί έχουν δύο παντογράφους, τον κύριο και έναν εφεδρικό.

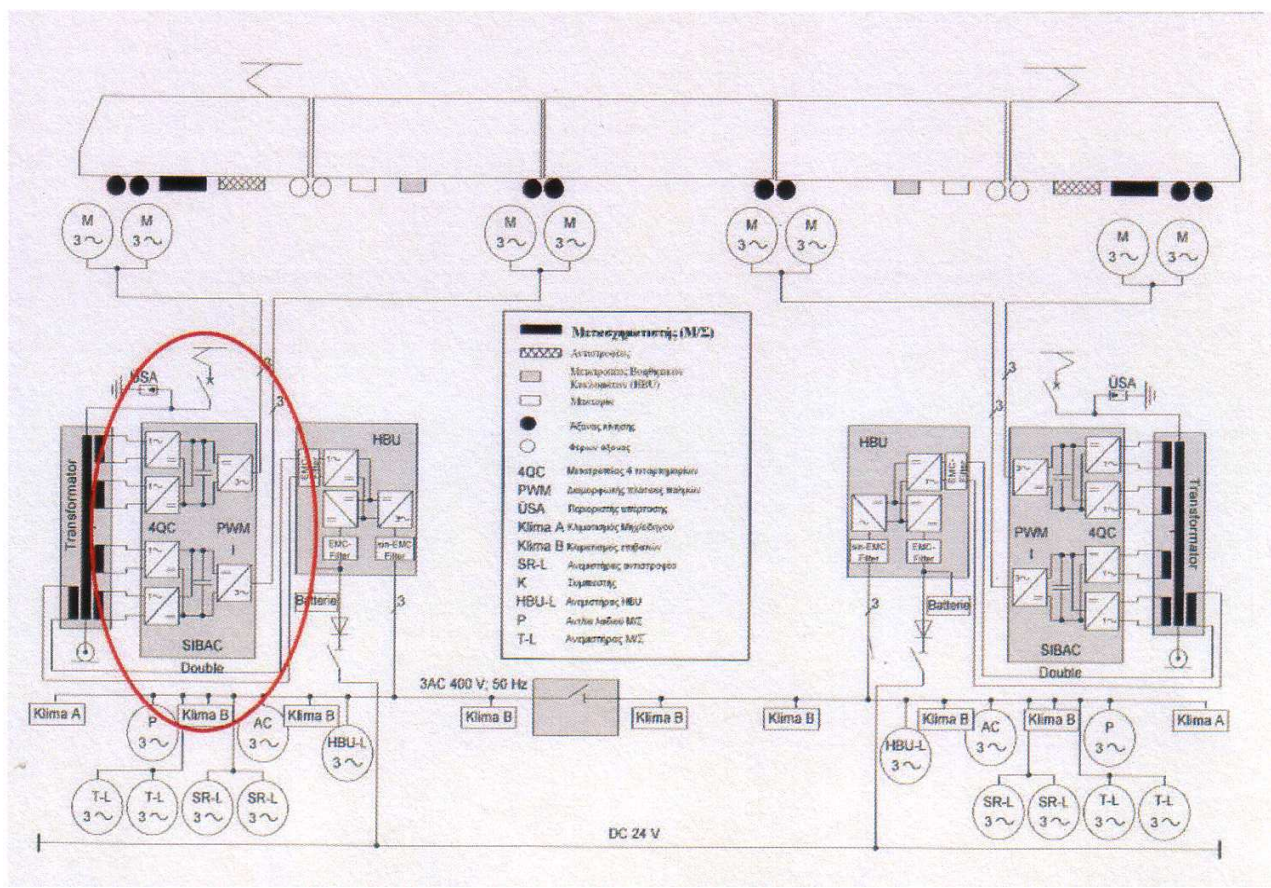


Όπως βλέπω στην φωτογραφία 1 μετά τον παντογράφο για την τροφοδοσία του μετασχηματιστή υπάρχει ένας διακόπτης ροής (circuit breaker) ο οποίος σε περίπτωση βλάβης απομονώνει τον συρμό από την ηλεκτρική τροφοδοσία του. Ο διακόπτης αυτός μπορεί να είναι διακόπτης κενού ή εκτόνωσης αέρα.

Οι ανεμιστήρες ψύξης που υπάρχουν στο εσωτερικό του συρμού χρησιμοποιούνται για να διατηρούν δροσερό το εσωτερικό περιβάλλον του συρμού, τους ανορθωτές και τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά ισχύος που υπάρχουν σε αυτόν, ενώ τροφοδοτούνται με τριφασικό Ε.Ρ και μία τάση των 400 V.

Στο παρακάτω σχήμα 5.1 φαίνεται ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα τροφοδότησης ηλεκτροκίνητου συρμού έλξης. Όπως έχω αναφέρει και στην παράγραφο 2.3.2 η ενέργεια από τον

υποσταθμό της ΔΕΗ μεταφέρεται μέσω παντογράφου στον κύριο Μ/Σ του οχήματος, όπως και στην φωτογραφία 1. Ο Μ/Σ από το δευτερεύον τύλιγμα του τροφοδοτεί τον ανορθωτή τεσσάρων τεταρτημορίων (4QC) ο οποίος μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή. Από εκεί μεταφέρεται στον διαμορφωτή πλάτους παλμών (PWM) ο οποίος μετατρέπει ξανά την συνεχή σε εναλλασσόμενη τάση τριών φάσεων έτοιμη να τροφοδοτήσει τους κινητήρες του συρμού έλξης, για την μετακίνηση της αμαξοστοιχίας.



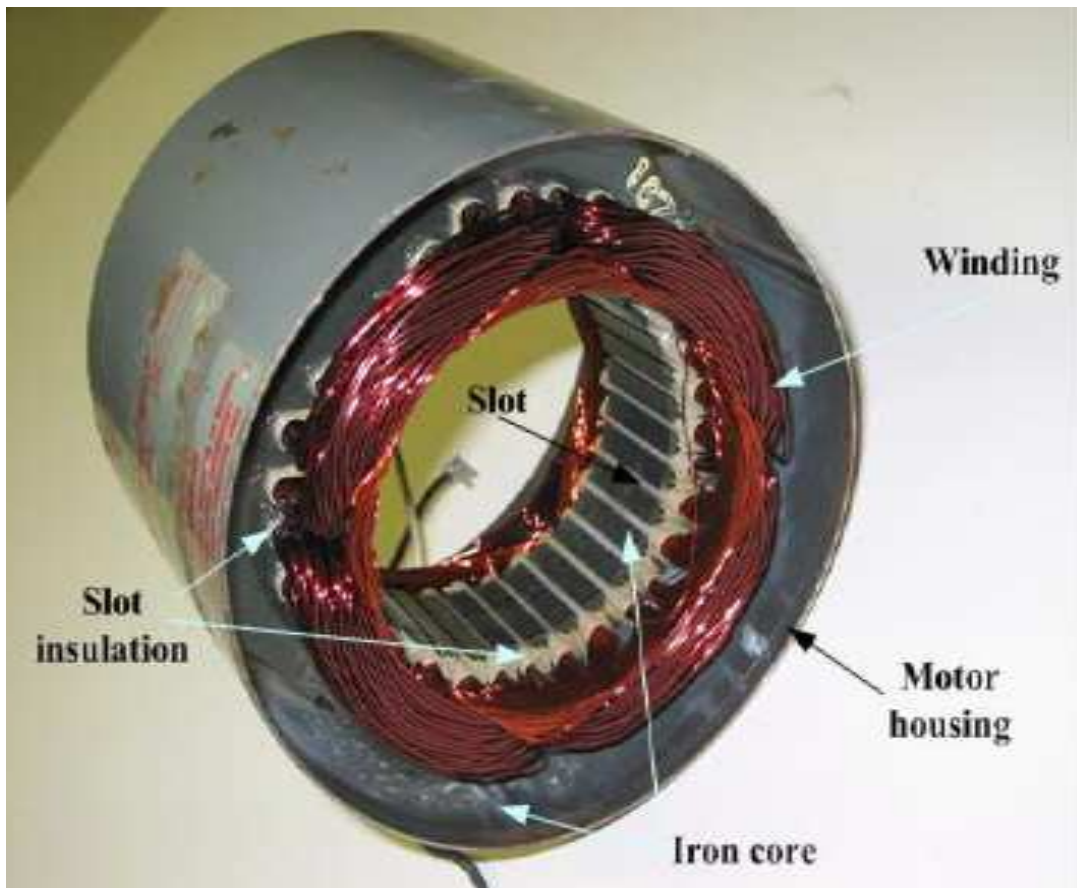
Σχήμα 5.1

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1 ο κύριος Μ/Σ του συρμού έχει περισσότερα δευτερεύοντα τυλίγματα, καθένα από τα οποία έχει διαφορετική τιμή τάσης για να τροφοδοτεί εκτός από την ανορθωτική διάταξη έλξης και την ανορθωτική διάταξη

βοηθητικών φορτίων. Τέτοια φορτία, που φαίνονται στο κάτω μέρος του σχήματος 5.1, είναι η αντλία λαδιού του Μ/Σ και ο ανεμιστήρας του. Επιπλέον από το δευτερεύον τύλιγμα του Μ/Σ οδηγείται εναλλασσόμενη τάση στην ανορθωτική διάταξη ΗΒU όπου στο ενδιάμεσο κύκλωμα μετατρέπεται σε συνεχή και από εκεί πάλι σε εναλλασσόμενη τριών φάσεων 400 V 50 Hz, για την τροφοδοσία του κλιματισμού του συρμού.

5.2 Κατασκευαστικά στοιχεία (μέρη) επαγωγικών κινητήρων.

Όπως στους κινητήρες Σ.Ρ έτσι και εδώ αποτελούνται από τον ακίνητο στάτη και τον περιστρεφόμενο δρομέα. Ο στάτης έχει τριφασικό τύλιγμα μέσα σε αυλάκια, το οποίο καταλήγει στους έξι ακροδέκτες του ακροκιβωτίου. Ο πυρήνας του στάτη, όπως φαίνεται στην φωτογραφία 3, κατασκευάζεται από δυναμοελάσματα ενώ η συνδεσμολογία του τυλίγματος του γίνεται κατά αστέρα ή τρίγωνο στον πίνακα ακροδεκτών του κινητήρα.



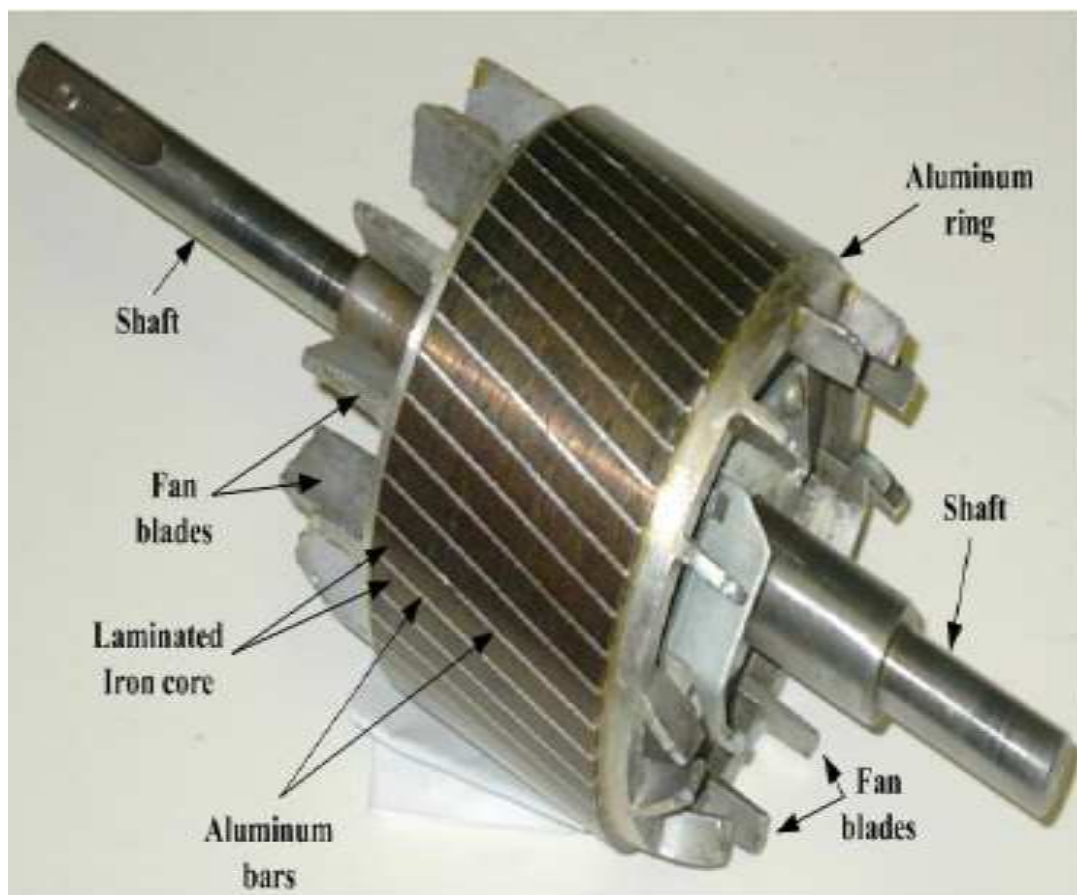
Φωτογραφία 3 : στάτης επαγωγικού κινητήρα.

Στην φωτογραφία 3 φαίνονται ξεκάθαρα τα αυλάκια (slot) και η μόνωση αυτών (slot insulation) μέσα στα οποία υπάρχει το τριφασικό τύλιγμα του στάτη. Επίσης διακρίνεται η περιέλιξη του (winding) καθώς και το πλαίσιο του κινητήρα (motor housing).

Στους ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες ο δρομέας τους μπορεί να είναι δύο ειδών :

A) βραχυκυκλωμένος δρομέας. Σε αυτόν ο πυρήνας του είναι κατασκευασμένος από δυναμοελάσματα που σχηματίζουν αυλακώσεις κατά μήκος του άξονα. Μέσα στις αυλακώσεις τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό ή ορείχαλκο χωρίς μόνωση οι οποίοι συγκολλούνται στα άκρα τους με στεφάνια βραχυκύκλωσης - σχηματίζοντας έτσι το τύλιγμα κλωβού -

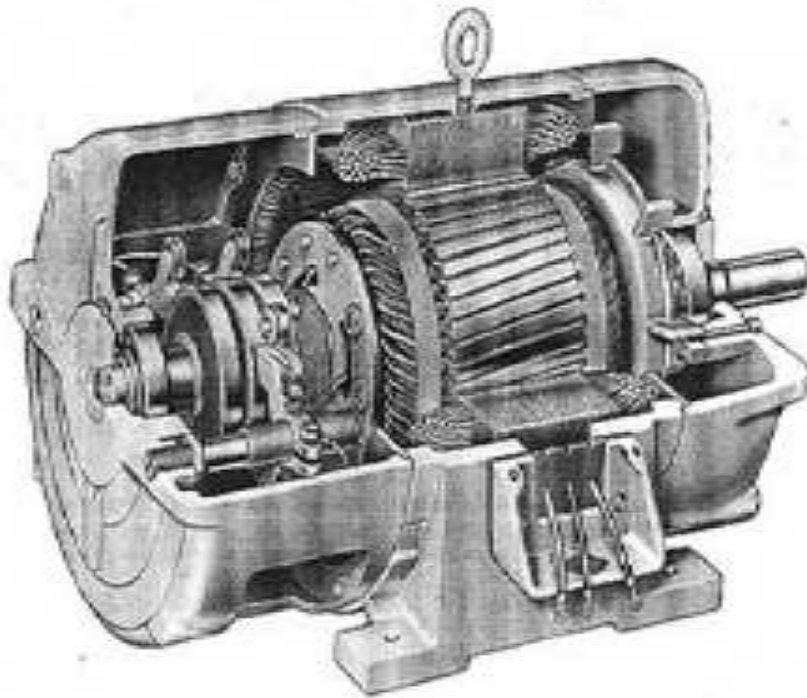
όπως φαίνεται στην φωτογραφία 4.



Φωτογραφία 4 : βραχυκυκλωμένος δρομέας (κλωβού)

Στον δρομέα την φωτογραφίας 4 φαίνονται τα πτερύγια του (fan blades), ο άξονας του (shaft) καθώς και οι χάλκινοι ράβδοι του δρομέα (laminated iron core) με το αλουμινένιο στεφάνι βραχυκύκλωσης (aluminum ring). Ο εκάστοτε βραχυκυκλωμένος δρομέας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε αριθμό πόλων του στάτη. Οι κινητήρες με αυτόν τον δρομέα χρειάζονται μεγάλο ρεύμα εκκίνησης και προσφέρουν μικρή ροπή κατά την εκκίνηση του, κάτι που είναι αρνητικό σε εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζει σε σχέση με εκείνους του δακτυλιοφόρου δρομέα είναι η απλή σχετικά κατασκευή τους και το χαμηλό τους κόστος.

Β) δακτυλιοφόρος δρομέας (τυλιγμένος). Αποτελείται από το τύλιγμα του δρομέα το οποίο τοποθετείται μέσα στα αυλάκια του, ενώ τα δύο τυλίγματα στάτη και δρομέα είναι όμοια μεταξύ τους. Πάνω στα δακτυλίδια, όπως φαίνεται στην φωτογραφία 5, εφάπτονται ισάριθμες ψήκτρες.



Φωτογραφία 5 : Μικρός επαγωγικός κινητήρας.

Στους κινητήρες αυτούς ο αριθμός πόλων του τυλίγματος του δρομέα είναι ίδιος με τον αριθμό πόλων του τυλίγματος του στάτη, ενώ ο αριθμός των φάσεων τους μπορεί να είναι διαφορετικός. Ως προς τον τρόπο λειτουργίας των δύο δρομέων είναι ίδιος μεταξύ τους.

Το τριφασικό τύλιγμα του ακίνητου στάτη των κινητήρων τροφοδοτείται από το δίκτυο με τριφασική εναλλασσόμενη τάση, έτσι σε σχέση με τον ακίνητο στάτη δημιουργεί ένα 'στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο', που στρέφεται με τον σύγχρονο αριθμό στροφών $n_s = (60 \cdot f) / p$. Αυτό το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί μια τάση εξ'επαγωγής στο

ακίνητο τύλιγμα του δρομέα \rightarrow αφού κλείνει κύκλωμα οι αγωγοί του δρομέα διαρρέονται από ρεύμα. Έτσι λοιπόν ρευματοφόροι αγωγοί του δρομέα μέσα στο μαγνητικό πεδίο του στάτη δέχονται δύναμη \leftrightarrow ροπή. Ο δρομέας στρέφεται προς την κατεύθυνση της φοράς περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη και προσπαθεί να φτάσει τον σύγχρονο αριθμό στροφών, ώστε να εξουδετερωθεί η αιτία της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής : $n_2 \rightarrow n_s$

Σημ.: ο δείκτης 2 είναι για τον δρομέα, ο δείκτης s για τον στάτη. Με το σύμβολο p πρόκειται για τον αριθμό πόλων της μηχανής ενώ το f συμβολίζει την συχνότητα εναλλασσόμενου ρεύματος του δικτύου σε Hertz.

Αν επιτευχτεί και οι στροφές του στάτη εξισωθούν με εκείνες του δρομέα $n_2 \rightarrow n_s$ ώστε να μην υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ στάτη και δρομέα \rightarrow τότε δεν θα επάγεται τάση στο τύλιγμα του δρομέα \rightarrow ρεύμα = 0 \rightarrow ροπή = 0

Εγώ θέλω ο κινητήρας μου στον άξονα του όταν είναι και χωρίς φορτίο να παράγει κάποια ωφέλιμη ροπή ώστε να μπορεί να υπερνικήσει τις μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες του, άρα θα πρέπει να υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ δρομέα και στάτη. Εδώ εισάγεται η έννοια της ολίσθησης, που είναι η διαφορά στροφών που δημιουργείται από την σχετική κίνηση μεταξύ δρομέα και στάτη, καθώς ο δρομέας καθυστερεί $n_2 < n_s$, προς τις στροφές στο στάτη. Έτσι ορίζεται η απόλυτη ολίσθηση (S) και η σχετική ολίσθηση που είναι η απόλυτη εκφρασμένη σε ποσοστό επί τοις εκατό (s%)

$$S = \Delta n / n_s \quad \kappa' \quad s\% = \Delta n / n_s * 100$$

Αν ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα τότε η ολίσθηση είναι $S = 0$, ενώ όταν είναι ακίνητος τότε η ολίσθηση $S = 1$

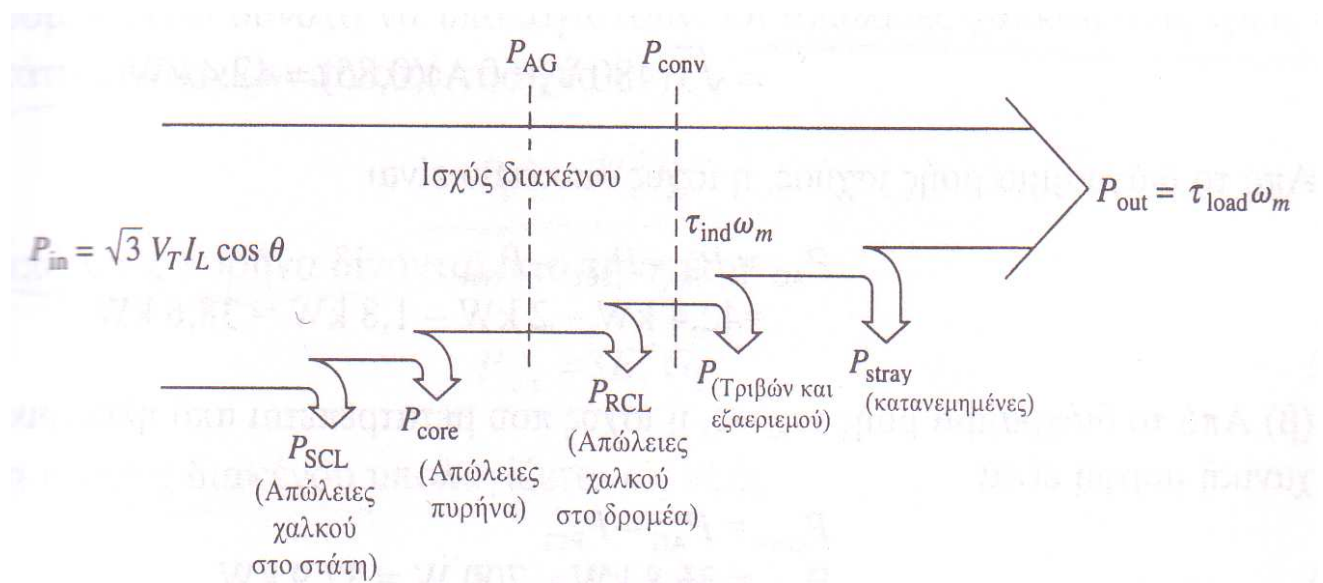
Παρακάτω θα αναφερθούμε στους τρόπους εκκίνησης των κινητήρων καθώς και στην ρύθμιση των στροφών τους.

5.3 Ισχύς και ροπή επαγωγικών κινητήρων και υπολογισμός αυτών.

Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου στον κινητήρα έχει την μορφή τριφασικού συστήματος τάσεων και ρευμάτων και δίδεται από την σχέση 5.1 : $P_{in} = \sqrt{3} V_T * I_L * \cos\theta$

Όπου V_T η ονομαστική τάση του κινητήρα, I_L το ρεύμα του στάτη, ενώ $\cos\theta$ ο συντελεστής ισχύος για επαγωγικό κινητήρα.

Στο σχήμα 5.2 φαίνονται οι απώλειες που υπάρχουν κατά την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας στην είσοδο του κινητήρα σε μηχανική ενέργεια (P_{out}) στην έξοδο του.



Σχήμα 5.2 : διάγραμμα ροής ισχύος επαγωγικού κινητήρα.

Η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα δίδεται από την σχέση 5.2 :

$$n = 120 \cdot f / P \quad (\text{r/min})$$

Όπου P ο αριθμός των πόλων του κινητήρα, ενώ f η συχνότητα του ηλ. δικτύου σε Hertz.

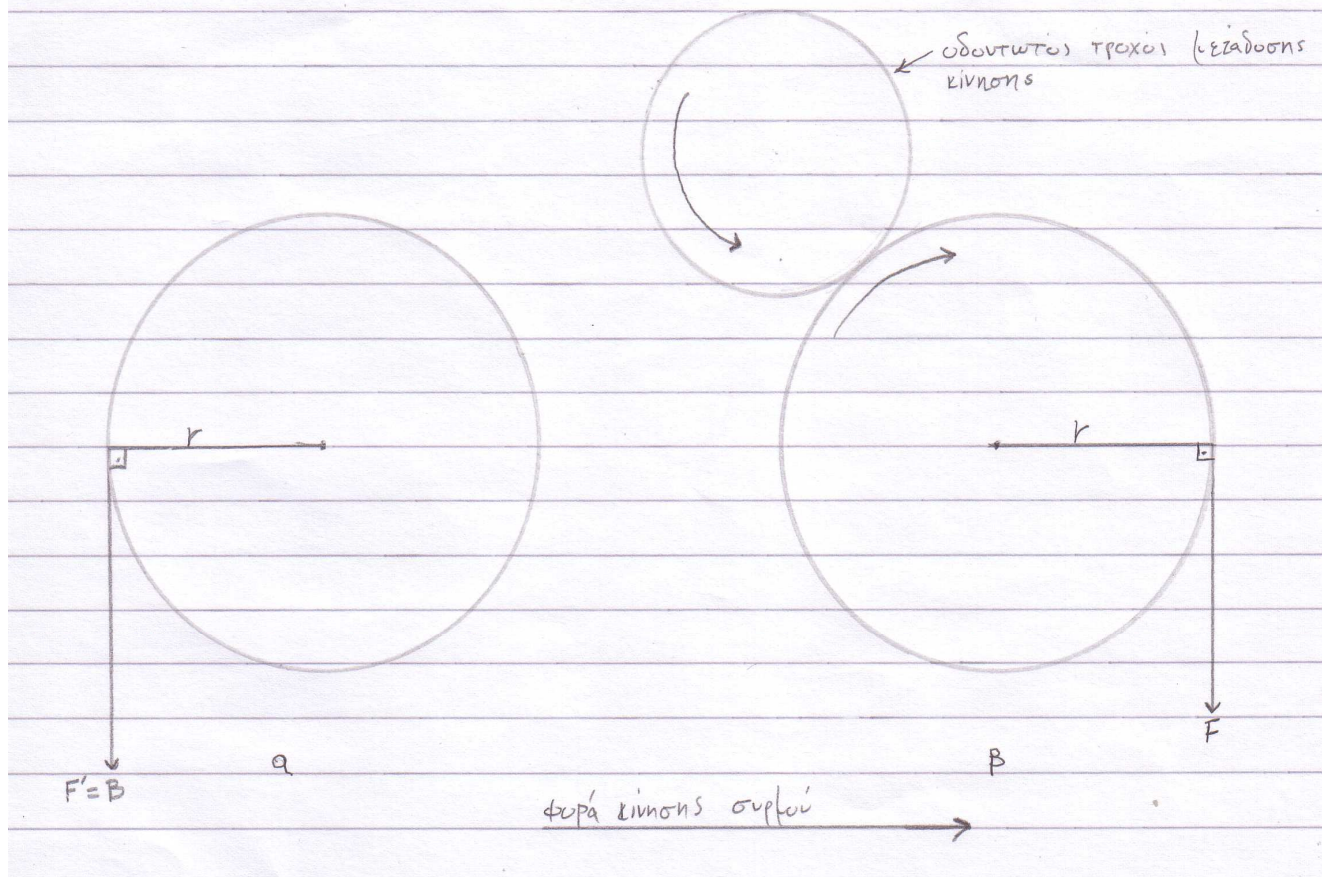
Η σχέση ανάμεσα στην ηλεκτρική ισχύ εισόδου και την μηχανική ισχύ εξόδου φαίνεται στο διάγραμμα ροής ισχύος επαγωγικού κινητήρα, στο σχήμα 5.2. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες τριβών, εξαερισμού και κατανεμημένες απώλειες. Από την άλλη όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του κινητήρα, τόσο μικρότερες οι απώλειες πυρήνα.

Η ροπή (M ή τ_{load}) που ασκείται στον άξονα του δρομέα, η οποία είναι η ροπή εξόδου του κινητήρα, δίνεται από την σχέση : $\tau_{\text{load}} = P_{\text{out}} / \omega_m$ ($\text{Nt} \cdot \text{m}$) (σχέση 5.3)

5.4 Επιλογή κινητήρων σε εφαρμογή έλξης συρμού.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται μια πρόχειρη και απλοϊκή εφαρμογή ηλεκτροκίνητης έλξης και επιλογής του επαγωγικού κινητήρα που χρειάζεται. Στην εφαρμογή αυτή ο συρμός έλξης που εξετάζω κινείται χωρίς να επιταχύνεται, με μία σταθερή ταχύτητα διαγράφοντας ευθύγραμμη ομαλή κίνηση. Στο σχήμα 5.3 που ακολουθεί φαίνεται ένας τροχός έλξης κινητήριου οχήματος συρμού, σε δύο σχήματα α' β'.

Κινητήριος τροχός συρμού έλξης τρένου.



Σχήμα 5.3 : τροχός κίνησης συρμού έλξης.

Στο σχήμα 5.3α φαίνεται η δύναμη του βάρους που ασκείται στον τροχό B(F'), την οποία αν πολλαπλασιάσω με την ακτίνα του τροχού r μου δίνει την ροπή αντίστασης αυτού(M'). Την ροπή αντίστασης M' παίρνω σαν βάση στον υπολογισμό μου καθώς είναι η ροπή φορτίου του κινητήρα. Αφού ο συρμός θα κινείται σε τμήμα χωρίς κλίση (ευθεία) και με σταθερή ταχύτητα τότε η ροπή κίνησης που παράγει ο κινητήρας έλξης(M) θα πρέπει να ισούται με την ροπή αντίστασης M' . Στο σχήμα 5.3β φαίνεται η μετάδοση κίνησης από τον οδοντωτό τροχό στον τροχό έλξης. Η αρχή λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα στηρίζεται στην θεωρία ότι οι ρευματοφόροι αγωγοί

του δρομέα μέσα στο μαγνητικό πεδίο του στάτη δέχονται δύναμη την οποία μεταδίδουν στον άξονα κίνησης και από εκεί μέσω γραναζιού στον τροχό έλξης, και είναι η δύναμη F που φαίνεται στο σχήμα 3β. Για να υπολογίσω την ροπή κίνησης του τροχού σαν απόσταση παίρνω από το σημείο όπου μεταδίδεται η κίνηση, άρα $M = F \cdot l$ όπου $l = 0,8m$, και είναι η απόσταση 'κέντρο με κέντρο' μεταξύ γραναζιού και τροχού έλξης. Όταν η ροπή M που παράγει ο κινητήρας είναι μεγαλύτερη από την ροπή αντίστασης M' τότε έχω επιτάχυνση και ελεύθερη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση.

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζεται με αριθμητική εφαρμογή έλξης συρμού τρένου και επιλογής ηλεκτρικού κινητήρα.

Εφαρμογή: Ηλεκτροκίνητος συρμός, όμοιος με του σχήματος 5.1, περιλαμβάνει 5 κινητήρια οχήματα έλξης. Το καθαρό βάρος όλου του συρμού είναι $10\text{tons} = 10.000 \text{ kgr}$ ενώ έχει χωρητικότητα 110 ατόμων. Αν ο κάθε κινητήριος τροχός έχει ακτίνα $r = 0,5m$. Να βρεθεί η ροπή αντίστασης M' ενός τροχού, αν εξεταστεί μεμονωμένα ένα από τα πέντε οχήματα του συρμού. Η ονομαστική τάση και συχνότητα του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα είναι 380 V και 50 Hz αντίστοιχα. Ο κινητήρας περιλαμβάνει 4 πόλους, συνδέεται σε διάταξη αστέρα και η ολίσθηση(S) του σε πλήρη φόρτιση είναι 5%. Ποια είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα κατά την λειτουργία του με ονομαστικό φορτίο και ποιά η ονομαστική ισχύς του κινητήρα έλξης.

Απάντηση: $n_{\text{sychr.}} = (120 \cdot f) / P = (120 \cdot 50) / 4 = 1500 \text{ rpm}$.

Άρα για τμήμα δικτύου όπου διαγράφεται ευθύγραμμη ομαλή κίνηση η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι:

$n_m = (1-S) \cdot n_{\text{sychr.}} \rightarrow n_m = (1-0,05) \cdot n_s = 0,95 \cdot 1500 = \mathbf{1425rpm}$.

Για να υπολογίσω την ροπή φορτίου T_{load} (ροπή αντίστασης M') θα πρέπει από το συνολικό βάρος του συρμού να βρώ εκείνο που ασκείται στο όχημα που εξετάζω και από εκεί στον τροχό κίνησης για τον οποίο θα βρω την ροπή αντίστασης.

Το συνολικό καθαρό βάρος του συρμού είναι 10.000 kgr ενώ το συνολικό βάρος των επιβατών με πλήρες φορτίο είναι: 110 άτομα * 75(kgr/άτομο) = 8250 kgr. → άρα το μεικτό βάρος όλου του συρμού 18250 kgr. Θεωρώ ότι το συνολικό μεικτό βάρος ισομοιράζεται στα 5 οχήματα του →

18250 kgr/5 οχήματα = 3650 kgr αντιστοιχούν στο ένα κινητήριο όχημα του οποίου εξετάζω τον 1 τροχό κίνησης.

Κοιτάζοντας τα οχήματα του συρμού του σχήματος 1 εξετάζω ένα ακριανό όχημα με παντογράφο το οποίο περιλαμβάνει 3 άξονες κίνησης ↔ 6 τροχούς κίνησης. Άρα

3650 kgr/6 τροχούς = 608 kgr/τροχό = **5965 Nt/τροχό.**

Άρα αφού ξέρω την ακτίνα του τροχού r μπορώ να υπολογίσω την ροπή φορτίου (αντίστασης) : $T_{load} = B_{τροχού} * r = 5965(Nt)*0,5(m) = \mathbf{2983 (Nt*m)}$.

Η ονομαστική ισχύς του κινητήρα είναι γινόμενο της ροπής φορτίου και της ταχύτητας περιστροφής :

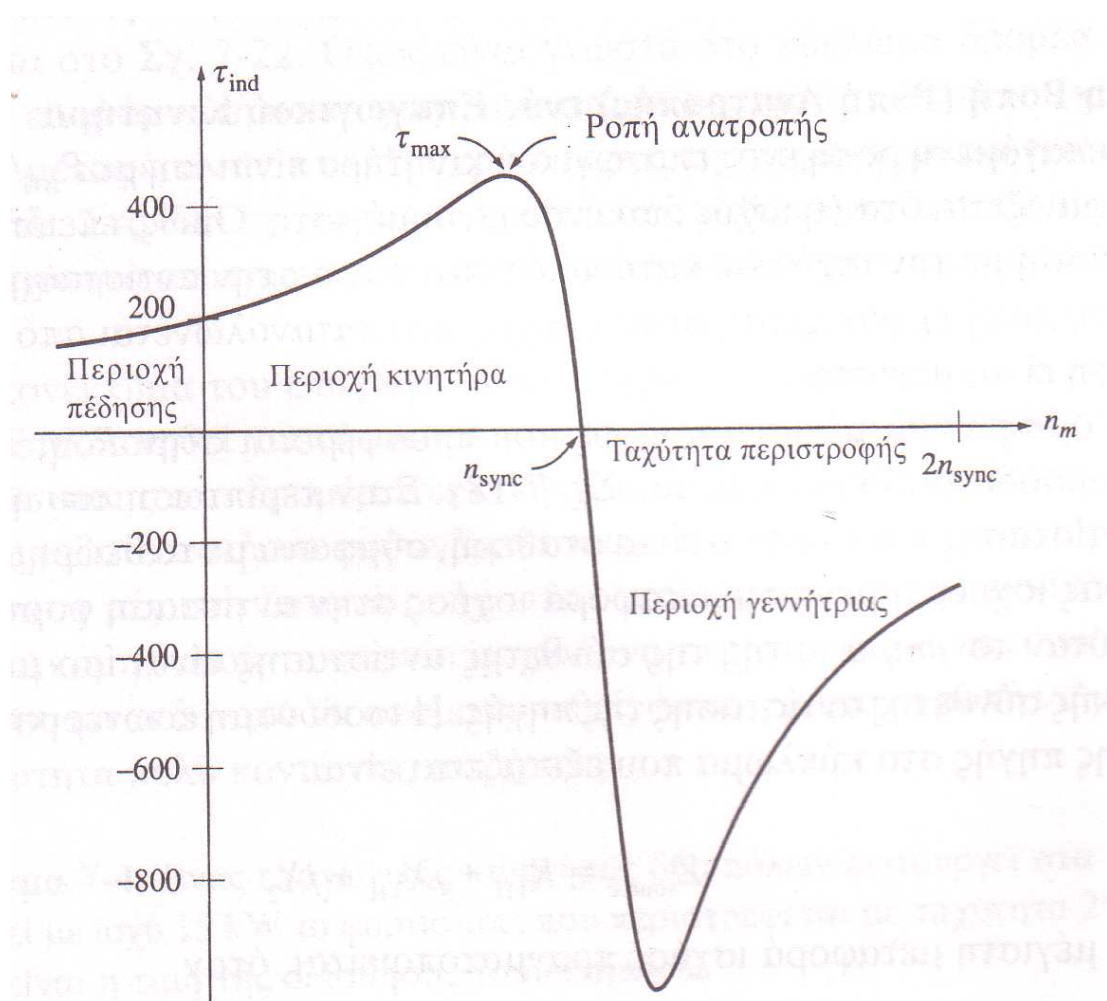
$$P_{out} = n_m * T_{load} \leftrightarrow$$

$$P_{out} = [1425(rpm) * 2\pi(rad/r) * (1min/60sec)] * 2983 (Nt*m) \leftrightarrow$$

$P_{out} = 444.914 \text{ Watts} = \mathbf{445kW}$ είναι η μηχανική ισχύς που απαιτείται για την κίνηση ενός κινητήριου τροχού. Άρα η ονομαστική ισχύς του κινητήρα που θα επιλεγεί για την εφαρμογή αυτή δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από εκείνη των **445kW**.

5.5 Χαρακτηριστική καμπύλη ταχύτητας περιστροφής σαν συνάρτηση επαγόμενης ροπής και ισχύος στους ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες.

Στο παρακάτω σχήμα 5.4 φαίνεται η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα σε διευρυμένες περιοχές λειτουργίας όπως είναι η περιοχή πέδησης στο 2^ο τεταρτημόριο και η περιοχή γεννήτριας στο 4^ο τεταρτημόριο.



Σχήμα 5.4 : χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας .

Εξετάζοντας την καμπύλη του σχήματος 5.4 μπορώ να κάνω τις παρακάτω παρατηρήσεις :

1. Κοιτάζοντας το σχήμα βλέπω ότι όταν ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα τότε η επαγόμενη ροπή που αποδίδεται στον άξονα του είναι μηδενική. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει ολίσθηση ($s = 0$) μεταξύ του στάτη και του δρομέα, ο οποίος συνδέεται με το γρανάζι μετάδοσης κίνησης στον άξονα του συρμού.

$$\text{Άρα : } n_m = (1-s)n_{\text{synchronous}} \rightarrow n_m = (1-0)n_{\text{synchronous}} \rightarrow$$

$$n_m = n_{\text{synchronous}}$$

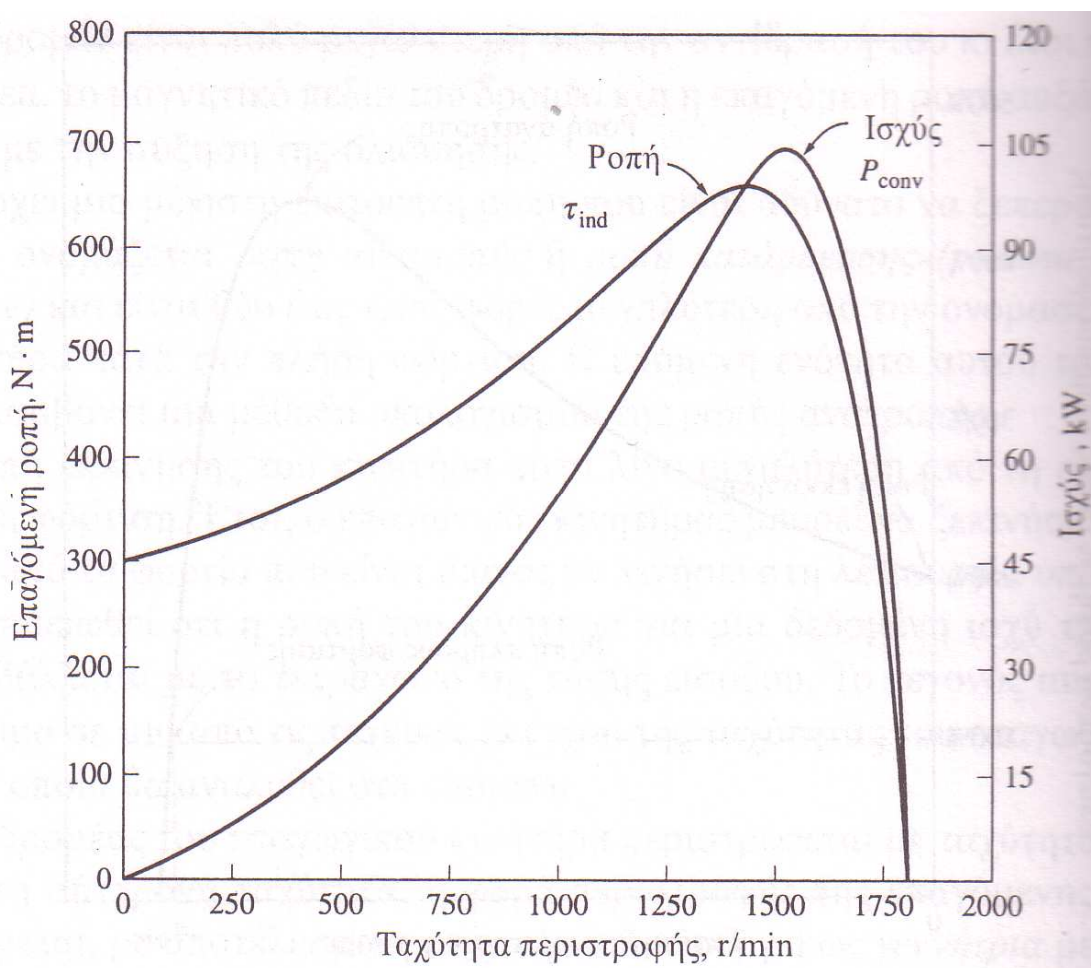
Αφού γίνεται αυτό τότε δεν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του στάτη και του δρομέα \rightarrow δεν επάγεται τάση στο τύλιγμα του δρομέα \rightarrow δεν διαρρέεται από ρεύμα \rightarrow οι αγωγοί του δρομέα δεν δέχονται ροπή.

2. Σε εφαρμογή συρμού έλξης χωρίς έντονες κλίσεις (ανωφέρεις ή κατωφέρεις) μπορεί να δουλέψει ικανοποιητικά καθώς για την κίνηση του συρμού και την επιτάχυνση του, μέσα σε ένα όριο τιμών οι οποίες είναι χαμηλές, όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα αυξάνεται και η ροπή. Δεν είναι κατάλληλος για κίνηση συρμού με έντονη ανωφέρεια, καθώς όταν η ροπή που παρέχει ο κινητήρας μου για να υπερνικήσει την ροπή φορτίου στην ανηφορική κλίση υπάρχει κίνδυνος να υπερβεί την ροπή ανατροπής του. Η τελευταία είναι μεγαλύτερη 2-3 φορές από την ονομαστική ροπή του κινητήρα κατά την πλήρη φόρτιση αυτού.

3. Η ροπή κατά την εκκίνηση του κινητήρα είναι μεγαλύτερη από την ροπή του κατά την πλήρη φόρτιση του, με αποτέλεσμα να μπορεί να ξεκινήσει με οποιοδήποτε από τα φορτία που είναι ικανός να κινήσει σε πλήρη ισχύ.

4. Όταν ο δρομέας περιστρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την σύγχρονη ταχύτητα του, όπως μπορεί να συμβεί σε τμήματα σιδηροδρόμου με κατηφορική κλίση, η φορά περιστροφής της ροπής αντιστρέφεται με αποτέλεσμα η μηχανή να λειτουργεί σαν γεννήτρια παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο.

Στο παρακάτω σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική της ταχύτητας περιστροφής ως συνάρτηση της επαγόμενης ροπής και της μηχανικής ισχύος που προσφέρει ο κινητήρας.



Σχήμα 5.5

Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές του σχήματος 5.5 παρατηρώ ότι η μέγιστη τιμή ισχύος που προσφέρει ο επαγωγικός κινητήρας

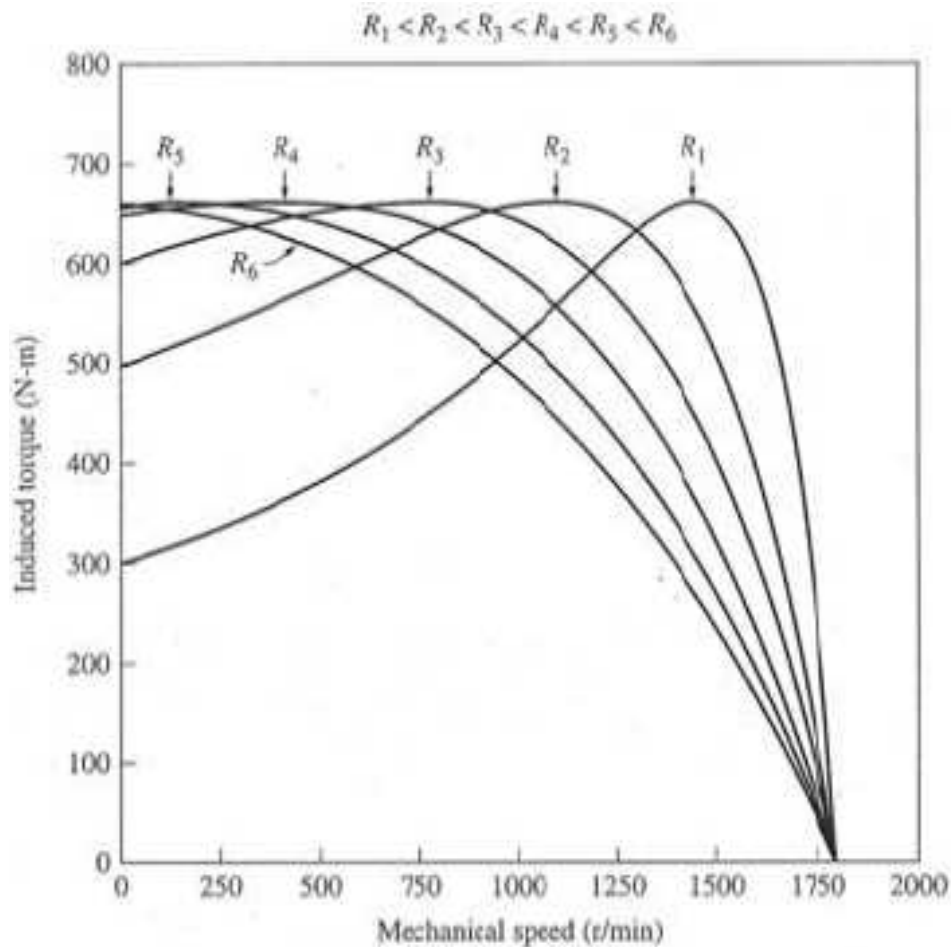
εμφανίζεται σε διαφορετική ταχύτητα από την μέγιστη ροπή του. Επίσης βλέπω ότι η χαρακτηριστική καμπύλη της ισχύος ξεκινάει από την αρχή των αξόνων, έτσι όταν η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (rpm) είναι μηδενική τότε και η μηχανική ισχύς που αποδίδεται στον άξονα σύνδεσης με το γρανάζι για την μετάδοση της στον κύριο άξονα του συρμού είναι μηδέν. Αντίθετα η χαρακτηριστική της επαγόμενης ροπής δεν ξεκινάει από την αρχή των αξόνων.

5.6 Εκκίνηση ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων.

Στις εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης οι επαγωγικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται είναι μεγάλης ισχύος και για αυτό στις περισσότερες περιπτώσεις αυτή γίνεται με αυτομετασχηματιστή. Εκείνος είναι τριών φάσεων και υποβιβάζει την τάση, ώστε ο κινητήρας να ξεκινά με μειωμένη τάση. Η μέθοδος αυτή προκαλεί σημαντική μείωση του ρεύματος εκκίνησης και έχω μικρές ηλεκτρικές απώλειες αλλά έχει ως μειονέκτημα το υψηλό κόστος εγκατάστασης του και το γεγονός ότι μειώνει την ροπή εκκίνησης. Άρα είναι κατάλληλη μέθοδος για περιπτώσεις ομαλού σιδηροδρομικού δικτύου, χωρίς έντονες κλίσεις.

Ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα παρουσιάζει ένα σημαντικό πλεονέκτημα κατά την εκκίνηση του, καθώς στο κύκλωμα του δρομέα του είναι δυνατή η εισαγωγή αντιστάσεων. Έτσι παρατηρώντας το σχήμα 5.6 όταν η τιμή της αντίστασης στον δρομέα αυξάνεται η ταχύτητα ανατροπής μειώνεται ενώ η ροπή ανατροπής μένει σταθερή.

Στο σχήμα 5.6 φαίνονται οι επιπτώσεις της μεταβολής της αντίστασης του δρομέα στη χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας για επαγωγικό κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα.



Σχήμα 5.6

Έτσι σύμφωνα με το σχήμα 5.6 ο κινητήρας αυτός είναι κατάλληλος για την εκκίνηση ισχυρών φορτίων, δηλαδή σε εφαρμογές έλξης με ανηφορική κλίση εκκίνησης του συρμού, όπως απαιτούν οι συνθήκες πολλές φορές σε ορεινούς σιδηροδρόμους με απότομες κλίσεις τμημάτων.

Έτσι η εκκίνηση γίνεται ομαλά με χαμηλή ταχύτητα περιστροφής και μέγιστη ροπή σε αυτήν, ενώ αργότερα μετά από αυτήν αφού το φορτίο αρχίσει να περιστρέφεται κανονικά η πρόσθετη αντίσταση μπορεί να απομακρυνθεί ώστε η μέγιστη ροπή να μετακινηθεί σε μια ταχύτητα πολύ κοντά στη σύγχρονη.

5.7 Ρύθμιση και έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής (στροφών) ασύγχρονων κινητήρων.

Ένας τρόπος ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής γίνεται με την εισαγωγή πρόσθετης αντίστασης στο κύκλωμα του δρομέα του, όπου αλλάζει η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6 και έχει περιγραφεί στην παράγραφο 5.5 αμέσως παραπάνω. Αυτός ο τρόπος ρύθμισης ταχύτητας (στροφών) ισχύει για κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα.

Οι μέθοδοι ρύθμισης των στροφών του δρομέα για ασύγχρονους κινητήρες προκύπτουν από την σχέση 5.4 :

$$n_2 = (60 * f / P) * (1 - S)$$

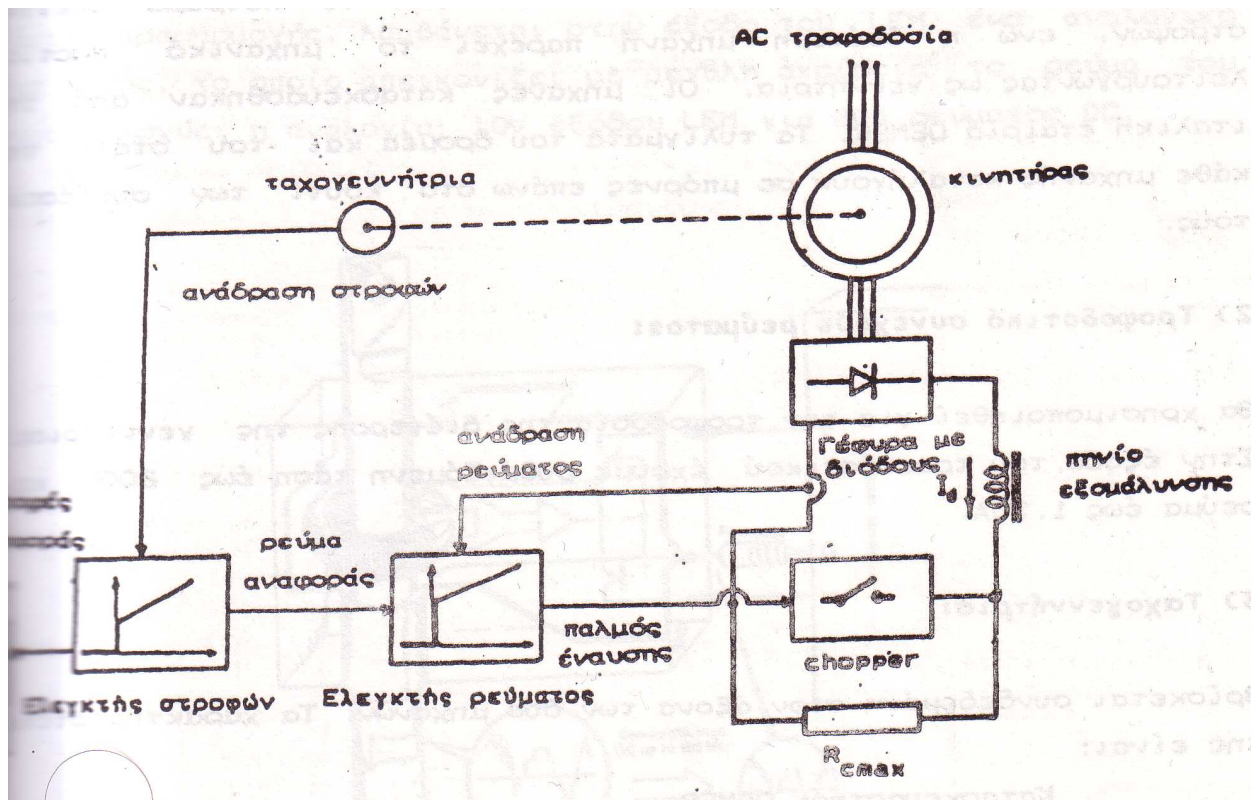
Σύμφωνα με την σχέση 5.4 στις εφαρμογές ηλεκτρικών σιδηροδρόμων όπου χρησιμοποιούνται κινητήρες μεγάλης ισχύος η ρύθμιση μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους :

1. Με αλλαγή του αριθμού των πόλων του κινητήρα. Ένας τρόπος που χρησιμοποιείται στην μέθοδο αυτή, για κινητήρες μεγάλης ισχύος, είναι η εισαγωγή πολλαπλών τυλιγμάτων στον στάτη με διαφορετικό αριθμό πόλων το καθένα και η ενεργοποίηση ενός από αυτά κάθε φορά. Έτσι μπορεί να κατασκευαστεί ένας κινητήρας τριών ή τεσσάρων ταχυτήτων (rpm) και αυτό συμβαίνει επιλέγοντας την μία ή την άλλη ομάδα τυλιγμάτων ανάλογα με την επιθυμητή ταχύτητα. Έτσι με την μέθοδο αυτή και με τον διαφορετικό αριθμό πόλων που έχει το κάθε τύλιγμα η ταχύτητα του στάτη βρίσκεται σε ένα εύρος τιμών. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι του υψηλό κόστος κατασκευής του κινητήρα.

2. Με μεταβολή της ηλεκτρικής συχνότητας της τάσης του δικτύου που εφαρμόζεται στο στάτη του κινητήρα. Η σύγχρονη

ταχύτητα του κινητήρα στις ονομαστικές συνθήκες είναι γνωστή ως βασική ταχύτητα, και με μεταβολή της συχνότητας η ταχύτητα του κινητήρα ρυθμίζεται πάνω ή κάτω από την βασική ταχύτητα. Όταν ο κινητήρας που χρησιμοποιείται για την κίνηση του συρμού έλξης περιστρέφεται με ταχύτητα μικρότερη από την βασική τότε η τάση που εφαρμόζεται στα τυλίγματα του στάτη του κινητήρα θα πρέπει να είναι μικρότερη από την ονομαστική τάση ώστε να είναι ασφαλή η λειτουργία του. Έτσι η μείωση της ηλεκτρικής συχνότητας είναι γραμμική με εκείνη της τάσης εισόδου ώστε να αποφευχθούν μεγάλα επικίνδυνα ρεύματα μαγνήτισης. Όταν η ηλεκτρική συχνότητα που εφαρμόζεται στον κινητήρα ξεπεράσει την ονομαστική τιμή του τότε η τάση συγκρατείται στην ονομαστική τιμή της ώστε να προστατευτεί η μόνωση του κινητήρα.

Παραπάνω περιγράφηκε το πώς γίνεται ρύθμιση στην ταχύτητα περιστροφής (στροφές) επαγωγικού κινητήρα αλλά όχι και αυτόματος έλεγχος αυτής. Αυτό επιτυγχάνεται με την δημιουργία βρόγχου ανάδρασης μέσω μιας ταχογεννήτριας και ενός κυκλώματος chopper όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7: σύστημα αυτομάτου ελέγχου δακτυλιοφόρου κινητήρα με chopper.

Σύμφωνα με το σχήμα 5.7 μέσω της ταχογεννήτριας λαμβάνεται ένα μετρητικό σήμα στροφών και ανατροφοδοτείται στον ελεγκτή στροφών όπου συγκρίνεται με μια τάση αναφοράς. Η έξοδος του ελεγκτή στροφών είναι η τάση που ρυθμίζει την γωνία και παλμό έναυσης, και είναι ανάλογη με την διαφορά της τάσης αναφοράς με την τάση που προκύπτει από την ένδειξη της ταχογεννήτριας. Όταν το σύστημα ισορροπήσει σε ένα αριθμό στροφών η τάση εξόδου από τον ελεγκτή στροφών όπως και η γωνία έναυσης έχει μια σταθερή τιμή που αντιστοιχεί, για ένα συγκεκριμένο φορτίο του κινητήρα έλξης, σε συγκεκριμένο αριθμό στροφών. Αν το φορτίο μεταβληθεί και μεγαλώσει τότε στιγμιαία οι στροφές μειώνονται δημιουργώντας μια πτώση τάσης στην

ταχογεννήτρια αντίστοιχα άνοδο της τάσης του ελεγκτή και έτσι άνοδο των στροφών μέχρι να φτάσει σε σημείο ισορροπίας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7 υπάρχει και ο βρόγχος ανάδρασης ρεύματος, όπου τιμή αναφοράς της έντασης ρεύματος είναι η έξοδος του ελεγκτή στροφών, με τον οποίο ελέγχεται το ρεύμα του δακτυλιοφόρου δρομέα .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΣ ΕΛΞΗΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΑΥΤΗ.

6.1 Σύγκριση των ηλεκτρικών κινητήρων έλξης.

Συγκρίνοντας τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος παρατηρώ ότι σε εφαρμογές έλξης όπου το φορτίο είναι αρκετά μεγάλο, χρήση κινητήρα έλξης σε περιοχές με **ανηφορική κλίση, ο κινητήρας διέγερσης σειράς είναι καταλληλότερος.** Αυτό προκύπτει καθώς με μικρή αύξηση του ρεύματος του επαγωγικού τυμπάνου, το οποίο αυξάνει ανάλογα με την αύξηση του φορτίου και της ανηφορικής κλίσης, *η ροπή στρέψης του κινητήρα παρουσιάζει μεγάλη αύξηση.* Αυτό τον κάνει χρήσιμο κατά την εκκίνηση συρμού. Το στάδιο **εκκίνησης για κάθε είδους κινητήρα Σ.Ρ είναι δύσκολο** καθώς η ένταση ρεύματος παίρνει αρκετά μεγάλες τιμές. Αυτή επιτυγχάνεται με την προσθήκη αντιστάσεων σε σειρά με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου ώστε να μειωθεί το ρεύμα εκκίνησης, σε ένα βαθμό που η αναλογικά με αυτό μειωμένη ροπή να μου προσφέρει ικανοποιητική ομαλή εκκίνηση. Σε τμήμα σιδηροδρόμου με **σταθερή ευθεία** χωρίς μεγάλη κλίση, όπου θέλω να έχω **ευθύγραμμη ομαλή κίνηση**, ή με μία μικρή ανηφορική κλίση τότε είναι καταλληλότεροι οι κινητήρες **παράλληλης (ή ξένης) διέγερσης** καθώς εξασφαλίζουν σταθερή ταχύτητα κίνησης του συρμού. Επιπλέον οι κινητήρες αυτοί, *ξένης και παράλληλης διέγερσης* έχουν χαμηλό κόστος συντήρησης καθώς οι μικρές αυξομειώσεις ροπής δημιουργούν μικρές φθορές σε αυτούς. Είναι κατάλληλοι για κίνηση συρμού σε *κατηφορική κλίση*, καθώς αν κοιτάξω την διευρυμένη γραφική σε άξονες στροφές – ρεύμα επαγωγικού τυμπάνου, καθώς η λειτουργία του μεταφέρεται στο δεύτερο τεταρτημόριο και δουλεύει σαν γεννήτρια αφού το μέγεθος

της ροπής έχει αρνητικό πρόσημο επομένως και η ισχύς. Σε μια πρόχειρη σύγκριση τους προτιμούνται οι κινητήρες Σ.Ρ παράλληλης διέγερσης από τους ξένης καθώς οι δεύτεροι έχουν υψηλότερο κόστος λόγω της απαίτησης τους να έχουν ξεχωριστό τροφοδοτικό Σ.Ρ για την διέγερση τους.

Οι κινητήρες Σ.Ρ σύνθετης διέγερσης, με ενισχυτική διάταξη, έχουν μια ευελιξία ως προς την χρήση τους καθώς μπορούν να δουλέψουν όπως οι κινητήρες παράλληλης και ξένης διέγερσης για κίνηση συρμού σε περιοχές με μικρή κλίση ενώ για έντονη ανηφορική κλίση έχουν όμοια συμπεριφορά με τους κινητήρες διέγερσης σειράς.

Συνοψίζοντας όσον αφορά τους κινητήρες Σ.Ρ βλέπω ότι κάθε ένας τύπος από αυτούς παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά και για τον λόγο αυτό έχουν μεγάλη χρήση σε εφαρμογές ηλεκτρικών σιδηροδρόμων.

Κάνοντας μια σύγκριση μεταξύ κινητήρων συνεχούς ρεύματος και των ασύγχρονων τριφασικών εναλλασσομένου βρίσκω τις εξής διαφορές :

1. Η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής (στροφών) στους κινητήρες Σ.Ρ γίνεται με ευκολότερο τρόπο από τους επαγωγικούς κινητήρες, χωρίς την χρήση ηλεκτρονικών, και αυτό τους κάνει πιο εφαρμόσιμους.
2. Η ροπή εκκίνησης για έναν ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα είναι λίγο μεγαλύτερη κατά την ροπή του σε πλήρη φόρτιση, ώστε να μπορεί να ξεκινήσει (με φορτίο που είναι ικανός να κινήσει) σε πλήρες φορτίο.
3. Οι επαγωγικοί κινητήρες έχουν καλύτερο βαθμό απόδοσης από τους κινητήρες Σ.Ρ ίδιας ισχύος. Στους κινητήρες Σ.Ρ

εμφανίζονται περισσότερες απώλειες σε σχέση με τους επαγωγικούς. Τέτοιες είναι οι απώλειες χαλκού στην διέγερση, οι απώλειες χαλκού στο δρομέα κατά την πλήρη φόρτιση και τις μηχανικές απώλειες.

4. Μέρος των απωλειών σε κινητήρες Σ.Ρ εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας τους, καθώς η λειτουργία των επαγωγικών κινητήρων είναι απλούστερη και στηρίζεται στο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο όπως έχει περιγραφεί. Έτσι οι επαγωγικοί κινητήρες έχουν σχετικά απλή κατασκευή → χαμηλό κόστος κατασκευής ↔ χαμηλότερο κόστος συντήρησης από τους αντίστοιχους Σ.Ρ.

5. Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος θεωρούνται καταλληλότεροι για τμήμα σιδηροδρόμου μεγάλου μήκους σε αντίθεση με εκείνους συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιούνται περισσότερο για μικρότερα τμήματα.

6. Η ωφέλιμη διάρκεια ζωής των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων μεγάλης ισχύος που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροκίνηση εξαρτάται από τον αριθμό των εκκινήσεων τους, καθώς είναι επιρρεπείς σε ζημιές που προκαλούν οι συχνές εκκινήσεις. Σε αυτόν τον τομέα πλεονεκτούν οι κινητήρες Σ.Ρ καθώς έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, κάτι που τους κάνει να χρησιμοποιούνται συνεχώς.

7. Στους επαγωγικούς κινητήρες ο στάτης παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή σε υγρασία και σε σκόνη σε σχέση με τον στάτη των κινητήρων Σ.Ρ.

Κάποια κοινά χαρακτηριστικά που μπορεί να έχουν μεταξύ τους οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες με κάποιον τύπο κινητήρα συνεχούς ρεύματος κατά την λειτουργία του σε

εφαρμογή έλξης ηλεκτρικού σιδηροδρόμου είναι τα παρακάτω:

-Οι επαγωγικοί κινητήρες παρέχουν αναγεννητική πέδηση καθώς μπορούν να τροφοδοτήσουν την ηλεκτρική ενέργεια πίσω στο δίκτυο που τους την παρέχει, κάτι που τους κάνει κατάλληλους για ορεινούς σιδηροδρόμους. Αυτό φαίνεται στην χαρακτηριστική του σχήματος 5.4 καθώς όταν ο δρομέας του επαγωγικού κινητήρα περιστρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την σύγχρονη η φορά περιστροφής της ροπής αντιστρέφεται με αποτέλεσμα η μηχανή να δουλεύει σαν γεννήτρια. Έτσι όταν ο συρμός κινείται σε τμήμα με κατηφορική κλίση η ροπή έχει αρνητική τιμή, λόγω της δύναμης από την βαρύτητα που της ασκείται, η μηχανή σαν γεννήτρια πλέον μετατρέπει την μηχανική αυτή ενέργεια σε ηλεκτρική. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει στους κινητήρες Σ.Ρ παράλληλης και ξένης διέγερσης, αν δούμε την χαρακτηριστική ροπή – στροφές.

- Στους επαγωγικούς κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα εάν παρεμβάλλω πρόσθετη αντίσταση στον δρομέα του μετατίθεται η χαρακτηριστική της ροπής - ταχύτητας, έτσι ώστε η μέγιστη ροπή να εμφανίζεται σε χαμηλή ταχύτητα περιστροφής. Με αυτόν τον τρόπο αυτό μπορώ να εκμεταλλευτώ την μέγιστη ροπή του κινητήρα κατά την εκκίνηση του, όπου θέλω μεγάλη ροπή. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι οι μεγάλες ηλεκτρικές απώλειες που εμφανίζονται. Αυτό το πλεονέκτημα της υψηλής ροπής κατά την εκκίνηση του έχει και ο κινητήρας Σ.Ρ διέγερσης σειράς, κάτι που φαίνεται από την χαρακτηριστική ρεύματος – ροπής του που είναι μια παραβολή, από την οποία φαίνεται ότι αυτός έχει καλή δυναμική συμπεριφορά.

6.2 Συμπεράσματα από τα παραπάνω.

Στις εφαρμογές ηλεκτροκίνητης έλξης **πριν το 2000** στο ελληνικό σιδηροδρομικό δίκτυο χρησιμοποιούνταν κυρίως για την πρόωση του συρμού έλξης **κινητήρες συνεχούς ρεύματος**. Η ονομαστική τάση των κινητήρων αυτών σε πολλές εφαρμογές είναι 750 V ενώ η ισχύς τους, όπως ισχύει και για τους επαγωγικούς κινητήρες, εξαρτάται από το *βάρος του συρμού* και την *ροπή αντίστασης* η οποία είναι ανάλογη αυτού. Η διάταξη ανόρθωσης του εναλλασσόμενου ρεύματος δικτύου επιτυγχάνεται με κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος, όπως έχω αναφέρει στο δεύτερο κεφάλαιο. Έτσι με γέφυρα πλήρους ανόρθωσης αποτελούμενη από διόδους ή ελεγχόμενους ανορθωτές πυριτίου γίνεται η ανόρθωση του εναλλασσόμενου ρεύματος δικτύου σε συνεχές, με όσο το δυνατόν ομαλότερη κυμάτωση. Αφού γίνει η μετατροπή τροφοδοτεί μέσω τρίτης σιδηροτροχιάς συνήθως τον κινητήρα έλξης. **Μετά το 2000** ευνοήθηκε από την εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος η **χρήση επαγωγικών κινητήρων έλξης**, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν σε πολλές εφαρμογές και μία από αυτές φαίνεται στο σχήμα 1 της παραγράφου 5.1. Σημαντικό ρόλο στην έλξη του συρμού έχει το βάρος του, το οποίο προσπαθώ να **ελαχιστοποιήσω** με τα κατάλληλα υλικά κατασκευής του συρμού έλξης. Σε παλαιότερες εφαρμογές το κύριο υλικό κατασκευής αμαξώματος ήταν ο *κοινός χάλυβας (κράμα σιδήρου – άνθρακα)*, ο οποίος παρουσιάζει μεγάλη μηχανική αντοχή και είναι το πιο διαδεδομένο υλικό στην βιομηχανία. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες προτιμάται ο *ανοξείδωτος χάλυβας*, κύριο υλικό κατασκευής αμαξώματος του μετρό Αθήνας, εξαιτίας των βελτιωμένων ιδιοτήτων του ως προς τον κοινό χάλυβα. Τα χαρακτηριστικά του είναι ότι έχει

μεγαλύτερη μηχανική αντοχή, καλύτερη αντοχή στην διάβρωση και δεν ευνοεί την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών. Επιπλέον σε ορισμένα αμαξώματα το υλικό μπορεί να είναι *αλουμίνιο (αργίλιο)* το οποίο δεν παρουσιάζει την ίδια μηχανική αντοχή με τον χάλυβα αλλά είναι πιο ελαφρύ αρκετά. Όπως είδαμε και στην παράγραφο 5.3 το βάρος του συρμού έχει σημαντικό ρόλο στην επιλογή κινητήρα έλξης και για τον λόγο αυτό προσπαθώ με την χρήση κατάλληλων υλικών να το μειώσω χωρίς όμως να επηρεαστεί η μηχανική αντοχή του συρμού σε καταπονήσεις.

Από την εξέταση των βασικών χαρακτηριστικών για κάθε κινητήρα, από τους οποίους έχω ασχοληθεί στην εργασία αυτή παρατηρώ ότι ο καθένας παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά στα μεγέθη ταχύτητα περιστροφής – ροπή κινητήρα. Έτσι προσπάθησα να ερμηνεύσω την συμπεριφορά του κάθε τύπου κινητήρα για το κάθε τμήμα σιδηροδρομικού δικτύου ως προς αυτά τα δύο κυριότερα μεγέθη, και να καταλήξω σε κάθε εφαρμογή ποιος τύπος είναι καταλληλότερος. Όλοι οι κινητήρες κατά την εκκίνηση τους έχουν το μειονέκτημα ότι **‘τραβούν’ υψηλό ρεύμα** από το δίκτυο, και αυτό μπορεί να δημιουργήσει **βύθιση τάσης**. Είδαμε τον τρόπο ρύθμισης των στροφών για τον κάθε τύπο κινητήρα και τα συστήματα έλεγχου της ταχύτητας τους. Μελετώντας την χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – στροφών για κάθε τύπο κινητήρα Σ.Ρ παρατηρώ ότι σε όλες τις γραφικές όταν υπάρχει **αύξηση του μεγέθους της ροπής οι στροφές σύμφωνα με την γραφική μειώνονται** ή το αντίστροφο. Στους επαγωγικούς κινητήρες αντίθετα, μελετώντας την αντίστοιχη γραφική καμπύλη ροπής – στροφών, βλέπω ότι αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα οδηγεί σε αντίστοιχη

αύξηση της ροπής, ως το σημείο της ροπής ανατροπής. Αυτό το χαρακτηριστικό κάνει τους επαγωγικούς κινητήρες να έχουν μεγάλη εφαρμογή στην ηλεκτροκίνητη έλξη.

6.3 Βιβλιογραφία.

STEPHEN J. CHARMAN: ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC – DC. (3^η ΕΚΔΟΣΗ ΤΖΙΟΛΑ)

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΡΟΥΜΠΕΛΑΚΗΣ : ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ – ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΘΕΩΡΙΑΣ.

ΣΤΑΜΑΤΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.

ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΤΟΥΛΟΓΛΟΥ – ΒΑΓΓΕΛΗΣ ΣΤΕΡΓΙΟΥ: ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ Συνεχούς και Εναλλασσόμενου Ρεύματος. (Εκδόσεις “ΙΩΝ”)

CHARLES I. HUBERT: ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ (ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΙΩΝ σε επιμέλεια Θεόδωρος Θεοδουλίδης – Νίκος Κολλιόπουλος)

ΕΓΓΡΑΦΟ : ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΛΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ από το Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.

Αναφορές εγγράφου από : DESIRO OSE Gr. Komponentenschulung Traktion/ASG (2004)“

Andreas Steimel: „Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energie Versorgung

ΕΓΓΡΑΦΟ : ΔΙΠΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗΣ 750 V DC / 25 kV AC ΓΙΑ ΕΙΔΙΚΟΥΣ ΣΥΡΜΟΥΣ ΜΕΤΡΟ ΔΙΠΛΗΣ ΤΑΣΕΩΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΟΧΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΛΞΗΣ και αναφορά από αυτό : ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ, «Προδιαγραφές Επιδόσεων Συρμών σειράς II, διπλής τάσης DV» κεφ. 11 & 24, αναθ. Α, Μαρ. 2002

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ :

www.raiway-technical.com.

www.users.teilar.gr/trogadas/MIXANES/...ergastirio AC

[www.library.tee.gr/digital/m 2102](http://www.library.tee.gr/digital/m_2102)

[iiu.teicav.edu.gr/iiw/courses.](http://iiu.teicav.edu.gr/iiw/courses)

www.ametro.gr

www.eng.ucy.ac.cy/elias

