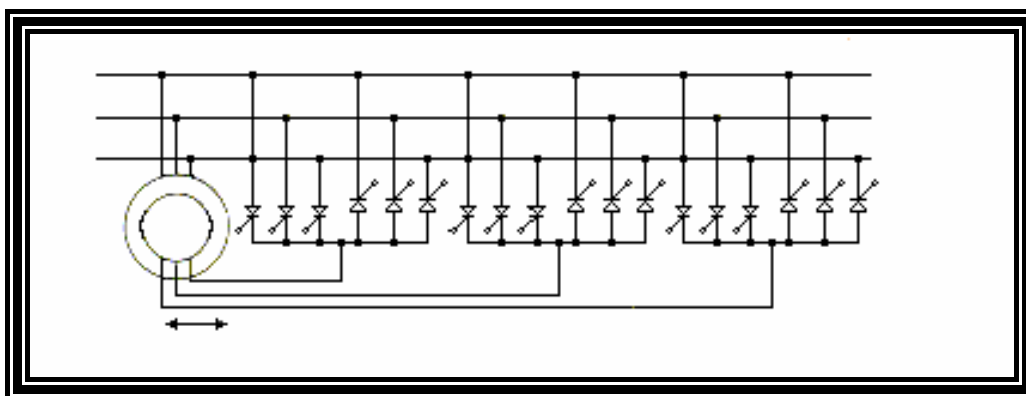


ΤΕΙ ΛΑΡΙΣΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

## ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

### ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ – ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ



Ν.Π. ΤΡΩΓΑΔΑ  
ΔΙΠΛ.ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΥ  
ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ Α.Π.Θ.

## Περιεχόμενα

### Ενότητα 1<sup>η</sup>

Κατασκευαστικά	5
Τυλίγματα ασύγχρονων μηχανών	7
Ισοδύναμο κύκλωμα	11
Τελικό απλοποιημένο κύκλωμα	14
Ποια μεγέθη επιδρούν στη λειτουργία του κινητήρα	21
Εκκίνηση ευστάθεια	23
Χρόνος εκκίνησης	24
Απώλειες θερμότητας κατά την εκκίνηση	27
Μέθοδοι εκκίνησης ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα	28
Εκκίνηση Υ/Δ σε ασύγχρονους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα	29
Εκκίνηση με αντίσταση στον στάτη	31
Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή	32
Εκκίνηση με μια μόνο αντίσταση στο στάτη	33
Εκκίνηση με ηλεκτρικό ρυθμιστή τάσης	33
Εκκίνηση με μετατροπέα συχνότητας	33
Κατασκευές κινητήρων για βελτίωση των συνθηκών εκκίνησης	33
Ασύγχρονοι κινητήρες με διπλό κλωβό	34
Πέδηση των ασύγχρονων κινητήρων	35
Κινητήρας συνδεσμολογίας DAHLANDER	36
Κινητήρες AC με συλλέκτη	37
Η εκκίνηση και η λειτουργία του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα σε μονοφασικό δίκτυο	39

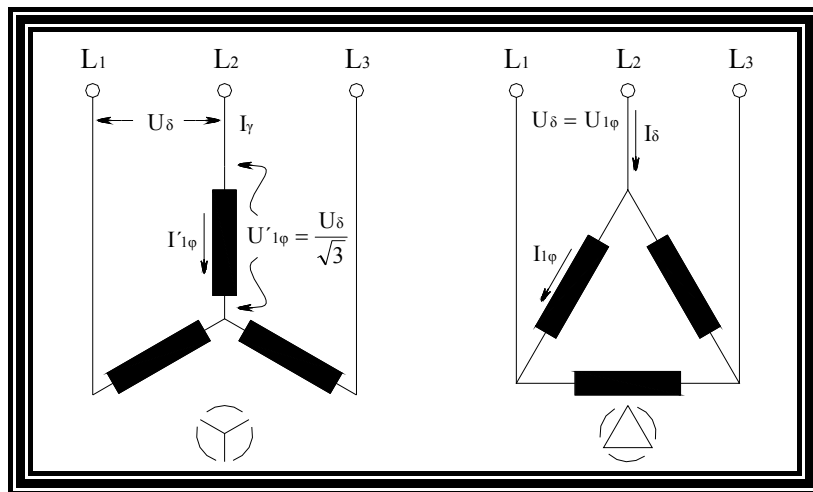
### Ενότητα 2<sup>η</sup>

Σύγχρονη μηχανή με κατανεμημένους πόλους	57
Εξισώσεις λειτουργίας και ισοδύναμο κύκλωμα	60
Φόρτιση της μηχανής σε ένα στερεό δίκτυο	64
Το φαινόμενο της αντίδρασης του τυμπάνου	66
Βραχυκύκλωση της σύγχρονης μηχανής	66
Προσδιορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών της σύγχρονης γεννήτριας	68
Η χαρακτηριστική χωρίς φορτίο (XXΦ)	69
Χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης (XB)	69
Προσδιορισμός της σύγχρονης αντίδρασης (Xd)	70
Λειτουργικές χαρακτηριστικές στάσιμης κατάστασης	71
Καμπύλες V	72

Παράλληλη λειτουργία γεννητριών EP	72
Τρόπος διέγερσης των σύγχρονων μηχανών	74
Διέγερση με διόδους και τριφασική γεννήτρια	75
Διέγερση με θυρίστορ	76
Γεννήτριες έκτυπων πόλων	77
Εξίσωση τάσεων ρεύματος	78
Ισχύς γεννητριών	79
Έλεγχος σύγχρονου κινητήρα	81
Μονοφασικοί κινητήρες EP με συλλέκτη	85
Κινητήρας μαγνητικής αντίδρασης	86
Κινητήρας μαγνητικής υστέρησης	86
Κινητήρας UNIVERSAL	87
Βηματικοί κινητήρες	87
Λυμένες ασκήσεις	89

# ΕΝΟΤΗΤΑ 1<sup>η</sup>

## ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ



## ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ

Οι ασύγχρονες μηχανές ονομάζονται επαγωγικές μηχανές. Η ασύγχρονη μηχανή αποτελείται από ένα ακίνητο μέρος του στάτη και από ένα κινητό το δρομέα. Ο στάτης φέρει στο εσωτερικό του μέρος αυλακώσεις μέσα στις οποίες τοποθετείται ένα τύλιγμα ( μονοφασικό, διφασικό, τριφασικό ). Το τύλιγμα αυτό παίρνει ρεύμα από το δίκτυο και δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο εξ' επαγωγής δημιουργεί ρεύματα στον δρομέα. Τα ρεύματα αυτά μαζί με το πεδίο που τα δημιούργησε προκαλούν δυνάμεις και κατά συνέπεια ηλεκτρομαγνητική ροπή, με την επίδραση της οποίας ο δρομέας περιστρέφεται.

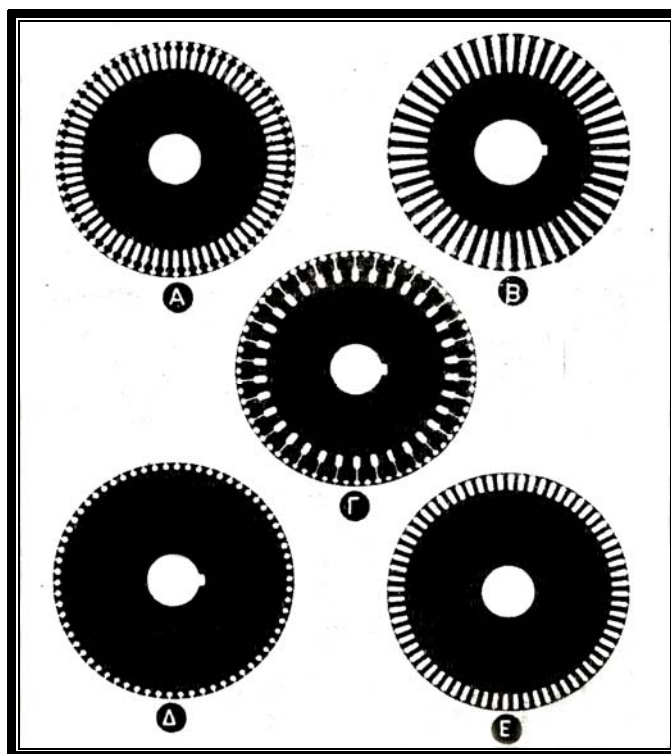
Οι αυλακώσεις του στάτη μέσα στις οποίες τοποθετείται το τύλιγμα έχουν κατάλληλο σχήμα και αυτές που συναντάμε σήμερα είναι αυλακώσεις κατά το μισό ανοιχτές και στον δρομέα ανοιχτές κατά το μισό ή τελείως κλειστές. Η καλύτερη περίπτωση είναι οι αυλακώσεις να είναι κλειστές αλλά αυτό συνεπάγεται δύσκολη τοποθέτηση των αγωγών μέσα σ' αυτές.

Όσο μικραίνει το άνοιγμα μιας αυλάκωσης τόσο μικρότερη γίνεται η σκέδαση και τόσο μεγαλύτερη ασφάλεια έχουμε έναντι των φυγοκεντρικών δυνάμεων.

Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της μηχανής τόσο πιο δύσκολα γίνονται τα πράγματα, γιατί μεγαλώνουν οι δυσκολίες στην τοποθέτηση των τυλιγμάτων και η μηχανή γίνεται αντιοικονομική.

Στον στάτη όμως συναντάμε και ανοιχτές αυλακώσεις. Αυτό συμβαίνει για μηχανές υψηλής τάσης (π.χ 6 KV) όπου τα τυλιγματα απαιτούν ενισχυμένη μόνωση, αυτά κατασκευάζονται εκτός της μηχανής και τοποθετούνται μέσα στις αυλακώσεις.

Στο σχήμα παρακάτω φαίνονται διάφορες αυλακώσεις του δρομέα και για τις οποίες θα πούμε περισσότερα σε επόμενο κεφάλαιο.



Οι τοποθετήσεις των τυλιγμάτων στις αυλακώσεις γίνεται με τους εξής τρόπους:

1) Η περιέλιξη γίνεται εκτός της μηχανής χρησιμοποιώντας ένα καλούπι. Αφού πάρει την τελική του μορφή τότε εισάγεται στις αυλακώσεις.

2) Η περιέλιξη γίνεται επάνω στη μηχανή

Για να γίνει η περιέλιξη με τους δύο παραπάνω τρόπους, πρέπει οι αυλακώσεις να είναι τουλάχιστον στο μισό ανοιχτές.

3) Τα τυλίγματα παίρνουν την πλήρη μορφή τους έξω από τη μηχανή μονώνονται και τοποθετούνται κατευθείαν μέσα στις αυλακώσεις οι οποίες πρέπει να είναι τελείως ανοιχτές. Σήμερα χρησιμοποιούνται περιελκτικές μηχανές για όλη την περιέλιξη χωρίς να παρεμβαίνει, αν αυτό γίνεται για μηχανές μέχρι 10KW

Η πιο απλή μορφή από αυτές που αναφέραμε είναι η τελείως ανοιχτές αλλά έχει μειονεκτήματα.

α) Όταν το διάκενο μεταξύ στάτη δρομέα είναι σταθερό μεγαλώνει το ρεύμα μαγνήτισης, όσο μεγαλώνει το στόμιο των αυλακώσεων. Γι' αυτό όπως είπαμε προηγουμένως χρησιμοποιείται ο τύπος αυτός για μηχανές υψηλής τάσης.

β) Προκαλούν διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου που θέλουμε να έχουμε στο διάκενο, επειδή το διάκενο δεν είναι σταθερό λόγω των αυλακώσεων, και παρουσιάζει διακυμάνσεις οι οποίες προκαλούν διακυμάνσεις στην μαγνητική αντίσταση. Είναι δηλαδή η μαγνητική αντίσταση μεταβαλλόμενη. Οι διακυμάνσεις αυτές προκαλούν αυξημένες απώλειες στον δρομέα και επί πλέον δημιουργηθούν ανώτερες αρμονικές στην ηλεκτρομαγνητική ροπή. Τώρα όσον αφορά το τύλιγμα του δρομέα, αυτό μπορεί να έχει τις ακόλουθες μορφές.

α) Έχουμε βραχυκυκλωμένο δρομέα

β) Έχουμε δρομέα με δακτυλίους

α) Ασύγχρονη μηχανή με κλωβό.

Στο σχήμα βλέπουμε ένα κλωβό ο οποίος παριστάνει την πιο απλή μορφή τυλιγματος.

Μέσα στις αυλακώσεις χύνεται ρευστό αλουμίνιο, το οποίο αποτελεί τον ηλεκτρικό αγωγό. Ο αγωγός αυτός που μπορεί να είναι από χαλκό ή αλουμίνιο δεν είναι μονωμένος με τον σίδηρο. Τα ρεύματα ρέουν μέσα από την αγωγιμότητα του σιδήρου.

Μόνωση έχουμε όταν ο κλωβός αποτελείται από μπάρες, γιατί στην περίπτωση αυτή δεν έχουμε χύτευση και οι αγωγοί είναι έτοιμοι και τοποθετούνται μετά στις αυλακώσεις.

β) Ασύγχρονη μηχανή με δακτυλίους.

Ο δρομέας της μηχανής αυτής φέρει αυλακώσεις μέσα στις οποίες τοποθετείται ένα τριφασικό τύλιγμα όμοιο με του στάτη, τα άκρα του επάνω συνδέονται με τους τρεις δακτυλίους. Στους δακτυλίους εφάπτονται ψήκτρες που συνδέονται με ένα εξωτερικό κύκλωμα τριών ωμικών αντιστάσεων που είναι συνδεδεμένες σε αστέρα.

γ) Δρομέας χωρίς αυλακώσεις

Αν ο δρομέας αυτός κατασκευαστεί από σίδηρο χωρίς αυλακώσεις, τότε από γνωστή θεωρία αναπτύσσονται δινορεύματα τα οποία μαζί με το μαγνητικό πεδίο προκαλούν μια ροπή. Τέτοιοι δρομείς χρησιμοποιούνται για μηχανές με μεγάλο αριθμό στροφών (10000 [rpm]) γιατί παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή κατά των φυγοκεντρικών δυνάμεων

Στο σχήμα βλέπουμε τα εξαρτήματα μιας αποσυναρμολογημένης μηχανής

## ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΑΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Η διαφορά των τυλιγμάτων της μηχανής συνεχούς ρεύματος με αυτήν των τυλιγμάτων της μηχανής εναλλασσομένου ρεύματος έγκειται στην κατασκευαστική διαφορά των δυο μηχανών. Δηλαδή στις ασύγχρονες μηχανές οι συνδέσεις μεταξύ κάθε μιας πλευράς ενός πηνίου με ένα τομέα του συλλέκτη δεν υπάρχει συλλέκτης όπως στην μηχανή συνεχούς ρεύματος που μαζί με τις ψήκτρες παίζει τον ρόλο του μηχανικού ανορθωτή τάσης.

Ο στάτης των μηχανών μονοφασικού, τριφασικού ρεύματος φέρει αυλακώσεις μέσα στις οποίες τοποθετούνται οι πλευρές των πηνίων, τα οποία αποτελούν το τύλιγμα εναλλασσομένου ρεύματος.

Όπως στις μηχανές συνεχούς ρεύματος έτσι και εδώ διακρίνουμε τυλίγματα απλής και διπλής στρώσης, δηλ. σε κάθε αυλάκι βρίσκονται μια ή δυο πλευρές πηνίων. Τα τυλίγματα με μια στρώση είναι απλούστερα στην κατασκευή τους και συνεπώς εύκολη η διόρθωση και η επισκευή τους εν αντιθέσει με τα διπλής στρώσης.

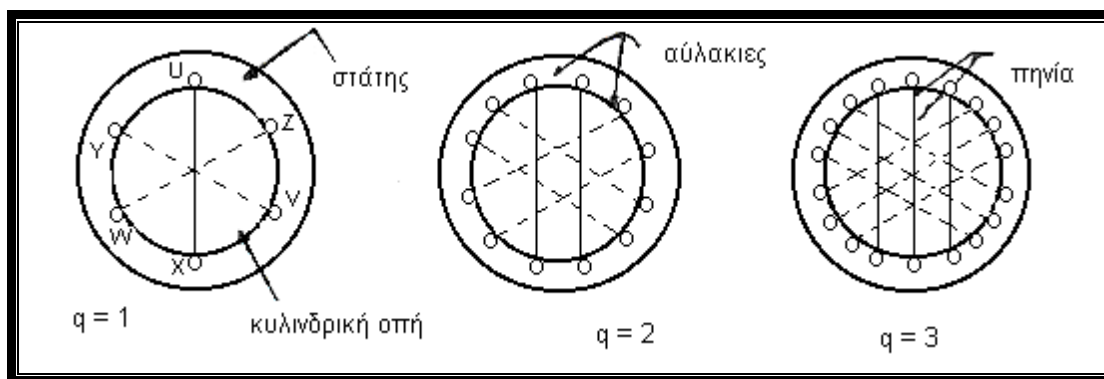
Τα τυλίγματα απλής στρώσης καταλαμβάνουν μεγαλύτερα σε σύγκριση με τα τυλίγματα διπλής στρώσης όταν πρόκειται για την ίδια μηχανή δηλαδή για την δημιουργία ίδιας τάσης και ίδιας ισχύος.

Η μηχανή με τύλιγμα διπλής στρώσης είναι μικρότερη και συνεπώς απαιτεί λιγότερα υλικά για την κατασκευή της.

Γενικά οι μηχανές κατασκευάζονται με τυλίγματα διπλής στρώσης. Αν ο αριθμός των αυλακιών είναι  $N$ ,  $m$  είναι ο αριθμός των φάσεων και  $2p$  ο αριθμός των πόλων, τότε ορίζουμε ένα χαρακτηριστικό αριθμό.

$$q = \frac{N}{2pm}$$

Ο οποίος δηλώνει τον αριθμό των αυλακιών ανά πόλο και ανά φάση. Πρέπει όμως εδώ να πούμε ότι άλλη είναι η σημασία ενός πόλου στην μηχανή συνεχούς ρεύματος που είναι ορατός και πάνω του είναι το τύλιγμα διέγερσης και άλλο στην μηχανή εναλλασσομένου ρεύματος, όπου ο πόλος σημαίνει μια ζώνη επί της κυλινδρικής επιφάνειας, στην οποία όλες οι υπάρχουσες εκεί πλευρές των πηνίων διαρρέονται από ρεύμα της ίδιας κατεύθυνσης. Μια τέτοια ζώνη περιλαμβάνει ένα ορισμένο αριθμό αυλακών μέσα στις οποίες βρίσκονται οι πλευρές των πηνίων. Στο σχήμα φαίνονται διάφορα τυλίγματα με διαφορετικό  $q$ .



Οι εγκάρσιες συνδέσεις ονομάζονται κεφαλές του τυλίγματος. Τύμπανο λέγεται εκείνο το μέρος της μηχανής στο οποίο αναπτύσσεται τάση εξ' επαγωγής. Επειδή τα τυλίγματα αποτελούν ένα ιδιαίτερο κεφάλαιο των ηλεκτρικών μηχανών δεν θα ασχοληθούμε περισσότερο με αυτά ως προς την κατασκευή των δηλ. και πως τοποθετούνται.

Ο ασύγχρονος κινητήρας έχει 2 τυλίγματα εναλλασσομένου ρεύματος, ένα στο στάτη και ένα στον δρομέα.

Όλα τα στοιχεία του στάτη θα έχουν τον δείκτη 1 και όλα τα στοιχεία του δρομέα του δείκτη 2.

$U_1$ : Η τάση του στάτη η οποία συμπίπτει με την τάση του δικτύου. Αυτή είναι η πολική όταν γράφεται στη πινακίδα του κινητήρα ή αναφέρεται στο δίκτυο τροφοδοσίας. Είναι δε φασική όταν αναφέρεται

στο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα.

$I_1$ : Είναι το ρεύμα του στάτη. Είναι δε ρεύμα γραμμής ( δικτύου ) όταν γράφεται στην πινακίδα του .

κινητήρα. Είναι δε ρεύμα φασικό όταν αναφέρεται στο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα

$f_1$ : Είναι η συχνότητα της τάσης  $U_1$  ( του ρεύματος  $I_1$  )

$w_1$ : Είναι ο αριθμός των σπειρών μιας φάσης.

$n_1$ : Είναι ο αριθμός στροφών ανά λεπτό του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη, είναι δε ο

σύγχρονος αριθμός στροφών.

$\Phi_1$ : Είναι η μαγνητική ροή ανά πόλο του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη.

Τα αντίστοιχα σύμβολα με τον δείκτη 2 είναι μεγέθη του δρομέα.

### ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

θα ξεκινήσουμε με το βασικό θεώρημα των Ferrati και Tesla . Ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο έκαναν την σημαντική ανακάλυψη: ότι με πηνία εν στάση μπορεί να δημιουργηθεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, αρκεί τα πηνία να έχουν κατάλληλη διάταξη στο χώρο και να τροφοδοτηθούν με εναλλασσόμενα ρεύματα καθορισμένης διαφοράς φάσης .Η ανακάλυψη αυτή μαζί με την ιδιότητα μετασχηματισμού του E. P. αποτέλεσε την αρχή για την κατασκευή των τριφασικών κινητήρων.

**"ΘΕΩΡΗΜΑ "** Εάν τρία πηνία κατανεμημένα στην περιφέρεια του στάτη απέχουν μεταξύ τους γεωμετρικά  $\frac{x}{3} = \frac{2\pi r}{3} = \frac{\pi D}{3}$

και τροφοδοτηθούν με εναλλασσόμενα ρεύματα διαφοράς  $\frac{T}{3}$  θα προκύψει

ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σταθερής έντασης.

Το θεώρημα αυτό αποδεικνύεται (δεν το θεωρούμε σκόπιμο) και μας δίνει, μετά από σχετικά δύο πράξεις, σε διανυσματική μορφή το μαγνητικό πεδίο

$$B_{ολ}(x,t) = \frac{3}{2} B_{max} e^{j\frac{2\pi x}{X}} e^{-j\omega t}$$



Από την διανυσματική αυτή μορφή προκύπτει ότι το διάνυσμα  $3/2 B_{\max}$  στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  κατά την δεξιόστροφη φορά. Έχουμε δηλαδή ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με μέγιστη μαγνητική επαγωγή ίση με  $3/2 B_{\max}$  του ενός πηνίου.

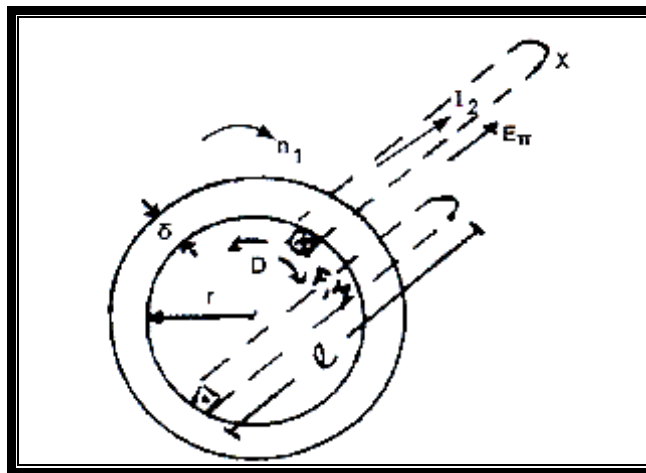
Η σύγχρονη ταχύτητα είναι:

$$n_1 = \frac{120f_1}{2p} [\text{rpm}] \qquad f_1 = \frac{n_1}{60} [\text{rpm}]$$

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \frac{n_1}{60}$$

Η φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου ακολουθεί την φορά διαδοχής των ηλεκτρικών φάσεων. Έτσι αν θελήσουμε να αλλάξουμε την φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου θα πρέπει να αλλάξουμε την σύνδεση δύο φάσεων.

Πως γίνεται όμως και περιστρέφεται ο δρομέας και μάλιστα με ταχύτητα μικρότερη της σύγχρονης.



Δεχόμαστε ότι έχουμε την φορά  $n_1$  του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη.

$U$  είναι σχετική ταχύτητα του αγωγού ως προς το πεδίο. Στην αρχή ο δρομέας είναι ακίνητος και το μαγνητικό πεδίο στρέφεται με ταχύτητα  $n_1$ . Εφόσον ο αγωγός του δρομέα βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο επάγεται επ' αυτού μια τάση  $\bar{E}_{\pi} = l(\bar{U} \times \bar{B})$  στα άκρα του αγωγού της τάξης των [ mV ]. Επειδή ο κλωβός είναι βραχυκυκλωμένος με τις στεφάνες βραχυκύκλωσης κυκλοφορεί κάποιο ρεύμα. Βάσει του LORENZ θα έχουμε λοιπόν μια άσκηση δύναμης επί του αγωγού και ίση με  $\bar{F} = I(\bar{l}_2 \times \bar{B})$ . Εδώ έχουμε διανυσματική " έννοια " του χώρου και όχι στροφή ενός διανύσματος κατά  $e^{j\varphi}$ , δηλ μας δείχνει την εφαρμοζόμενη δύναμη επί του αγωγού κάθε χρονική στιγμή.

Η δύναμη αυτή  $F$  που εφαρμόζεται έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μιας ροπής στρέψης "M" κατά την φορά περιστροφής του πεδίου του στάτη.

Έτσι έχουμε περιστροφή όταν η ροπή στρέψης είναι μεγαλύτερη της ροπής των τριβών και του φορτίου.

Την περιστροφική ταχύτητα του δρομέα την ονομάζουμε "η" ο δρομέας προσπαθεί να φθάσει την ταχύτητα περιστροφής του πεδίου του στάτη. Έστω τώρα ότι την φθάνει. Τότε η

σχετική ταχύτητα  $U = 0$  οπότε θα έχουμε συγχρονισμό ταχυτήτων. Σ' αυτή την περίπτωση λέμε ότι έχουμε σύγχρονη μηχανή.

Αφού  $U = 0$  συνεπάγεται ότι  $\bar{E}_\pi = 0$ , δηλ. δεν επαγονται τάσεις δεν κυκλοφορούν ρεύματα, δεν

αναπτύσσονται ροπές και έτσι η μηχανή δηλ- ο δρομέας θα χάνει στροφές οπότε θα έχουμε πάλι  $n \neq n_1$  άρα πάλι  $U \neq 0$  και θα αρχίσει να περιστρέφεται και πάλι. Ο παραπάνω τρόπος ανάλυσης είναι απλός και μας δείχνει ότι δεν μπορεί να έχουμε  $n = n_1$

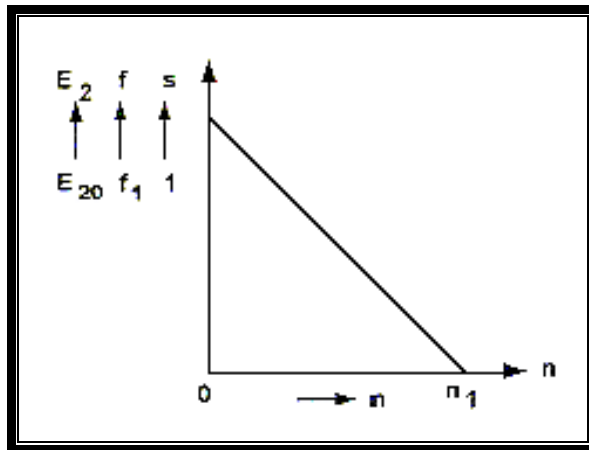
Επειδή λοιπόν οι στροφές του δρομέα δεν μπορούν να είναι ίσες με τον σύγχρονο αριθμό στροφών γι' αυτό την μηχανή την ονομάζουμε ασύγχρονη.

Για  $n < n_1$ , έχουμε λειτουργία κινητήρα

Για  $n > n_1$ , έχουμε λειτουργία γεννήτριας.

Ορίζουμε τώρα σαν ολίσθηση

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{f_1 - f}{f_1} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}$$



Το ερώτημα είναι: Ποία είναι η συχνότητα της επαγόμενης τάσης στον δρομέα:

$$f_2 = f_1 - f$$

Για περισσότερους πόλους  $f_2 = sf_1$

Δηλαδή στο δρομέα έχουμε ένα τριφασικό σύστημα με χαμηλή συχνότητα. Το επαγόμενο πεδίο τείνει να μειώσει το διεγερόμενο μαγνητικό πεδίο με συνέπεια αυτά τα δύο να μας δίνουν το συνισταμένο μαγνητικό πεδίο.

Λόγω της επαγωγής έχουμε ένα Μ/Σ με το πρόσθετο χαρακτηριστικό της ολίσθησης.

Όταν ο δρομέας είναι ακίνητος έχουμε την μέγιστη συχνότητα.

Δρομέας ακίνητος συνεπάγεται  $n = 0 \Rightarrow s = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1$  και  $f_2 = sf_1 = f_1 = 50[\text{Hz}]$

$$\text{για } \begin{matrix} n_1 = 1500\text{rpm} \\ n = 1485\text{rpm} \end{matrix} \Rightarrow s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1485}{1500} = 0,01$$

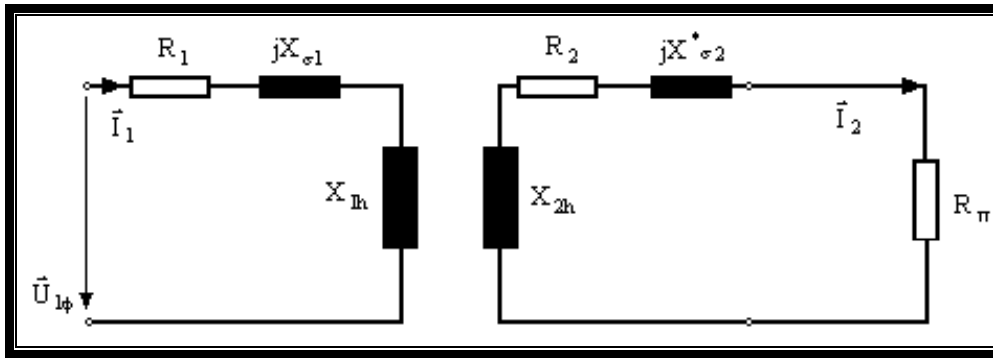
και η συχνότητα της επόμενης τάσης του δρομέα είναι:

$$f_2 = sf_1 = 0,01 \cdot 50 = 0,5\text{Hz}$$

Έτσι για  $n = 0 \Rightarrow f_2 = f_1$  και  $E_2 = E_{20}$

$$\text{Για } n \neq 0 \Rightarrow E_2 = sE_{20}$$

## ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ



( AB ): βραχυκύκλωμα για βραχυκυκλωμένο δρομέα

( AB ): με την  $R_{\pi}$  για δακτυλιοφόρο δρομέα

$R_1$ : Φασική αντίσταση τυλίγματος του στάτη

$X_{\sigma 1}$ : Αντίδραση φασική σκέδαση τυλίγματος του στάτη

$X_{1h}$ : Αντίδραση φασική τυλίγματος του στάτη

$X_{\sigma 1} : 2\pi f_1 L_{\sigma 1}$

$X_{\sigma 2}^* : 2\pi f_2 L_{\sigma 2} = 2\pi (sf_1) L_{\sigma 2} = s(2\pi f_1 L_{\sigma 2})$

Εδώ το  $f_2$  δεν είναι σταθερό άρα και η αντίδραση  $X_{\sigma 2}$  δεν είναι σταθερή όπως και η  $X_{2h}$

Αυτή είναι η διαφορά από τους μετασχηματιστές. Ανάγουμε τώρα το δευτερεύον στο πρωτεύον.

Γενικά για ένα μετασχηματιστή η σχέση μεταφοράς είναι:  $K = \frac{w_1}{w_2}$  Εδώ όμως έχουμε

$$K = \frac{w_1 \xi_1}{w_2 \xi_2} = \frac{w'_1}{w'_2}$$

όπου:  $w_1 \xi_1$  είναι ο ενεργός αριθμός ελιγμάτων του πρωτεύοντος,  $w_2 \xi_2$  αντίστοιχα του δευτερεύοντος. θα εργαστούμε όπως ακριβώς και στον μετασχηματιστή.

Αναγωγή ισχύος ( επειδή η ισχύς δεν αλλάζει)

$$\begin{aligned} X_{2h}^* &= sX_{2h} & X_{2h} &= 2\pi f_1 L_{2h} \\ X_{\sigma 2}^* &= sX_{\sigma 2} & X_{\sigma 2} &= 2\pi f_1 L_{\sigma 2} \end{aligned}$$

Απώλειες στην περιέλιξη του δρομέα ή απώλειες χαλκού.

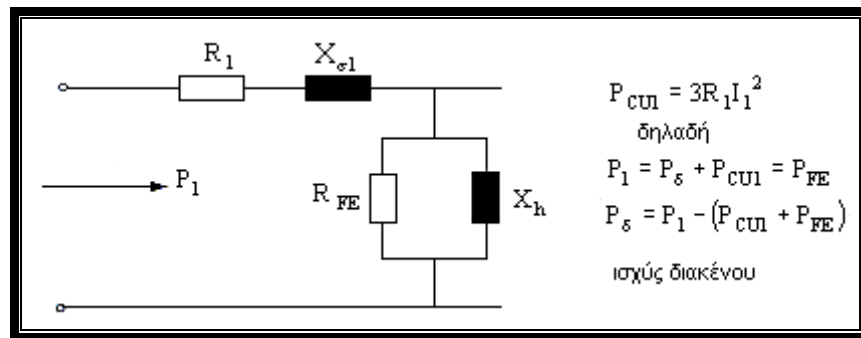
$P_{CU2} = 3R'_2 I_2'^2$  για βραχυκυκλωμένο δρομέα  $P_{CU2} = 3(R'_2 + R'_{\pi}) I_2'^2$  για δακτυλιοφόρο

$$\begin{aligned} \text{δρομέα } K &= \frac{w_1 \xi_1}{w_2 \xi_2} & \bar{E}_2 &= \frac{w_1 \xi_1}{w_2 \xi_2} = E & U'_2 &= \frac{w_1 \xi_1}{w_2 \xi_2} = U_2 \end{aligned}$$

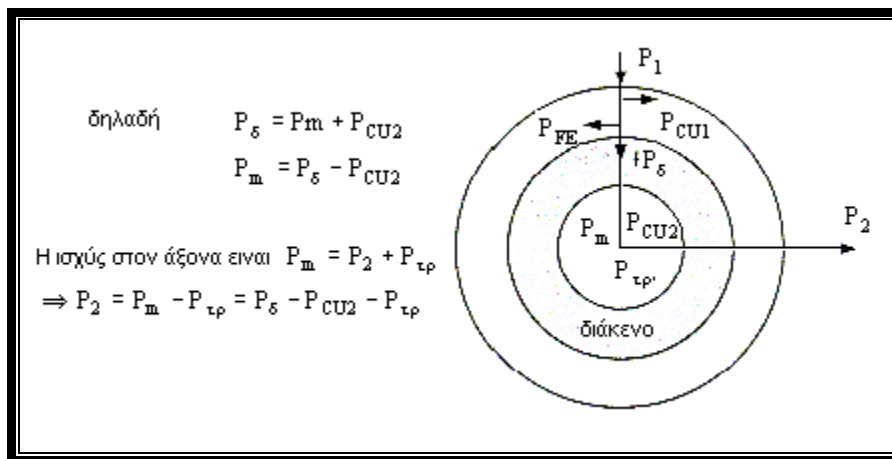
Η ισοδυναμία των ρευμάτων ορίζεται από την ισότητα των διαρευμάτων  $\theta$ , για να μην αλλάξει η μαγνητική ισορροπία του συστήματος Συνεπώς:

$$\begin{aligned} I_2 &= \left[ \frac{w_2 \xi_2}{w_1 \xi_1} \right] I_2' & Z'_2 &= \left[ \frac{w_1 \xi_1}{w_2 \xi_2} \right]^2 Z_2 \\ R'_2 &= \left[ \frac{w_1 \xi_1}{w_2 \xi_2} \right]^2 R_2 & X'_{\sigma 2} &= \left[ \frac{w_1 \xi_1}{w_2 \xi_2} \right]^2 X_{\sigma 2} \end{aligned}$$

Ο στάτης παίρνει μια ισχύ από το δίκτυο  $P_1$  που καλύπτει τις απώλειες χαλκού στον στάτη και την ισχύ διακένου συν τις απώλειες σιδήρου  $P_{FE}$ .

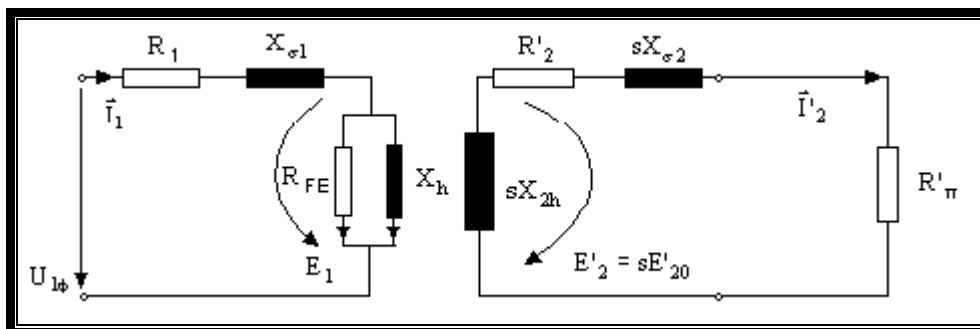


Η ισχύς διακένου καλύπτει τις απώλειες χαλκού στο δρομέα  $P_{CU2}$  και την μηχανική  $P_m$



Αυτή είναι η ωφέλιμη ισχύς στον άξονα που αναγράφεται στην πινακίδα της μηχανής:

Ή  $P_2 = M\omega_m$  όπου  $\omega_m = 2\pi \frac{n}{60}$ . Συνέχεια για να καταλήξουμε στο ισοδύναμο κύκλωμα.



Το ρεύμα  $I'_2$  θα είναι ίσο με

$$I'_2 = \frac{E'_2}{(R'_2 + R'_\pi) + jsX'_{\sigma 2}} = \frac{\frac{E'_2}{s}}{\frac{R'_2}{s} + \frac{R'_\pi}{s} + jX'_{\sigma 2}}$$

οπότε έχουμε το παραπάνω κύκλωμα.

Έτσι στην δεύτερη αναγωγή διαιρώντας με  $s$  το ρεύμα δεν μεταβάλλεται, μεταβάλλεται όμως η τάση από  $E'_2$  σε  $E'_{20}$  άρα τώρα μεταβάλλεται η ισχύς.

$$P_{CU2} = 3R'_2 I'_2{}^2$$

$$P_{CU2} = 3(R'_2 + R'_\pi) I'_2{}^2$$

$$P_\delta = 3 \frac{R'_2 + R'_\pi}{s} I'_2{}^2 = \frac{P_{CU2}}{s}$$

από την οποία παίρνουμε  $P_{CU2} = sP_\delta$

που είναι μια βασική σχέση των ασύγχρονων μηχανών. Αλλά

$$P_m = P_\delta - P_{CU2} = P_\delta - sP_\delta = (1-s)P_\delta$$

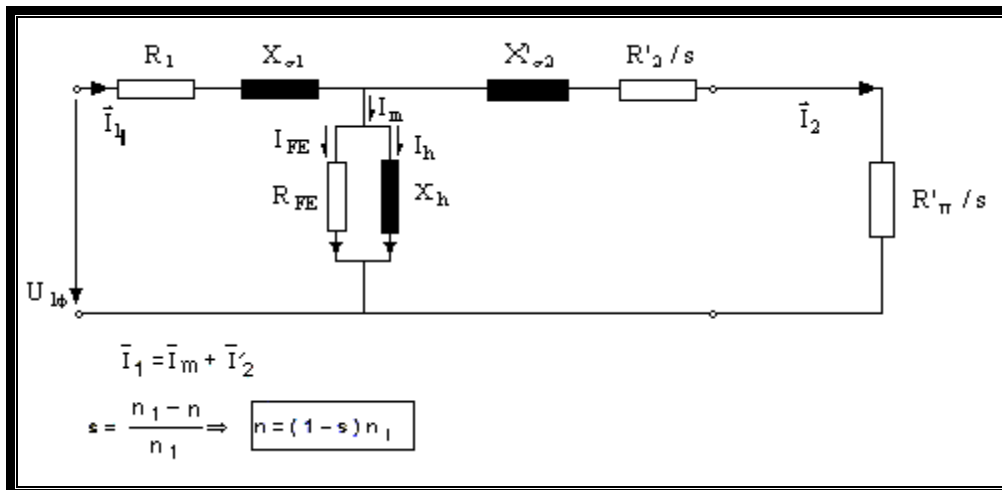
$$\text{άρα } P_m = (1-s)P_\delta$$

Στην δεύτερη αναγωγή κάνουμε και αναγωγή συχνοτήτων ενώ η πρώτη αναγωγή ήταν αναγωγή τάσης.

$$K \neq \frac{E_1}{E_2} \text{ αλλά } K = \frac{E_1}{E_{20}} \text{ όταν ο δρομέας είναι ακίνητος}$$

$$E'_{20} = E_{20} \frac{w_1 \xi_1}{w_2 \xi_2} = E_1$$

$$E'_{20} = 4,44 w_2 \xi_2 f_1 \Phi = E_1 = 4,44 w_1 \xi_1 f_1 \Phi$$



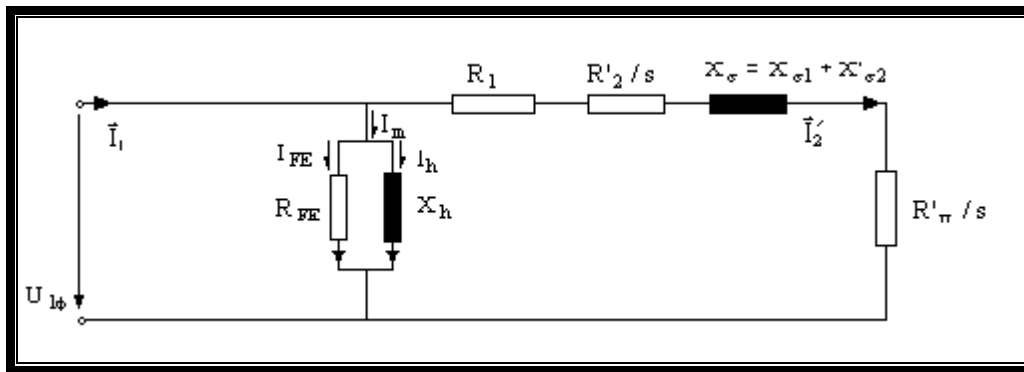
$$M_{\epsilon\sigma} = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{(1-s)P_\delta}{(1-s)\omega_{1m}} = \frac{P_\delta}{\omega_{1m}}$$

είναι η ηλεκτρομαγνητική ή η εσωτερική ροπή με  $\omega_{1m} = \text{σταθ}$

$$M = \frac{P_2}{\omega_m} \text{ και } M_{\epsilon\sigma} = M_2 + M_{\tau\phi}$$

Ωφέλιμη φόρτιση. Αν έχουμε ονομαστική φόρτιση τότε είναι ονομαστική ροπή.

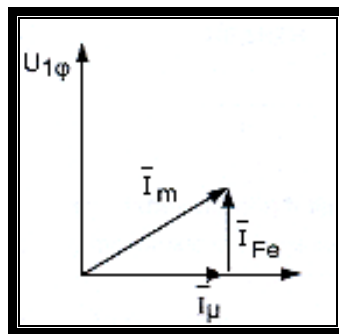
## ΤΕΛΙΚΟ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΚΥΚΛΩΜΑ



Αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα χρησιμοποιούμε για μηχανές μεσαίας ισχύος.

Στο ιδανικό κενό  $n = n_1$  και  $s = 0$   $n_1 - n / n_1$  αφού  $s = n_1 - n / n_1$

Το δευτερεύον θα είναι ανοιχτό άρα το  $I_{10} = I_m$  και  $I_2 = 0$ . Σε περίπτωση πρώτης προσέγγισης μπορούμε να γράψουμε  $I_{10} = I_m = I_{\mu}$  ( αυτό για να μπορεί να μετρηθεί το ρεύμα μαγνήτισης). Το  $I_{\mu}$  με το  $I_{FE}$  έχουν διαφορά φάσης  $90^\circ$ . Στο σχήμα που ακολουθεί δίνουμε το διανυσματικό διάγραμμα.



Το  $I_{\mu}$  συμφασικό με την  $U_{1\phi}$ . Το  $I_{\mu}$  καθυστερεί λόγω ιδανικού πηνίου  $90^\circ$  ως προς την  $U_{1\phi}$

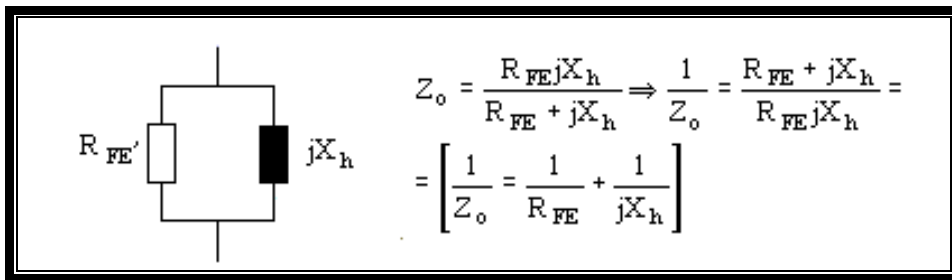
Στο πραγματικό κενό: Εδώ έχουμε κάποιες τριβές στα ρουλεμάν και τριβές λόγω ρευμάτων αέρα στη μηχανή από τον έλικα, άρα κάποια συνεχή φόρτιση οπότε  $n_1 \neq n$ , και  $s \neq 0$ .

Λειτουργία: Όσο μεγαλύτερος είναι ο κινητήρας τόσο μικρότερη είναι η ονομαστική ολίσθηση. Έτσι παρατηρούμε το κλάσμα " $1/s$ " που αυξάνει την αντίσταση στο δευτερεύον του ισοδύναμου της μηχανής. (Στην εκκίνηση δακτυλιοφόρου κινητήρα αγνοούμε την  $R_1 + X_{\sigma 1}$ )

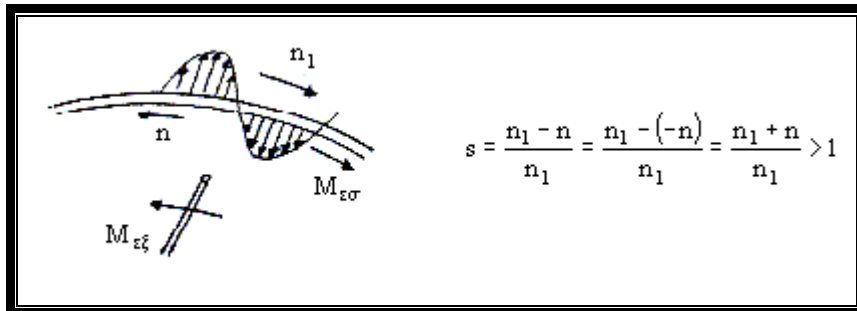
Εκκίνηση: Εδώ εννοούμε ότι  $n = 0$  και  $s = 1$  παίζει σημαντικό ρόλο εδώ η αντίδραση σκέδασης και σ αυτήν οφείλεται η παράξενη μορφή της " καμπύλης ροπής "  $M_{\text{εσ}}=f(s)$  ή  $M=f(n)$  που ονομάζεται και " μηχανική χαρακτηριστική του κινητήρα ".

$$\text{Το } \bar{I}_m = \frac{\bar{U}_{1\phi}}{\bar{Z}_o} \text{ όπου } \frac{1}{\bar{Z}_o} = \frac{1}{R_{FE}} + \frac{1}{jX_h}$$

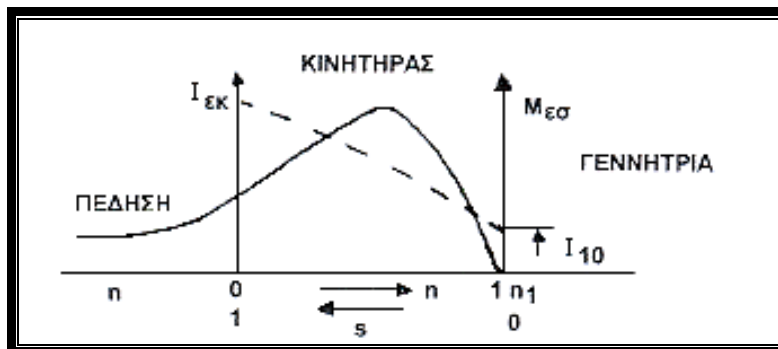
$$\text{Άρα } \bar{I}_m = \bar{U}_{1\phi} \cdot \frac{1}{\bar{Z}_o} = \frac{\bar{U}_{1\phi}}{R_{FE}} + \frac{\bar{U}_{1\phi}}{jX_h} = \bar{I}_{FE} + \bar{I}_{\mu}$$



Πέδηση: Εδώ το " η " γίνεται αρνητικό λόγω της εξωτερικής εφαρμοζόμενης ροπής  $M_{εξ} > M_{εσ}$  οπότε η ολίσθηση γίνεται;



Εξαναγκασμένη αντίστροφη περιστροφή του δρομέα.



Η μηχανή στην πέδηση παίρνει και ισχύ στον άξονα  $M_{εξ}$  όμως παίρνει και ρεύμα. Έτσι έχουμε μια πέδη η ισχύς της οποίας καταναλώνεται σε θερμότητα. Μεγάλα ρεύματα συνεπάγονται μεγάλες απώλειες. Το ρεύμα είναι

$$\bar{I}'_2 = \frac{\bar{U}_{1\phi}}{R_1 + \frac{R'_2 + R'_\pi}{s} + jX_\sigma}$$

$$|\bar{I}'_2| = I'_2 = \frac{\bar{U}_{1\phi}}{\sqrt{\left[ R_1 + \frac{R'_2 + R'_\pi}{s} \right]^2 + X_\sigma^2}}$$

Η ισχύς του διακένου είναι ίση με

$$P_\delta = 3I_2^2 \frac{R'_2 + R'_\pi}{s} = 3 \cdot \frac{\bar{U}_{1\phi}^2}{\left[ R_1 + \frac{R'_2 + R'_\pi}{s} \right]^2 + X_\sigma^2} \cdot \frac{R'_2 + R'_\pi}{s}$$

και η ροπή που αναπτύσσεται είναι με βάση την παραπάνω σχέση ίση με

$$M_{\epsilon\sigma} = \frac{P_{\delta}}{\omega_{1m}} = \frac{3U_1^2\phi}{\omega_{1m}} \cdot \frac{1}{\left[R_1 + \frac{R'_2 + R'_\pi}{s}\right]^2 + X_{\sigma}^2} \cdot \frac{R'_2 + R'_\pi}{s}$$

θεωρούμε τώρα την τάση και την συχνότητα σταθερές και εξετάζουμε την συμπεριφορά της  $M_{\epsilon\sigma}$

συναρτήσεως της ολισθησης ( άρα και των στροφών  $n$  ).

**Περίπτωση 1<sup>η</sup>**  $s \rightarrow 0$

Τότε το  $\frac{R'_2 + R'_\pi}{s} \rightarrow \infty$ . Έτσι για πολύ μικρές τιμές της ολισθησης  $s$  ( $s = 0,01 : 0,1$ ) θα είναι

$$\frac{R'_2 + R'_\pi}{s} \gg R_1,$$

και  $X_{\sigma}$  και έτσι μπορούμε να παραλείψουμε από τον τύπο της  $M_{\epsilon\sigma}$  τις  $R_1$  και  $X_{\sigma}$  η  $U_1\phi$ ,  $\omega_{1m}$  είναι σταθερές και συνεπώς:

$$M_{\epsilon\sigma} = \frac{3U_1^2\phi}{\omega_{1m}} \cdot \frac{s}{R'_2 + R'_\pi}$$

Αν θεωρήσουμε ότι η  $R'_2 + R'_\pi = \text{σταθερή}$  τότε .

$$M_{\epsilon\sigma} = \frac{3U_1^2\phi}{\omega_{1m}(R'_2 + R'_\pi)} \cdot s$$

δηλαδή η  $M_{\epsilon\sigma}$  είναι γραμμική συνάρτηση του  $s$ . Στην γραφική παράσταση θα παριστάνεται με ευθεία γραμμή.

**Περίπτωση 2<sup>η</sup>**  $s \rightarrow \infty$  (περίπτωση πέδησης)

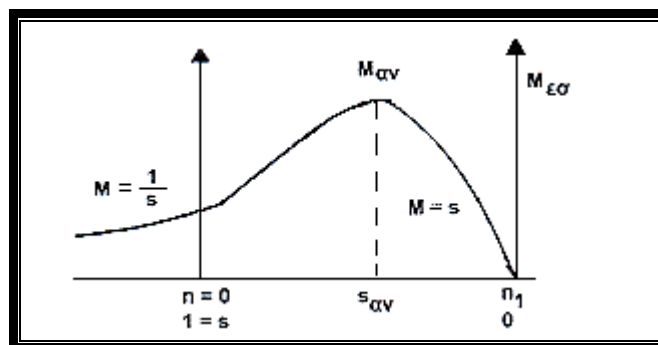
θεωρώ  $n_1 = \text{σταθ.}$  είναι δε η περίπτωση της εξαναγκασμένης περιστροφής της αντίθετης με την περιστροφή του μαγνητικού πεδίου η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα και τον αριθμό των πόλων της μηχανής.

Για  $s \rightarrow \infty$  ή  $n \rightarrow -\infty$  έχουμε την μέγιστη τιμή του ρεύματος που φαίνεται άλλωστε στο ισοδύναμο κύκλωμα.

Εσωτερική ροπή

$$M_{\epsilon\sigma} = \frac{3U_1^2\phi}{\omega_{1m}} \cdot \frac{1}{R_1^2 + X_{\sigma}^2} \cdot \frac{R'_2 + R'_\pi}{s} \quad \text{ή} \quad M_{\epsilon\sigma} = \frac{1}{s}$$

Από αυτά βλέπουμε ότι έχουμε διαφορετική συμπεριφορά στις μικρές και στις μεγάλες ολισθήσεις.





Η ροπή εκκίνησης θα είναι στην εκκίνηση  $n = 0 \rightarrow s=1$  επομένως από τον τύπο της ροπής

$$M_{\varepsilon\sigma} = 3 \frac{3U_1^2 \varphi}{\omega_{1m}} \bullet = \frac{1}{\left[ R_1 + \frac{R'_2 + R'_\pi}{s} \right]^2 + X_\sigma^2} \bullet \frac{R'_2 + R'_\pi}{s}$$

$$(s=1) = 3 \frac{3U_1^2 \varphi}{\omega_{1m}} \bullet \frac{1}{(R_1 + R'_{\sigma\lambda})^2 + X_\sigma^2} \bullet R'_{\sigma\lambda}$$

$$\text{όπου } R'_{\sigma\lambda} = R'_2 + R'_\pi$$

$$M_{\varepsilon\kappa} = \frac{3U_1^2 \varphi}{\omega_{1m}} \bullet \frac{R_{\sigma\lambda}}{(R_1 + R'_{\sigma\lambda})^2 + X_\sigma^2} (*)$$

και η ροπή εκκίνησης λοιπόν εξαρτάται από την  $R'_2 + R'_\pi = R'_{\sigma\lambda}$ .

Επειδή η (\*) εξίσωση είναι δευτεροβάθμια ως προς  $R'_{\sigma\lambda}$  σημαίνει ότι μια δοθείσα προκαθορισμένη τιμή της  $M_{\varepsilon\kappa}$  μπορούμε να την πετύχουμε με δύο διαφορετικές τιμές της  $R'_{2\sigma\lambda}$  μία μεγάλη τιμή και μια μικρή. Για μεγάλη τιμή της  $R'_{2\sigma\lambda}$  θα έχουμε μικρό  $I_{2\varepsilon\kappa}$ .

Η μέγιστη ροπή εκκίνησης επιτυγχάνεται αν παραγωγίσουμε την  $M_{\varepsilon\kappa}$  ως προς  $R'_{2\sigma\lambda}$  και μετά τις πράξεις θέτοντας

$$\frac{dM_{\varepsilon\kappa}}{dR'_{2\sigma\lambda}} = 0 \quad \text{θα προκύψει} \quad R'_{2\sigma\lambda} = \sqrt{R_1^2 + X_\sigma^2}$$

Αυτή είναι η συνθήκη της μέγιστης ροπής εκκίνησης και για να την υπολογίσουμε πρέπει να αντικαταστήσουμε την  $R'_{2\sigma\lambda}$  στην  $M_{\varepsilon\sigma}$ .

$$M_{\varepsilon\kappa} = \frac{3U_1^2 \varphi}{\omega_{1m}} \bullet R'_{2\sigma\lambda} = \frac{\sqrt{R_1^2 + X_\sigma^2}}{\left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_\sigma^2} \right]^2 + X_\sigma^2}$$

$$\text{ο παρνομαστής γίνεται} \quad (R_1 + R'_{\sigma\lambda})^2 + X_\sigma^2 = 2R'_{\sigma\lambda}{}^2 + 2R_1 R'_{\sigma\lambda}$$

$$M_{\varepsilon\kappa} = \frac{3U_1^2 \varphi}{\omega_{1m}} \bullet \frac{1}{2(R_1 + R'_{\sigma\lambda})} = \frac{3U_1^2 \varphi}{\omega_{1m}} \bullet \frac{1}{2 \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_\sigma^2} \right]^2}$$

Την μέγιστη εσωτερική ροπή ή ροπή ανατροπής την παίρνουμε αν παραγωγίσουμε την  $M_{\varepsilon\sigma}$  ως προς ολίσθηση  $s$  και μηδενίζουμε την παράγωγο. Αυτό από τα μαθηματικά όταν ζητούμε το μέγιστο.

$$\frac{dM_{\varepsilon\sigma}}{ds} = 0 \quad \text{μετά απο τις πράξεις θα πάρουμε} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{την } M_{\sigma\omega} = \frac{3U_1^2 \varphi}{\omega_{1m}} \bullet \frac{1}{2 \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_\sigma^2} \right]^2} \\ \text{και } s_{\sigma\omega} = \frac{R'_2 + R'_\pi}{\sqrt{R_1^2 + X_\sigma^2}} \end{array} \right.$$

Σε μεγάλες μηχανές και εκεί που θέλουμε να δούμε την συμπεριφορά της  $M_{\sigma\omega}$  παίρνουμε την  $R_1 \approx 0$  οπότε

$$M_{av} = \frac{3U_1^2 \phi}{\omega_{1m}} \cdot \frac{1}{2X_\sigma}$$

Εδώ βλέπουμε ότι η καθοριστική παράμετρος για την ροπή ανατροπής είναι η αντίδραση σκέδασης και δεν εξαρτάται από την αντίσταση του δρομέα.

$$s_{av} = \frac{R'_2 + R'_\pi}{X_\sigma}$$

Αντίθετα η θέση της  $M_{av}$  που καθορίζεται από την  $s_{av}$  εξαρτάται από την αντίσταση του δρομέα. Έτσι δεν

μεταβάλλεται το πλάτος της  $M_{av}$  με μεταβολή της  $R'_2 + R'_\pi$  αλλά μεταβάλλεται μόνο η θέση της  $M_{av}$  δεξιά ή αριστερά. Η  $M_{av}$  μεταβάλλεται ως προς το πλάτος μόνο αν μεταβάλλουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (π.χ αριθμός αυλακιών) της μηχανής επεμβαίνοντας δηλαδή στην  $X_\sigma$  της μηχανής. Από την μεταβολή δε της  $R'_2 + R'_\pi$  με μια εξωτερική αντίσταση μεταβάλλουμε τη θέση της.

Έχοντας τώρα τις δύο εξισώσεις της  $M_{εσ}$  και  $M_{av}$  (για μεγάλες μηχανές  $R_1 = 0$ ).

$$M_{εσ} = \frac{3U_1^2 \phi}{\omega_{1m}} \cdot \frac{\frac{R'_2 + R'_\pi}{s}}{\left[ R_1 + \frac{R'_2 + R'_\pi}{s} \right]^2 + X_\sigma^2}$$

$$M_{av} = \frac{3U_1^2 \phi}{\omega_{1m}} \cdot \frac{1}{2X_\sigma}$$

και διαιρώντας κατά μέλη παίρνουμε

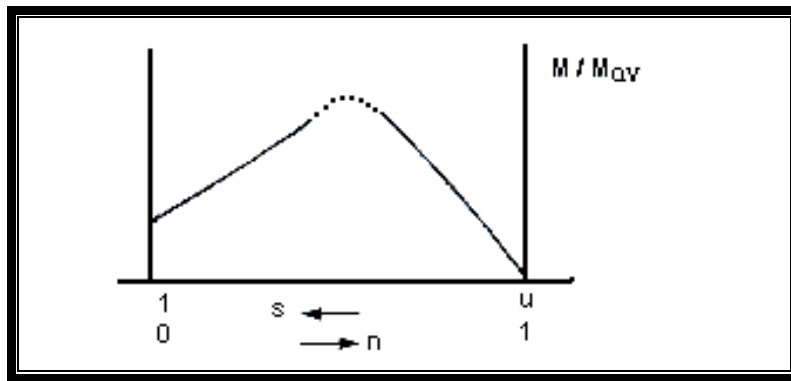
$$\frac{M_{εσ}}{M_{av}} = \frac{\frac{3U_1^2 \phi}{\omega_{1m}} \cdot \frac{\frac{R'_2 + R'_\pi}{s}}{\left[ \frac{R'_2 + R'_\pi}{s} \right]^2 + X_\sigma^2}}{\frac{3U_1^2 \phi}{\omega_{1m}} \cdot \frac{1}{2X_\sigma}} = \frac{2(R'_2 + R'_\pi) \frac{X_\sigma}{s}}{\left[ \frac{R'_2 + R'_\pi}{s} \right]^2 + X_\sigma^2}$$

$$= \frac{2}{\frac{R'_2 + R'_\pi}{s} \cdot \frac{1}{2X_\sigma} + \frac{X_\sigma}{R'_2 + R'_\pi} \cdot s}$$

και τελικά γενικά

$$\frac{M}{M_{av}} = \frac{2}{\frac{s_{av}}{s} + \frac{s}{s_{av}}} \quad \text{\textbf{ΤΥΠΟΣ ΤΟΥ KLOSS}}$$

Ο τύπος αυτός δίνει για πολύ μικρά  $s$  ή πολύ μεγάλα  $s$  την παρακάτω την παρακάτω γραφική παράσταση .

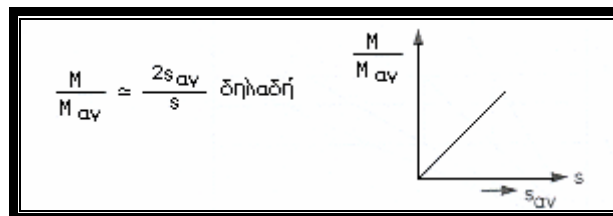


Για δεδομένη ολίσθηση έστω  $s = 1$  στην εκκίνηση μεταβάλλουμε την αντίσταση του δρομέα  $R'_2 + R'_\pi$  όπου η  $R'_\pi$  είναι εξωτερική αντίσταση για δακτυλιοφόρου δρομέα .

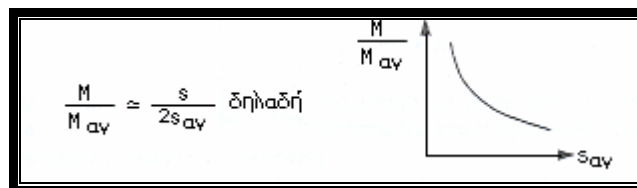
Έτσι στον τύπο του KLOSS μεταβάλλεται το  $s_{av}$  όπου  $s =$  σταθερό .

Διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις :

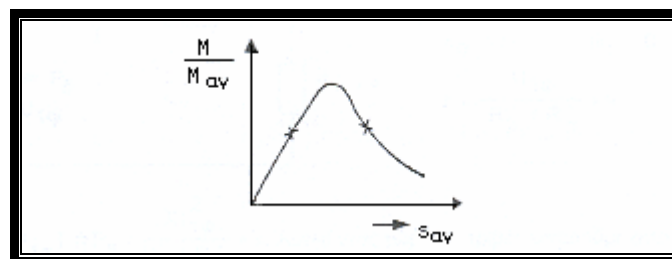
1)  $s_{av} < s \rightarrow R'_2 + R'_\pi$  είναι μικρό από τον τύπο του KLOSS .



2)  $s_{av} < s \rightarrow R'_2 + R'_\pi$  είναι μεγάλο και



Συνδυάζοντας τις δυο παραπάνω περιπτώσεις παίρνουμε .



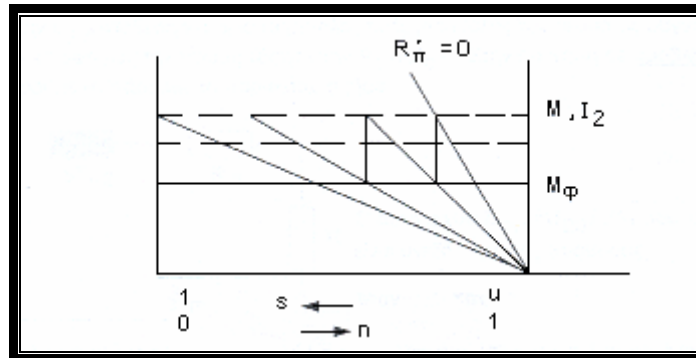
Δηλαδή όσο αυξάνουμε τις αντιστάσεις του δρομέα στην αρχή αυξάνει η ροπή και μετά για μεγάλες αντιστάσεις του δρομέα η ροπή μειώνεται. Προτιμούμε λοιπόν τις μεγάλες αντιστάσεις για να έχουμε μικρό ρεύμα αφού αυτό δίνεται από τη σχέση.

$$I_2 = \frac{U_1 \phi}{\sqrt{R_1 + \frac{R_2 + R_\pi}{s} + X_\sigma^2}}$$

Γενικά η  $X_{\sigma} = 0$  Επίσης υποθέσαμε  $R_1 = 0$  Συνεπώς  $R_2 + R_{\pi}$  όπως και  $\frac{M}{M_{av}} \approx \frac{2s}{s_{av}}$

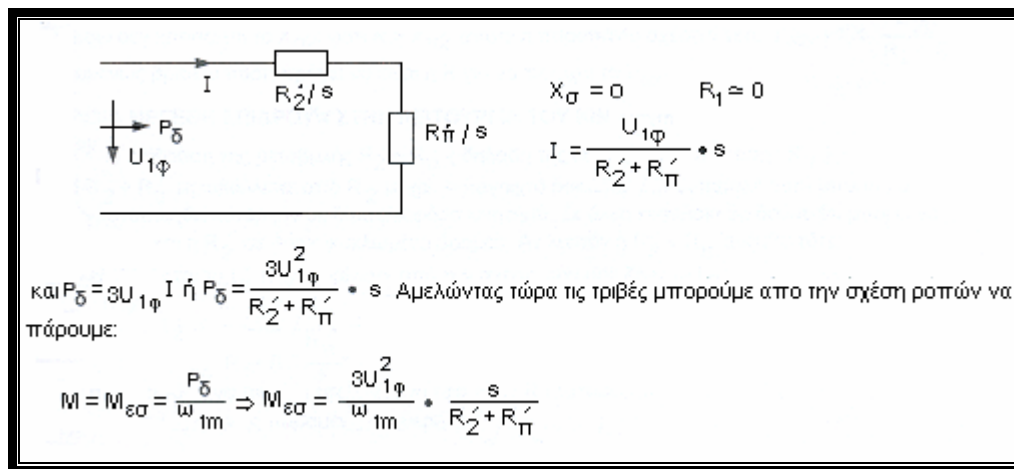
Παρατηρούμε δηλαδή ότι έχουμε ωμική συμπεριφορά του δρομέα ( $\cos\phi = 1$ ).

Η αντίσταση του δακτυλιοφόρου δρομέα έχει λήψεις και με κατάλληλη αντίσταση (εξωτερική) του δρομέα επιτυγχάνουμε ορισμένη  $M_{εκ}$  μικρότερη βέβαια της  $M_{av}$  έχουμε το παρακάτω σχήμα.

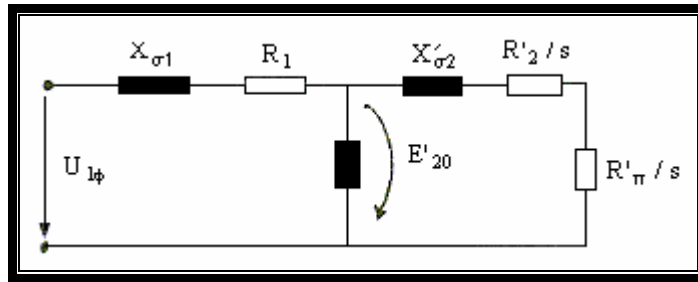


Μειώνοντας την αντίσταση περνάμε σε άλλη καμπύλη μέχρι να βραχυκυκλώσουμε τελείως την  $R'_\pi = 0$ ,  $M_{επ} = M$  μέση –  $M_{\phi}$ . Οι εξωτερικές αντιστάσεις  $R_{\pi}$  έχουν την μορφή του σχήματος με πολλές λήψεις και τις χρησιμοποιούμε για βαριές εκκινήσεις.

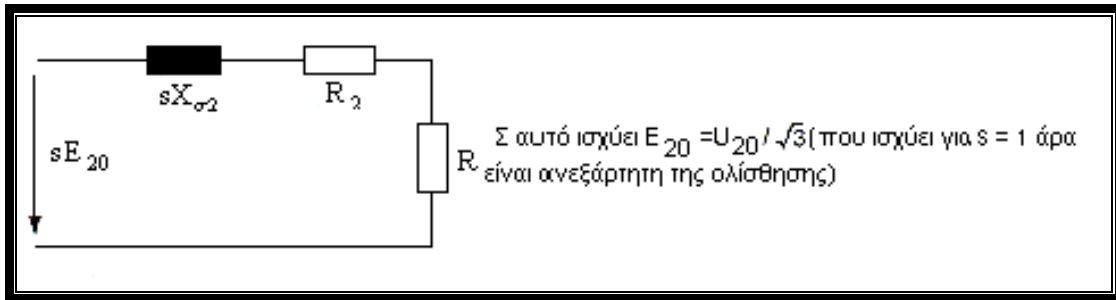
Για πολύ μεγάλες αντιστάσεις του δρομέα παίρνουμε το παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα.



Ενώ όμως έχουμε με την μεγάλη αντίσταση εκκίνησης μεγάλη ροπή εκκίνησης  $M_{εκ}$  και μικρό ρεύμα εκκίνησης έχουμε μεγάλες απώλειες χαλκού στον δρομέα  $P_{Cu2} = 3I_2^2 (R_2 + R_{\pi})$  γι' αυτό και διαρκεί μικρό χρονικό διάστημα το φαινόμενο της εκκίνησης. Η τάση ηρεμίας ( στο δρομέα )  $E_2 \phi_0$  αναγράφεται στην πινακίδα εφαρμόζοντας τάση στον στάτη δημιουργείται τάση εξ' επαγωγής ( $I_2=0$ ) δηλ. είναι σαν να έχουμε μετασχηματιστή και αυτή η τάση εξ' επαγωγής είναι η μέγιστη διότι μέγιστη είναι η σχετική ταχύτητα των δυο στρεφόμενων πεδίων.



θεωρούμε την  $E_{20}$  σταθερή για αρκετά μεγάλες τιμές μεταβολής του ρεύματος μαγνήτισης στον στάτη. Δεν παίρνουμε υπόψη μας την πτώση τάσης στην  $R_1$  &  $X_{\sigma 1}$ . Στην εκκίνηση σε προβλήματα ελέγχου στροφών μπορούμε να πάρουμε το παρακάτω σχήμα.



Έστω ότι θέλουμε ρεύμα εκκίνησης  $I_{2εκ} = 1,41 I_{2ov}$  άρα παίρνουμε  $s = 1$  οπότε έχουμε:

$$I_{2εε} = 1,4I_{ov} = \frac{sE_{20}}{sX_{\sigma 2}^2 + (R_2 + R)^2} \text{ και επιλύοντας ως προς } R$$

Εδώ δεν χρειάζεται το  $X_{\sigma 2}$  γιατί  $R > X_{\sigma 2}$  οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$I_{2ov} \cdot 1,4 = \frac{E_{20}}{R_2 + R}$$

Επομένως βρίσκω πόση πρέπει να είναι η  $R$  για να πετύχω το  $I_{2εκ}$

### ΠΟΙΑ ΜΕΓΕΘΗ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

1<sup>ov</sup> - Η επίδραση της μεταβολής  $R'_2 + R'_\pi$  (δηλαδή της εξωτερικής αντίστασης  $R_\pi$ ). Η  $R'_2 + R'_\pi$  μεταβάλλεται από  $R_2$  μέχρι  $\infty$  (ανοιχτό δακτύλιο). Η μεταβολή αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί καταρχήν με δακτυλιοφόρο κινητήρα. Σε άλλο κεφάλαιο θα δούμε ότι μπορεί να μεταβληθεί και η  $R'_2$  σε βραχυκυκλωμένο δρομέα. Αν λοιπόν η  $R'_2 + R'_\pi$  αυξηθεί τότε:

α) ελαττώνεται το  $I'_2$  όπως φαίνεται από την σχέση που μας το δίνει:

$$I'_2 = \frac{U_{1\phi}}{R_1 + R_2 \frac{R_\pi}{s} + jX_\sigma}$$

β) αυξάνει το συνφ αφού η εφαπτομένη εφφ =  $X / R$  ελαττώνεται

γ) η ροπή ανατροπής παραμένει σταθερή ( $M_{av} = \dots\dots\dots$ )

δ) η ολίσθηση ανατροπής  $s_{av} = R'_2 + R'_\pi / R_1^2 + X_\sigma^2$  αυξάνει ανάλογα, δηλ. όταν διπλασιάζεται η  $R'_2 + R'_\pi$  τότε διπλασιάζεται και η  $s_{av}$ . Αυτό σημαίνει ότι το σημείο ανατροπής μετακινείται στο σχήμα προς τα δεξιά προς μεγαλύτερες τιμές του  $s$ . Όταν γίνει  $R'_2 + R'_\pi > \sqrt{R_1^2 + X_\sigma^2}$  τότε  $s_{av} > 1$  και η αντίστοιχη χαρακτηριστική  $M_{εσ} = f(s)$  θα τέμνει την ευθεία  $s = 1$

σε ένα σημείο A εκ με 10Υ ενεργό της πριν φθάσει στη μέγιστη  $M_{εσ}$ . Για την  $s_{av} = 1$  το σημείο  $A_{εκ}$  συμπίπτει με το σημείο ανατροπής  $A_κ$ .

2<sup>ov</sup> - Η επίδραση της μεταβολής του  $R_1$ ,  $X_σ = X'_{σ1} + X'_{σ2}$  κάθε αύξηση μιας από τις τρεις αντιστάσεις

$R_1, X_{σ1}, X_{σ2}$  που δίνει το  $I'_2$  καθώς και του παρονομαστή της σχέσης που δίνει το  $M_{εσ}$  και το  $P_δ$ .

Άρα

α) ελαττώνεται το ρεύμα  $I'_2$

β) ελαττώνεται η ροπή  $M_{εσ}$  και η  $P_δ$ .

Η μεταβολή της  $R_1$  γίνεται με πρόσθεση σε σειρά ωμικών αντιστάσεων ( αύξηση) μεταξύ δικτύου και κινητήρα. Εφαρμόζεται για την εκκίνηση του ασύγχρονου κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα και ισχύος μεγαλύτερης των 100 KW ( $U_1 = 380$  V), χωρίς φορτίο όμως γιατί ελαττώνεται η  $M_{εσεκ}$ . Αύξηση της  $X_{σ1}$  γίνεται με πρόσθεση εν σειρά επαγωγικών αντιστάσεων μεταξύ δικτύου και κινητήρα. Εφαρμόζεται σπάνια.

Άλλος τρόπος αύξησης του  $X_{σ1}$  ( και του  $X_{σ2}$  )είναι να κατασκευάσουμε τον κινητήρα αφού ξεκινήσει ο

κινητήρας. Αυτό επιτυγχάνεται με δρομέα και στάτη κανονικής μορφής, που μετατοπίζεται αξονικά μέσα στον στάτη. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε κινητήρες ανυψωτικών μηχανημάτων όπως π.χ σε γερανογέφυρες.

3<sup>ov</sup> - Η επίδραση της μεταβολής της τάσης  $U_1$

$$|I'_2| = \frac{U_{1φ}}{\sqrt{\left[R_1 + \frac{R_2 + R_{π'}}{s}\right]^2 + X_{σ}^2}} \approx U_{1φ}$$

$$P_δ = \frac{3U_1^2 φ}{\left[R_1 + \frac{R_2 + R_{π'}}{s}\right]^2 + X_{σ}^2} \cdot \frac{R_2 + R_{π'}}{s} \approx U_1^2 φ$$

$$M_{εσ} = \frac{3U_1^2 φ}{\omega_{1m}} \cdot \frac{1}{\left[R_1 + \frac{R_2 + R_{π'}}{s}\right]^2 + X_{σ}^2} \cdot \frac{R_2 + R_{π'}}{s} \approx U_1^2 φ$$

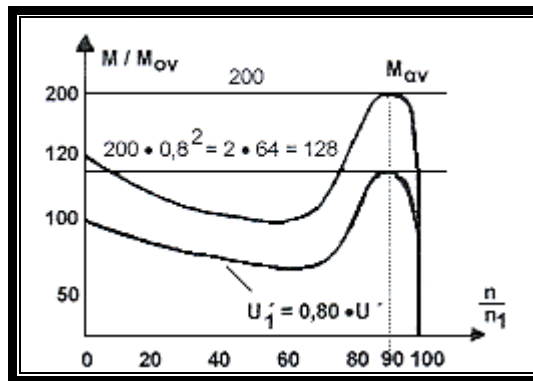
Αν υποθέσουμε λοιπόν ότι τα  $R_1, R_2 + R_{π'}, X_{σ}, \omega_1, s$  είναι σταθερά τότε η ελάττωση της τάσης έχει τα παρακάτω αποτελέσματα .

α) Το ρεύμα  $I'_2$  και τα  $I_{μ}, I_{FE}, I_1$  ελαττώνονται αναλογικά γιατί το  $I'_2$  είναι ανάλογη της  $U_{1φ}$   $I'_2 = κ U_{1φ}$

β) Η ισχύς διακένου και η εσωτερική ροπή ελαττώνονται πολύ περισσότερο γιατί είναι από τις παραπάνω

σχέσεις  $P_δ = c_1 U_1^2 φ$  και  $M_{εσ} \approx c_2 U_1^2 φ$

γ) Ελαττώνεται και η  $E_1$  οπότε ελαττώνεται και το ρεύμα μαγνήτισης και επίσης το ρεύμα σιδήρου. Η μέθοδος ελάττωσης της τάσης εφαρμόζεται παρά πολύ για την εκκίνηση του ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα. Απαραίτητα όμως πρέπει ο κινητήρας να μην έχει φορτίο ή να έχει πολύ λίγο. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται η μηχανική χαρακτηριστική για  $U_1 = U_{ov}$  και  $U_1 = 0,8 U_{ov}$



Σε παρακάτω κεφάλαιο θα δούμε σε ποιές μεθόδους εκκίνησης ασύγχρονων κινητήρων βραχ. δρομέα χρησιμοποιούμε αυτή τη μέθοδο.

4<sup>ov</sup> Επίδραση της μεταβολής της συχνότητας Τα μεγέθη που εξαρτώνται από τη συχνότητα είναι τα εξής:

α) Όλες οι επαγωγικές αντιστάσεις

$$X_h = 2\pi f_1 L_h \quad X_{\sigma 1} = 2\pi f_1 L_{\sigma 1} \quad X_{\sigma 2} = 2\pi f_2 L_{\sigma 2} = 2\pi f_1 L_{\sigma 2}$$

β) Ο σύγχρονος αριθμός στροφών και κατά συνέπεια ο αριθμός στροφών λειτουργίας.

$$n_1 = \frac{f \cdot 60}{p} \quad n = n_1(1-s)$$

γ) Εάν το δίκτυο έχει σταθερή τάση  $U_1$  τότε και  $E_1 = \text{σταθ.}$  θα έχουμε και μεταβολή του ρεύματος μαγνήτισης γιατί

$$\bar{E}_1 = jx_h \bar{I}_\mu = j2\pi f_1 L_h \bar{I}_\mu \approx \text{σταθερό}$$

δ) Μεταβολή θα έχουμε και στο ρεύμα  $I_2$  και  $I_1$  Οι μεταβολές των  $X$ ,  $n_1$ ,  $n$ , είναι ευθέως ανάλογες της  $f$ , η μεταβολή του  $I_\mu$  είναι αντιστρόφως ανάλογη .

$$\bar{I}_\mu = \frac{\bar{E}_1}{jX_h} = \frac{\bar{E}_1}{j2\pi f_1 L_h}$$

Ωστε όταν η  $f_1$  του δικτύου αυξηθεί τότε τα ρεύματα  $I_\mu$ ,  $I_2$  η ροπή Μεσ και η ισχύς  $P_2$  θα ελαττωθούν.

Όταν η συχνότητα μειωθεί τότε τα μεγέθη αυτά θα αυξηθούν.

Παρακάτω δίνεται η μηχανική χαρακτηριστική του κινητήρα που εξετάζουμε για  $f_1 = 50$  [Hz] &  $f_1 = 60$  [Hz]. Η μεταβολή της συχνότητας  $f_1$  του δικτύου τροφοδοσίας του ασύγχρονου κινητήρα αποτελεί και μια μέθοδο μεταβολής του αριθμού στροφών του ασύγχρονου κινητήρα.

#### 5<sup>ov</sup> Επίδραση της ταυτόχρονης μεταβολής της τάσης και της συχνότητας

Όπως είδαμε στις δυο προηγούμενες παραγράφους έχουμε ότι το

$$I \approx U_1 \quad M \approx U_1^2 \quad n = \text{σταθερό}$$

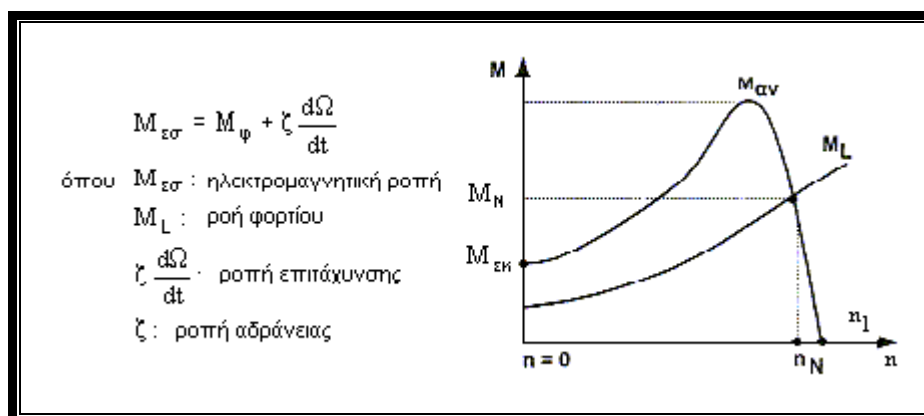
$$I \approx \frac{1}{f_1} \quad M \approx \frac{1^2}{f_1} \quad n \approx f_1$$

Εάν με κάποιο τρόπο μεταβληθούν ταυτόχρονα και με τον ίδιο συντελεστή αναλογίας η τάση και η συχνότητα δηλαδή γίνει  $U_1' = \lambda U_1$  και  $f_1' = \lambda f_1$  τότε τα ρεύματα και οι ροπές παραμένουν αμετάβλητες, ενώ ο αριθμός στροφών και η ισχύς μεταβάλλονται όπως η συχνότητα.

Αυτός είναι ένας τρόπος ελέγχου των στροφών ενός κινητήρα ασύγχρονου βραχυκυκλωμένου δρομέα που αναφέρεται στις επόμενες σελίδες.

## ΕΚΚΙΝΗΣΗ – ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ

Για να περιστραφεί ένας κινητήρας ασύγχρονος είναι αναγκαία η ροπή που αναπτύσσει να είναι μεγαλύτερη από την ροπή φορτίου και τριβών μέχρι να αποκατασταθεί η ισορροπία διότι πρέπει να υπερνικηθεί η αδράνεια. Η γενική εξίσωση που εκφράζει την ισορροπία των ροπών είναι:



Η επιτάχυνση διαρκεί τόσο χρόνο μέχρι να γίνει  $M_{\varepsilon\sigma} = M_{\varphi}$ . Στο σχήμα βλέπουμε τις χαρακτηριστικές  $M_{\varepsilon\sigma} = f(n)$ ,  $M_{\varphi} = f(n)$ . Το σημείο που έχει συντεταγμένες  $M_N$ ,  $n_N$  πρέπει να είναι τέτοιο που να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που τίθεται από την θερμική αντοχή της μηχανής, από τον συντελεστή απόδοσης, από την δυνατότητα υπερφόρτισης και τον κατάλληλο συντελεστή ισχύος. Η συνθήκη ευστάθειας προκύπτει από τη μελέτη του διαγράμματος  $M_{\varepsilon\sigma} = f(n)$  της ασύγχρονης μηχανής σε συνδυασμό με την καμπύλη του φορτίου. Ευστάθεια έχουμε όταν ισχύει:

$$\frac{\partial M_{\varphi}}{\partial n} > \frac{\partial M_{\varepsilon\sigma}}{\partial n} \text{ αυτή η σχέση σημαίνει ότι :}$$

Για να έχουμε ευστάθεια θα πρέπει η θετική αύξηση της ροπής  $M_{\varphi}$  να είναι μεγαλύτερη από την θετική αύξηση της ροπής  $M_{\varepsilon\sigma}$ . Μόλις μεγαλώσει η  $M_{\varphi}$  κατά  $\Delta M_{\varphi}$  θα μεγαλώσει και η ταχύτητα κατά  $\Delta n$ .

θα μειωθεί όμως η  $M_{\varepsilon\sigma}$  και έτσι αναγκαστικά θα έχουμε επιβράδυνση με αποτέλεσμα να επαναφέρουμε στο σημείο  $P_N$ .

Αντίθετα εάν μειωθεί η  $M_{\varphi}$  κατά  $-\Delta M_{\varphi}$  τότε ο αριθμός στροφών τείνει να μειωθεί κατά  $-\Delta n$ . Έτσι όμως μεγαλώνει η  $M_{\varepsilon\sigma}$  και αμέσως έχουμε επιτάχυνση ώστε να επανέλθουμε στην αρχική κατάσταση. Τα προηγούμενα ισχύουν για την γραμμική περιοχή της ροπής  $M_{\varepsilon\sigma}$  δηλ. για  $0 \leq s \leq s_{\alpha\nu}$ .

Στην υπόλοιπη περιοχή συμβαίνουν ακριβώς τα αντίθετα. Μια μικρή αύξηση της  $M_{\varphi}$  προκαλεί ταυτόχρονη αύξηση της  $\eta$  και της  $M_{\varepsilon\sigma}$  με αποτέλεσμα να απομακρυνθούμε διαρκώς από την αρχική κατάσταση. Έτσι η περιοχή ευστάθειας εκκίνησης από την σύγχρονη ταχύτητα μέχρι το σημείο ανατροπής.

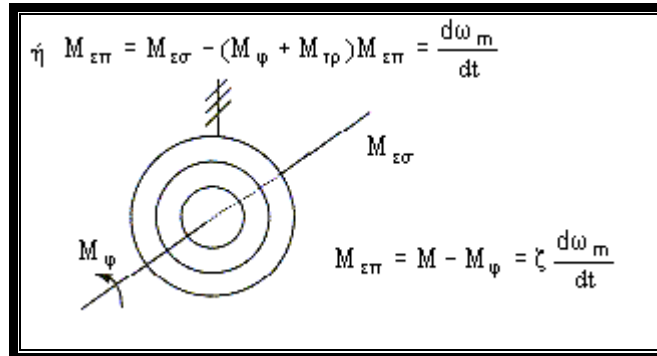


## ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ

### Υπολογισμός χρόνου εκκίνησης

Παίρνουμε την ισότητα των ροπών.

Ροπή επιτάχυνσης = Ροπή κινητήρα - Ροπή φορτίου - Ροπή τριβών.



Για  $M_{\epsilon\pi} = 0$  έχουμε κατάσταση ισορροπίας ή μόνιμη κατάσταση ή στάσιμη κατάσταση. Στην εκκίνηση υπάρχει πάντα η  $M_{\epsilon\pi}$ . Στα παρακάτω αμελούμε την  $M_{\tau\rho}$  όπου θεωρούμε ότι  $M_{\varphi} > M_{\tau\rho}$  έτσι συμβολίζοντας την  $M_{\epsilon\sigma} = M$  έχουμε:

α) Περίπτωση κενού (χωρίς φορτίο) όπου  $M_{\varphi} = 0$  και  $M_{\epsilon\pi} = M - M_{\tau\rho}$  και για  $M_{\tau\rho} = 0$

$$M_{\epsilon\pi} = M = \zeta \frac{d\omega_m}{dt} \Rightarrow dt = \frac{d\omega_m}{M} \text{ και αν η } M = \text{σταθ.}$$

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = \int_{t_1}^{t_2} \zeta \frac{d\omega_m}{M} \Rightarrow t_2 - t_1 = \frac{\zeta}{M} [\omega_{m2}(t_2) - \omega_{m1}(t_1)]$$

όπου βλέπουμε ότι έχουμε αύξηση της γωνιακής ταχύτητας η οποία συντελείται λόγω της επιτάχυνσης.

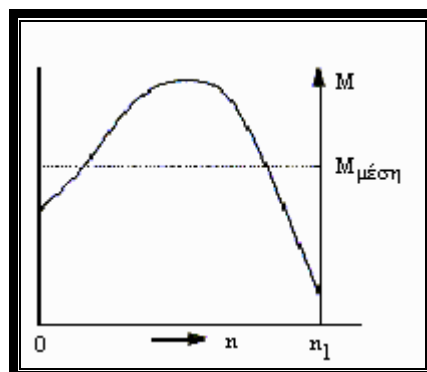
Στην εκκίνηση  $t_1 = 0 \rightarrow \omega_{m1} = 0$  και για ιδανικό κενό.

Έστω η  $\omega_{m1} = \omega_{m2}$  δηλαδή ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα.

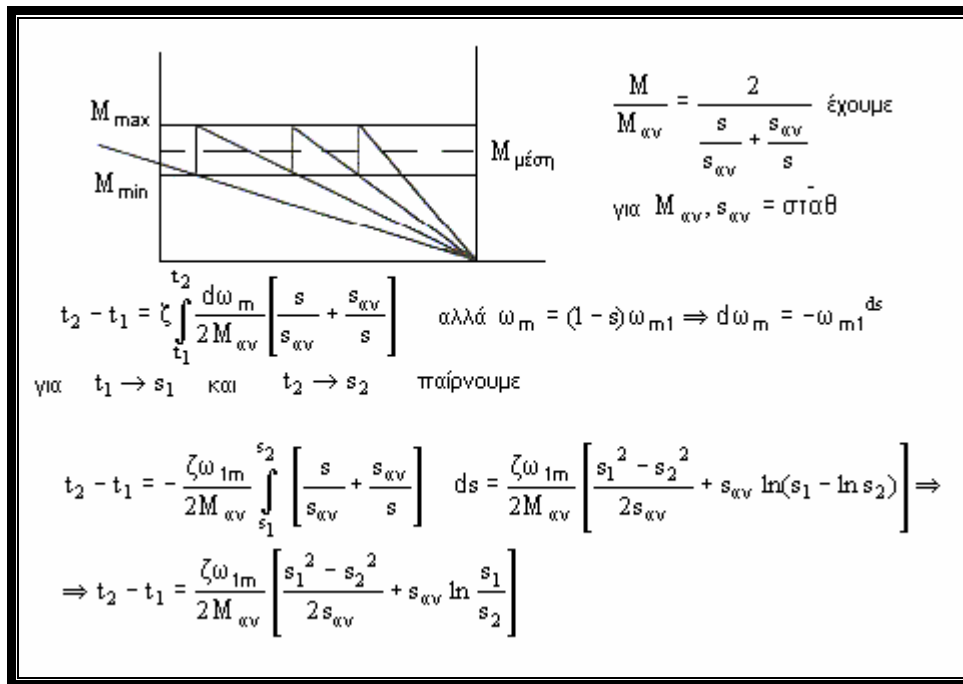
$\omega_{m1} = 2\pi \frac{n_1}{60}$  έτσι για  $t_2 = t_{\epsilon\kappa}$  έχουμε  $t_{\epsilon\kappa} = \frac{\zeta}{M} \omega_{m1}$  με την προϋπόθεση ότι έχουμε σταθερή

ροπή επιτάχυνσης ή ροπή του κινητήρα.

Αυτό όμως δεν συμβαίνει στον κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα.



Μπορούμε χονδρικά να δεχθούμε στον κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα ότι έχουμε μια μέση τιμή ροπής,  $M$  μέση ( φυσικά με σφάλμα ). Στον δακτυλιοφόρο κινητήρα για πολλές βαθμίδες εκκίνησης έχουμε μια καλή μέση τιμή της ροπής. Έτσι  $M_{εσ} = M$  από τη σχέση του KLOSS .



Η σχέση αυτή ισχύει για οποιαδήποτε  $t_2 - t_1$  και ισχύει για ροπές επιτάχυνσης και ροπές επιβράδυνσης.

Στην περίπτωση εκκίνησης  $t_1 = 0$   $s_1 = 1$  και όταν φθάνουμε στον συγχρονισμό  $t_2 = t$  συγχρ. παίρνουμε  $s_2 = 0$  οπότε έχουμε:

$$t = \frac{\zeta \omega_{1m}}{2M_{\alpha v}} \left[ \frac{1}{2s_{\alpha v}} + s_{\alpha v} \ln \left( \frac{1}{0} \right) \right]$$

Το παραπάνω οφείλεται στο ότι ο συγχρονισμός είναι μια ιδανική μορφή αφού στην πραγματικότητα ποτέ το  $n$  δεν φθάνει το  $n_1$  . Έτσι η  $s_2 \neq 0$  ( συνήθως  $s_2 = 0,01$  ) οπότε αίρεται η απειρία.

$$t_{εκ} = \frac{\zeta \omega_{1m}}{2M_{\alpha v}} \left[ \frac{1}{2s_{\alpha v}} + s_{\alpha v} \ln \frac{1}{s_2} \right]$$

β) Εκκίνηση με φορτίο.

$$M_{επ} = M - M_{\phi}$$

$$\text{ροπή αδρανείας } \zeta = \int_0^R r^2 dm \text{ όπου } dm = (2\pi r) dr l \gamma \left[ \frac{\text{Kgr}}{\text{cm}^3} \right]$$

βλέπουμε ότι  $\zeta = f(r^2)$ .

Την εκκίνηση επιβραδύνει η ροπή αδρανείας  $\zeta$

$$dt = \zeta \frac{d\omega_{1m}}{M - M_{\phi}} \text{ όπου έστω } M = \text{σταθ. και } M_{\phi} = \text{σταθ.}$$

έτσι  $t_2 - t_1 = \frac{\zeta}{M - M_\phi} (\omega_{2m} - \omega_{1m})$  άρα .στην εκκίνηση με φορτίο ο χρόνος μεγαλώνει .

### ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΚΙΝΗΣΗ

Η ισχύς απωλειών στον δρομέα είναι η  $P_{CU2}$  οπότε ενέργεια είναι

$$w = \int_{t_1}^{t_2} P_{CU2} dt \quad \text{που αναπτύσσεται υπό μορφή θερμότητας.}$$

α) Για κενό με  $M\phi = 0$   $P_{CU2} = s P_\delta$  ,  $w_{20} = \int_{t_1}^{t_2} P_\delta dt$  και για την εκκίνηση

$$t_1 = 0 \quad t_1 \rightarrow s_1 \quad , \quad t_2 = t_{εκ} \quad t_2 \rightarrow s_2$$

$$w_{20} = \int_{t_1}^{t_2} s P_\delta dt = \int_{t_1}^{t_2} s \omega_{1m} M dt \quad \text{αλλά}$$

$$M_{επ} = M = \zeta \frac{d\omega_m}{dt} - \int_{s_1}^{s_2} \frac{\omega_{1m}}{dt} ds \quad [\omega_m = (1-s)\omega_{1m} \Rightarrow d\omega_m = -\omega_{1m} ds]$$

]έτσι  $dt = -\frac{\zeta \omega_m}{M} ds$  οπότε ,  $w_{20} = \int_{s_1}^{s_2} s \omega_{1m} M \left( -\frac{\zeta \omega_{1m}}{M} \right) \cdot ds$  η  $M$  απλοποιείται

αφού είναι σταθερή

$$\omega_{20} = \int_{s_1}^{s_2} \zeta \omega_{1m} s ds \Rightarrow \omega_{20} \frac{\zeta \omega_{1m}}{2} [s_1^2 - s_2^2] \quad \text{έτσι στην εκκίνηση έχουμε } t_1 = 0 \Rightarrow s = 1$$

$$t_2 = t_{εκ} \Rightarrow s_2 = 0 \quad \text{και} \quad \omega_{20} = \frac{1}{2} \zeta \omega_{1m}^2$$

β) Βλέπουμε στην παραπάνω σχέση ότι δεν εμφανίζεται η  $R_2$  ουσία προκαλεί τις απώλειες. Ακόμη στην εκκίνηση αποταμιεύεται κινητή ενέργεια στον δρομέα και βλέπουμε το παράδοξο ότι αυτή είναι ίση με τις θερμικές απώλειες που αναπτύσσονται στον δρομέα.

Στον στάτη έχουμε:

$$\omega_1 = \int_{t_1}^{t_2} P_{CU1} dt = 3 \int_{t_1}^{t_2} R_1 I_1^2 dt = 3 \frac{R_1}{R_2'} \int_{t_1}^{t_2} R_2' I_1^2 dt \quad \text{όπου αν θεωρήσουμε το } I_m \approx 0, I_1 \approx I_2$$

(ρεύμα ανυψωμένο στον στάτη) οπότε

$$\omega_1 = \frac{R_1}{R_2'} \int_{t_1}^{t_2} 3 R_2' I_2^2 dt = \frac{R_1}{R_2'} \int_{t_1}^{t_2} P_{CU2} dt \Rightarrow \omega_1 = \frac{R_1}{R_2'} \omega_{20} \quad \text{συνολικά}$$

$$\omega = \omega_1 + \omega_{20} = \frac{R_1}{R_2} \omega_{20} + \omega_{20} = \left[ 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right] \frac{1}{2} \zeta \omega_{1m}^2$$

που είναι οι συνολικές απώλειες joule .Έτσι στην εκκίνηση αν αμεληθούν οι απώλειες σιδήρου τότε θα έχουμε στην εκκίνηση τις παρακάτω τρεις απώλειες.  $P_{CU1}$  ,  $P_{CU2}$  και η ωφέλιμη κινητική

ενέργεια που συσσωρεύεται, στον δρομέα. Έτσι ο κινητήρας θα απορροφήσει από το δίκτυο την ενέργεια του στάτη του δρομέα όπως επίσης και την κινητική ενέργεια που αποθηκεύεται στο δρομέα.

γ) Περίπτωση εκκίνησης με φορτίο

$$M - M_\phi = \zeta \frac{d\omega_m}{dt} = -\zeta \frac{\omega_{1m}}{dt} ds \quad \text{οπότε}$$

$$\omega_{20} = \int_{t_1}^{t_2} P_{CU2} dt = \int_{s_1}^{s_2} s \omega_{1m} M \left[ -\frac{\zeta \omega_{1m}}{M - M_\phi} \right] ds =$$

$$= -\zeta \omega_{1m}^2 \int_{s_1}^{s_2} \frac{M}{M - \phi} s ds \quad \text{αλλά} \quad \frac{M}{M - \phi} = 1 + \frac{M_\phi}{M - M_\phi}$$

$$\text{άρα} \quad \omega_{20} = -\zeta \omega_{1m}^2 \int_{s_1}^{s_2} \left[ 1 + \frac{M_\phi}{M - M_\phi} \right] s ds \Rightarrow \omega_{20} = \frac{1}{2} \zeta \omega_{1m}^2 [s_1^2 - s_2^2] - \zeta \omega_{1m}^2 \int_{s_1}^{s_2} \frac{M_\phi}{M - M_\phi} s ds$$

Το δεύτερο μέλος της παραπάνω σχέσης υπολογίζεται όταν είναι γνωστή η συνάρτηση της ροπής φορτίου.  $M_\phi = f(s)$ .

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ: Έστω δακτυλιοφόρος κινητήρας με πολλές βαθμίδες εκκίνησης που έχει φορτίο ένα ανυψωτικό μηχάνημα.

Ισχύει  $M = \text{σταθ.}$  και  $M_\phi = \text{σταθ.}$  οπότε:

$$\omega_{20} = \frac{1}{2} \zeta \omega_{1m}^2 [s_1^2 - s_2^2] + \frac{1}{2} \zeta \omega_{1m}^2 [s_1^2 - s_2^2] \frac{M}{M - M_\phi} \quad \text{ή}$$

$$\omega_{20} = \frac{1}{2} \zeta \frac{M}{M - M_\phi} \zeta \omega_{1m}^2 [s_1^2 - s_2^2] \quad \text{όπου για την περίπτωση εκκίνησης} \quad s_1 = 1 \quad s_2 = 0$$

έχουμε

$$\omega_2 = \frac{1}{2} \frac{M}{M - M_\phi} \zeta \omega_{1m}^2$$

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΔΡΟΜΕΑ

Όπως αναφερθήκαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, για να περιστραφεί ένας κινητήρας πρέπει η ροπή που θα αναπτύξει να υπερνικήσει την ροπή φορτίου και την ροπή τριβών. Για να δημιουργηθεί όμως αυτή η ροπή εκκίνησης απαιτείται ένα μεγάλο ρεύμα εκκίνησης, πολύ μεγαλύτερο του ονομαστικού. Το ρεύμα αυτό και για την μικρή διάρκεια εκκίνησης προκαλεί μεγάλες απώλειες ισχύος και πτώση τάσης.

Την στιγμή της εκκίνησης είναι  $n = 0$  ( $s = 1$ ) και οι σχέσεις για το ρεύμα και την ροπή γίνονται:

$$I'_{2εε} = \frac{U_1}{\sqrt{[R_1 + R_2 + R_{\pi}]^2 + X_{\sigma}^2}} > I_{2ov} = \frac{U_1}{\sqrt{\left[R_1 + \frac{R_2 + R_{\pi}}{s}\right]^2 + X_{\sigma}^2}}$$

$$M_{εκ} = \frac{3U_1^2 \phi}{\omega_{1m}} \cdot \frac{R'_2 + R'_{\pi}}{[R_1 + R_2 + R_{\pi}]^2 + X_{\sigma}^2}$$

Το ρεύμα εκκίνησης είναι για εκκίνηση με πλήρες φορτίο  $I_{2εκ} = (6 \div 8) I_{ov}$

Στην εκκίνηση μας ενδιαφέρουν λοιπόν 2 μεγέθη

α) Το ρεύμα εκκίνησης

β) Η ροπή εκκίνησης

Εμείς λοιπόν προσπαθούμε να έχουμε όσο το δυνατό μικρότερο ρεύμα εκκίνησης και ροπή τέτοια ώστε να έχουμε ομαλή εκκίνηση.

Από τον παραπάνω τύπο του ρεύματος εκκίνησης προκύπτουν οι παρακάτω μέθοδοι ελάττωσης του ρεύματος εκκίνησης. Το τι συμβαίνει με τη ροπή εκκίνησης το βλέπουμε πάλι από τον παραπάνω τύπο της ροπής εκκίνησης .

α) ελάττωση της συνεπάγεται μείωση του  $I_{εκ}$  και του  $M_{εκ}$  επειδή  $I_{εκ} = U_1$  και  $M_{εκ} = U_1^2$

β) αύξηση του  $R_1$ ,  $R'_2 + R'_{\pi}$  ή του  $X_{\sigma} = X_{\sigma 1} = X'_{\sigma 2}$

το ρεύμα εκκίνησης ελαττώνεται ενώ η ροπή εκκίνησης μεταβάλλεται. Ειδικά στην περίπτωση της αύξησης της  $R'_2 + R'_{\pi}$  η  $M_{εκ}$  αυξάνει μέχρι την ροπή ανατροπής και στη συνέχεια ελαττώνεται.

Η απλούστερη μέθοδος εκκίνησης είναι η άμεση δηλαδή η χωρίς παρεμβολή κανενός στοιχείου εκκίνησης.

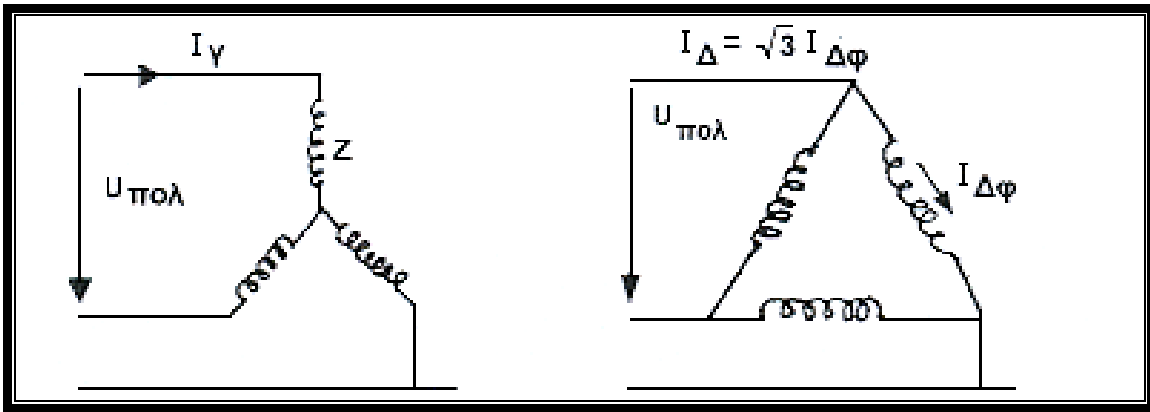
Υπάρχει, ανάμεσα στους τεχνίτες, η αντίληψη ότι η απευθείας εκκίνηση επιτρέπεται από την Δ.Ε.Η για ασύγχρονους κινητήρες μέχρι 3 ÷ 5 Ηρ. Αυτό δεν είναι απόλυτα σωστό. Η Δ.Ε.Η. θέλει από 5% στο σημείο τροφοδοσίας.

Έτσι σε ένα μεγάλο εργοστάσιο ισχύος π.χ 3000 [KVA] μπορεί να είναι δυνατή η άμεση εκκίνηση κινητήρα έως 20 -30 KW με την προϋπόθεση ο κινητήρας να αντέξει στο μεγάλο ρεύμα εκκίνησης.

Σε σταθμούς παραγωγής γίνεται άμεση εκκίνηση ασύγχρονων κινητήρων Υ.Τ ισχύος 500 KW .

### **ΕΚΚΙΝΗΣΗ Υ/ Δ ΣΕ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΔΡΟΜΕΑ**

Εδώ πρέπει σε κανονική λειτουργία ο κινητήρας να κατασκευασθεί (ως προς τις περιελίξεις) έτσι ώστε να έχουμε συνδεσμολογία τριγώνου για να μπορεί να λειτουργήσει με διακόπτη Υ / Δ. Η εκκίνηση αυτή γίνεται για λόγους μείωσης του ρεύματος εκκίνησης.



### ΠΙΝΑΚΙΔΑ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ 380 ΥΔ / 660 ΥΥ

Εδώ τα 660 ΥΥ είναι αναξιοποίητα γιατί το δίκτυο της Δ.Ε.Η δεν μας δίνει τάση 660 [ V ]. Βλέπουμε ότι φασική τάση είναι ίση με 380 [ V ].

Έτσι για παράδειγμα αν  $U_{\pi} = 220 \text{ V}$  τότε σε αστέρα πρέπει να ισχύει 380 ΥΔ. Δηλαδή να γράφει η πινακίδα 220 VΔ / 380 ΥΥ σημαίνει ότι ο κινητήρας θα λειτουργήσει σε συνδεσμολογία αστέρα με  $U_{\pi} = 380 \text{ V}$  ή σε συνδεσμολογία τριγώνου με  $U_{\pi} = 220 \text{ V}$ . Βλέπουμε ότι ο κινητήρας δεν μπορεί να ξεκινήσει με Υ / Δ στο δίκτυο της Δ.Ε.Η γιατί αυτή μας δίνει  $U_{\pi} = 380 \text{ V}$ .

Τα παραπάνω αναφέρεται στη λειτουργική κατάσταση του κινητήρα και όχι στην εκκίνηση. Για ολίσθηση  $s = \text{σταθερή}$  θα είναι και η  $Z = Z (s = \text{σταθ.}) = \text{σταθ.}$  έτσι:

$$I_Y = \frac{U_{\pi}}{\sqrt{3}Z} \quad \text{και} \quad I_{\Delta\phi} = \frac{U_{\pi}}{Z} \quad I_{\Delta} = \frac{\sqrt{3}U_{\pi}}{Z} = \sqrt{3}I_{\Delta\phi}$$

$$\text{έτσι} \quad \frac{I_Y}{I_{\Delta}} = \frac{\frac{U_{\pi}}{\sqrt{3}Z}}{\frac{\sqrt{3}U_{\pi}}{Z}} = \frac{1}{3}$$

που ισχύει για σταθερό " s ". Εδώ το εφαρμόζουμε για την εκκίνηση (  $n = 0 \Rightarrow s = 1$  ).

Το ρεύμα της κατευθείαν εκκίνησης  $I_{\Delta} = (5 \div 9) I_{ov}$ .

Έτσι εδώ για Υ / Δ είναι κατά  $\frac{1}{3}$  λιγότερο. Για συγκεκριμένες τιμές του ρεύματος εκκίνησης (λόγω οδηγιών της Δ.Ε.Η ) χρησιμοποιούμε κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα όπου το ρεύμα και η ροπή εκκίνησης συμπεριφέροντε ανάλογα.

Στην εκκίνηση η ροπή τριβών  $M_{\tau\phi} = 0$  και η σχέση της ροπής είναι:

$$M_{εσ} = \frac{P_{\delta}}{\omega_{1m}} = \frac{3}{\omega_{1m}} I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

όπου δεχόμαστε ότι μεγέθη  $R_2$  και  $s$  είναι σταθερά. Το  $I_2$  είναι το φασικό ρεύμα. Εδώ επίσης κάνουμε την παραδοχή ότι

$$I_m \approx 0 \quad \text{και} \quad I_1 \approx I_2$$

Έτσι η ροπή στον αστέρα για την συγκεκριμένη ολίσθηση  $s=1$  είναι:

$$M_Y = \frac{3R_3}{\omega_{1m}} I_1^2 \quad \text{Στον αστέρα} \quad I_{Y\phi} = I_{\phi} \quad \text{Στο τρίγωνο} \quad I_{Y\phi} = \sqrt{3}I_{\Delta\phi}$$

$$\text{Άρα } \frac{M_Y}{M_\Delta} = \frac{I^2_Y}{I_{\Delta\phi}} = \frac{\frac{U_\pi}{\sqrt{3}Z^2}}{\frac{U_\pi}{Z}} = \frac{1^2}{\sqrt{3}} = \frac{1}{3} \quad \text{.Δηλαδή και } \frac{T_Y}{T_\Delta} = \frac{1}{3} \quad \text{για την εκκίνηση } Y/\Delta \frac{M_Y}{M_\Delta} = \frac{1}{3}$$

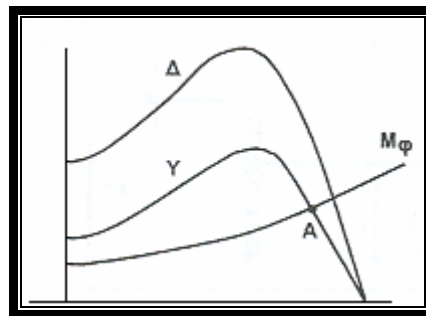
Στο ασανσέρ έχουμε συνδεσμολογία σε Υ με κατευθείαν εκκίνηση όπου λόγω ειδικής κατασκευής έχουμε μικρό ρεύμα εκκίνησης και μεγάλη ροπή εκκίνησης .

$$I_{\varepsilon\kappa} = 3,5I_{ov}$$

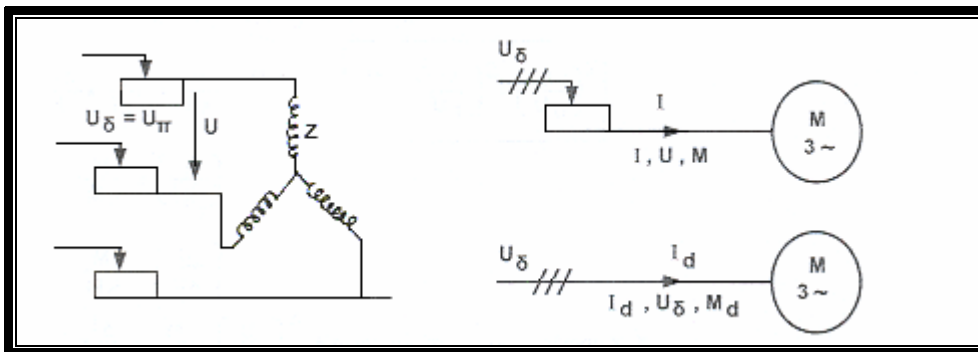
$$M_{\varepsilon\kappa} = 2,4M_{ov}$$

Αν παρατηρήσουμε τις χαρακτηριστικές του  $I = f(n)$  βλέπουμε ότι στη μετάζευξη από  $Y \rightarrow \Delta$  έχουμε μια αιχμή του ρεύματος που είναι μεγάλη και συνεπώς ενοχλεί. Πρέπει να προσέξουμε να μην κάνουμε την αλλαγή  $Y \rightarrow \Delta$  την χρονική στιγμή π.χ της αναστροφής διότι η αιχμή θα αποκτήσει μεγάλες τιμές. Η εξέλιξη στο χρόνο του ρεύματος και της ροπής είναι διαφορετική όπου φαίνεται η επίδραση της αιχμής.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ Η αντλία έχει χαρακτηριστική του σχήματος. Το σημείο A είναι το οριακό σημείο όπου μπορούμε να κάνουμε την μετάζευξη έτσι ώστε η  $M_{αντλ} < M_{κιν}$ . Δηλαδή θα έχουμε μεγάλο ρεύμα εκκίνησης.



### ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΣΤΑΤΗ



Εξετάζουμε εδώ την περίπτωση  $I, U, M$  όπως και την περίπτωση των  $I_d, U_d, M_d$ , στην κατευθείαν εκκίνηση. Εφ' όσον έχουμε τον ίδιο κινητήρα με το ίδιο  $Z$  θα ισχύει;

$$\frac{I}{I_d} = \frac{U}{U_\delta} \quad \text{και} \quad \frac{M}{M_d} = \left[ \frac{I}{I_d} \right]^2 \quad \text{αφού} \quad M \approx \frac{3R_2'}{\omega_{1m}} I_1^2$$

$$\text{άρα} \quad \frac{M}{M_d} = \left[ \frac{I}{I_d} \right]^2 = \left[ \frac{U}{U_\delta} \right]^2 \quad \text{και} \quad \frac{M}{M_d} = \left[ \frac{U}{U_\delta} \right]^2$$

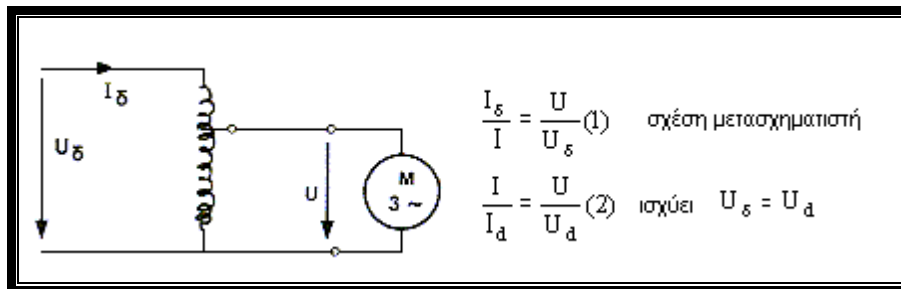
Έτσι αν αυξηθεί η τάση κατά 10% δηλαδή γίνει 1,1 τότε η ροπή θα αυξηθεί κατά  $(1,1)^2$  δηλ. 21%. Έστω ότι το ρεύμα το κατεβάζω στο  $\frac{1}{3}$  τότε η ροπή θα κατεβεί στο  $(\frac{1}{3})^2$  δηλαδή στο  $\frac{1}{9}$ . Γι' αυτό αυτή η εκκίνηση δεν χρησιμοποιείται πολύ λόγω ελάττωσης της ροπής εκκίνησης.

Για να λυθούν τα παραπάνω προβλήματα χρησιμοποιούμε αυτομετασχηματιστή με πολλές λήψεις.



## ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΜΕ ΑΥΤΟΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Ο αυτομετασχηματιστής είναι, πιο φθηνός ( από τους ίδιους) δηλαδή που θα δούλευαν στο ίδιο φορτίο επί ώρες επειδή στην εκκίνηση λειτουργεί για 10 - 15 sec. Έτσι μπορεί να φορτιστεί με μεγάλο φορτίο, δηλαδή μπορεί να αντέξει σε μεγάλες πυκνότητες ρεύματος π.χ 20 A / mm<sup>2</sup> απ' ότι θα άντεχε αν δούλευε σε μόνιμη κατάσταση π.χ 2 A / mm<sup>2</sup>. Έτσι και η ίδια κατασκευή του μπορεί να είναι πολύ μικρή ως προς το μέγεθος. Επίσης έχει τα προτερήματα ( οικονομικά ) π.χ έχει μόνο ένα τύλιγμα. Παρακάτω δίνεται η παράσταση του σε μια φάση.



πολλαπλασιάζω την (1) με την (2) και έχω:

$$\frac{I_{\delta}}{I} \cdot \frac{I}{I_d} = \frac{U}{U_{\delta}} \cdot \frac{U}{U_d} \Rightarrow \frac{I_{\delta}}{I_d} = \left[ \frac{U}{U_d} \right]^2 = \left[ \frac{U}{U_{\delta}} \right]^2$$

$$\text{και } \frac{M}{M_d} = \left[ \frac{I}{I_d} \right]^2 \text{ ή από την (2)}$$

$$\frac{M}{M_d} = \left[ \frac{U}{U_{\delta}} \right]^2 \text{ έτσι τελικά}$$

$$\frac{I_{\delta}}{I_d} = \frac{M}{M_d} = \left[ \frac{U}{U_{\delta}} \right]^2 \text{ σχέση που θυμίζει την εκκίνηση Υ/Δ}$$

$$\text{Έτσι αφού } I_d \approx 6I_{ov} \text{ και θελήσουμε } I_{\delta} = \frac{1}{4} I_d$$

$$\text{Δηλαδή } I_{\delta} = \frac{1}{4} 6I_{ov} = 1,5I_{ov} \text{ και ροπή } M_{\delta} = \frac{1}{4} M_d$$

$$\text{Θέτω } \left[ \frac{U}{U_{\delta}} \right]^2 = \frac{1}{4} \Rightarrow \frac{U}{U_{\delta}} = \frac{1}{2}$$

Αρκεί δηλαδή να κάνουμε την τάση μισή για να πάρουμε ρεύμα, ροπή το  $\frac{1}{4}$  ( των  $I_{ov}$ ,  $M_{ov}$  )

$$\text{Ειδικά για την περίπτωση του } I_{\delta} = \frac{1}{3} I_d \text{ ή } M_{\delta} = \frac{1}{3} M_d$$

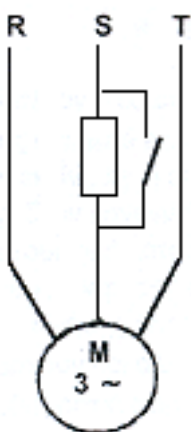
θα έχουμε την περίπτωση του Υ/Δ.

Έτσι με διάφορες λήψεις μπορούμε να πάρουμε όποιους λόγους θέλουμε. Το επόμενο πλεονέκτημα είναι ότι μπορούμε να αποφύγουμε την αιχμή που δημιουργείται στην εκκίνηση Υ/Δ.

Αυξάνοντας στον Α/Σ την τάση αυξάνει η ροπή και το ρεύμα. Έτσι για διάφορες λήψεις έχουμε μείωση της επίδρασης της αιχμής απ' ότι είχαμε για Υ/Δ. Εδώ λόγω σύντομων μεταζεύξεων χρειάζονται διάφορα χρονικά ρελέ. Το πως μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος μετάζευξης από βαθμίδα σε βαθμίδα γίνεται στην πράξη με δοκιμή. Υπάρχουν όμως τυποποιημένοι χρόνοι. Η συνδεσμολογία του κινητήρα μπορεί να είναι οποιαδήποτε Υ ή Δ.

### **ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΜΕ ΜΙΑ ΜΟΝΟ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΤΟ ΣΤΑΘΗ ( KUSA )**

Με τη μέθοδο αυτή ο εκκινήτης και ο αυτοματισμός εκκίνησης γίνεται πολύ φθηνότερος. Χρησιμοποιούμε μόνο μια αντίσταση ( ωμική ) όπως φαίνεται στο σχήμα.



Το ρεύμα εκκίνησης στις δυο φάσεις R, T είναι μεγάλο όπως στην άμεση εκκίνηση. Στην πρώτη φάση την K που έχει την πρόσθετη αντίσταση, το ρεύμα εκκίνησης είναι μικρότερο. Έτσι έχουμε μια ασύμμετρη εκκίνηση, Η συνολική ροπή εκκίνησης του ασύγχρονου κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα ελαττώνεται. Η αντίσταση μπορεί να είναι και ρυθμιζόμενη. Έτσι μπορούμε, με φθηνή σχετικά μέθοδο να προσαρμόσουμε την ροπή εκκίνησης του κινητήρα προς την ροπή φορτίου και ο κινητήρας να ξεκινήσει σιγά - σιγά. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο εφ' όσον επιτρέπεται το μεγάλο ρεύμα εκκίνησης ενώ το φορτίο στην εκκίνηση είναι μικρότερο του ονομαστικού.

### **ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ**

Εδώ η εναλλασσόμενη τάση τροφοδοσίας ρυθμίζεται με θυρίστορες, ενδεχομένως με ανάδραση μέσου των στροφών.

### **ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΜΕ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ**

Η τροφοδότηση γίνεται κατά την εκκίνηση με μεταβλητή συχνότητα.

### **ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ**

Η κύρια και σπουδαιότερη διαφορά ανάμεσα στα στοιχεία ( ροπή , ρεύμα ) εκκίνησης και στα ονομαστικά έγκειται στην ολίσθηση. Για την εκκίνηση  $s=1$  ενώ η ονομαστική  $s_{ov} = 0,02 : 0,05$  και ο όρος  $R_2/s = P_2$  στην εκκίνηση, ενώ ο ονομαστικός είναι  $R_2/s = (20 - 50) R_2$ . Στους δακτυλιοφόρους κινητήρες η απάλειψη αυτής της διαφοράς γίνεται αυξάνοντας την  $R_2$  με την σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων σε σειρά. Στους κινητήρες όμως βραχυκυκλωμένου δρομέα προσπαθούμε με διάφορες κατασκευαστικές μεθόδους να έχουμε  $R_{2εκ}$  μεγάλο και  $R_{2ov}$  μικρό .

## ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΕ ΔΙΠΛΟ ΚΛΩΒΟ

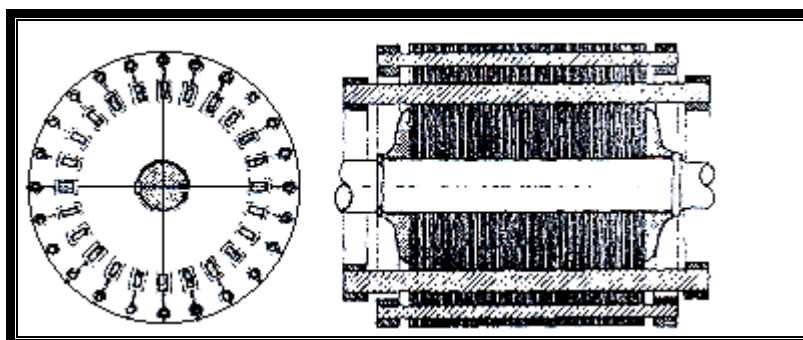
Ο κινητήρας αυτός έχει δρομέα με δυο κλωβούς. Ένας είναι εξωτερικός στην περιφέρεια του δρομέα και έναν εσωτερικό κλωβό. Κάθε κλωβός έχει τους δικούς του δακτυλίους βραχυκύκλωσης όπως φαίνεται στο σχήμα.

Οι αγωγοί του εξωτερικού κλωβού κατασκευάζονται, έτσι ώστε να έχουν μεγάλη ωμική αντίσταση ( μικρή διατομή, ή υλικό μεγάλης ειδικής αντίστασης ) ενώ οι αγωγοί του εσωτερικού κλωβού έχουν μικρή ωμική αντίσταση ( μεγάλης διατομής ή υλικό μικρότερης ειδικής αντίστασης ).

Επίσης η επαγωγική αντίσταση σκεδασμού είναι διαφορετική στους δυο κλωβούς. Ο εξωτερικός κλωβός έχει πολύ μεγαλύτερη μαγνητική απόσταση από τον στάτη παρά ο εσωτερικός κλωβός. Γι' αυτό η απώλεια σκεδασμού του εσωτερικού κλωβού, δηλ. η ισοδύναμη επαγωγική αντίσταση σκεδασμού είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του εξωτερικού κλωβού.

Επί πλέον ο εσωτερικός κλωβός έχει πολύ μεγαλύτερο συντελεστή αυτεπαγωγής απ' ότι ο εξωτερικός κλωβός και αυτό έχει σημασία για την εκκίνηση .

Στην εκκίνηση η σύνθετη αντίσταση των ράβδων στα βαθιά αυλάκια είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλώνει το βάθος. Στην κανονική λειτουργία γίνεται το αντίθετο. Μοιάζει σαν να μετατοπίζεται το ρεύμα ανάλογα με την λειτουργική κατάσταση του κινητήρα.



Με τους κινητήρες αυτής της κατασκευής ελαττώνεται το ρεύμα εκκίνησης [  $I_{εκ} = (2 \div 3) I_{ov}$  ] ενώ η ροπή εκκίνησης είναι ίση με την ονομαστική.

Υπάρχουν και άλλες όμως κατασκευές με ιδιαίτερη μορφή. Η δυνατότητα ενός κινητήρα να ξεκινήσει με αυξημένη ροπή φορτίου έχει ομαδοποιηθεί σε κλάσεις.

Υπάρχουν τέσσερις κλάσεις ροπών:

KL16, KL13, KL10, KL7

Αυτές επιτρέπουν εκκίνηση με φορτία ροπής όπως στον παρακάτω πίνακα, ακόμα και αν η τάση είναι κατά 5% μειωμένη.

1,6M<sub>ov</sub> για L16

1,3M<sub>ov</sub> για L13

1,0M<sub>ov</sub> για L10

0,7M<sub>ov</sub> για L7

## ΠΕΔΗΣΗ ΤΩΝ ΑΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Ένας ασύγχρονος κινητήρας μπορεί να πεδηθεί αν αυτό επιβάλλεται από τις συνθήκες εργασίας του π.χ σε ανυψωτικά μηχανήματα .Υπάρχουν οι παρακάτω αναφερόμενοι μέθοδοι πέδησης που βασίζονται είτε σε εξωτερική πέδηση είτε στη λειτουργία μηχανής με αντίστροφα στρεφόμενο πεδίο είτε στη λειτουργία της ασύγχρονης γεννήτριας. Στην πράξη είναι συνηθισμένοι οι παρακάτω τρόποι:

### 1) Μηχανική πέδηση

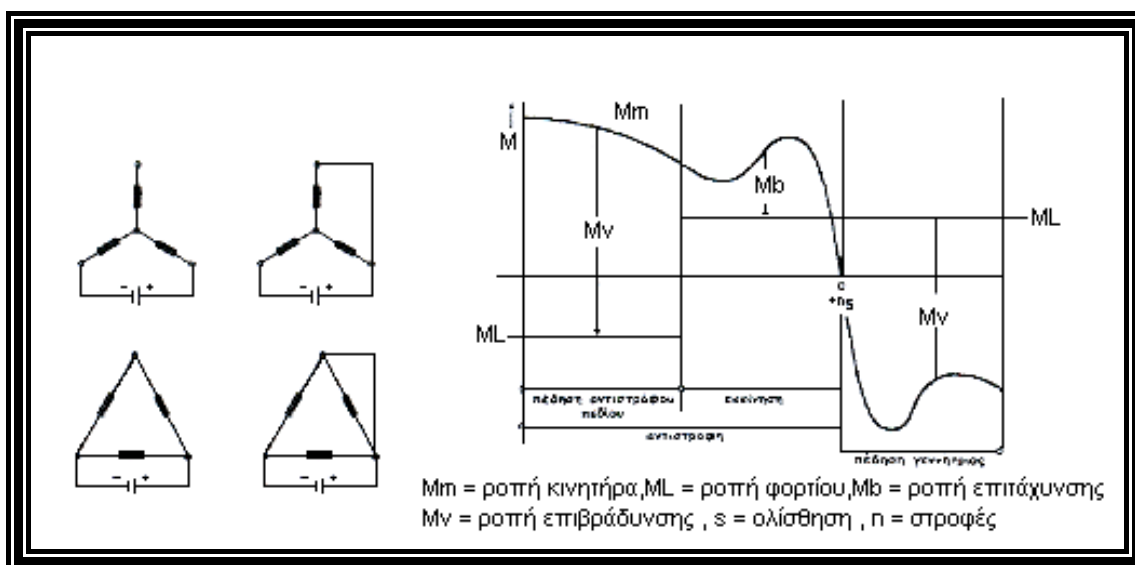
Π.χ με ειδική ηλεκτρομαγνητική πέδη που είναι στον ίδιο τον άξονα. Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν υπερθερμαίνεται ο κινητήρας.

### 2) Εναλλαγή δυο φάσεων

Επάγεται ένα αντίθετα στρεφόμενο πεδίο που πεδεί τον κινητήρα. Η θερμική καταπόνηση του κινητήρα στην εκκίνηση. Αν η πέδηση διαρκεί πάνω από 5 δευτερόλεπτα πρέπει να ελεγχθεί κατά πόσο υπερθερμαίνεται ο κινητήρας. Σε δακτυλιοφόρους κινητήρες η πέδη μπορεί να γίνει με εναλλαγή δυο φάσεων και με αντιστάσεις στον δρομέα.

### 3) Πέδη με συνεχές ρεύμα

Ο κινητήρας αποσυνδέεται από το τριφασικό δίκτυο και συνδέεται με πηγή συνεχούς ρεύματος όπως στο σχήμα



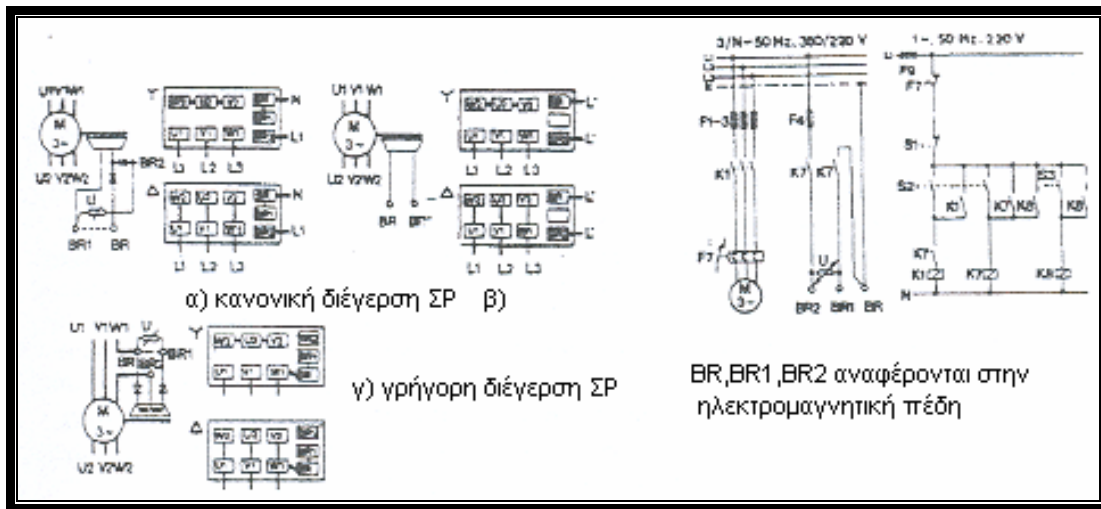
Η πέδη επιτρέπεται να γίνεται κατά την διάρκεια  $t < 10 \text{ sec}$ . Η πηγή συνεχούς ρεύματος μπορεί να συνδεθεί στον κινητήρα κατά 4 διαφορετικούς τρόπους.

### 4) Πέδη με εναλλαγή του αριθμού των πόλων

Σε κινητήρες δυο ταχυτήτων αν βάλουμε την χαμηλότερη ταχύτητα ο κινητήρας φρενάρει, λειτουργώντας έτσι σαν γεννήτρια. Η θερμική καταπόνηση της μηχανής είναι ίση με αυτή κατά την εκκίνηση υπό χαμηλή ταχύτητα. Η πέδη με αλλαγή της ταχύτητας δεν προχωρά προφανώς μέχρι την μηδενική ταχύτητα, αλλά σταματά στην ταχύτητα που έχουμε επιλέξει.

### 5) Κινητήρες πέδης για συνδυασμένη λειτουργία

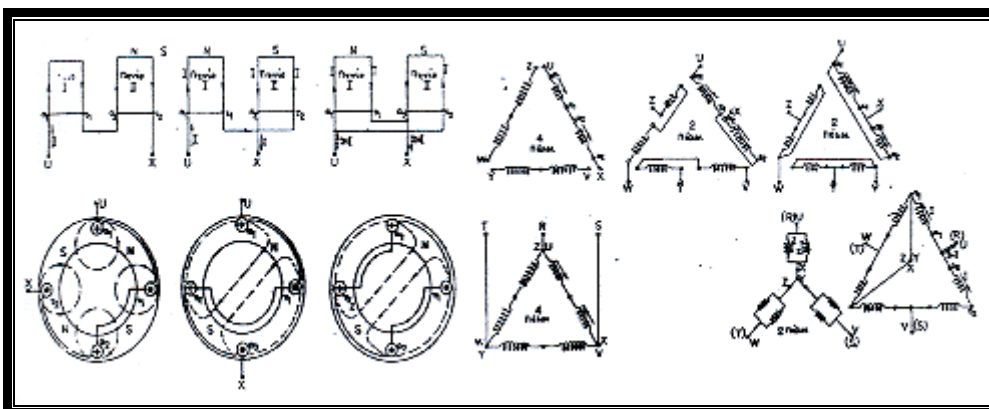
Όπως αυτή των ανυψωτικών μηχανών είναι ειδικής κατασκευής και λειτουργίας σύμφωνα με την μέθοδο 1 της πρόσθετης ηλεκτρομαγνητικής πέδης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



### ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ DAHLANDER

Για να ρυθμίσουμε τον σύγχρονο αριθμό στροφών μιας ασύγχρονης μηχανής συμφωνά με τη σχέση  $n_s = f_s/p$  μπορούμε να μεταβάλλουμε τον αριθμό των ζεύξεων πόλων.

Μπορούμε λοιπόν να βάλουμε στα ίδια αυλάκια του στάτη τύλιγμα 2, 4 και 6 ή 8 πόλων, δηλ. να εκλέξουμε το πλήθος των πόλων, ( σύγχρονες ταχύτητες ). Το μειονέκτημα είναι ότι δεν εκμεταλλευόμαστε όλο τον χώρο των αυλακιών ή αλλιώς ο κινητήρας γίνεται πολύ μεγάλος σε όγκο. Για τον ίδιο όγκο κινητήρας με 2 ανεξάρτητα τυλίγματα ( 2 ταχυτήτων ) έχει ισχύ περίπου ( 2 : 2/3 ) απ' ότι με ένα τύλιγμα ( μίας ταχύτητας ). Για να αυξήσουμε την ισχύ αυτή στα 4/5 = 0,8 της κανονικής προσπαθούμε με την ίδια περιέλιξη και αλλαγή της εσωτερικής σύνδεσης των πηνίων να μεταβάλλουμε το πλήθος των πόλων. Η πιο συνηθισμένη συνδεσμολογία αυτού του είδους είναι η συνδεσμολογία DAHLANDER.



Στο σχήμα φαίνεται η διαδικασία μετατροπής ενός τετραπολικού τυλίγματος σε διπολικό τύλιγμα με την αλλαγή της συνδέσεως του πηνίου μεταξύ τους. Η κάθε φάση έχει δυο πηνία I &

II. Οι πόλοι σχηματίζονται πάντοτε μεταξύ ρευμάτων με αντίθετη διεύθυνση. Όταν συνδέσουμε τα πηνία εν σειρά  $\tau_1$  με  $\alpha_1$  τότε σχηματίζονται 4 πόλοι. Για να δημιουργήσουμε δυο πόλους πρέπει οι δυο γειτονικές πλευρές των πηνίων I & II να έχουν ομόρροπα ρεύματα, και γι' αυτό συνδέουμε το  $\tau_2$  με το  $\tau_1$  και το  $\alpha_2$  με το  $\chi$  και έτσι αλλάζουμε τη φορά του ρεύματος στο πηνίο II.

Η σύνδεση του σχ. 6.8β απορροφά από το δίκτυο το ίδιο ρεύμα I και άρα η ισχύς  $P = \sqrt{3} UI \cos\phi$  του δικτύου είναι ίδια στον πολικό και στον διπολικό κινητήρα. Από τη σχέση  $P = M\Omega$  συμπεραίνουμε ότι θα πρέπει να είναι  $M(3000 \text{ rpm}) = 0,5 M(15000 \text{ rpm})$ . Επειδή το  $M \approx I\Phi$  σημαίνει ότι και για την μαγνητική ροή θα έχουμε  $\Phi(3000 \text{ rpm}) = 0,5 \Phi(1500)$  δηλαδή στην πολύστροφη σύνδεση έχουμε κακή εκμετάλλευση των μαγνητικών ιδιοτήτων της μηχανής. Εάν θέλουμε να διατηρήσουμε την ροπή σταθερή για τους αριθμούς στροφών θα πρέπει να διπλασιάσουμε το ρεύμα εισόδου. Γι' αυτό συνδέουμε παράλληλα τα δυο πηνία ( $\alpha_1$  με  $\tau_2$ ) και ( $\tau_1$  με  $\alpha_2$ ).

Τότε θα έχουμε  $M(3000) = M(1500)$  και  $P(3000) = P(1500)$

Στην πράξη οι εταιρείες που κατασκευάζουν τέτοιους κινητήρες προσπαθούν να εξομαλύνουν την διαφορά στην ισχύ ώστε να είναι  $P_{\text{υψ. ταχ.}} = 1,5 P_{\text{χαμ. ταχ.}}$  ή  $P_{\text{χαμ. ταχ.}} = 0,65 P_{\text{υψ. ταχ.}}$ . Αυτό γίνεται πρακτικά με σύνδεση κατά τρίγωνο για τις χαμηλές ταχύτητες και διπλό αστέρα για τις υψηλές ταχύτητες. Ο συμβολισμός στην πινακίδα είναι  $\Delta / YY$ .

Η συνδεσμολογία στο σχήμα 6.8γ είναι η κανονική συνδεσμολογία DAHLANDER και χρησιμοποιείται εκεί που το φορτίο απαιτεί ροπή σταθερή για όλες τις στροφές  $M \propto \Omega$ .

Σε όλες τις συνδεσμολογίες DAHLANDER το πλήθος των πόλων διαιρείται δια δυο ή αλλιώς ο λόγος των ταχυτήτων είναι 2:1. Έτσι έχουμε κινητήρες με σύγχρονες ταχύτητες

1500/3000 [rpm] 4/2 πολικός αστέρας

750/1500 [rpm] 8/4 πολικός αστέρας

500/1000 [rpm] 12/6 πολικός αστέρας

Το ακροκιβώτιο του κινητήρα με συνδεσμολογία DAHLANDER έχει 6 ακροδέκτες με δείκτες

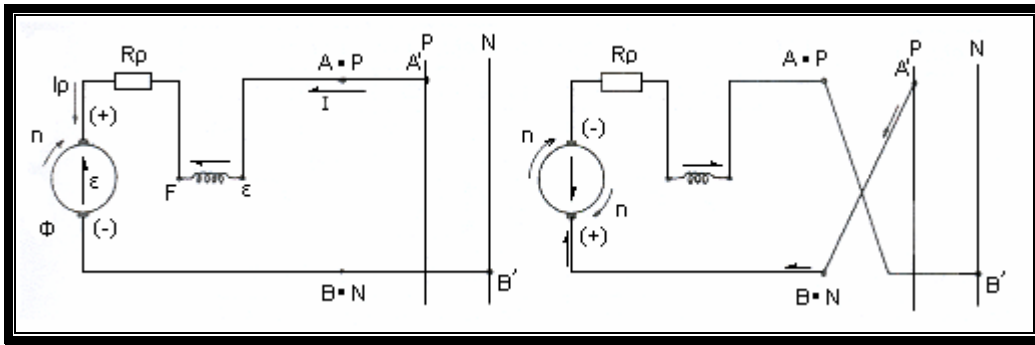
$U_a$   $V_a$   $W_a$  για χαμηλή ταχύτητα

$U_b$   $V_b$   $W_b$  για υψηλή ταχύτητα

### ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Εάν ένα κινητήρα Σ. Ρ με διέγερση εν σειρά αντιστρέψουμε την πολικότητα των ακροδεκτών του η φορά περιστροφής του κινητήρα δεν θα αλλάξει. Αυτό σημαίνει ότι ο κινητήρας Σ.Ρ θα μπορεί να δουλέψει και σε εναλλασσόμενο ρεύμα.

Στην πράξη όμως ένας τέτοιος κινητήρας θα εμφανίσει πολύ μεγάλες αυτεπαγωγικές τάσης λόγω της εναλλαγής της πολικότητας με  $f = 50 \text{ Hz}$ . Η πρώτη μετατροπή που χρειάζεται να γίνει θα είναι να σχηματίσουμε τους μαγνητικούς πόλους με εναλλασσόμενο ρεύμα. Έτσι ο στάτης θα πάρει τύλιγμα E.P. στην περίπτωση αυτή ο στάτης πρέπει να γίνει με φύλλα δυναμοελάσματος για να ελαττωθούν οι απώλειες δινορευμάτων. Στον δρομέα που θα έχει



τύλιγμα Σ.Ρ. θα αναπτυχθούν 2 ειδών Η.Ε.Δ :

$$1. e(t) = \frac{cn\Phi}{\Gamma_{\epsilon p}} \quad (1) \quad (\text{Η.Ε.Δ. περιστροφής μηχανής Σ.Ρ.})$$

$$2. e(t) = \frac{kf\Phi_{12}}{M_{\epsilon T}} \quad (2) \quad (\text{Η.Ε.Δ. μετασχηματιστή})$$

όπου:  $\Phi$  είναι η εναλλασσόμενη μαγνητική ροή του στάτη και  $\Phi_{12}$  είναι η μαγνητική ροή του στάτη που

περνάει από το πηνίο της περιέλιξης του δρομέα Από την (1) προκύπτει ότι Η.Ε.Δ  $e(t)$  στις  $\Gamma_{\epsilon p}$

ψήκτρεις της μηχανής είναι εναλλασσόμενη ημιτονοειδής και με την ίδια συχνότητα του ρεύματος στάτη. Γι' αυτό και η ενεργός τιμή της είναι:

$$E_{\pi \epsilon p} = \frac{1}{2} E_{\Sigma P} = 0,707(\Sigma.P.)$$

$$\text{με την προϋπόθεση } \Phi_{\Sigma P} = \Phi_{\mu \epsilon \gamma} [\Phi(f) = \Phi_{\mu \epsilon \gamma} \eta \mu(\omega t)].$$

Στην μηχανή Ε. Ρ με συλλέκτη γίνεται συνεπώς μικρότερη εκμετάλλευση των μαγνητικών ιδιοτήτων. Η εσωτερική ροπή που αναπτύσσεται στο δρομέα θα είναι γενικά ανάλογη προς το ρεύμα του δρομέα και προς την μαγνητική ροή  $\Phi$ .

$$M(t) = cI_r(f) \bullet \Phi(t)$$

Η διαφορά από τον κινητήρα Σ.Ρ. είναι ότι τα μεγέθη  $I_r$  και  $\Phi$  είναι εναλλασσόμενα. Οι ιδιότητες των κινητήρων με συλλέκτη Ε.Ρ. που συμβάλουν στην ευρεία διάδοση είναι:

1) Λειτουργούν με την συχνότητα του δικτύου 50 HZ και με οποιαδήποτε ταχύτητα περιστροφής.

2) Έχουμε την δυνατότητα προοδευτικής και ευρείας ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής.

3) Χρησιμοποιούνται περισσότερο εκεί όπου με βιομηχανική συχνότητα 50 HZ απαιτείται να πάρουμε υψηλές ταχύτητες περιστροφής,

Η ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων με συλλέκτη Ε.Ρ. με διέγερση σειράς ρυθμίζεται ακριβώς έτσι όπως και στους ανάλογους κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

Μειονεκτήματα των κινητήρων με συλλέκτη Ε.Ρ. είναι η άσχημη μεταγωγή - σπινθηρισμός στις ψήκτρεις, ο οποίος εξηγείται από το ότι επάγεται τάση  $E \text{ M/T}$  που αναφέραμε προηγουμένως εξ' επαγωγής.

Οι κινητήρες αυτοί βρίσκουν εφαρμογή για διάφορους σκοπούς ιδιαίτερα για τα σπίτια (σκούπες, μίξερ κ.λ.π). Κινητήρες Ε.Ρ. με συλλέκτη μεγάλης ισχύος μέχρι 1500 KW χρησιμοποιούνται ως κινητήρες έλξεως στα τρένα.

## Η ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΚΑΙ Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΕ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

Η συνδεσμολογία που επικράτησε για την εκκίνηση του τριφασικού κινητήρα σε μονοφασικό δίκτυο, είναι με ένα ή δυο πυκνωτές ( εκκίνησης, λειτουργίας ).

Οι πυκνωτές συνδέονται πάντα μεταξύ μιας φάσης. Η χωρητικότητα του πυκνωτή λειτουργίας για κάθε αποδιδόμενο [ KW ] ισχύος του κινητήρα δίνεται από τον πίνακα:

$f = 50 \text{ Hz}$	τάση δικτύου πολική	380	220	127
$C_1 [ \text{ } ] / \text{KW}$ ( $M_{EK} \leq 0,3 M_{av.τριφ}$ )		20	70	200

Συνδεσμολογία κινητήρων για διάφορες τάσεις		
125 VΔ/220 VΥ	220 VΔ/380 VΥ	125 VΔ/220 VΥ
Συνδεσμολογία 1  $U_c = 250 \text{ V}$	2  $U_c = 250 \text{ V}$	3  $U_c = 320 \text{ V}$
Οι διακεκομμένες συνδέσεις ισχύουν για την αντίστροφη φορά περιστροφής		αποσυνδεδεμένο πύλιγμα

Υπάρχουν τρεις συνδεσμολογίες. Οι πυκνωτές στις συνδεσμολογίες 1 και 2 πρέπει να αντέχουν σε διαρκή τάση ίση με το 115% της τάσης του δικτύου ( = 250 V ) και δίνονται στο σχήμα. Οι πυκνωτές της συνδεσμολογίας 3 έχουν την μισή ισχύ αλλά η τάση τους πρέπει να είναι 135% της τάσης του δικτύου (320V).

Η ισχύς του τριφασικού κινητήρα σε μονοφασική λειτουργία είναι 70 - 80% της ισχύος του σε τριφασική λειτουργία. Η ροπή εκκίνησης είναι 25 - 35% της ροπής σε τριφασικό δίκτυο.

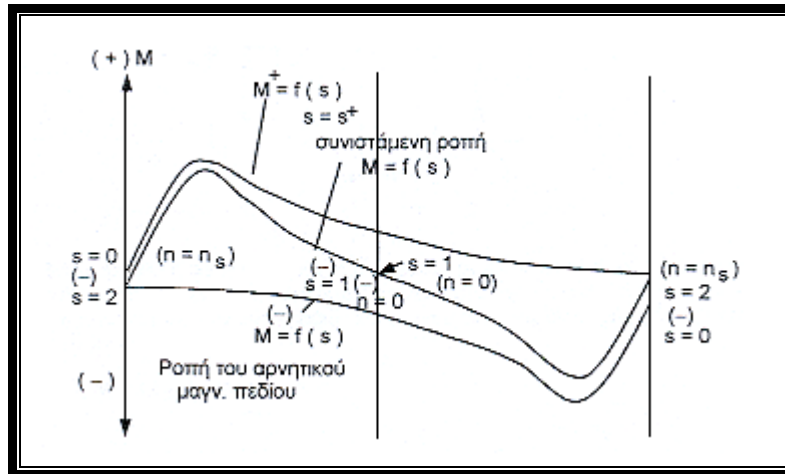
Η χρήση τριφασικών κινητήρων σε μονοφασικό δίκτυο είναι λογικό για κινητήρες μέχρι 2 KW περίπου γι' αυτό πέρα των 2 KW το κόστος των πυκνωτών είναι σημαντικό. Η αλλαγή φοράς περιστροφής του κινητήρα αυτού γίνεται με την αλλαγή της σύνδεσης μόνο του ακροδέκτη φάσης - δικτύου του πυκνωτή. Αυτό φαίνεται στο σχήμα παραπάνω.

## ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΙ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Είχαμε αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο για την λειτουργία τριφασικών κινητήρων επαγωγικών ως μονοφασικών. Υποθέτουμε λοιπόν ότι έχει διακοπές η μια φάση. Τότε ο ασύγχρονος κινητήρας δεν μπορεί να ξεκινήσει μόνος του, δηλ. δεν μπορεί να δημιουργήσει ροπή εκκίνησης. Αν όμως τον φέρουμε σε μια ταχύτητα προς την μια ή την άλλη φορά, τότε συνεχίζει να στρέφεται και μπορεί να κινήσει κάποιο φορτίο. Η ροπή του μεγαλώνει όσο μικραίνει η ταχύτητα, πέρα όμως από μια τιμή ο κινητήρας ανατρέπεται και μένει ακίνητος. Η συμπεριφορά αυτή της μηχανής έχει ως εξής:



Ο στάτης φέρει ένα μονοφασικό τύλιγμα, ενώ ο δρομέας φέρει ένα τριφασικό τύλιγμα, το οποίο μπορεί να είναι βραχυκυκλωμένος κλωβός ή ένα τύλιγμα κανονικό με δακτυλίους ολίσθησης. Στην ηρεμία συμπεριφέρεται όπως ένας μετασχηματιστής με βραχυκυκλωμένο το δευτερεύον. Το μονοφασικό πεδίο του στάτη επάγει στο δρομέα ρεύματα. Το πεδίο του στάτη μπορούμε να το θεωρήσουμε σαν άθροισμα δυο στρεφόμενων πεδίων σε αντίθετη κατεύθυνση με εύρος καθενός ίσο με το μισό εύρος του εναλλασσομένου πεδίου. Τα δυο αυτά πεδία μαζί με τα ρεύματα του δρομέα δημιουργούν δυο ροπές, οι οποίες είναι ίσες μεταξύ τους και αντίθετης φοράς.



Έτσι η ολική ροπή είναι μηδέν και ο κινητήρας δεν αναπτύσσει ροπή εκκίνησης. Εάν τώρα ο δρομέας στραφεί με κάποιο τρόπο προς μια κατεύθυνση και πάρει μια ταχύτητα, τότε η μια συνιστώσα του εναλλασσομένου πεδίου έχει την ίδια φορά περιστροφής με τον δρομέα και λέγεται δεξιόστροφη, ενώ η άλλη στρέφεται αντίθετα προς τον δρομέα και λέγεται αριστερόστροφη. Εάν  $n_s$  είναι η σύγχρονη ταχύτητα καθενός στρεφόμενου πεδίου και  $n$  η ταχύτητα του δρομέα, τότε ορίζουμε δυο ολισθήσεις μια  $s$  για το δεξιόστροφο και μια  $s'$  για το αριστερόστροφο πεδίο.

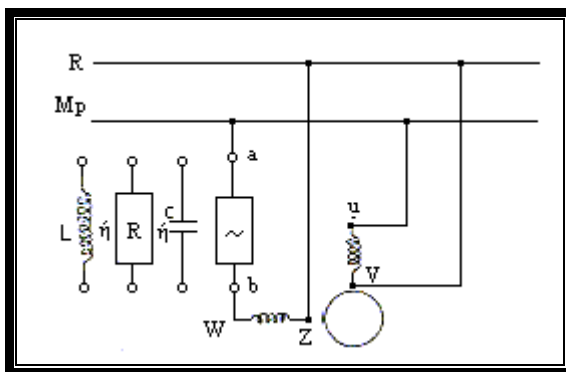
$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$$s' = \frac{n_s - n}{n_s} = 2 - s$$

Αυτό σημαίνει ότι το δεξιόστροφο πεδίο επάγει στον δρομέα ρεύμα με συχνότητα  $s f_s$  και το αριστερόστροφο ρεύμα συχνότητας  $s' f_s = (2 - s) f_s$ . Τα δύο πεδία σχηματίζουν μαζί με τα ρεύματα του δρομέα ροπές, των οποίων το άθροισμα μας δίνει την ολική ροπή. Συνολικά δηλαδή δημιουργούνται τέσσερις ροπές. Δυο από αυτές είναι σταθερές και δύο ταλαντεύονται με μέσο όρο το μηδέν. Οι ταλαντευόμενες σχηματίζονται από το δεξιόστροφο πεδίο με το ρεύμα του δρομέα που έχει συχνότητα  $(2 - s) f_s$  και από αριστερόστροφο με το ρεύμα συχνότητας  $s f_s$ .

## ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΩΝ ΑΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Το κύριο μειονέκτημα του μονοφασικού κινητήρα είναι η αδυναμία του να ξεκινήσει μόνος του. Γι' αυτό το λόγο χρειάζεται βοήθεια στην εκκίνηση. Έτσι αναπτύχθηκαν διάφοροι μέθοδοι εκκίνησης με κοινό γνώρισμα στην εκκίνηση ενός δευτέρου μαγνητικού πεδίου έτσι ώστε να παραχθεί ένα στρεφόμενο ελλειπτικό πεδίο. Για να γίνει αυτό προσθέτουμε παράλληλα στο κύριο τύλιγμα ένα βοηθητικό τύλιγμα που έχει μια απόσταση από το κύριο τύλιγμα ίση με  $90^\circ$  ηλεκτρικές. Αυτό το τύλιγμα τοποθετείται σε ξεχωριστά αυλάκια. Για την δημιουργία του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου πρέπει να περνάει από το βοηθητικό τύλιγμα και ρεύμα που να έχει μια φασική απόκλιση από το ρεύμα του κύριου τυλίγματος. Το βοηθητικό τύλιγμα τίθεται εκτός κυκλώματος μετά την εκκίνηση. Γι'αυτό το ονομάζουμε και τύλιγμα εκκίνησης.



Για να δημιουργηθεί η φασική απόκλιση συνδέουμε σε σειρά με το βοηθητικό τύλιγμα μια ωμική αντίσταση ή ένα πηνίο ή ένα πυκνωτή όπως φαίνεται στο σχήμα. Η ροπή εκκίνησης είναι ανάλογη του γινομένου των ρευμάτων των δυο κλάδων και του ημίτονου της διαφοράς φάσης μεταξύ των ρευμάτων.

$$M = k I_A I_B \sin \varphi$$

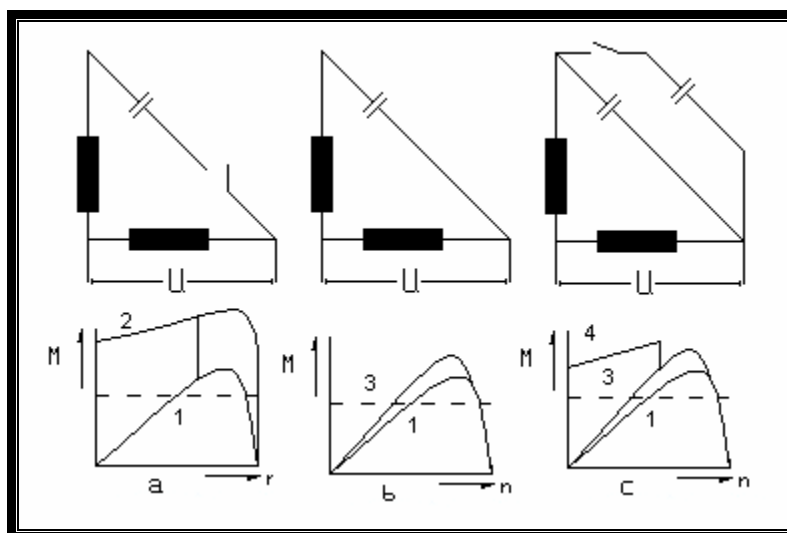
$$\varphi = \begin{matrix} I_A \\ I_B \end{matrix}$$

Το μέγεθος του βοηθητικού ρεύματος  $I_B$  και η γωνία  $\varphi$  εξαρτώνται από το μέγεθος των εξωτερικών στοιχείων που θα συνδέσουμε σε σειρά με το βοηθητικό τύλιγμα. Τα στοιχεία αυτά υπολογίζονται αν γνωρίζουμε την τάση την ροπή  $M$  που θα αναπτύξει η μηχανή.

## ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΕ ΠΥΚΝΩΤΕΣ

Στην πράξη συναντάμε τους μονοφασικούς κινητήρες με πυκνωτές. Αυτοί τοποθετούνται πάνω στο περίβλημα και συνδέονται με τους ακροδέκτες των τυλιγμάτων. Μπορούμε να συνδέσουμε ένα πυκνωτή σε σειρά με το βοηθητικό τύλιγμα που να χρησιμεύει μόνο για την εκκίνηση. Κατόπιν αφού πάρει η-μηχανή ένα ορισμένο αριθμό στροφών, ένας βοηθητικός διακόπτης (φυγοκεντρικός διακόπτης) ανοίγει το βοηθητικό κύκλωμα. Η συνδεσμολογία και η χαρακτηριστική  $M = f(n)$  φαίνονται στο σχήμα:

Η καμπύλη 2 ισχύει για την περίπτωση που έχουμε ένα πυκνωτή, είναι η 1 όταν το βοηθητικό τύλιγμα δεν διαρρέετε από ρεύμα. Όταν φθάσει περίπου τα 2/3 της σύγχρονης ταχύτητας γίνεται μεταπήδηση από την καμπύλη 2 στην 1. Ο πυκνωτής δεν παραμένει συνδεδεμένος κατά την μόνιμη λειτουργία, για να μην περνάει ρεύμα από το βοηθητικό τύλιγμα, το οποίο λόγω της μικρής αντίστασης υπερβαίνει το επιτρεπόμενο όριο και προκαλεί θέρμανση του κινητήρα. Υπάρχει όμως και κινητήρας στον οποίο παραμένει συνδεδεμένος ο πυκνωτής μόνιμα στο κύκλωμα ( βλ. σχήμα ).



Πρέπει όμως η χωρητικότητα αυτού του πυκνωτή να είναι μικρή, ώστε το ρεύμα να μην περνάει τα επιτρεπτά όρια. Τα πλεονεκτήματα αυτού του κινητήρα με πυκνωτή λειτουργίας σε σύγκριση προς τον κινητήρα με πυκνωτή εκκίνησης είναι η μεγαλύτερη ροπή ανατροπής, καλύτερος συντελεστής ισχύος, καλύτερος βαθμός απόδοσης, μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ για τις ίδιες διαστάσεις. Έχει όμως το μειονέκτημα της μικρής ροπής εκκίνησης. Είναι επόμενο να μειώνεται η ροπή εκκίνησης εφ' όσον μειώνεται η χωρητικότητα του πυκνωτή. Μπορούμε επίσης να συνδέσουμε τον πυκνωτή εκκίνησης και τον πυκνωτή λειτουργίας ( βλ. σχήμα ). Ένας πυκνωτής παραμένει μόνιμα συνδεδεμένος, ενώ ένας δεύτερος συνδέεται μόνο κατά την εκκίνηση και αποσυνδέεται μετά με ένα φυγοκεντρικό διακόπτη. Έτσι παίρνουμε στην αρχή την καμπύλη 4 που παρουσιάζει μεγάλη ροπή εκκίνησης ενώ μετά γίνεται μετάβαση στην καμπύλη 3, που έχει όλα πλεονεκτήματα αναφέραμε προηγουμένως. Η καμπύλη 1 είναι η χαρακτηριστική του μονοφασικού κινητήρα χωρίς πυκνωτές. Η φορά περιστροφής ενός μονοφασικού κινητήρα αλλάζει αν αλλάξουμε τους πόλους του κύριου τυλιγματος. Αν αλλάξουμε τους πόλους και των δυο τυλιγμάτων δεν αλλάζει η φορά περιστροφής. Η αλλαγή φοράς εξαρτάται βέβαια από την φορά περιστροφής του συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου.

### ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Σήμερα στη βιομηχανία, στα οικήματα, στα κυκλώματα αυτοματισμού μεγάλη διάδοση έλαβαν οι μονοφασικοί μικροκινητήρες Ε.Ρ. με διέγερση σειράς.

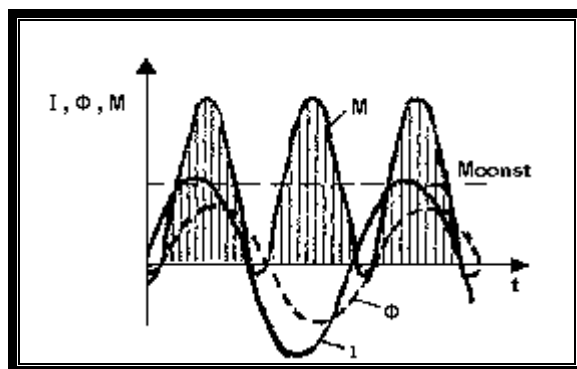
Αυτοί οι κινητήρες απ' την κατασκευή τους σχεδόν δεν διαφέρουν απ' τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος διεγέρσεως σειράς. Η διαφορά τους είναι στο ότι αυτοί δεν αποτελούνται από χυτό, αλλά από δυναμοελάσματα ηλεκτροτεχνικού χάλυβα το κέλυφος και τους πόλους. Το τελευταίο είναι απαραίτητο για τη μείωση των απωλειών απ' τα δινορεύματα απ' την εναλλασσόμενη στο χρόνο μαγνητική ροή.

Η ροπή στρέψεως του κινητήρα δημιουργείται, όπως και στους κινητήρες Σ.Ρ. εις βάρος της αλληλοεπίδρασης των ρευμάτων του τυλίγματος του δρομέα με τη μαγνητική ροή των πόλων: Με τη μεταβολή στο χρόνο της φοράς του ρεύματος η ροπή στρέψεως πρακτικά δεν μεταβάλλεται στη φορά, διότι σχεδόν ταυτόχρονα με το ρεύμα  $I = I_m \sin \omega t$  αλλάζει φορά και η μαγνητική ροή των πόλων:

$$M \approx I_p \Phi$$

$\Phi = \Phi_m \sin (\omega t - \beta)$ . Όμως συνέπεια της πρακτικής ημιτονικής μεταβολής στο χρόνο του ρεύματος  $I$  και της ροής  $\Phi$  η ροπή στρέψεως δεν παραμένει σταθερή, αλλά μεταβάλλεται ημιτονικά στο χρόνο με συχνότητα, ίση με διπλάσια της συχνότητας δικτύου. Σε ορισμένες στιγμές χρόνου ( σχ. 25.35 ) αυτή μάλιστα γίνεται αρνητική. Η μεταβολή της ροπής, όμως συνέπεια της μεγάλης συχνότητας μεταβολής στο χρόνο και των σημαντικών ροπών αδρανείας του δρομέα και του συμπλεγμένου σε περιστροφή μηχανήματος, πρακτικά λίγο γίνεται αισθητή. Ο κινητήρας αναπτύσσει στον άξονα ροπή, ίση της μέσης για μια περίοδο της στιγμιαίας ροπής.

Από λειτουργικές ιδιότητες ο κινητήρας Ε. Ρ. με συλλέκτη μας θυμίζει τον κινητήρα Σ.Ρ. με διέγερση σειράς αλλά μερικώς υποχωρεί του τελευταίου στους ενεργητικούς δείκτες (  $\eta$ ,  $\cos \phi$  ) συνέπεια των υψηλών ηλεκτρικών και μαγνητικών απωλειών.



*Συναρτήσεις ροπής στρέψεως  $M$ ς ρεύματος  $I$  και μαγνητικής ροής του τυλίγματος διεγέρσεως  $\Phi$  απ' το χρόνο στον μονοφασικό κινητήρα Ε.Ρ με συλλέκτη.*

Οι θετικές ιδιότητες των κινητήρων με συλλέκτη Ε.Ρ. που συμβάλλουν στην ευρεία διάδοση, παρ' όλα τα μειονεκτήματα των είναι: κατά *πρώτον*, η δυνατότητα λήψης με βιομηχανική συχνότητα 50HZ πρακτικά οποιονδήποτε ταχυτήτων περιστροφής, κατά *δεύτερον*, η δυνατότητα απλής προοδευτικής και ευρείας ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής. Αυτοί οι κινητήρες ιδιαίτερα χρησιμοποιούνται εκεί όπου με βιομηχανική συχνότητα 50 HZ απαιτείται να πάρουμε υψηλές ταχύτητες περιστροφής 3.000 - 20.000 rpm ότι δεν μπορούμε να πετύχουμε με την βοήθεια των σύγχρονων και των ασύγχρονων κινητήρων.

Η ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων με συλλέκτη Ε.Ρ. με διέγερση σειράς ρυθμίζεται ακριβώς έτσι, όπως και στους ανάλογους κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

Σοβαρό μειονέκτημα των κινητήρων με συλλέκτη Ε.Ρ. είναι η άσχημη μεταγωγή, το υψηλό σπινθήρισμα υπό των ψηκτρών το οποίο επεξηγείτε ότι επάγεται στις ομάδες μεταγωγής Η.Ε.Δ μετασχηματισμού.

Συνέπεια του σημαντικού σπινθηρίσματος, η επαφή συλλέκτη - ψηκτρών είναι πηγή ραδιοφωνικών παρασίτων, για την εξάλειψη των οποίων χρησιμοποιούνται ειδικά φίλτρα.

Οι κινητήρες αυτοί βρίσκουν εφαρμογή για διάφορους σκοπούς ιδιαίτερα για τα σπία (σκούπες απορροφήσεως, μίξερ, ηλ. Μηχανές ξυρίσματος).

Κινητήρες Ε.Ρ με συλλέκτη μεγάλης ισχύος μέχρι 1500 KW χρησιμοποιούνται ως κινητήρες έλξης αυτοκινηταμαξών στις σιδηροδρομικές γραμμές σε μια σειρά Δυτικό - Ευρωπαϊκών χωρών. Μ' αυτό η συχνότητα του Ε.Ρ είναι 25 HZ.

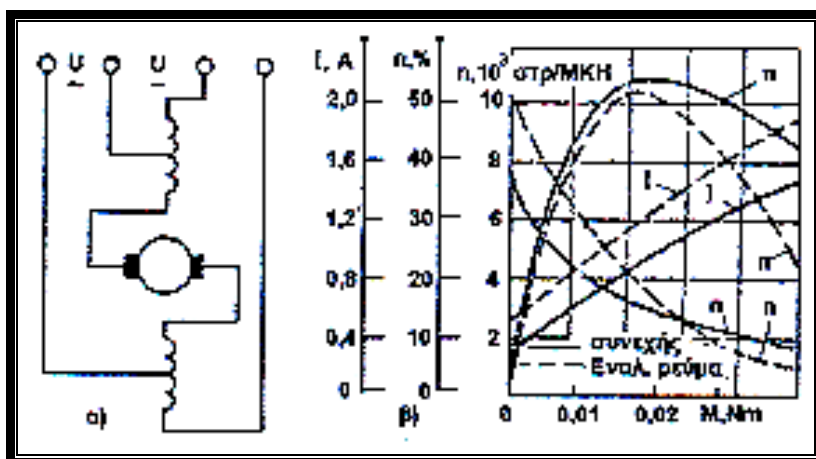
### **ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΕ ΣΥΛΛΕΚΤΗ "ΓΙΟΥΝΙΒΕΡΣΑΛ"**

Σήμερα εκτός απ' τους κινητήρες με συλλέκτη συνεχούς και εναλλασσομένου ρεύματος κατασκευάζεται μεγάλος αριθμός κινητήρων με συλλέκτη γιουνιβέρσαλ, ικανούς να εργαστούν όπως και το δίκτυο συνεχούς ρεύματος, έτσι και απ' το δίκτυο εναλλασσομένου ρεύματος βιομηχανικής συχνότητας 50 HZ.

Απ' αυτήν την κατασκευή τους αυτοί οι κινητήρες σχεδόν δεν διαφέρουν απ' τους κινητήρες με συλλέκτη Ε.Ρ. με διέγερση σειράς. Η διαφορά τους είναι ότι έχουν πρόσθετο μεσαίο ακροδέκτη στο τύλιγμα διεγέρσεως. Με τη λειτουργία τους στο συνεχές ρεύμα υπό τάση συνδέεται όλο το τύλιγμα διεγέρσεως, με την λειτουργία τους στο εναλλασσόμενο ρεύμα - μόνο το τμήμα του τυλίγματος διεγέρσεως. Το τελευταίο είναι απαραίτητο για την προσέγγιση των χαρακτηριστικών του κινητήρα στο συνεχές και εναλλασσόμενο ρεύμα.

Το ζήτημα είναι ότι, με την χρησιμοποίηση όλου του τυλίγματος στο Ε.Ρ. ο κινητήρας αναπτύσσει λιγότερες ροπές και έχει λιγότερες στροφές, από ότι στο συνεχές ρεύμα, που εξηγείται η επίδραση στο πλάτος και στη φάση του Ε.Ρ. των επαγωγικών αντιστάσεων του τυλίγματος του δρομέα και της διέγερσης.

Πρέπει να τονίσουμε ότι ακόμα με τη χρησιμοποίηση όλου του τυλίγματος στο Ε.Ρ μόνο στο τμήμα σπειρών του τυλίγματος διεγέρσεως ο κινητήρας μπορεί να είναι γιουνιβέρσαλ μόνο από το μέγεθος της αναπτυσσόμενης ισχύος, συνάμα μόνο για κάποια μια πλήρης προσδιορισμένη ταχύτητα περιστροφής. Σε όλες τις άλλες ταχύτητες περιστροφής οι μηχανικές χαρακτηριστικές του κινητήρα στο Ε.Ρ είναι χειρότερες, απ' ότι στο συνεχές. Στο Ε.Ρ είναι χαμηλότερος ο βαθμός απόδοσης συνέπεια των αυξημένων ηλεκτρικών και μαγνητικών απωλειών, χειρότερη μεταγωγή απ' την παρουσία Η.Ε.Δ μετασχηματισμού.



Σχέδιο αρχής λειτουργίας (α) και λειτουργικές χαρακτηριστικές (β) κινητήρα με συλλέκτη γιουινβέρσαλ.

Συνήθως στους κινητήρες γιουινβέρσαλ η ονομαστική ισχύς στο συνεχές ρεύμα είναι μερικώς μεγαλύτερη, απ' ό,τι στο εναλλασσόμενο.

### ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΕ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Ο τριφασικός κινητήρας με συλλέκτη Ε. Ρ στην αρχή λειτουργίας είναι ασύγχρονη μηχανή, διότι ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται με ταχύτητα, διαφορετική της ταχύτητας περιστροφής του πεδίου.

Η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής πραγματοποιείται με τη μέθοδο εισαγωγής στο δευτερεύον κύκλωμα της μηχανής πρόσθετης Η.Ε.Δ  $E_{\pi}$  συχνότητας διολίσθησης. Για αυτό το σκοπό στο δρομέα της μηχανής περιελίσσεται τύλιγμα, όμοιο του τυλίγματος του δρομέα μηχανής Σ.Ρ. συνδεδεμένο προς το συλλέκτη. Ο συλλέκτης και το σύστημα ψηκτρών χρειάζονται για τη μετατροπή του ρεύματος μιας συχνότητας, υπάρχουσας στο τύλιγμα συλλέκτη, σε ρεύμα άλλης συχνότητας στο κύκλωμα, συνδεδεμένο στις ψήκτρες. Με τη βοήθεια του συλλέκτη στο δευτερεύον κύκλωμα της μηχανής εισάγεται πρόσθετη Η.Ε.Δ, που έχει την ίδια συχνότητα, που έχει και η Η.Ε.Δ που επάγεται στο δευτερεύον τύλιγμα απ' το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Με τη μετατόπιση των ψηκτρών και τη μεταβολή της διαδικασίας λειτουργίας το πλάτος και η φάση αυτής της Η.Ε.Δ μεταβάλλονται.

Η εισαγωγή πρόσθετης Η.Ε.Δ στο δευτερεύον τύλιγμα επιτρέπει ευρεία και προοδευτικά να ρυθμίζουμε την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα υψηλό συντελεστή ισχύος.

Η μηχανή με συλλέκτη είναι αναστρέψιμη. Αυτή μπορεί να εργάζεται σε λειτουργία κινητήρα και σε λειτουργία γεννήτριας. Όμως σε λειτουργία γεννήτριας οι μηχανές με συλλέκτη χρησιμοποιούνται πολύ σπάνια. Οι ασύγχρονες γεννήτριες με συλλέκτη, που επιτρέπουν να λάβουμε σταθερή συχνότητα με μεταβαλλόμενη ταχύτητα η, αντίθετα, μεταβαλλόμενη συχνότητα με σταθερή ταχύτητα περιστροφής χρησιμοποιούνται μόνο σε ειδικά κυκλώματα.

Οι τριφασικές μηχανές με συλλέκτη βρίσκουν εφαρμογή σε συγκροτήματα συμπλεκόμενα με δακτυλιοφόρους ασύγχρονους κινητήρες. Τα συμπλεκόμενα συγκροτήματα επιτρέπουν να ρυθμίζουμε το συντελεστή ισχύος την ταχύτητα του δακτυλιοφόρου ασύγχρονου κινητήρα.

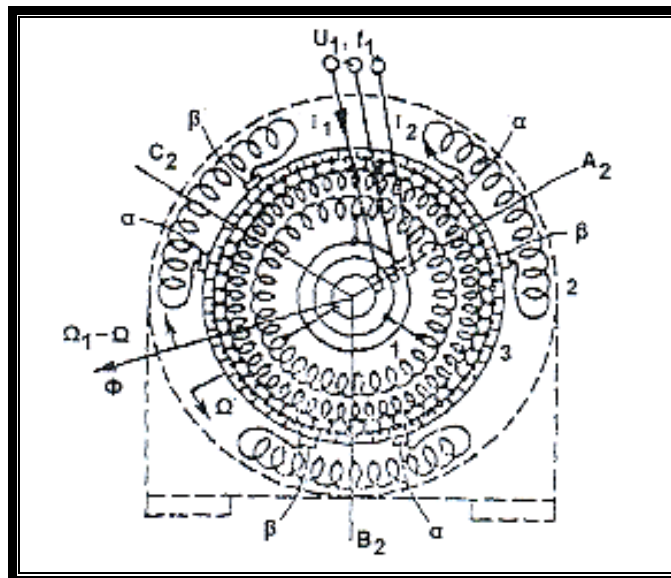
Οι ασύγχρονοι κινητήρες με συλλέκτη στερούνται των βασικών μειονεκτημάτων των ασύγχρονων κινητήρων με χωρίς συλλέκτη. Αυτοί επιτρέπουν προοδευτικά, οικονομικά και με υψηλό συντελεστή ισχύος να ρυθμίζουμε την ταχύτητα περιστροφής. Μαζί μ' αυτό η αξία των κινητήρων με συλλέκτη είναι 1,5 ÷ 2 φορές μεγαλύτερη της αξίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος και 4 ÷ 6 φορές περισσότερο της αξίας των ασύγχρονων κινητήρων. Η τελειοποίηση των συστημάτων ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής με τη βοήθεια των συνηθισμένων ασύγχρονων κινητήρων, η δημιουργία κινητήρων συνεχούς ρεύματος με ευρύ φάσμα ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής οδήγησαν τα τελευταία χρόνια στον περιορισμό της χρησιμοποίησης μηχανών με συλλέκτη Ε.Ρ. Περισσότερη διάδοση απ' τους τριφασικούς κινητήρες με συλλέκτη έλαβε ο κινητήρας με παράλληλη διέγερση και διπλό σετ ψηκτρών ( ο κινητήρας του Σράγκε - Ρίχτερ ).

Η κατασκευή και η αρχή λειτουργίας του κινητήρα επεξηγούνται στο 25.40. Το πρωτεύον τύλιγμα 1 του κινητήρα τοποθετείται στο δρομέα και αποτελεί συνηθισμένο τριφασικό τύλιγμα Ε. Ρ συνδεδεμένο σε αστέρα ή τρίγωνο. Η τροφοδοσία του πρωτεύοντος τυλίγματος γίνεται απ' το δίκτυο  $U_1 f_1$  δια των δακτυλιδιών επαφής. Στα ίδια λούκια, όπου και το πρωτεύον τύλιγμα, είναι τοποθετημένο το πρόσθετο τύλιγμα 3, το οποίο συνδέεται στο συλλέκτη και αποτελεί το συνηθισμένο τύλιγμα δρομέα μηχανής Σ.Ρ. Το δευτερεύον τύλιγμα 2 του κινητήρα είναι τοποθετημένο στο στάτη. Αυτό είναι τριφασικό η πολυφασικό τύλιγμα, τα άκρα του οποίου συνδέονται προς τις ψήκτρες α και β, που εφάπτονται στο συλλέκτη. Όλες οι ψήκτρες α και όλες οι ψήκτρες β στερεώνονται σε δυο ξεχωριστές τραβέρσες, οι οποίες με τη βοήθεια ειδικού μηχανικού συστήματος μπορούν αμοιβαία να μετατοπιστούν.

Η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα γίνεται με εισαγωγή στο δευτερεύον τύλιγμα πρόσθετης Η.Ε.Δ Ε π συχνότητας διολισθήσεως  $f_2 = S_{F1}$ . Η.Ε.Δ . επάγεται απ' την περιστρεφόμενη ροή Φ στο τμήμα του πρόσθετου τυλίγματος 3, οριζόμενου μεταξύ των ψηκτρών α και β, προς τις οποίες συνδέονται τα άκρα των φάσεων του δευτερεύοντος τυλίγματος. Η συχνότητα της πρόσθετης Η.Ε.Δ είναι ίση με την συχνότητα της βασικής Η.Ε.Δ του δευτερεύοντος τυλίγματος  $f_{\pi} = S_{F1}$  όπου  $f_1$  η συχνότητα Η.Ε.Δ ... , επαγόμενη στο τύλιγμα 3 απ' την περιστρεφόμενη ροή  $\Phi, s = (\omega_c - \omega_p) / \omega_c$  - η διολίσθηση του στάτη ( των ψηκτρών ) σε σχέση προς το περιστρεφόμενο πεδίο,  $\omega$  - γωνιακή ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου σε σχέση προς το δρομέα,  $\omega_c$  - γωνιακή ταχύτητα του δρομέα,  $(\omega_c - \omega_p)$  - η γωνιακή ταχύτητα του πεδίου σε σχέση προς το στάτη.

Με τη συμμετρική τοποθέτηση των ψηκτρών α και β σε σχέση προς τους άξονες των φάσεων του δευτερεύοντος τυλίγματος ( $A_2, B_2, C_2$ ) η Η.Ε.Δ  $E_{\pi}$  βρίσκεται σε φάση (ή αντίφαση) με την Η.Ε.Δ  $sE_2$ , που επάγεται απ' την ροή Φ στο δευτερεύον τύλιγμα. Η πρόσθετη Η.Ε.Δ είναι ανάλογη του μήκους τόξου του συλλέκτη μεταξύ των ψηκτρών α και β της δεδομένης φάσης.

Για τη λήψη ταχύτητας περιστροφής άνω της σύγχρονης είναι απαραίτητο τις ψήκτρες α να τις μετατοπίσουμε σε σχέση προς τον άξονα της φάσεως ( $A_2, B_2, C_2$ ) αντίθετα της φοράς περιστροφής του δρομέα, ενώ τις ψήκτρες β - προς τη φορά περιστροφής.



Με τη μη συμμετρική μετατόπιση των ψηκτρών σε σχέση προς τους άξονες των φάσεων του στάτη στο δευτερεύον τύλιγμα μπορεί να εισαχθεί προσθετή Η.Ε.Δ, προπορευόμενη της Η.Ε.Δ  $S_{E2}$  κατά  $90^\circ$  ( και η οποία συμπίπτει είναι σε φάση με τη ροή  $\Phi$  ), που θα επιφέρει την καλύτερη του συντελεστή  $\cos\phi_1$  ).

Οι κινητήρες κατασκευάζονται για ισχύς από 1,5 μέχρι 150 KW, σε ξεχωριστές περιπτώσεις - μέχρι 250KW. Κανονικά όρια ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής  $2\div 1-4\div 1$  έχουν σταθερές μηχανικές χαρακτηριστικές για κάθε θέση των ψηκτρών. Με τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής ο  $\cos\phi_1$  είναι τέτοιος, όπως και στους συνηθισμένους ασύγχρονους κινητήρες. Με ταχύτητα περιστροφής άνω της σύγχρονης ο  $\cos\phi_1$  βελτιώνεται και μπορεί να φθάσει το 1. Με ταχύτητα περιστροφής σύγχρονης ο  $\cos\phi_1$ , μπορεί να γίνει αρκετά υψηλός μόνο με τη συμμετρική μετατόπιση των ψηκτρών ( που αυτό μπορεί να γίνει μόνο στους μη αναστρεφόμενους κινητήρες ). Ο βαθμό μερικώς χαμηλότερος, απ' ότι στο συνηθισμένο κινητήρα με σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής άνω της σύγχρονης ( εις βάρος της εμφάνισης απωλειών στις τριβές των ψηκτρών και στις μεταβατικές επαφές και την αύξηση των μαγνητικών απωλειών ). Με ταχύτητα περιστροφής κάτω της σύγχρονης ο βαθμός απόδοσης μειώνεται ουσιαστικά.

Η εκκίνηση γίνεται απ' ευθείας ( άμεσα ) με τη σύνδεση του στο δίκτυο. Στους κινητήρες με κανονικά όρια ρυθμίσεως της ταχύτητας περιστροφής η ροπή εκκινήσεως είναι  $1,2\div 2$  φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής ροπής. Το ρεύμα εκκινήσεως υπερβαίνει το ονομαστικό  $1,5\div 2$  φορές.

Ο κινητήρας του ( Σράγκε - Ρίχτερ ) βρίσκει εφαρμογή στους κινητήρες που δεν αναστρέφονται με ευρεία και προοδευτική ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής: στις μηχανές τυπογραφείων, στη χαρτοβιομηχανία, κλωστοϋφαντουργία και τσιμεντοβιομηχανία.

Τα όρια ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής σε ιδιαίτερες περιπτώσεις ευρύνονται μέχρι  $50\div 1$ . Η αξία και οι διαστάσεις του κινητήρα μεγαλώνουν με τη διεύρυνση των ορίων ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής.

Οι κινητήρες με συλλέκτη μπορούν να λειτουργήσουν ως γεννήτριες σε όλο το φάσμα ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής δίνοντας την ενέργεια στο δίκτυο.



## ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Η ταχύτητα και η ροπή του επαγωγικού κινητήρα μπορούν να μεταβληθούν με έναν από τους παρακάτω τρόπους.

- A) Έλεγχος της τάσης από τον στάτη
- B) Έλεγχος της τάσης από τον δρομέα
- Γ) Έλεγχος της συχνότητας
- Δ) Έλεγχος της τάσης και της συχνότητας
- Ε) Έλεγχος του ρεύματος του στάτη
- ΣΤ) Έλεγχος της τάσης, ρεύματος, συχνότητας

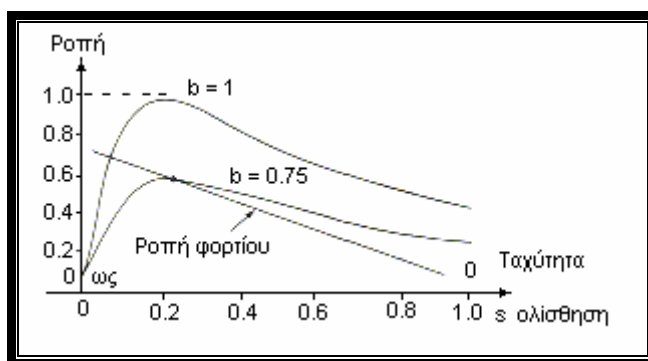
## ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ

Η εξίσωση

$$M_{\varepsilon\sigma} = \frac{3U_{1\phi}^2}{\omega_1} \times \frac{1}{(R_1 + \frac{R'_2 + R'_\pi}{s}) + X^2_{\sigma}} \times \frac{R'_2 + R'_\pi}{s} \quad (1)$$

δείχνει ότι η ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης εισόδου και μία μείωση της τάσης αυτής θα μας προκαλέσει μείωση της ταχύτητας. Αν η τάση μειωθεί από  $U_{1\phi}$  σε  $\kappa U_{1\phi}$  τότε η εξίσωση δίνει

$$M_{\varepsilon\sigma} = \frac{3(\kappa U_{1\phi})^2}{\omega_1} \times \frac{1}{(R_1 + \frac{R'_2 + R'_\pi}{s}) + X^2_{\sigma}} \times \frac{R'_2 + R'_\pi}{s} \quad \text{όπου } \kappa \leq 1. \quad (2)$$



Σχήμα 1. Χαρακτηριστική Ροπής – ταχύτητας με μεταβλητή τάση του στάτη

**Η εικόνα 1** δείχνει τις τυπικές μηχανικές χαρακτηριστικές  $M=f(n)$  για διάφορες τιμές του  $\kappa$ . Τα σημεία τομής αυτών και της χαρακτηριστικής φορτίου δίνει τα σημεία λειτουργίας του συστήματος.

Σε κάποιο μαγνητικό κύκλωμα, η παραγόμενη τάση είναι ανάλογη της ροής και της συχνότητας, και η ενεργός τιμή της ροής διακένου μπορεί να δοθεί ως.

$$U_{2\phi} = \kappa U_{1\phi} = \kappa_m \cdot \omega \cdot \phi \quad (3) \quad \text{ή}$$

$$\phi = \frac{U_{2\phi}}{\kappa_m \omega} = \frac{\kappa U_{1\phi}}{\kappa_m \omega} \quad (4) \quad \text{όπου } \kappa_m \text{ είναι μια σταθερά η οποία εξαρτάται από τον}$$

αριθμό των αμπεροστροφών του τυλίγματος του στάτη. Καθώς η τάση του στάτη μειώνεται η

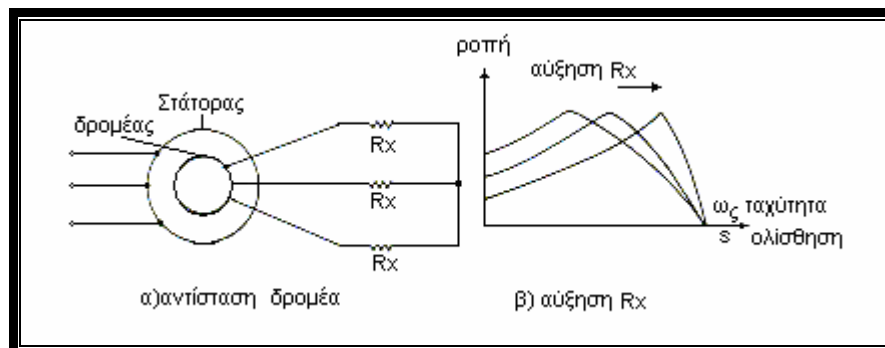
ροή του διακένου και η ροπή επίσης μειώνονται. Σε μια χαμηλή τάση, το ρεύμα θα είναι μέγιστο σε μια τιμή της ολίσθησης  $S = \frac{1}{3}$  (5) σχήμα 1

Η περιοχή ελέγχου της ταχύτητας εξαρτάται από την ολίσθηση  $S_{ov}$  για την μέγιστη ροπή. Για χαμηλής ολίσθησης κινητήρα, η περιοχή ταχύτητας είναι πολύ περιορισμένη. Αυτός ο τύπος ελέγχου της τάσεως του στάτη δεν είναι κατάλληλος για φορτία σταθερής ροπής και εφαρμόζεται σε εγκαταστάσεις που απαιτούν χαμηλή ροπή εκκίνησης και μια περιορισμένη περιοχή μεταβολής της ταχύτητας. Η μεταβολή της τάσης μπορεί να γίνει 1) από ένα τριφασικό εναλλάκτη 2) από inverters και 3) από PWM inverters.

Οι ελεγκτές (controllers) A.C είναι πολύ απλοί. Οι αρμονικές συνιστώσες είναι υψηλές και ο συντελεστής ισχύος των ελεγκτών είναι χαμηλός. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εγκαταστάσεις χαμηλής ισχύος, όπως, ανεμιστήρες, φυγοκεντρικές αντλίες, αναδευτήρες των οποίων η ροπή εκκίνησης είναι χαμηλή. Επίσης χρησιμοποιείται για να περιορίσει το ρεύμα εκκίνησης σε υψηλής ισχύος επαγωγικούς κινητήρες.

### Έλεγχος της τάσης του δρομέα

Σε ένα δακτυλιοφόρο κινητήρα, μια εξωτερική τριφασική αντίσταση μπορεί να συνδεθεί στα δακτυλίδια όπως φαίνεται στο σχήμα. Η αποδιδόμενη ροπή μπορεί να μεταβληθεί μεταβάλλοντας την αντίσταση  $R_{π}$ . Αν η  $R'_{π}$  η οποία είναι ανηγμένη στο στάτη προστεθεί στην  $R'_2$  η εξίσωση της Μεσ θα μας δώσει την ροπή.



Σχήμα 2 .Έλεγχος ταχύτητας με εξωτερική αντίσταση

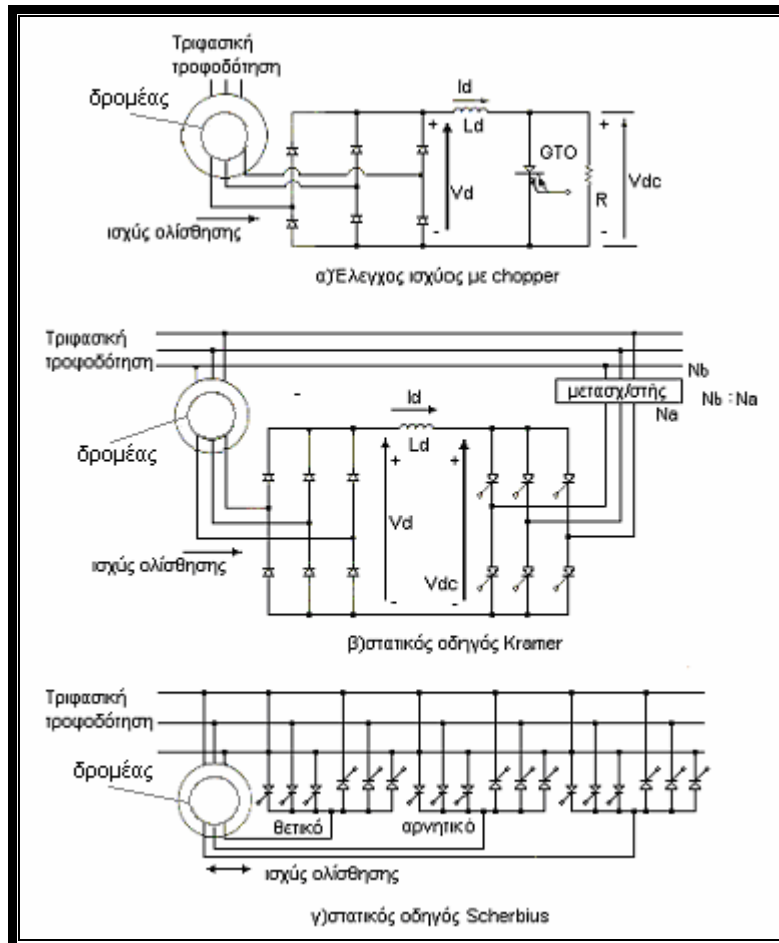
Οι μηχανικές χαρακτηριστικές  $M=f(n)$  για διαφορετικές τιμές της  $R_{π}$  δίνονται στο **σχήμα 2β**. Αυτή η μέθοδος αυξάνει την ροπή εκκίνησης ενώ περιορίζει το ρεύμα εκκίνησης. Αυτή συνήθως είναι μια αποδοτική μέθοδος και μπορεί να προκαλέσει διαταραχές στην ισορροπία του συστήματος στις τάσεις και στα ρεύματα αν και οι αντιστάσεις δεν είναι ίσες. Ένας δακτυλιοφόρος κινητήρας σχεδιάζεται να έχει χαμηλή τιμή αντίστασης στο δρομέα έτσι ώστε η απόδοσή του να είναι υψηλή και η ονομαστική ολίσθηση να είναι χαμηλή. Η αύξηση της τιμής της  $R_{π}$  δεν μεταβάλλει την ροπή ανατροπής αλλά την ολίσθηση ανατροπής.

Οι δακτυλιοφόροι κινητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως σε εγκαταστάσεις που απαιτούν συχνές εκκινήσεις και πεδησεις με μηχανισμούς μεγάλων ροπών. (π.χ γερανοί , ανυψωτές).

Αλλάζοντας την αντίσταση του δρομέα με εξωτερική αντίσταση προσφέρεται μεγαλύτερη ευκαμψία στον έλεγχο αλλά αυτό αυξάνει το κόστος λόγω συντήρησης που οφείλεται στα δαχτυλίδια ολίσθησης και στις ψήκτρες.

καλείται ισχύς ολίσθησης. Αυτή καταναλίσκεται στην αντίσταση R.

Η ισχύς αυτή μπορεί να επιστραφεί στην είσοδο αλλάζοντας το chopper και την αντίσταση R με ένα πλήρως ελεγχόμενο μετατροπέα όπως αυτός του σχ.3β



σχήμα 3.

Ο μετατροπέας λειτουργεί στην αντίθετη περιοχή με γωνία  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$  επιστρέφοντας ενέργεια στο δίκτυο. Η μεταβολή της γωνίας αυτής επιτρέπει την ροή ισχύος και τον έλεγχο της ταχύτητας. Αυτός ο τύπος ελέγχου είναι γνωστός ως έλεγχος Kramer. Αν πάλι αλλάξουμε τις ανορθωτικές γέφυρες με κυκλοκονβέρτερς όπως στο σχήμα 3γ η ισχύς ολίσθησης ρέει στην κατεύθυνση που είναι δυνατή και αυτή η διάταξη καλείται scherbius. Αυτές οι διατάξεις (Kramer-scherbius) χρησιμοποιούνται σε αντλίες μεγάλης ισχύος και εγκαταστάσεις αναδευτήρων όπου απαιτείται μια περιοχή ελέγχου των στροφών. Αφού ο κινητήρας συνδέεται ακριβώς στην πηγή, ο συντελεστής ισχύος αυτών των ελεγκτών (οδηγών) είναι γενικά υψηλός.

### Έλεγχος συχνότητας

Η ροπή και η ταχύτητα περιστροφής των επαγωγικών κινητήρων μπορούν να ελεγχθούν αλλάζοντας τη συχνότητα τροφοδοσίας. Από την εξίσωση (1) γνωρίζουμε ότι για την ονομαστική τάση και συχνότητα η ροή έχει την ονομαστική τιμή. Αν η τάση παραμείνει σταθερή στην

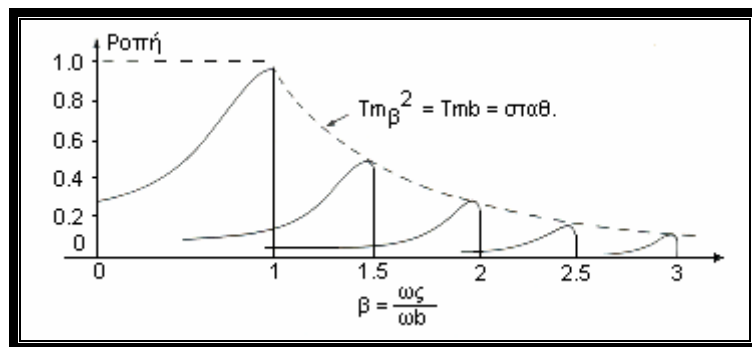
ονομαστική της τιμή καθώς η συχνότητα πέφτει κάτω της ονομαστικής τιμής, η μαγνητική ροή θα αυξηθεί. Αυτό θα προκαλέσει κορεσμό της ροής διακένου και οι παράμετροι του κινητήρα δεν θα συνυπολογισθούν στον καθορισμό της χαρακτηριστικής της ροπής με την ταχύτητα. Σε χαμηλή συχνότητα, η αντίδραση θα μειωθεί και το ρεύμα του κινητήρα θα αυξηθεί πολύ. Αυτός ο τύπος ελέγχου της συχνότητας δεν χρησιμοποιείται στην πράξη.

Αν η συχνότητα αυξηθεί πέρα του ορίου της ονομαστικής τιμής, η ροή και η ροπή θα μειωθούν. Αν η σύγχρονη ταχύτητα ανταποκρίνεται στην ονομαστική συχνότητα τότε αυτή ονομάζεται βασική ταχύτητα  $\omega_b$  και η σύγχρονη ταχύτητα καθώς και κάθε άλλη ταχύτητα γίνεται  $\omega_s = \beta \times \omega_b$  και η ολίσθηση είναι

$$S = \frac{\beta \omega_b - \omega_m}{\beta \omega_b} = \frac{1 - \omega_m}{\beta \omega_b} \quad (6)$$

Η ροπή γίνεται:

$$M_{\epsilon\sigma} = \frac{3 R'_2 \times V_{1\phi}^2}{S \beta \omega_b [(R_1 + \frac{R'_2}{S})^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2]} \quad (7)$$



Σχήμα 4 .Χαρακτηριστικές ροπής με έλεγχο συχνότητας

Η τυπική χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας φαίνεται στο σχήμα 4 για μεταβλητές τιμές του  $\beta$ . Αν η  $R_1$  αγνοηθεί έχουμε τη μέγιστη ροπή στη βασική ταχύτητα:

$$M_{\max} = \frac{3 U_{1\phi}^2}{2 \omega_b (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})} \quad (8)$$

Η μέγιστη ροπή για κάθε άλλη ταχύτητα είναι:

$$M_m = \frac{3}{2 \omega_b (X_{1\sigma} + \beta X'_{2\sigma})^2} \left( \frac{U_{1\phi}}{\beta} \right)^2 \quad (9)$$

και η αντίστοιχη ολίσθηση είναι Διαιρώντας τις δύο παραπάνω σχέσεις έχουμε:  $\frac{M_{\max}}{M_m} = \frac{1}{\beta^2}$

(10) και  $M_m = M_{\max} \cdot \beta^2$  (11) Επί πλέον από τις δύο αυτές εξισώσεις συμπεραίνουμε ότι η ροπή είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας και  $M_m \cdot \beta^2 = \text{σταθερή}$  όπως

συμβαίνει και στον κινητήρα σειράς συνεχούς ρεύματος. Σε αυτόν τον τύπο ελέγχου λέμε ότι ο κινητήρας λειτουργεί στην περιοχή εξασθένισης πεδίου. Για  $\beta > 1$  ο κινητήρας λειτουργεί με μια σταθερή τάση και η ροή μειώνεται μέχρι ενός σημείου που εξαρτάται από την ικανότητα του κινητήρα. Για  $1 < \beta < 1,5$  η σχέση μεταξύ της  $M_m$  και του  $\beta$  είναι γραμμική. Για  $\beta < 1$  ο κινητήρας λειτουργεί ομαλά με μια σταθερή ροή μειώνοντας την τάση και την συχνότητα έτσι ώστε η τάση να παραμένει σταθερή.

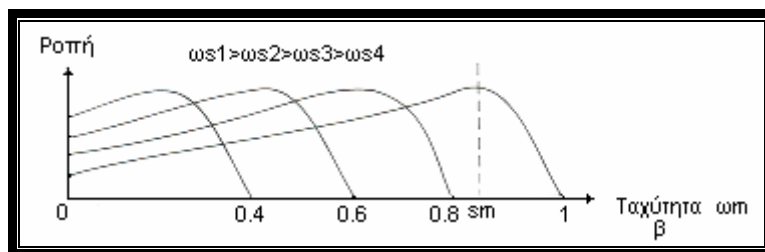
### Έλεγχος τάσης και συχνότητας

Αν ο λόγος της τάσης προς την συχνότητα παραμένει σταθερός, η ροή από την εξίσωση (1) παραμένει σταθερή. Η εξίσωση 9 δηλώνει ότι η μέγιστη ροπή, η οποία εξαρτάται από την συχνότητα μπορεί να διατηρηθεί σχεδόν σταθερή. Έτσι, σε μια χαμηλή συχνότητα, η ροή διακένου μειώνεται εξαιτίας της πτώσης της εμπέδησης του στάτη και η τάση θα πρέπει να αυξηθεί για να διατηρήσει το επίπεδο της ροπής. Αυτός ο τύπος κινητήρα είναι συνήθως γνωστός ως έλεγχος Volts/Hertz. Αν  $\omega_s = \beta \omega_b$  και ο λόγος τάσης / ταχύτητα είναι σταθερός έχουμε  $\frac{V_a}{\omega_s} = d$  (12) Ο λόγος  $d$  που ορίζεται από την ονομαστική τιμή της πολικής τάσης  $U_s$  και

της βασικής ταχύτητας  $\omega_b$  δίνεται από τον τύπο  $d = \frac{U_s}{\omega_b}$  (13)

Αντικαθιστώντας τη  $V_a$  από την (6) στην εξίσωση (7) παίρνουμε τη ροπή  $M_d$  και η

$$\text{ολίσθηση για την μέγιστη ροπή είναι } S_m = \frac{R'_{2}}{[R_{1}^2 + \beta^2 (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (14)$$

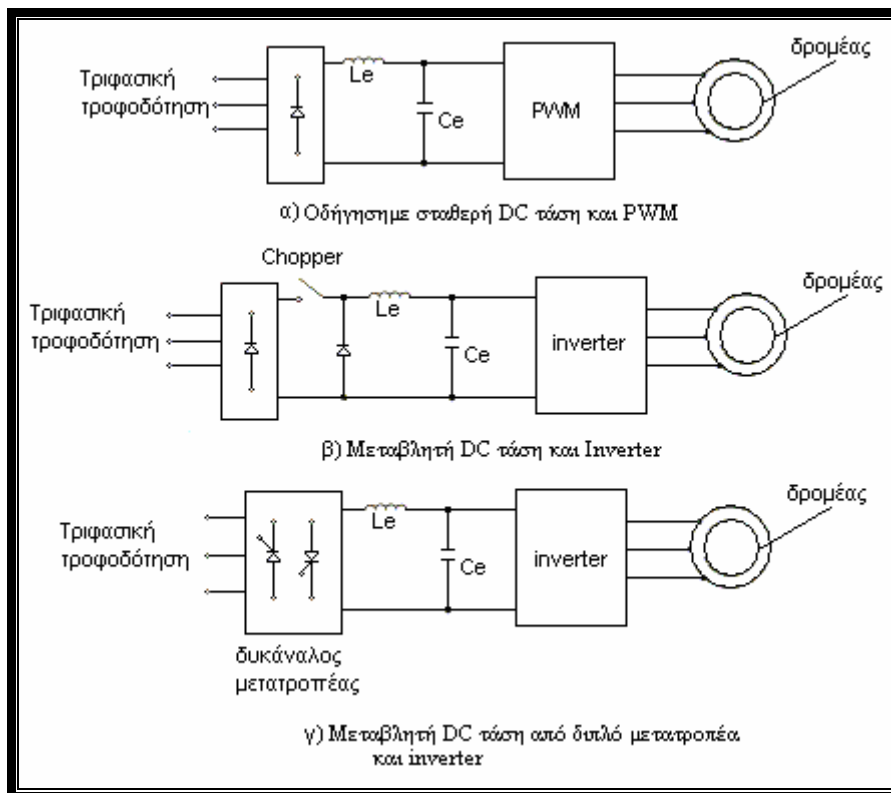


Σχήμα 5. Χαρακτηριστική Ροπής – ταχύτητας με έλεγχο  $\frac{V}{Hz}$

Οι τυπικές χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας, φαίνονται στην εικόνα 5. Καθώς η συχνότητα μειώνεται, το  $\beta$  μειώνεται και η ολίσθηση για την μέγιστη ροπή αυξάνεται. Για συγκεκριμένη ροπή η ταχύτητα μπορεί να ελεγχθεί βάση της εξίσωσης 13 με την μεταβολή της συχνότητας. Έτσι μεταβάλλοντας και την τάση και την συχνότητα, μπορεί να ελεγχθούν, η ροπή και η ταχύτητα. Η ροπή κανονικά παραμένει σταθερή όσο μεταβάλλεται η ταχύτητα. Η τάση σε διαφορετικές ταχύτητες μπορεί να διατηρηθεί από 3φασικούς αντιστραφείς (inverters) ή από κυκλομετατροπείς. Οι κυκλομετατροπείς χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος όπου οι απαιτήσεις συχνότητας είναι στο  $\frac{1}{2}$  ή  $\frac{1}{3}$  της συχνότητας της γραμμής.

Τρία πιθανά κυκλώματα για την μεταβολή τάσης και συχνότητας φαίνονται στην εικόνα 6. Στην εικόνα 6α η συνεχής τάση παραμένει σταθερή και οι τεχνικές PWM εφαρμόζονται για να μεταβάλουν μαζί και την τάση και την συχνότητα μέσω του inverter. Εξαιτίας της διόδου ανόρθωσης, δεν είναι πιθανή η επανατροφοδότηση και ο inverter θα λειτουργεί αρμονικά στην AC τροφοδοσία.

Στην εικόνα 6β ο chopper μεταβάλλει την συνεχή τάση στον inverter και ο inverter ελέγχει την συχνότητα. Εξαιτίας του chopper μειώνεται η υπέρταση στην AC τροφοδοσία. Στην εικόνα 6γ η συνεχής τάση μεταβάλλεται από ένα διπλό μετατροπέα και ο έλεγχος της συχνότητας γίνεται μέσα στον inverter. Αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει επανατροφοδότηση. Έτσι ο συντελεστής ισχύος της εισόδου του μετατροπέα είναι μικρός, ειδικά σε υψηλή γωνία καθυστέρησης.



Σχήμα 6. Οδήγηση με πηγή τάσης επαγωγικού κινητήρα

### Έλεγχος ρεύματος.

Η ροπή των επαγωγικών κινητήρων μπορεί να ελεγχθεί μεταβάλλοντας το ρεύμα του δρομέα. Το ρεύμα εισόδου μεταβάλλεται βάσει του ρεύματος του δρομέα. Για σταθερό ρεύμα εισόδου, το ρεύμα δρομέα εξαρτάται από τις σχετικές τιμές του μαγνητισμού και την εμπέδηση του κυκλώματος του δρομέα. Από το ισόδυναμο κύκλωμα το ρεύμα του δρομέα είναι .

$$I'_2 = \frac{jX_m I_1}{R_1 + \frac{R'_2}{s} + j(X_m + X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})} = I'_2 \angle \theta_1 \quad (15)$$

Από τις εξισώσεις η αναπτυσσόμενη ροπή είναι

$$M_2 = \frac{3 R'_2 (X_m I_1)^2}{S \omega_s [(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_m + X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2]} \quad (16)$$

Και η ροπή εκκίνησης για  $s=1$  είναι

$$M_{εκ} = \frac{3 R'_{2} (X_m I_1)^2}{\omega_s [(R_1 + R'_{2})^2 + (X_m + X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2]} \quad (17)$$

Η ολίσθηση για μέγιστη ροπή είναι

$$S_m = \frac{R'_{2}}{\pm [(R_1)^2 + (X_m + X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (18)$$

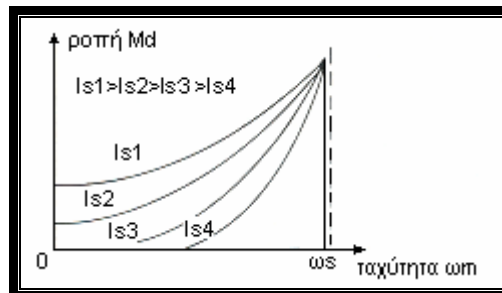
Σε πραγματική λειτουργία το ρεύμα στάτη μέσω της  $R_1$  και  $X_{1\sigma}$  θα είναι σταθερό  $I_1$ . Γενικώς η  $X_m = X_h$  (απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα) είναι πολύ μεγαλύτερη από την  $X_{1\sigma}$  και  $R_1$  οι οποίες μπορούν να αγνοηθούν για τις περισσότερες εφαρμογές. Αγνοώντας τις τιμές  $R_1$  και  $X_{1\sigma}$  η εξίσωση (18) γίνεται

$$S_m = (\pm) \frac{R'_{2}}{X_m + X'_{2\sigma}} \quad (19)$$

Και για  $S_m=S$  η εξίσωση (19) δίνει μια μέγιστη ροπή

$$M_m = \frac{3X_m^2}{2\omega_s(X_m + X'_{2\sigma})} \times I_1^2 = \frac{3L_m^2}{2(L_m + L'_{2\sigma})} \times I_1^2 \quad (20)$$

Μπορεί να σημειωθεί από την εξίσωση 15-17 ότι η μέγιστη ροπή εξαρτάται από το τετράγωνο του ρεύματος και έτσι εξαρτάται από τη συχνότητα.

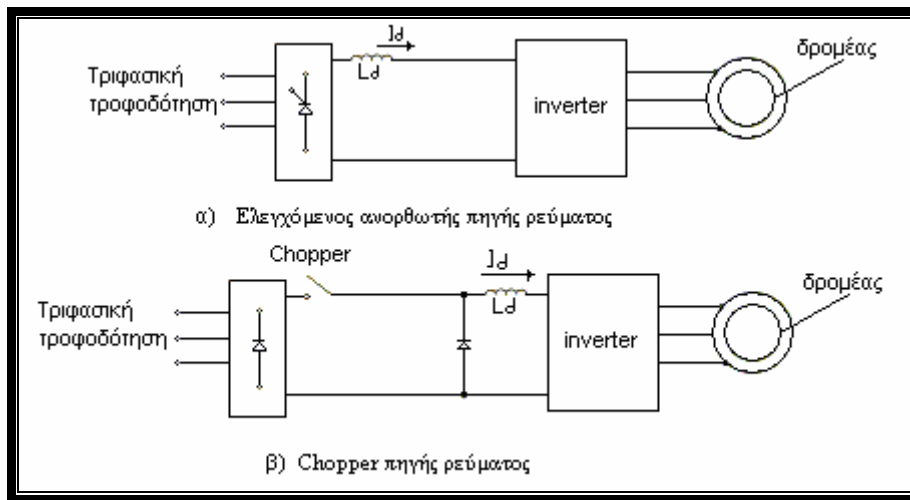


Σχήμα 7. Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας με έλεγχο ρεύματος

Οι τυπικές χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας φαίνονται στην εικόνα 7. Καθώς η  $X_m$  είναι μεγαλύτερη συγκρινόμενη με τις  $X_{1\sigma}$  και  $X'_{2\sigma}$  η ροπή εκκίνησης είναι χαμηλή. Καθώς η ταχύτητα αυξάνεται ή η ολίσθηση μειώνεται, η τάση του στάτη αυξάνεται όπως και η ροπή. Το ρεύμα εκκίνησης είναι χαμηλό εξαιτίας των χαμηλών τιμών της ροής (καθώς  $I_m$  είναι χαμηλό και  $X_m$  μεγάλη) και το ρεύμα του δρομέα συγκρίνεται με τις ονομαστικές τιμές. Η ροπή αυξάνεται με την ταχύτητα εξαιτίας της αύξησης της ροής. Μεγαλύτερη αύξηση της ταχύτητας προς το θετικό τμήμα των χαρακτηριστικών αυξάνει την πολική τάση πέρα της ονομαστικής τιμής. Η ροή και το ρεύμα μαγνήτισης επίσης αυξάνονται για τον κορεσμό της ροής. Η ροπή μπορεί να ελεγχθεί με το ρεύμα του στάτη και την ολίσθηση. Για να διατηρηθεί η ροή διακένου σταθερή και για την αποφυγή του κορεσμού εξαιτίας της υψηλής τάσης ο κινητήρας λειτουργεί κανονικά στην αρνητικής κλίση περιοχή της ισοδύναμης χαρακτηριστικής ροπής – ταχύτητας με τον έλεγχο τάσης. Η αρνητική κλίση είναι στην ασταθή περιοχή και ο κινητήρας πρέπει να λειτουργεί με έλεγχο κλειστού βρόγχου. Σε χαμηλή ολίσθηση, η πολική τάση μπορεί να διατηρηθεί και η ροή

να κορεστεί. Κατά τον κορεσμό, η ροπή κορυφής όπως απεικονίζεται στην εικόνα 7 θα είναι μικρότερη από αυτή που φαίνεται.

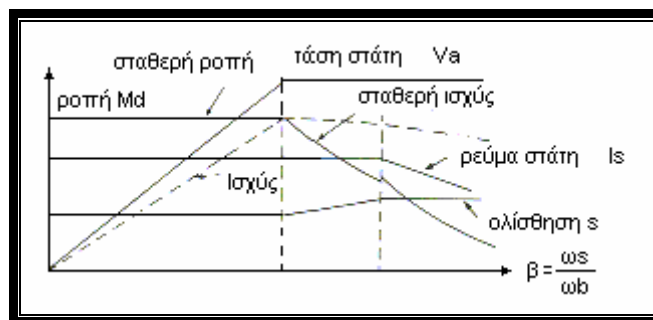
Το σταθερό ρεύμα μπορεί να προμηθευτεί από 3φασικής πηγής ρεύματος inverters. Ο inverter έχει τα πλεονεκτήματα του ελέγχου της πτώσης του ρεύματος και του ότι το ρεύμα είναι λιγότερο ευαίσθητο στις μεταβολές των παραμέτρων του κινητήρα. Πάντως λειτουργούν αρμονικά και με παλμική ροπή. Δύο πιθανές θεωρήσεις αυτού του τύπου οδήγησης φαίνονται στην εικόνα 8. Στην εικόνα 8α ο επαγωγέας δρα σαν πηγή ρεύματος και ο ελεγχόμενος ανορθωτής ελέγχει την πηγή ρεύματος. Στην εικόνα 8β ο chopper ελέγχει την πηγή ρεύματος και ο συντελεστής ισχύος είναι υψηλότερος.



Σχήμα 8. Οδήγηση επαγωγικού κινητήρα με πηγή ρεύματος

### Έλεγχος τάσης, ρεύματος και συχνότητας

Οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων εξαρτώνται από τον τύπο του ελέγχου. Μπορεί να είναι απαραίτητο να μεταβληθεί η τάση και το ρεύμα για να ανταποκριθούμε στις ανάγκες της ροπής-ταχύτητας όπως φαίνεται στην εικόνα 9, όπου υπάρχουν τρεις περιοχές

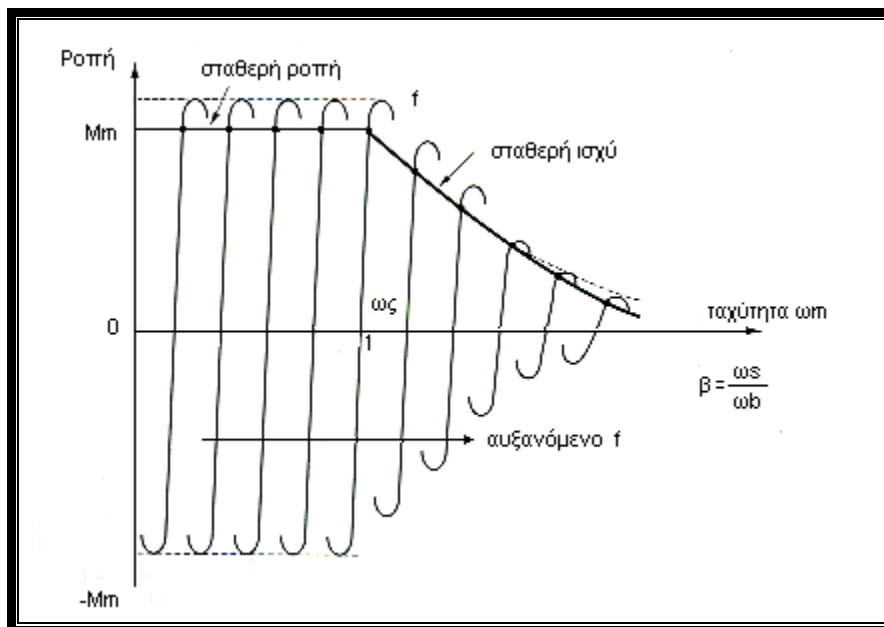


Σχήμα 9

Στην πρώτη περιοχή, η ταχύτητα μπορεί να μεταβληθεί από τον έλεγχο της τάσης ή του ρεύματος σε σταθερή ροπή. Στην δεύτερη περιοχή, ο κινητήρας λειτουργεί με σταθερό ρεύμα και μεταβλητή ολίσθηση. Στην τρίτη περιοχή η ταχύτητα ελέγχεται από την συχνότητα με ένα μειούμενο ρεύμα στάτη.



Οι μεταβολές της ροπής και της ισχύος για συγκεκριμένο ρεύμα στάτη και συχνότητες κάτω της ονομαστικής συχνότητας φαίνονται με τις τελείες στην εικόνα 10. Για  $\beta < 1$ , ο κινητήρας λειτουργεί με ελεγχόμενη συχνότητα αλλά σε σταθερή τάση. Για αυτό η ροή μειώνεται αντιστρόφως της συχνότητας και ο κινητήρας λειτουργεί στον τύπο ασθενούς πεδίου.

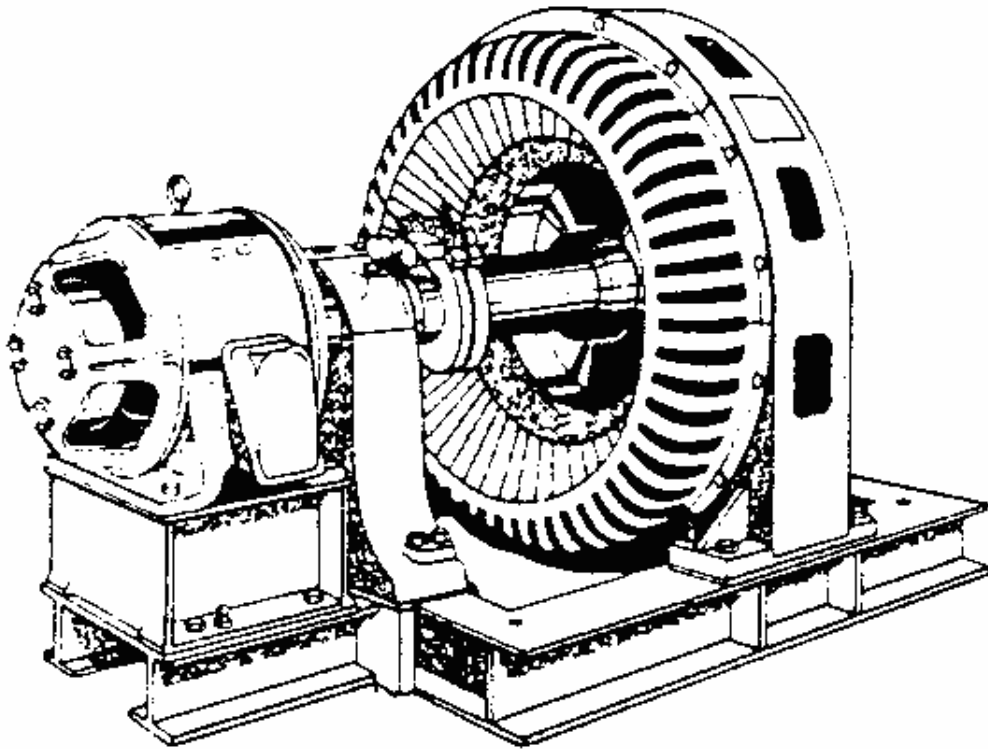


Σχήμα 10. Χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας για έλεγχο με μεταβλητή συχνότητα

Όταν λειτουργεί με μείωση της ταχύτητας απαιτεί μείωση της συχνότητας τροφοδοσίας. Αυτό αλλάζει τη λειτουργία με κλάδο επανατροφοδότησης. Η οδήγηση επιβραδύνεται κάτω από την επιρροή της ροπής πέδησης και της ροπής φορτίου. Για ταχύτητα κάτω της ονομαστικής τιμής  $\omega_b$ , η τάση και η συχνότητα μειώνονται με την ταχύτητα ώστε να διατηρήσουν το επιθυμητό λόγο  $V/f$  ή τη συνεχή μαγνητική ροή και να κρατήσουμε την λειτουργία στην καμπύλη ροή-ταχύτητα με αρνητική κλίση περιορίζοντας την ταχύτητα ολίσθησης. Για ταχύτητα πάνω της  $\omega_b$ , η συχνότητα μειώνεται με την ταχύτητα ώστε να διατηρηθεί η λειτουργία στο τμήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης ταχύτητας-ροπής με την αρνητική κλίση. Όταν πλησιάζει την επιθυμητή ταχύτητα η λειτουργία αλλάζει τη λειτουργία του κινητήρα και η οδήγηση τίθεται στην επιθυμητή ταχύτητα.

## ΕΝΟΤΗΤΑ 2<sup>η</sup>

### ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ



Κατασκευαστικά μέρη σύγχρονης μηχανής

Στη σύγχρονη μηχανή, όπως και στη μηχανή συνεχούς ρεύματος, βρίσκουμε πάλι το στάτη και το δρομέα. Ο στάτης φέρει ένα τριφασικό συμμετρικό τύλιγμα, δηλαδή ένα σύστημα τριών πηνίων που το κάθε ένα έχει ίση ωμική αντίσταση και επαγωγική αντίδραση με τα άλλα. Επίσης οι μαγνητικοί άξονες των πηνίων αυτών σχηματίζουν διαδοχικά γωνία ίση με  $\frac{2\pi}{3}$  μεταξύ τους.

Το σύστημα αυτό των τριών πηνίων τροφοδοτείται από ένα τριφασικό συμμετρικό σύστημα τάσεων. Αποτέλεσμα του γεγονότος αυτού είναι να δημιουργηθεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο χώρο, το οποίο στρέφεται με σταθερό αριθμό στροφών. Ο αριθμός στροφών αυτός είναι χαρακτηριστικό μέγεθος της μηχανής που εξετάζουμε και λέγεται σύγχρονος αριθμός στροφών, συμβολίζεται δε με  $n_1$  και ισούται με :

$$n_1 = \frac{f \cdot 60}{p}$$

όπου  $f_1$  είναι η συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου που τροφοδοτεί το στάτη, και  $p$  είναι ο αριθμός ζευγών πόλων της σύγχρονης μηχανής.

Ο δρομέας ή ρότορας της μηχανής τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα και κατά συνέπεια φέρει ένα τύλιγμα συνεχούς ρεύματος. Ο δρομέας της σύγχρονης μηχανής στρέφεται πάντοτε με αριθμό στροφών ίσο με τον σύγχρονο  $n_1$ .

Αν ο αριθμός στροφών του δρομέα είναι διαφορετικός από τον σύγχρονο, τότε η μηχανή αποσυγχρονίζεται και επέρχονται βλάβες λόγω κάποιων δυσμενών επαγωγικών φαινομένων που θα αναπτύξουμε αργότερα. Για δεδομένη συχνότητα τροφοδοσίας ο αριθμός στροφών εξαρτάται από τους πόλους της μηχανής, και διατηρείται σταθερός για λειτουργία γεννήτριας από την κινητήρια μηχανή, η οποία δίδει την απαιτούμενη μηχανική ενέργεια που θα μετατραπεί σε ηλεκτρική από την γεννήτρια.

Ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα της σύγχρονης μηχανής έχουμε δύο τύπους μηχανών :

- α) Σύγχρονη μηχανή με δρομέα κατανεμημένων πόλων.
- β) Σύγχρονη μηχανή με δρομέα έκτυπων ή διακεκριμένων πόλων.

Ο πρώτος τύπος έχει δρομέα με αυλακώσεις και μέσα στις αυλακώσεις αυτές τοποθετούνται τα τυλίγματα συνεχούς ρεύματος, τα οποία και προστατεύονται με σφήνες από τις φυγόκεντρες δυνάμεις. Η μορφή του δρομέα με κατανεμημένους πόλους φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί .

Ο αριθμός των πόλων μιας μηχανής με δρομέα τύπου κατανεμημένων πόλων είναι συνήθως δύο (άρα  $p=1$ ). Οι μηχανές αυτές έχουν αριθμό στροφών  $n_1$  μεγάλο.

Ο δεύτερος τύπος με δρομέα έκτυπων ή διακεκριμένων πόλων έχει πόλους που προεξέχουν και γύρω τους τοποθετείται το τύλιγμα συνεχούς ρεύματος. Μια τομή ενός δρομέα μηχανής με διακεκριμένους πόλους παρουσιάζει το σχήμα που ακολουθεί :

Όπως είναι φανερό το πεδίο διέγερσης των σύγχρονων μηχανών βρίσκεται στο δρομέα των μηχανών. Επομένως όταν στη συνέχεια θα αναφερόμαστε στο τύλιγμα διέγερσης θα εννοούμε το τύλιγμα του δρομέα, δηλαδή σε ένα τύλιγμα συνεχούς ρεύματος.

οποίο λέγεται τύλιγμα απόσβεσης και τοποθετείται στο δρομέα των μηχανών. Όταν ο δρομέας είναι τύπου κατανεμημένων πόλων το τύλιγμα απόσβεσης δημιουργείται από τις σφήνες που συγκρατούν τα τυλίγματα στις θέσεις τους και κατασκευάζονται συνήθως από χαλκό ή αλουμίνιο.

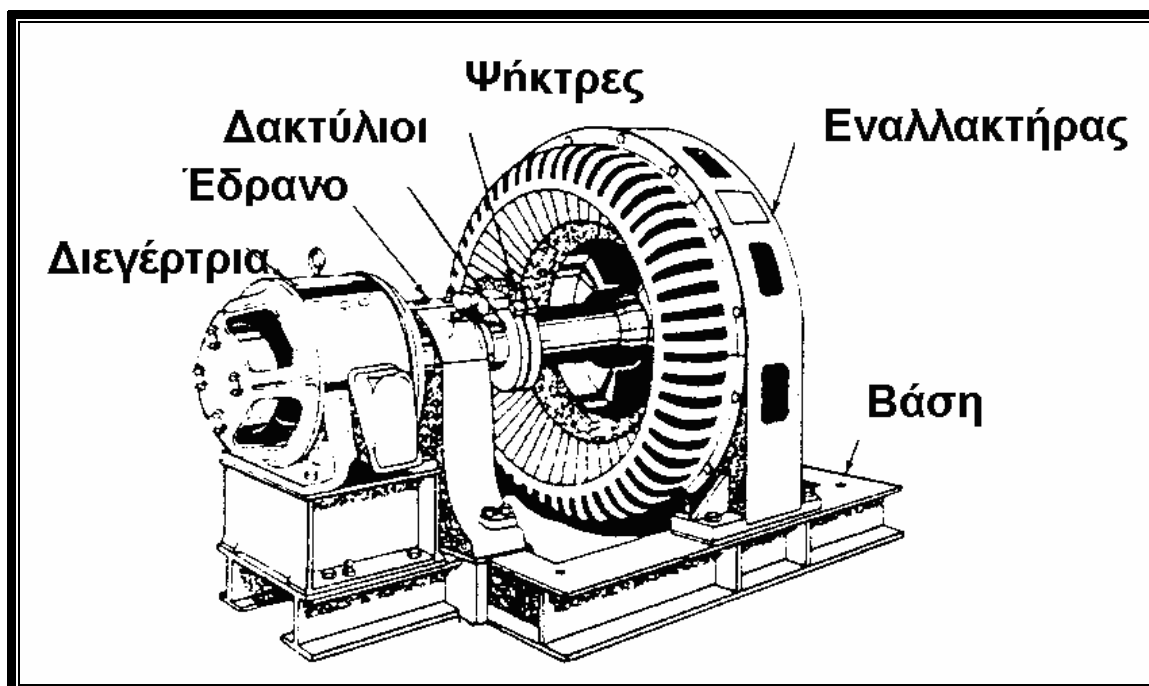
Για μηχανές με ισχύ μεγαλύτερη από 150 MVA και μικρότερη από 250 MVA χρησιμοποιείται λάδι ή νερό στο στάτη και υδρογόνο στο δρομέα.

Το πλέον σύγχρονο σύστημα ψύξης χρησιμοποιεί νερό στο στάτη και στο δρομέα και χρησιμοποιείται για μηχανές ισχύος μεγαλύτερης από 500 MVA.

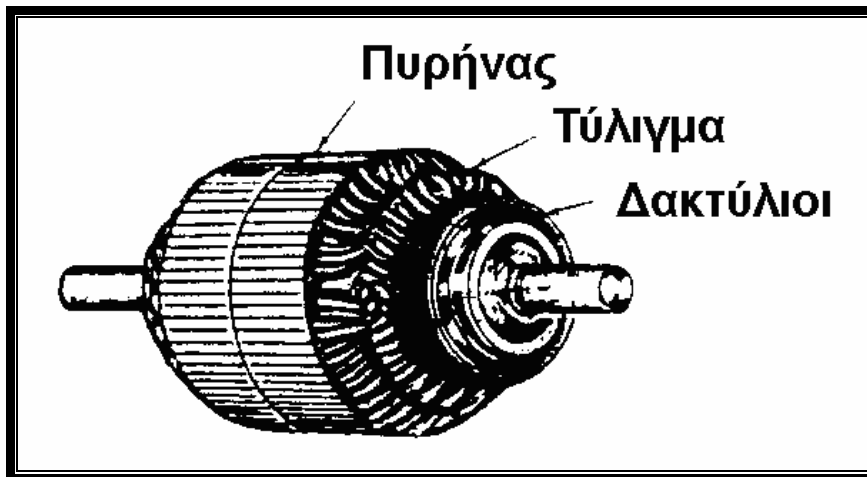
Η ανάπτυξη του φαινομένου της υπεραγωγιμότητας των υλικών θα επιδράσει με καθοριστικό τρόπο στην ανάπτυξη των σύγχρονων μηχανών. Το Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασσαχουσέτης έχει καταφέρει να βελτιώσει σημαντικά την θερμοκρασία στην οποία ορισμένα κεραμικά υλικά εμφανίζουν υπεραγωγιμότητα και προσανατολίζεται στην εφαρμογή των μεθόδων παρασκευής των υλικών αυτών σε μορφή αγωγών. Όταν επιτευχθεί το σημαντικό αυτό βήμα, η κατασκευή γιγαντιαίων συγχρόνων μηχανών ισχύος GVA θα γίνει πλέον πραγματικότητα.

Ακολουθούν διάφορα σχήματα που δείχνουν χαρακτηριστικά των σύγχρονων μηχανών.

### Σύγχρονες μηχανές



### Σύγχρονη γεννήτρια



Δρομέας Σ.Μ.

### Σύγχρονη μηχανή με κατανεμημένους πόλους

Για τη μελέτη των σύγχρονων μηχανών θα κάνουμε ορισμένες παραδοχές οι οποίες θα εξασφαλίσουν μια κάπως απλούστερη μαθηματική ανάλυση :

α) Ο δρομέας της μηχανής θεωρείται ότι στρέφεται πάντοτε με την σύγχρονη ταχύτητα  $n_1$  και έτσι δεν έχουμε τη δημιουργία δυσμενών επαγωγικών φαινομένων.

β) Το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο του δρομέα και στάτη παρουσιάζει ημιτονοειδή κατανομή.

γ) Λόγω της παραδοχής (β) θεωρούμε ότι οι τάσεις στο στάτη της μηχανής είναι ημιτονοειδείς και συμμετρικές.

δ) Οι απώλειες σιδήρου της μηχανής θεωρούνται αμελητέες.

Με βάση τις παραδοχές αυτές θα εξετάσουμε την συμπεριφορά της μηχανής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

### Εξισώσεις λειτουργίας και ισοδύναμο κύκλωμα

Η γενική κατάσταση λειτουργίας της σύγχρονης μηχανής περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

#### Εξισώσεις στις τρεις φάσεις του στάτη:

$$\begin{aligned}
 U_{\alpha}(t) &= R_s I_{\alpha} + \frac{d\Phi_{\alpha}}{dt} \\
 U_{\beta}(t) &= R_s I_{\beta} + \frac{d\Phi_{\beta}}{dt} \\
 U_{\gamma}(t) &= R_s I_{\gamma} + \frac{d\Phi_{\gamma}}{dt}
 \end{aligned} \quad (1)$$

όπου  $R_s$  είναι η ωμική αντίσταση του τυλίγματος του στάτη και  $\Phi_{\alpha}$ ,  $\Phi_{\beta}$ ,  $\Phi_{\gamma}$  οι μαγνητικές ροές των τριών φάσεων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

Εξισώσεις στον κλωβό απόσβεσης, που θεωρείται σαν να αποτελείται από δύο τυλίγματα με δείκτες D και Q, και τα οποία είναι κάθετα μεταξύ τους:

$$\begin{aligned} 0 &= R_D I_D + \frac{d\Phi_D}{dt} \\ 0 &= R_Q I_Q + \frac{d\Phi_Q}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

όπου τα μεγέθη είναι γνωστά και αναφέρονται στον κλωβό απόσβεσης.

Τέλος στο τύλιγμα διέγερσης θα ισχύουν τα εξής:

$$U_F = R_F I_F + \frac{d\Phi_F}{dt} \quad (3)$$

όπου  $R_F$  και  $\Phi_F$  είναι αντίστοιχα η αντίσταση και η μαγνητική ροή του τυλίγματος διέγερσης.

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας όπως δεχθήκαμε στις βασικές παραδοχές οι τάσεις και τα ρεύματα του στάτη είναι ημιτονοειδή μεγέθη.

Επίσης οι τρεις ροές είναι ημιτονοειδείς στο στάτη, άρα, λόγω των ημιτονοειδών μεγεθών θα έχουμε ότι και οι τρεις τάσεις  $U_\alpha$ ,  $U_\beta$ ,  $U_\gamma$  θα είναι ημιτονοειδείς και θα διαφέρουν μόνο κατά σταθερές γωνίες. Μπορούμε λοιπόν να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση τάσεων μίας μόνο φάσης.

Επίσης εφ'όσον στις βασικές παραδοχές δεχθήκαμε ότι ο δρομέας στρέφεται με τον σύγχρονο αριθμό στοφών  $n_1$ , στο τύλιγμα απόσβεσης δεν θα ρέουν ρεύματα καθόλου. Οι ροές  $\Phi_D$  και  $\Phi_Q$  θα είναι σταθερές. Επομένως οι εξισώσεις (2) η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας δεν υπάρχουν.

Τέλος μια και το ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης είναι σταθερό, τότε και η ροή  $\Phi_F$  θα είναι σταθερή.

Με τις παραπάνω λοιπόν επεξηγήσεις οι εξισώσεις λειτουργίας μπορούν να διαμορφωθούν κατάλληλα και να πάρουν την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{aligned} v_\alpha(t) &= \sqrt{2} U_s \eta \mu \omega t \\ i_\alpha(t) &= \sqrt{2} I_s \eta \mu(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (4)$$

και

$$U_\alpha = R_s \cdot I_\alpha + E_p + E_\eta + E_\sigma .$$

όπου

$$\begin{aligned} E_p &= \omega M I_F \eta \mu(\omega t + \varphi_F) \\ E_\eta &= \omega L_\eta I_s \eta \mu(\omega t + \varphi) \\ E_\sigma &= \omega L_{\sigma s} I_s \eta \mu(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (5)$$

και για το τύλιγμα του δρομέα:

$$U_F = R_F I_F \quad (6)$$

Τα διάφορα μεγέθη που εμφανίζονται στις εξισώσεις επεξηγούνται ακολούθως:

Η γωνία  $\varphi$  είναι η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης του στάτη  $U_s$  και του ρεύματος του στάτη  $I_s$ .

Η γωνία  $\varphi_F$  είναι η γωνία που ορίζεται από την ακτίνα που διέρχεται από το σημείο που αρχίζουν να μετρούνται οι γωνίες στο στάτη και από αυτή που διέρχεται από το σημείο που αρχίζουν να μετρούνται οι γωνίες στο δρομέα.

Η τάση  $E_p$  είναι επαγωγική τάση που δημιουργείται όταν περιστρέφεται το πεδίο του δρομέα με το στάτη σε κενό, δηλαδή όταν  $I_s=0$ .

Ο συντελεστής  $M$  είναι συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ του τυλίγματος του δρομέα και του τυλίγματος μίας φάσης του στάτη.

Το  $I_F$  είναι το ρεύμα του δρομέα, δηλαδή το ρεύμα διέγερσης. Το σύμβολο  $F$  είναι το αρχικό της αγγλικής λέξης FIELD που σημαίνει πεδίο και εννοεί το πεδίο διέγερσης στην προκειμένη περίπτωση.

Η τάση  $E_n$  είναι επαγωγική τάση που παράγεται λόγω του κύριου μαγνητικού πεδίου του στάτη.

Ο συντελεστής  $L_n$  είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής που εκφράζει την αυτεπαγωγιμότητα του κύριου πεδίου.

Η τάση  $E_\sigma$  είναι η αναπόφευκτη επαγωγική τάση που δημιουργείται λόγω του πεδίου σκέδασης.

Ο συντελεστής  $L_{\sigma\sigma}$  συνεπώς θα είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πεδίου σκέδασης. Τέλος σαν  $\omega$  συμβολίζεται η ηλεκτρική συχνότητα του πεδίου του στάτη της σύγχρονης μηχανής.

Οι εξισώσεις (4),(5),(6) μπορούν να συνδυαστούν κατάλληλα και με μια μάλλον πολύπλοκη μαθηματική επεξεργασία που δεν μας ενδιαφέρει άμεσα μπορούν να διαμορφώσουν την εξίσωση τάσεων μίας φάσης του στάτη, που είναι η ακόλουθη:

$$\bar{u}_s = (R_s + jX_D)\bar{I}_s + \bar{E}_p \quad (7)$$

Η εξίσωση (7) έχει το στοιχείο  $X_D$  που ορίζεται σαν σύγχρονη αντίδραση μίας σύγχρονης μηχανής. Η  $X_D$  μπορεί να γραφεί:

$$X_D = \omega L_D \quad (8)$$

Ο συντελεστής  $L_D$  είναι ένας συντελεστής αυτεπαγωγής που ορίζεται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$L_D = L_h + L_{\sigma\sigma} \quad (9)$$

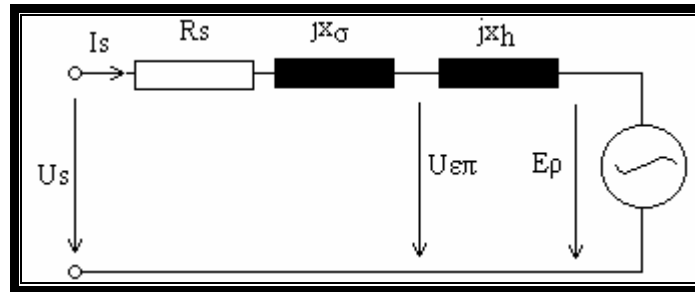
Επίσης η εξίσωση (7) παρουσιάζει το στοιχείο  $E_p$  το οποίο είναι ένα υπολογιστικό μέγεθος και ορίζεται ως εξής:

$$E_p = \omega \cdot M \cdot I_f \cdot (\sin\theta + j \eta\mu\theta)$$

Το μέγεθος αυτό λέγεται πολική τάση. Η γωνία  $\theta$  είναι μεταξύ της πολικής τάσης  $E_p$  και της τάσης του στάτη  $U_s$  και ισούται με:

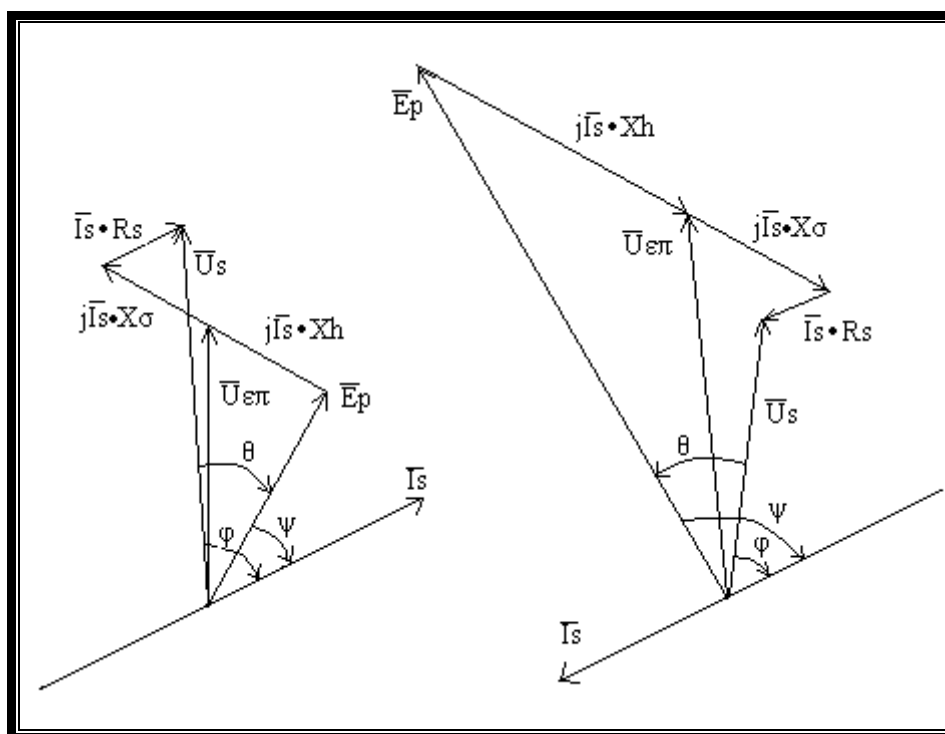
$$\theta = \varphi_F + \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

Με βάση την εξίσωση (7) μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης μηχανής με δρομέα κατανεμημένων πόλων, το οποίο να μας χρησιμεύσει σημαντικά στην επίλυση πολλών λειτουργικών καταστάσεων της μηχανής. Το κύκλωμα αυτό είναι το ακόλουθο:



Το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα του προηγούμενου σχήματος ισχύει όταν η μηχανή δουλεύει σαν γεννήτρια. Για λειτουργία κινητήρα το κύκλωμα είναι το ίδιο με την διαφορά όμως ότι το ρεύμα του  $I_s$  θα έχει αντίθετη φορά.

Με βάση λοιπόν το ισοδύναμο κύκλωμα μπορούμε εύκολα να σχεδιάσουμε το διανυσματικό διάγραμμα που εκφράζει την εξίσωση: (7)



Γεννήτρια

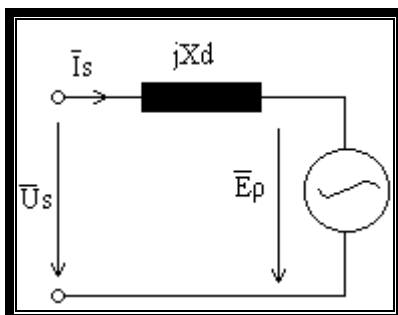
Κινητήρας

Για λειτουργία κινητήρα και αντίθετη φορά του ρεύματος κατά  $180^\circ$  το διανυσματικό διάγραμμα της σύγχρονης μηχανής θα τροποποιηθεί κατάλληλα και θα έχει την μορφή του σχήματος (β).



## Φόρτιση της μηχανής σε ένα "στερεό δίκτυο"

Η έννοια της φόρτισης της μηχανής συνδέεται με την ανταλλαγή ενεργού και άεργου ισχύος μεταξύ της μηχανής και του δικτύου με το οποίο είναι αυτή παραλληλισμένη. Όπως έχουμε αναφέρει σε άλλη παράγραφο "στερεό δίκτυο" είναι ένα δίκτυο με σταθερή τάση  $U_s$  και σταθερή συχνότητα.



Ισοδύναμο κύκλωμα Σ.Μ. για αντίσταση  $R_s=0$

Το σχήμα παρουσιάζει το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα μίας σύγχρονης μηχανής, με αντίσταση στάτη  $R_s=0$ . Θα εξετάσουμε τώρα τη σχέση μεταξύ των τάσεων  $E_p$  και  $U_s$  και του ρεύματος  $I_s$ .

Για να υπάρχει το ρεύμα  $I_s$  θα πρέπει να διαφέρουν οι δυο τάσεις  $U_s$  και  $E_p$  μεταξύ τους. Η πολική τάση όμως  $E_p$  είναι ένα υπολογιστικό μέγεθος που εξαρτάται από το ρεύμα διέγερσης, δηλαδή το ρεύμα του δρομέα  $I_f$ . Επομένως αυξομειώνοντας το ρεύμα του δρομέα μπορούμε να επιδράσουμε στην τάση  $E_p$ .

Υπάρχει μία χαρακτηριστική τιμή του ρεύματος του δρομέα, η οποία λέγεται τιμή ρεύματος δρομέα σε κενό και συμβολίζεται με  $I_{F0}$ . Το ρεύμα  $I_{F0}$  επίσης λέγεται και ρεύμα διέγερσης σε κενό. Αν αυξήσουμε το ρεύμα διέγερσης  $I_f$  σε τιμές μεγαλύτερες του  $I_{F0}$  τότε η μηχανή υπερδιεγείρεται. Αν το ρεύμα  $I_f$  μειωθεί σε τιμές μικρότερες του  $I_{F0}$ , τότε η μηχανή υποδιεγείρεται. Κάθε μια κατάσταση συνεπάγεται τελείως διαφορετική συμπεριφορά της μηχανής.

Στην κατάσταση υποδιέγερσης η πολική τάση είναι μικρότερη της τάσης του στάτη, δηλαδή ισχύει ότι  $E_p < U_s$ .

Στην κατάσταση υπερδιέγερσης η πολική τάση είναι μεγαλύτερη από την τάση του στάτη και ισχύει  $E_p > U_s$ .

Στην υποδιέγερση το ρεύμα  $I_s$  καθυστερεί της τάσης  $U_s$  κατά γωνία ίση με  $90^\circ$ . Τότε η συμπεριφορά της μηχανής αντιστοιχεί στη συμπεριφορά ενός τριφασικού πηνίου το οποίο καταναλίσκει άεργη ισχύ από το δίκτυο.

Στην υπερδιέγερση το ρεύμα  $I_s$  προπορεύεται της τάσης  $U_s$  κατά γωνία ίση με  $90^\circ$ . Τότε η μηχανή συμπεριφέρεται σαν τριφασικός πυκνωτής που προσδίδει άεργη ισχύ στο δίκτυο.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι στην κατάσταση υποδιέγερσης και στην κατάσταση υπερδιέγερσης η μηχανή ανταλλάσσει μόνον άεργη ισχύ με το δίκτυο με το οποίο είναι παραλληλισμένη. Για να γίνει ανταλλαγή ενεργού ισχύος μεταξύ μηχανής και δικτύου πρέπει το ρεύμα  $I_s$  και η τάση  $U_s$  να σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία διαφορετική από  $90^\circ$ .

Αυτό το επιτυγχάνουμε αν επενεργήσουμε με μια ροπή πάνω στον άξονα περιστροφής της μηχανής. Στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η ροπή αυτή θα εξισορροπείται από την εσωτερική ηλεκτρομαγνητική ροπή  $M_H$  που αναπτύσσει η μηχανή. Η φορά της εξωτερικής ροπής χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά της μηχανής, δηλαδή το αν θα εργάζεται σαν γεννήτρια ή σαν κινητήρας. Πιο συγκεκριμένα:

Όταν η εξωτερική ροπή προσπαθεί να επιταχύνει το δρομέα κατά τη φορά περιστροφής, η πολική τάση  $E_p$  προηγείται της τάσης του στάτη  $U_s$  κατά γωνία  $\theta$  και η μηχανή εργάζεται σαν γεννήτρια μετατρέποντας μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική ισχύ.

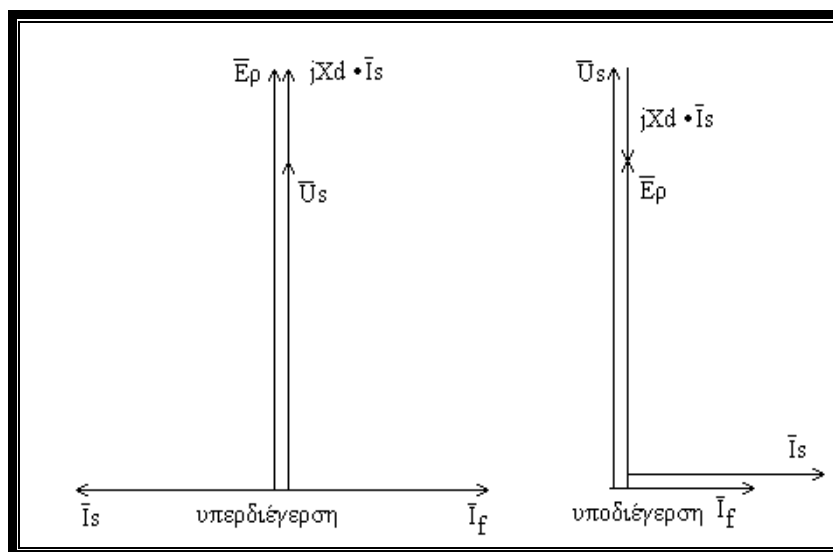
Όταν όμως η εξωτερική ροπή είναι αντιθέτου φοράς με αυτή του δρομέα, τότε η τάση του στάτη  $U_s$  προηγείται της  $E_p$  κατά  $\theta$  και η μηχανή εργάζεται σαν κινητήρας προσλαμβάνοντας ηλεκτρική ισχύ από το δίκτυο και μετατρέποντας την σε μηχανική.

Συμπερασματικά λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι:

α) Η ανταλλαγή άεργου ισχύος μεταξύ μίας ασύγχρονης μηχανής και του δικτύου που την τροφοδοτεί γίνεται με την ρύθμιση του ρεύματος διέγερσης.

β) Η άεργος ισχύς που ανταλλάσσει η μηχανή με το δίκτυο ρυθμίζεται με την φορά της ροπής που επιβάλλεται εξωτερικά στον άξονα της μηχανής.

Μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα διάγραμμα όπου να φαίνονται οι σχετικές θέσεις των διανυσμάτων  $U_s$  και  $I_s$  για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης της μηχανής, που φαίνεται στο σχήμα.



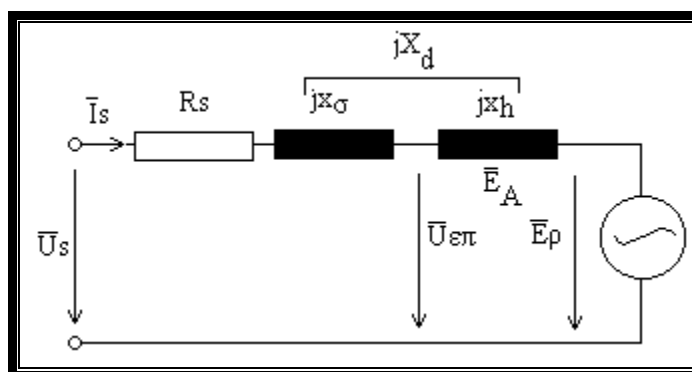
Την ιδιότητα της σύγχρονης μηχανής να προσδίδει άεργη ισχύ στο δίκτυο όταν είναι σε υπερδιέγερση και στον άξονα της δεν ασκείται ροπή, την εκμεταλλευόμαστε σημαντικά όταν θέλουμε να κάνουμε αντιστάθμιση στις γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, είναι γνωστό ότι επιδρώντας στο ισοζύγιο άεργου ισχύος στο άκρο άφιξης μίας γραμμής μεταφοράς, μπορούμε να επιτύχουμε μία επιθυμητή πτώση τάσης. Η επιθυμητή πτώση τάσης συνήθως κυμαίνεται σε ποσοστό ίσο με +5% ή -5% της ονομαστικής τάσης της γραμμής. Τοποθετώντας στο άκρο άφιξης μία σύγχρονη μηχανή σε υπερδιέγερση και χωρίς φορτίο στον άξονα, επιτυγχάνουμε την αλλαγή του ισοζυγίου άεργου ισχύος διότι η μηχανή δουλεύει σαν πυκνωτής και προσδίδει άεργη ισχύ στο δίκτυο. Τότε η σύγχρονη μηχανή λέγεται σύγχρονος πυκνωτής ή περιστρεφόμενος πυκνωτής.

## Το φαινόμενο της αντίδρασης τυμπάνου

Στις μηχανές συνεχούς ρεύματος συναντήσαμε το φαινόμενο της αντίδρασης τυμπάνου, όπου στο αρχικό πεδίο διέγερσης -το πεδίο του στάτη δηλαδή-επιδρούσε κατόπιν το πεδίο του δρομέα και το τελικό πεδίο παρουσιαζότανε παραμορφωμένο και συνοδευότανε από μία σειρά δυσμενών φαινομένων.

Αντίστοιχο φαινόμενο παρατηρείται και στις σύγχρονες μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος. Το πεδίο διέγερσης εδώ θα είναι το πεδίο του δρομέα ,το οποίο μπορεί να εξασθενεί ή να ενισχύεται ανάλογα με την φόρτιση. Για χωρητική φόρτιση το αρχικό πεδίο ενισχύεται, ενώ για επαγωγική φόρτιση εξασθενεί.

Το συνιστάμενο πεδίο που προκύπτει εμφανίζεται στο διάκενο μεταξύ δρομέα και στάτη. Αποτέλεσμα του συνιστάμενου πεδίου είναι να επάγεται στο στάτη μία επαγωγική τάση, η  $U_{ΕΠ}$ , η οποία δεν είναι απλά ένα υπολογιστικό μέγεθος όπως η πολική τάση  $E_p$  αλλά έχει φυσική σημασία και οντότητα. Αν θεωρήσουμε το ακόλουθο σχήμα μπορούμε να υπολογίσουμε την  $U_{ΕΠ}$ :



Από το βρόχο που περιέχει την  $U_{ΕΠ}$  προκύπτει ότι:

$$\bar{U}_s - \bar{I}_s \cdot (R_s + jX_{s\sigma}) = \bar{U}_{ΕΠ} \quad (1)$$

Το μέγεθος  $X_{s\sigma}$  το έχουμε συναντήσει ξανά και εκφράζει την επαγωγική αντίδραση λόγω του πεδίου σκέδασης. Το μέγεθος αυτό θεωρείται σταθερό και ανεξάρτητο από το ρεύμα του στάτη  $I_s$ . Ο υπολογισμός του γίνεται στο κύκλωμα βραχυκύκλωσης της μηχανής που θα εξετάσουμε αργότερα.

Από την εξίσωση (1) μπορούμε να έχουμε την τιμή της επαγωγικής τάσης που αναπτύσσεται στη μηχανή λόγω του φαινομένου της αντίδρασης τυμπάνου.

## Βραχυκύκλωμα της σύγχρονης μηχανής

Βραχυκύκλωμα σε μια σύγχρονη μηχανή έχουμε όταν μία ή περισσότερες φάσεις συνδεθούν αγωγίμα μεταξύ τους ή με την γη (ουδέτερο).

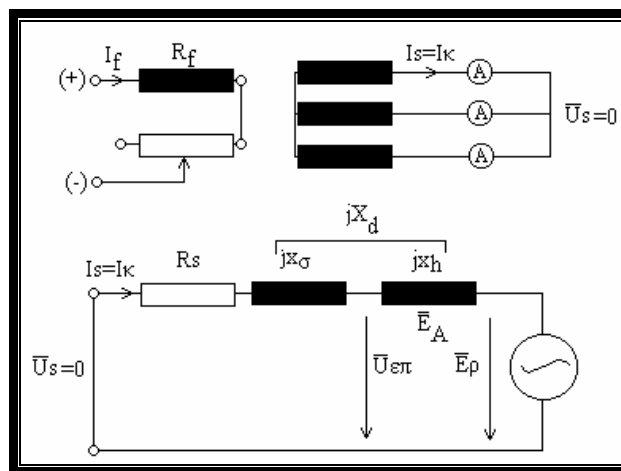
Κατά το βραχυκύκλωμα της μηχανής έχουμε δύο φαινόμενα:

α) Ένα μεταβατικό φαινόμενο κατά τη διάρκεια του οποίου το ρεύμα του στάτη παίρνει πολύ μεγάλες τιμές και καταπονεί τις κεφαλές και τις μονώσεις των τυλιγμάτων. Η αιχμή της τιμής του ρεύματος λέγεται κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης.

β) Μετά την πάροδο μερικών δευτερολέπτων αποκαθίσταται το μόνιμο βραχυκύκλωμα. Το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης χρησιμεύει σε κάθε μελέτη ηλεκτρικών μηχανών για τον προσδιορισμό ορισμένων στοιχείων της μηχανής. Για το λόγο αυτό γίνονται εργαστηριακά πειράματα βραχυκύκλωσης και προσδιορίζεται το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης, το οποίο εξαρτάται από την τιμή της τάσης και από τον αριθμό των φάσεων που βραχυκυκλώνονται.

Τριπολικό βραχυκύκλωμα έχουμε όταν βραχυκυκλωθούν ταυτόχρονα και οι τρεις φάσεις του στάτη της μηχανής. Η ιδιαιτερότητα του τριπολικού βραχυκυκλώματος είναι το γεγονός ότι δεν δημιουργείται κάποια τοπική ασυμμετρία στο δίκτυο. Έτσι η μελέτη του τριπολικού βραχυκυκλώματος δεν χρειάζεται ανάλυση με την μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών που χρησιμοποιείται στη μελέτη τοπικών ασυμμετριών στα δίκτυα.

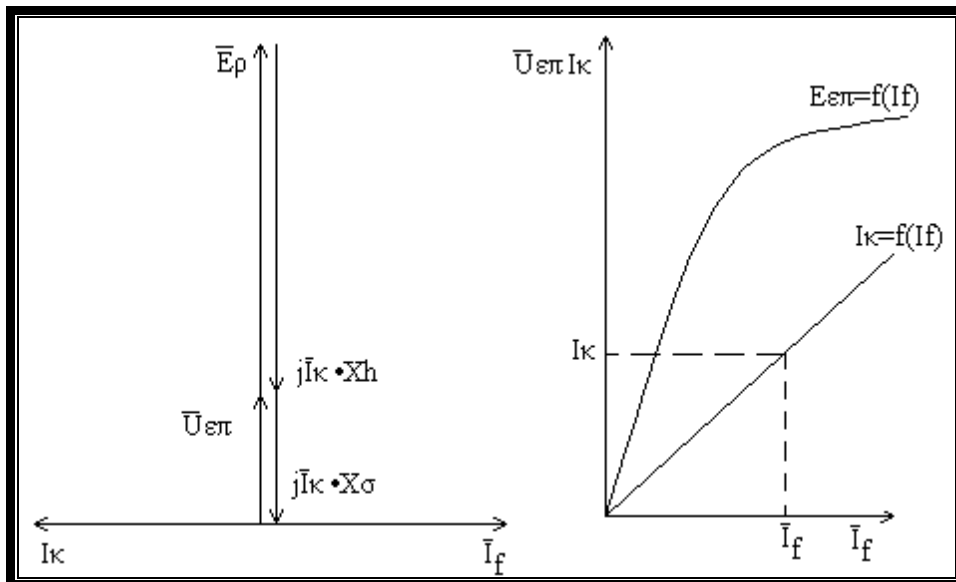
Μπορούμε να θεωρήσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα μίας σύγχρονης μηχανής σε κατάσταση τριπολικού βραχυκυκλώματος, όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Στο σχήμα το  $I_k$  είναι το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Από το κύκλωμα του σχήματος η τιμή του ρεύματος  $I_k$  προκύπτει:

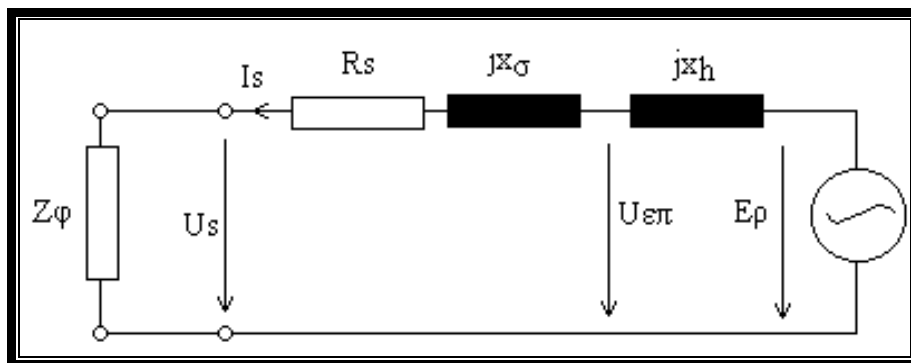
$$I_k = \frac{E_p}{j(X_{s\sigma} + X_h)} = \frac{E_p}{jX_D} \quad (1)$$

Επομένως παρατηρούμε ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης εξαρτάται από τη διέγερση και επίσης εξαρτάται από την σύγχρονη αντίδραση XD ( $R_s=0$ ). Όπως παρατηρήσαμε σε προηγούμενη παράγραφο η σύγχρονη αντίδραση μειώνεται με την αύξηση του διάκενου της μηχανής με αποτέλεσμα την αύξηση της ευστάθειας της μηχανής. Από τη σχέση (1) όμως βλέπουμε ότι αύξηση του διακένου θα επιφέρει μεγάλα ρεύματα βραχυκύκλωσης, πράγμα που είναι δυσμενές για τη μηχανή. Όπως συμβαίνει συνήθως στις περιπτώσεις αυτές υπάρχει κάποια "χρυσή τομή" όπου συμβιβάζεται η αποδεκτή ευστάθεια της μηχανής με κάποια λογική τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει την χαρακτηριστική καμπύλη για το βραχυκύκλωμα που συζητούμε.



$I_k = f(I_f)$  καμπύλη βραχυκύκλωσης

**Προσδιορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών της σύγχρονης γεννήτριας**



Το ισοδύναμο κύκλωμα της πραγματικής σύγχρονης μηχανής ανά φάση είναι :  
όπου  $U =$  η τάση ακροδεκτών

$X_s =$  η επαγωγική αντίσταση αντίδρασης του επαγωγίμου

$X_σ =$  η επαγωγική αντίσταση σκέδασης του επαγωγίμου

$R_s =$  η ωμική αντίσταση του τυλίγματος.

$X_D = X_s + X_σ =$  η σύγχρονη επαγωγική αντίσταση

$E_a = jI_a \cdot X_a$  τάση αντίδρασης του επαγωγίμου.

Αν τώρα εφαρμόσουμε στο παραπάνω κύκλωμα τον 2ο κανόνα του Kirchhoff θα έχουμε :

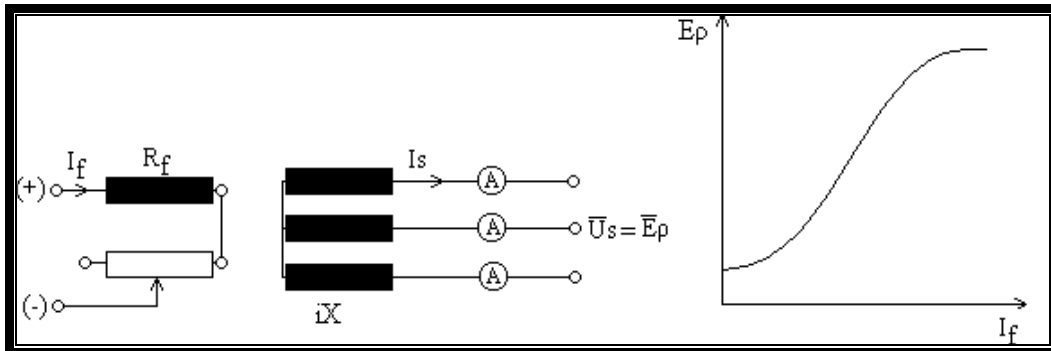
$$\bar{u}_s = \bar{E}_p - \bar{I}_s (R_s + jX_D)$$

### Η χαρακτηριστική χωρίς φορτίο (Χ.Χ.Φ)

Αν θεωρήσουμε ότι η γεννήτρια στρέφεται με τον σύγχρονο αριθμό στροφών και ότι στη γεννήτρια δεν είναι συνδεδεμένο κανένα ηλεκτρικό φορτίο, τότε το ρεύμα του επαγωγίμου θα είναι  $I_s=0$  και η τάση ακροδεκτών

$$U = E_p$$

Με μεταβολή του  $I_f$  θα έχουμε την παρακάτω χαρακτηριστική  $E_p=f(I_f)$  Η συνδεσμολογία και η χαρακτηριστική που προκύπτει χωρίς φορτίο είναι :

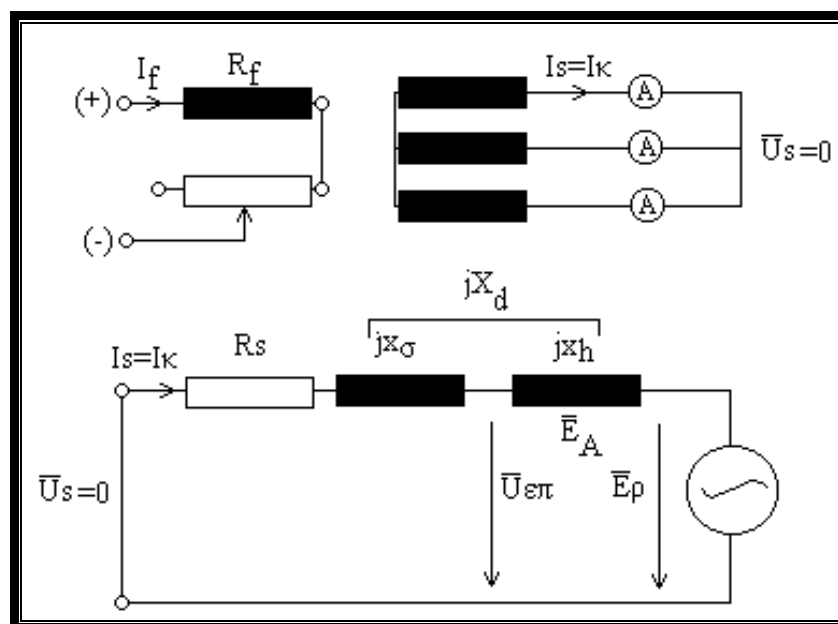


### Χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης (Χ.Β)

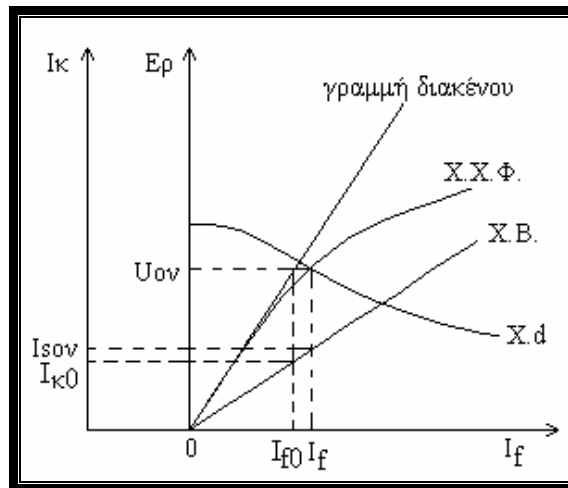
Αν εφαρμόσουμε ένα τριφασικό συμμετρικό βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες της μηχανής, τότε θα γίνει  $U_t=0$ . Η συνδεσμολογία του κυκλώματος και το ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση παίρνουν την μορφή του παρακάτω σχήματος.

$$\text{Έτσι έχουμε : } E_p = I_s \cdot (R_s + jx_D) = I_s \cdot Z_s$$

$$\text{ή } I_s = \frac{E_p}{Z_s}$$







Ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται στις σύγχρονες μηχανές είναι ο λόγος βραχυκύκλωσης (Short circuit ratio) που ορίζεται ως εξής :

$SCR = \text{ρεύμα διέγερσης που δίνει ονομαστική τάση στην X.X.Φ.} / \text{ρεύμα διέγερσης που δίνει ονομαστική ένταση στην X. Βραχυκύκλωσης.}$

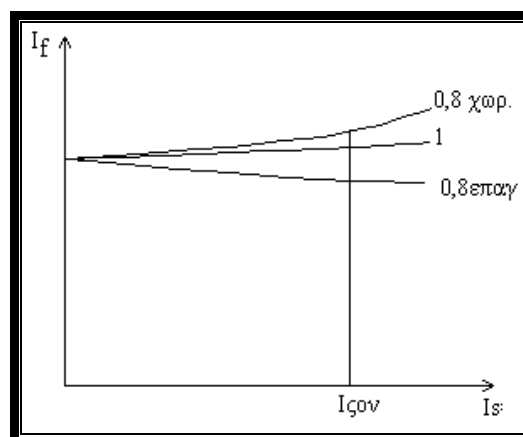
### Λειτουργικές χαρακτηριστικές στάσιμης κατάστασης

Τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν σε μια σύγχρονη γεννήτρια είναι η τάση στα άκρα του τυλίγματος του στάτη, το ρεύμα του στάτη και το ρεύμα διέγερσης.

Εξετάζουμε την γεννήτρια η οποία διανέμει ισχύ με σταθερή συχνότητα σε ένα φορτίο του οποίου ο συντελεστής ισχύος είναι σταθερός. Η καμπύλη δείχνει το ρεύμα διέγερσης σαν συνάρτηση του ρεύματος του στάτη για το σταθερό συντελεστή ισχύος.

Οι Σ.Γ δίνουν συνήθως την max ισχύ [KVA] στο φορτίο με μια τιμή της τάσης και Σ.Ι (συχνά 80,85,90% χωρητικό) για να δώσουν ισχύ χωρίς να υπερθερμανθούν.

Η πραγματική ισχύς εξόδου της γεννήτριας εξαρτάται από την ισχύ που παίρνει από των κινητήρα μηχανή.



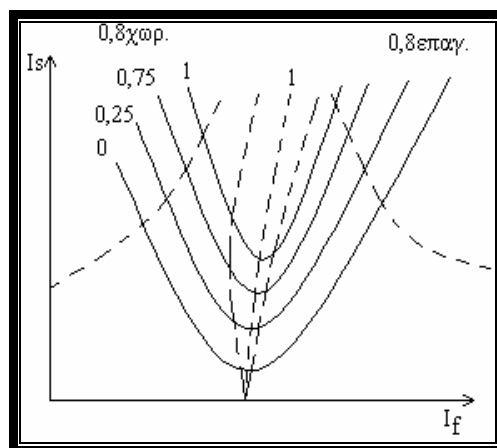
$$I(f) = f(I_s)$$



Ο συντελεστής ισχύος στον οποίο λειτουργεί ο σύγχρονος κινητήρας μπορεί να ελεγχθεί μειώνοντας το ρεύμα διέγερσης.

Η καμπύλη δείχνει τη σχέση μεταξύ του ρεύματος του δρομέα και του ρεύματος διέγερσης για μια σταθερή τάση στα άκρα του στάτη με ένα σταθερό φορτίο στον άξονα του.

Μια οικογένεια καμπυλών φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



**Καμπύλες ( V )**

Για σταθερή ισχύ εξόδου, το ρεύμα του δρομέα είναι φυσικά ελάχιστο σε ένα μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και αυξάνεται με μείωση του συντελεστή ισχύος.

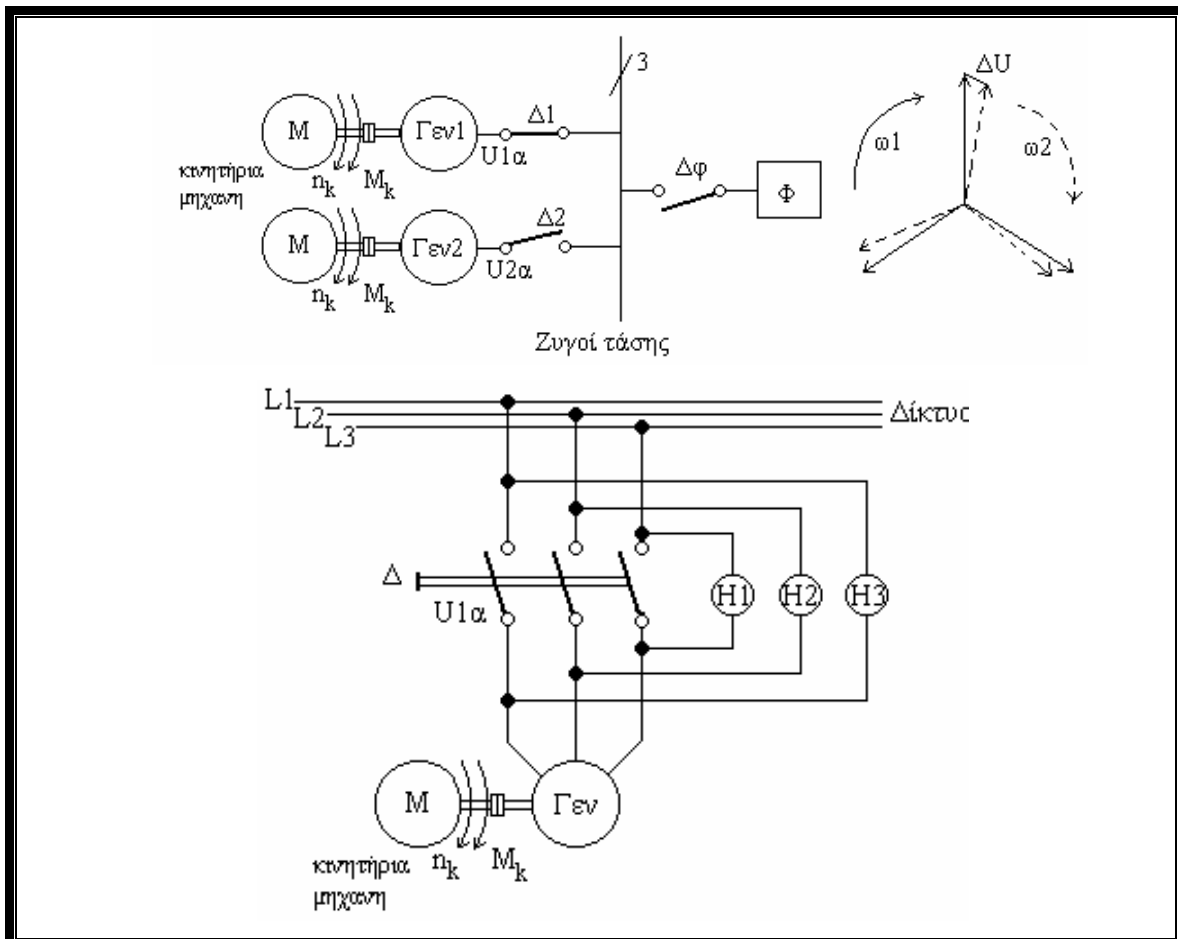
Αυτές οι καμπύλες δείχνουν πως το ρεύμα διέγερσης πρέπει να μεταβληθεί καθώς το φορτίο μεταβάλλεται σε σχέση με τον κύριο σταθερό συντελεστή ισχύος.

Τα σημεία στα δεξιά του μοναδιαίου συντελεστή ισχύος συνθέτουν μια καμπύλη που αντιστοιχεί σε υπερδιέγερση και χωρητικό ρεύμα εισόδου. Τα σημεία στα αριστερά αντιστοιχούν σε υποδιέγερση και επαγωγικό ρεύμα εισόδου. Η διακεκομμένη γραμμή καθορίζει τα όρια στα οποία θα πρέπει να περιορισθεί το ρεύμα διέγερσης για να μην έχουμε αποδιέγερση της μηχανής. Επίσης καθορίζεται και το όριο του ρεύματος  $I_s$  το οποίο δεν μπορεί να ξεπερνάει μια ορισμένη τιμή (υπερφόρτιση).

### **Παράλληλη λειτουργία γεννητριών Ε.Ρ.(Εναλλακτών).**

Για να πραγματοποιηθεί ο παραλληλισμός των εναλλακτών πρέπει να τηρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις :

- α) Οι εναλλακτές να είναι του αυτού είδους (π.χ τριφασικοί κατά Υ)
- β) Οι παραγόμενες ομοειδείς τάσεις  $U_1$  και  $U_2$  να είναι ίσες.
- γ) Οι συχνότητες  $f_1$  και  $f_2$  να είναι ίσες.
- δ) Η διαδοχή των φάσεων να είναι η ίδια.
- ε) Οι τάσεις των αντίστοιχων φάσεων να είναι σε φάση.



Στο σχήμα( β) φαίνεται ο παραλληλισμός μιας σύγχρονης γεννήτριας με το δίκτυο, με την μέθοδο των λαμπτήρων. (σκοτεινή σύνδεση )

Θεωρούμε δύο εναλλακτικές σχήμα (α) από τους οποίους ο ένας είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο και παρέχει τάση στους ζυγούς ενώ πρόκειται να συνδεθεί στους ίδιους ζυγούς και ο δεύτερος εναλλακτήρας.

Σε κάθε εναλλακτήρα θα αντιστοιχεί και ένα σύστημα διανυσμάτων τάσεων που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega = 2\pi f$  όπου  $f = n/60$

Όπως φαίνεται στο αναλυτικό σχήμα στην μια πλευρά του τριπολικού διακόπτη  $\Delta_1$  επικρατεί η τάση  $U_{1\alpha}$  ενώ στην άλλη η τάση  $U_{2\alpha}$ .

Στους ακροδέκτες του διακόπτη επομένως εφαρμόζεται η τάση

$$\Delta U = U_{1\alpha} - U_{2\alpha}$$

Όταν  $U_{1\alpha} = U_{2\alpha} = U_{\alpha}$  τότε  $\Delta U = 0$

Κατάλληλη στιγμή για το κλείσιμο του διακόπτη  $\Delta_2$  είναι όταν  $\Delta U = 0$  δηλαδή. οι λάμπες σβήνουν τελείως (σκοτεινή σύνδεση).

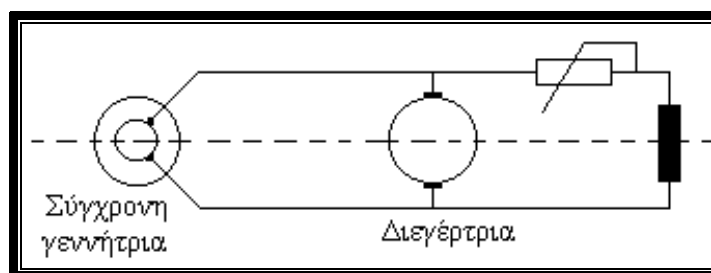
Για να επιτύχομε την κατάλληλη στιγμή που θα κλείσουμε τον διακόπτη ( $\Delta U = 0$ ), πρέπει το αναβόσβημα να είναι αρκετά αργό (περίπου ένα αναβόσβημα κάθε δύο δευτερόλεπτα).

Εάν κατά την στιγμή που κλείσει ο διακόπτης έχουμε  $\Delta U < 0$  ή  $\Delta U > 0$ , τότε μέσα από τις επαφές του διακόπτη  $\Delta_2$  θα κυκλοφορήσει ένα ισχυρό επίρρευμα που μπορεί να προκαλέσει σοβαρή ανωμαλία στο κύκλωμα.

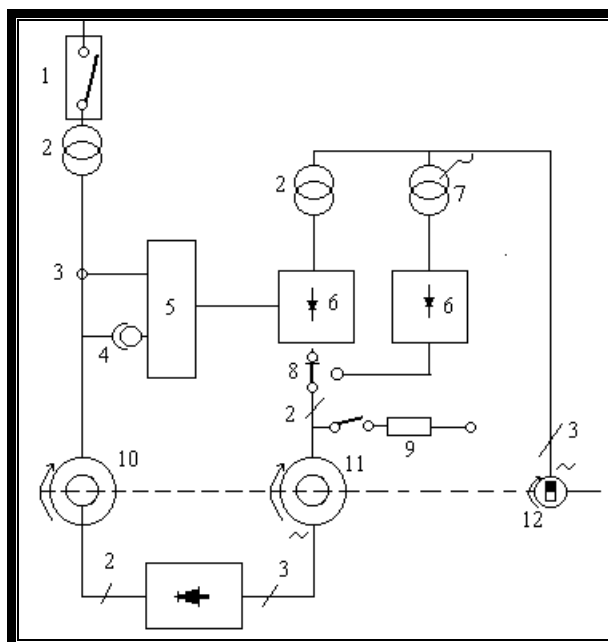
Στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ο παραλληλισμός γίνεται με ειδικά όργανα συγχρονισμού που τοποθετούνται σε ιδιαίτερη κατασκευή. Αυτά είναι το διπλό βολτόμετρο, διπλό συχνόμετρο και το συγχρονοσκόπιο.

## Τρόπος διέγερσης των σύγχρονων γεννητριών

Το ρεύμα της διέγερσης των Σ.Γ προέρχεται από μια ρυθμιζόμενη πηγή συνεχούς ρεύματος που λέγεται διεγέρτρια. Αυτή παλαιά ήταν μια γεννήτρια συνεχούς με συλλέκτη. Σήμερα χρησιμοποιείται με διόδους. Το πεδίο της διεγέρτριας τροφοδοτείται σε μεγάλες γεννήτριες από μια άλλη μηχανή συνεχούς ρεύματος με παράλληλη σύνδεση. Η ρύθμιση της τάσης γίνεται με ηλεκτρομαγνητικούς ρυθμιστές. Μια αντίσταση αυξομειούμενη με ηλεκτρομαγνητικό ρυθμιστή αλλάζει το ρεύμα διέγερσης. Η Σύγχρονη γεννήτρια , η διεγέρτρια , και η βοηθητική διεγέρτρια, βρίσκονται στον κοινό άξονα του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους. Αυτό το σχήμα διέγερσης υπάρχει σε λειτουργία σε παλαιές εγκαταστάσεις.



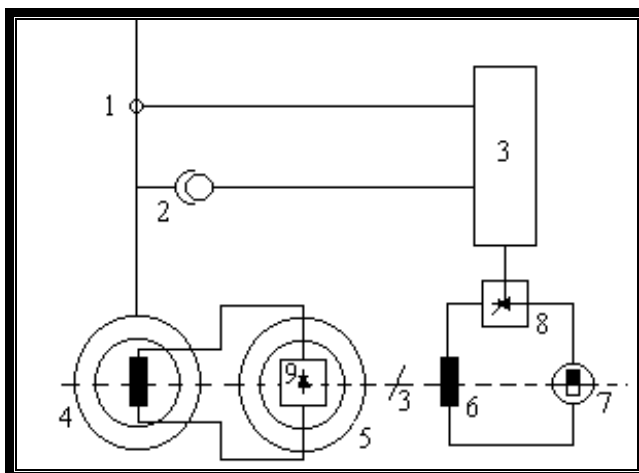
Η διεγέρτρια είναι γεννήτρια παράλληλης διέγερσης συνεχούς ρεύματος. Υπάρχει σήμερα στο υδροηλεκτρικό εργοστάσιο ενέργειας του Ταυρωπού .(Λίμνη Πλαστήρα) Μετά την εφαρμογή των ηλεκτρονικών ισχύος εγκαταλείφθηκε αυτή η μέθοδος και τώρα η διέγερση γίνεται αποκλειστικά με την εφαρμογή των δύο μεθόδων με διόδους ή με θυρίστορ.



1) Διακόπτης ισχύος, 2) Μετασχηματιστής, 3) Μετασχηματιστής έντασης, 4) Μετασχηματιστής τάσης, 5) Έλεγχος τάσης, ρυθμιστής, 6) Ανορθωτικές γέφυρες, 7) Αυτομετασχηματιστής για την ρύθμιση της διέγερσης με το χέρι σε περίπτωση βλάβης του αυτόματου συστήματος λειτουργίας

της διέγερσης, 8) Διακόπτης δύο θέσεων, 9) Αντίσταση εκφόρτισης του δρομέα από επαγωγικά ρεύματα, 10) Σύγχρονη γεννήτρια, 11) Κύρια διεγέρτρια, 12) Βοηθητική διεγέρτρια με μόνιμους πόλους οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να μαγνητίζονται ξανά σε περίπτωση απομαγνήτισης

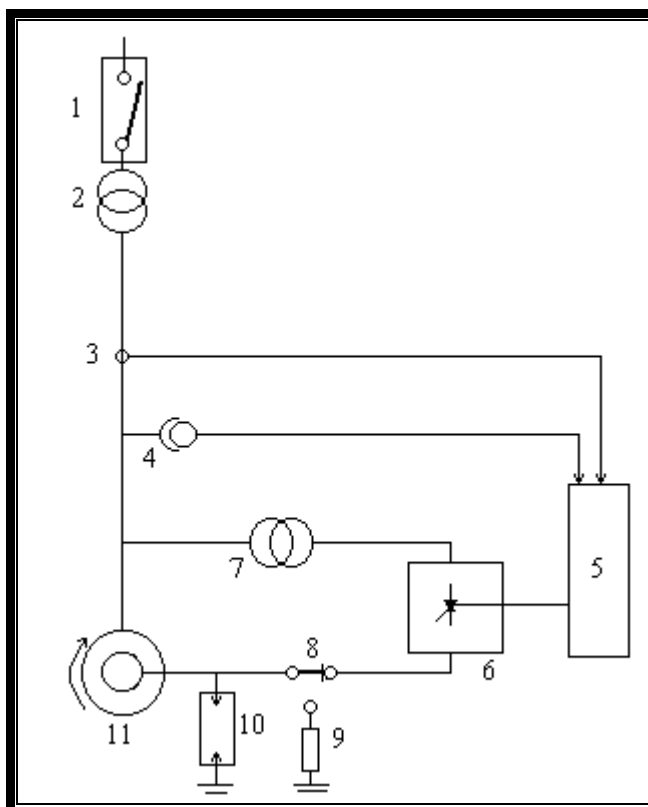
### Διέγερση με διόδους και τριφασική γεννήτρια



Μια τριφασική γεννήτρια (5) τροφοδοτεί μέσω διόδων (9) τους δακτυλίους της διέγερσης της Σ.Γ. (4) όπως στο σχήμα. Η τριφασική γεννήτρια διεγείρεται από το ρυθμιζόμενο ρεύμα μιας γεννήτριας (7) μόνιμων πόλων.

Η ρύθμιση του ρεύματος του πεδίου της διεγέρτριας γίνεται μέσω θυρίστορ και συστήματος αυτομάτου ελέγχου, όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο. Υπάρχει όμως και η δυνατότητα ρύθμισης με το χέρι. Η γέφυρα των διόδων μπορεί να είναι στο στάτη δηλ. επί του εδάφους ή περιστρεφόμενη, δηλαδή στερεωμένη πάνω στο δρομέα. Αν πρόκειται περί στατής γέφυρας τότε η τριφασική διεγέρτρια γεννήτρια έχει την διέγερση της επί του τυμπάνου του δρομέα όπως συνήθως. Αν η γέφυρα των διόδων είναι περιστρεφόμενη τότε η τριφασική γεννήτρια έχει την διέγερση στο στάτη και το τριφασικό κύκλωμα απ' όπου λαμβάνεται η ισχύς στο δρομέα. Δηλαδή πρόκειται για μια αντίστροφη κατασκευή απ' ό,τι την συναντήσαμε στις Σ.Γ. Αυτή η κατασκευή οδηγεί στο να μην υπάρχει η ανάγκη στρεφόμενων επαφών για να περάσει το ρεύμα του πεδίου στο δρομέα.

## Διέγερση με θυρίστορ



1 Διακόπτης ισχύος 2 μετασχηματιστής 3 Μετασχηματιστής έντασης 4 Μετασχηματιστής τάσης 5 Ρυθμιστής ελέγχου της τάσεως 6: Γέφυρα Thyristor 7 : Μ/Σ διέγερσης 8 Διακόπτης δύο θέσεων 9 : Αντίσταση εκφόρτισης του τυλίγματος διέγερσης 10 Απαγωγέας τάσεως 11 Σύγχρονη γεννήτρια

Η διέγερση αυτή έχει δύο εναλλακτικές μορφές. Στην πρώτη η ισχύς λαμβάνεται από μετασχηματιστή στην έξοδο της γεννήτριας ή από το δίκτυο. Στην δεύτερη, η ισχύς λαμβάνεται από μια στρεφόμενη γεννήτρια.

Στην διέγερση με θυρίστορ έχουμε κατ' ευθείαν ρύθμιση της συνεχούς τάσης που επενεργεί στο τύλιγμα της διέγερσης της Σ.Γ.

Στα άλλα σχήματα της διέγερσης που γνωρίζουμε, παρεμβάλλεται ένα κύκλωμα που ρυθμίζει την τάση π.χ. το κύκλωμα διέγερσης της γεννήτριας διέγερσης πράγμα που προκαλεί μια καθυστέρηση στη ρύθμιση.

Η γρήγορη ρύθμιση της τάσης διέγερσης είναι σημαντικό πλεονέκτημα σε μεταβατικές καταστάσεις π.χ. σε βραχυκυκλώματα.

## Γεννήτριες έκτυπων πόλων

Το διάρρευμα  $\Theta_A$  του στάτη στις μηχανές έκτυπων πόλων προέρχεται από τα τυλίγματα στο στάτη, που είναι όμοιας κατασκευής, όπως σε μια στροβιλογεννήτρια. Όπως είχαμε πει στην στροβιλογεννήτρια η ροή ή η μαγνητική επαγωγή είναι ημιτονοειδής.

Λόγω όμως των έκτυπων πόλων έχουμε μια ανομοιομορφία στο διάκενο της μηχανής και η μαγνητική επαγωγή που δημιουργείται από το ρεύμα του στάτη εξαρτάται από την σχετική θέση του κύματος της μαγνητικής επαγωγής ως προς τους έκτυπους πόλους.

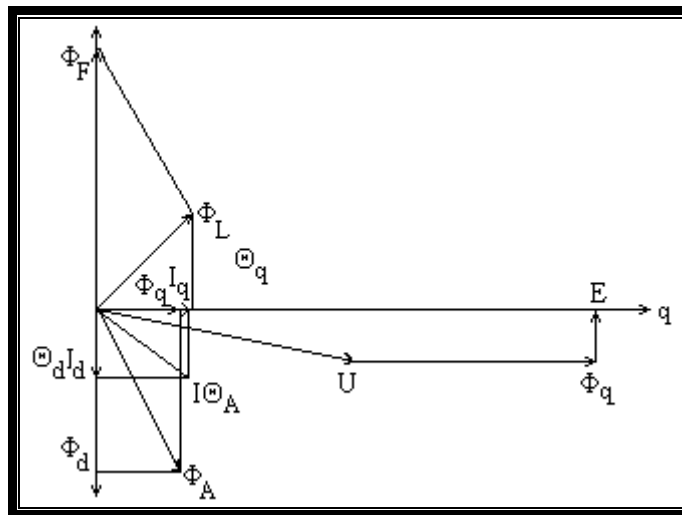
Υπάρχουν δύο χαρακτηριστικές θέσεις του κύματος  $\Theta_A$ . Η μια είναι όταν το μέγιστο ή το ελάχιστο του  $\Theta_A$  συμπίπτει με τον μαγνητικό άξονα του δρομέα. Αυτή λέγεται θέση του ορθού άξονα. Ο μαγνητικός άξονας του δρομέα δηλαδή ο βόρειος πόλος του λέγεται και ορθός ή d άξονας.

Η άλλη χαρακτηριστική θέση είναι όταν το κύμα  $\Theta_A$  έχει μέγιστο ή ελάχιστο στο μέσο του διαστήματος μεταξύ των πόλων. Στο μέσο μεταξύ των πόλων που έπεται του άξονα d κατά  $90^\circ$  (ηλεκτρική γωνία) χαράσσουμε ένα άξονα όπως στο σχήμα και το ονομάζουμε εγκάρσιο ή q άξονα.

Αν το κύμα δεν έχει την d ή q θέση μπορεί να αναλυθεί σε δυο συνιστώσες στο χώρο  $\Theta_d$   $\Theta_q$  που η μια να έχει την θέση της d και η άλλη την θέση της q. Το ορθό κύμα  $B_d$  είναι πιο ενισχυμένο από το  $B_q$ . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το διάκενο της μηχανής στους πόλους είναι μικρότερο από ότι στο διάστημα μεταξύ των πόλων.

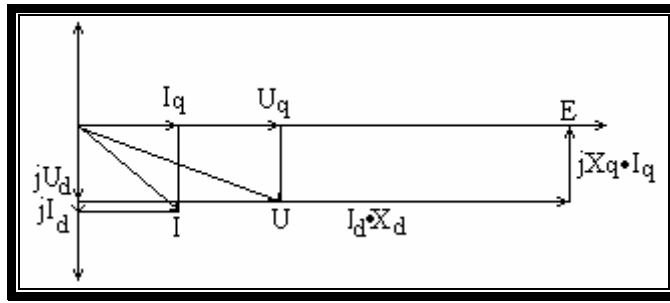
Τα κύματα  $B_d$ ,  $B_q$  της επαγωγής είναι εκτός αυτού και παραμορφωμένα.

Παραμόρφωση έχει και το πεδίο  $B_f$  που προέρχεται από τη διέγερση.



Η ροή  $\Phi_f$  που προκαλείται από το πεδίο διέγερσης  $B_f$  επάγει μια τάση  $E$  στο τύλιγμα

$$E = - \frac{d \Phi_f}{d t}$$



Από το διανυσματικό διάγραμμα των φασικών διανυσμάτων έχουμε:

$$\begin{aligned}\bar{I} &= \bar{I}_d + \bar{I}_q \\ \bar{\Theta}_A &= \bar{\Theta}_d + \bar{\Theta}_q \\ \bar{\Phi}_A &= \bar{\Phi}_d + \bar{\Phi}_q\end{aligned}$$

όπου τα μεγέθη  $\Phi_d$ ,  $\Phi_q$  είναι ανάλογα των ρευμάτων  $I_d$ ,  $I_q$  δηλαδή ισχύει:

$$\begin{aligned}\Phi_d &= L_d \cdot I_d = \frac{X_d}{\omega} \cdot I_d && \text{με } X_d = L_d \cdot \omega \\ \Phi_q &= L_q \cdot I_q = \frac{X_q}{\omega} \cdot I_q && \text{με } X_q = L_q \cdot \omega \\ \Phi_q &= L_q \cdot I_q = \frac{X_q}{\omega I_q} && \text{με } X_q = L_q \cdot \omega\end{aligned}$$

Οι σταθερές  $L_d$ ,  $L_q$  αφενός και  $X_d$ ,  $X_q$  αφετέρου λέγονται αυτεπαγωγές και αντιδράσεις στον ορθό και εγκάρσιο άξονα αντίστοιχα.

Η συνισταμένη ροή  $\Phi_L$  στο τύλιγμα προέρχεται αθροιστικά από την ροή διέγερσης  $\Phi_f$  και την ροή του στάτη  $\Phi_A$  και λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση της  $\Phi_A$  προκύπτει:

$$\Phi_L = \Phi_A + \Phi_f = \Phi_d + \Phi_q + \Phi_f$$

### Εξίσωση τάσεων, ρευμάτων

Η επαγόμενη τάση στους πόλους της μηχανής είναι:

$$U = \frac{-d\Phi_L}{dt} = \frac{-d\Phi_f}{dt} - \frac{d\Phi_d}{dt} - \frac{d\Phi_q}{dt}$$

Για της ροές ισχύει:

$$E = \frac{-d\Phi_f}{dt}$$

$$\frac{d\Phi_d}{dt} = j\omega \cdot \Phi_d = jX_d \cdot I_d$$

$$\frac{d\Phi_q}{dt} = j\omega \cdot \Phi_q = jX_q \cdot I_q$$

Συνεπώς ισχύει η εξίσωση τάσεων :

$$\bar{E} = \bar{U} + jX_d \bar{I}_d + jX_q \bar{I}_q$$

Αναλύοντας τις τάσεις E, U στους άξονες d, q ορίζοντας μιγαδικό σύστημα συντεταγμένων με q πραγματικό και d στο φανταστικό άξονα προκύπτει από την παραπάνω σχέση:

$$E = E_q + jE_d = E_q$$

$$U = U_q + jU_d$$

$$I = I_q + jI_d \quad (I_d = I_q) \quad (I_q = I_q)$$

$$E = U - X_q \cdot I_d + jX_q \cdot I_q \quad (\text{πολλαπλασιάζουμε με } j)$$

$$E_d = 0 = U_d + X_q \cdot I_q$$

$$E_q = E = U_q - X_d \cdot I_d$$

Για τις συνιστώσες των ρευμάτων έχουμε:

$$I_d = -I \cdot \eta \mu(\theta + \varphi)$$

$$I_q = I \cdot \sigma \nu \nu(\theta + \varphi)$$

Αν η μηχανή δεν είναι ιδεατή και έχει μια αντίδραση σκέδασης  $X_\sigma$  και αντίσταση R τότε ισχύει για  $Z = R + jX_\sigma$ :

$$E = U - X_d \cdot I_d + X_q \cdot I_q + Z \cdot (I_q + jI_d)$$

$$E = U - (X_d + X_\sigma)I_d + j(X_q + X_\sigma) \cdot I_q + R \cdot (I_q + jI_d)$$

E, U είναι φασικά μεγέθη

$$E = U \cdot \sigma \nu \nu \Theta + X_d \cdot I \cdot \eta \mu(\varphi + \theta) = U_q - X_d \cdot I_d$$

Αυτή ισχύει για φασικά μεγέθη

Παρατηρούμε ότι η ενεργός ισχύς έχει 2 όρους, έναν που εξαρτάται από την διέγερση και είναι ανεξάρτητο της διεγέρσεως ο οποίος λέγεται ισχύς αντιδράσεως

$$P_r = \frac{U^2}{2 \cdot \eta \mu 2\theta \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)}$$

Δηλαδή η γεννήτρια έκτυπων πόλων μπορεί να δώσει ισχύ χωρίς διέγερση πράγμα αδύνατο για τη στροβιλογεννήτρια.

Το μέγιστο είναι για  $\theta = 45^\circ$ .

Το max της ισχύος είναι για  $\theta = 90^\circ$  και για U, E σταθερά.

### Ισχύς γεννητριών

Η μιγαδική ισχύς μιας γεννήτριας χωρίς απώλειες προκύπτει για κάθε μια φάση από την σχέση:

$$S = P + jQ = U \cdot I^* = (U_q + jU_d) \cdot (I_q - jI_d) = U_d \cdot I_d + U_q \cdot I_q + j(U_d \cdot I_q - U_q \cdot I_d)$$

$$\text{Ενεργός ισχύς: } P = U_d \cdot I_d + U_q \cdot I_q$$

$$\text{Αεργός ισχύς: } Q = U_d \cdot I_q - U_q \cdot I_d$$

Έκφραση των ισχύων συναρτήσει των U, E, θ από το σχήμα:



$$U_d = -U \eta \mu \theta \quad I_d = -\frac{E - U \sigma \nu \theta}{X_d}$$

$$U_q = U \sigma \nu \theta \quad I_q = \frac{U \eta \mu \theta}{X_q}$$

Αντικαθιστούμε τις παραπάνω τιμές στον τύπο της ισχύος και έχουμε:

$$P = \left(\frac{UE}{X_d}\right) \eta \mu \theta + \frac{U^2}{2 \eta \mu 2 \theta \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)} =$$

$$= UI \sigma \nu \Phi \text{ Ενεργός}$$

$$Q = \frac{U(E \sigma \nu \theta - U)}{X_d} + \frac{U^2}{2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) (\sigma \nu 2 \theta - 1)} =$$

$$= UI \eta \mu \Phi \text{ Άεργος}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} = \frac{U \cdot E}{x_d} \cdot \cos \theta + U^2 \cdot \cos 2 \theta \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)$$

P,Q τριφασικά με U,E πολικές

P,Q μονοφασικά με U,E φασικές

$$\tan \theta = \frac{X_q P}{U^2 + X_q Q} \quad \theta: \text{γωνία φορτίσεως}$$

P,Q τριφασικά U: πολική τάση

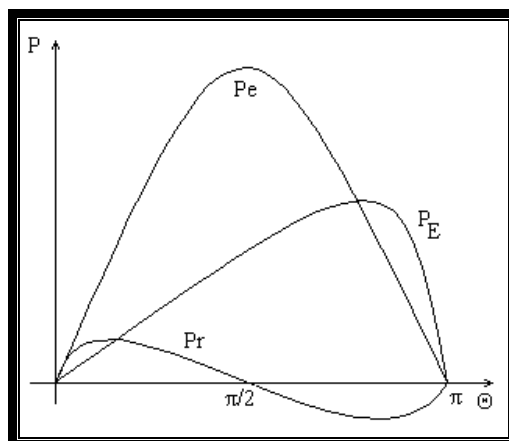
$$E = U \cdot \sigma \nu \nu \theta + X_d \cdot \eta \mu (\varphi + \theta) = U_q - X_d \cdot I_d$$

Αυτή ισχύει για φασικά μεγέθη. Παρατηρούμε ότι η ενεργός ισχύς έχει δύο όρους, έναν που εξαρτάται από την διέγερση και λέγεται ισχύς αντίδρασης.

$$P_r = \frac{U^2}{2 \cdot \eta \mu 2 \theta \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)}$$

Δηλαδή η γεννήτρια έκτυπων πόλων μπορεί να δώσει ισχύ χωρίς διέγερση πράγμα αδύνατο για τη στροβιλογεννήτρια.

το μέγιστο είναι για  $\theta=45^\circ$



Το μέγιστο της ισχύος είναι για  $\theta < 90^\circ$  για U, E σταθερά.

(1) *ευστάθεια - αστάθεια*

Η ισχύς που παίρνουμε από την γεννήτρια είναι για  $R=0$  η ενεργός ισχύς που προσπαθεί να πεδήσει το δρομέα.

Η ισχύς της μηχανής P προσδιορίζεται μόνο από τη μηχανική ισχύ στον άξονα της δηλαδή αλλάζει μόνο αν π.χ αλλάξει η ποσότητα ή και η ενθαλπία του ατμού ή νερού στον στρόβιλο που κινεί τη γεννήτρια.

Η άεργη ισχύς αλλάζει μόνο μεταβάλλοντας το ρεύμα της διέγερσης δηλαδή την ΗΕΔ της μηχανής.

Για γωνία φορτίσεως  $\Theta=0$  έχουμε:

$$Q = \frac{U_p (E_p - U_s)}{X_d} \quad P = 0$$

$Q > 0 \Rightarrow$  πυκνωτής δίνει άεργο ισχύ σε επαγωγική κατανάλωση

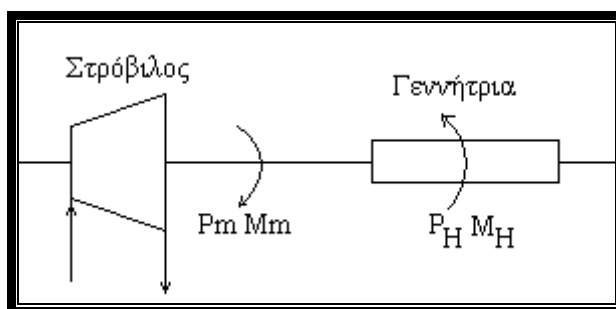
$Q < 0 \Rightarrow$  παίρνει άεργο ισχύ

$$\tan \Theta = \frac{X_d P}{U^2 + X_d Q}$$

Δηλαδή η μηχανή δεν μετατρέπει ισχύ.

Παράγει όμως άεργη ισχύ ανάλογα με τη διέγερση  $E_p$  δηλαδή εργάζεται σαν πυκνωτής. Λέγεται δε σύγχρονος ή στρεφόμενος πυκνωτής.

### Σχέσεις και ισοζύγιο μηχανικής ισχύος



Εφαρμοσμένη μηχανική ισχύς  $P_a$   $P_a = P_m - P_{tp} = P_h = P_n + P_{cu} + P_{fe}$  όπου  $P_n$ : ισχύς στους ακροδέκτες της γεννήτριας

Αν παραλείψουμε τις απώλειες  $Cu$  και  $Fe$ :

$$P_a = P_m - P_{tp} = P_h = \left( \frac{E_p U_s}{X_d} \right) \cdot \eta \mu \Theta = P_n$$

Για της ροπές:

$$M_a = M_m - M_{tp} = M_h$$

Για κινητήρα

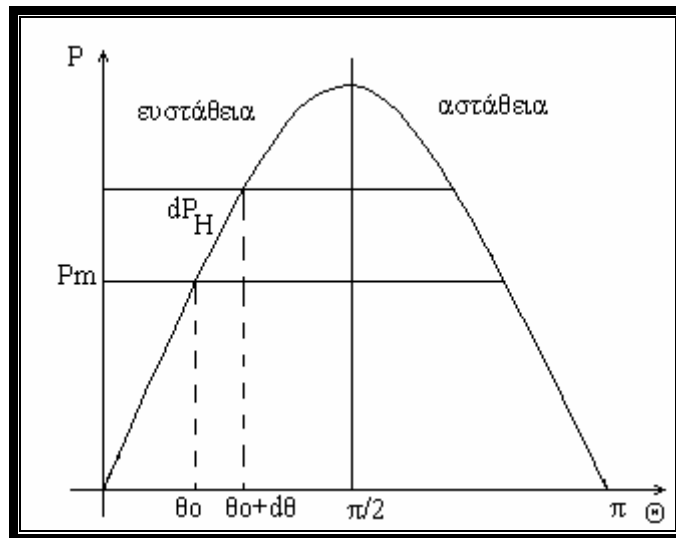
$$P_1 = P_h + P_{fe} + P_{cu} \quad P_h = P_2 + P_{tp}$$

$$P_1 = P_2 + P_{cu} + P_{fe} + P_{tp}$$

(2) ευστάθεια συγχρονισμού

Θεωρούμε τη μηχανή σε στάσιμη κατάσταση με φορτίο  $P_m = P_h$  και γωνία φορτίσεως  $\theta = \theta_0$ .

Έστω ότι οι τάσεις  $E_p$ ,  $U_s$  μένουν σταθερές και ότι ξαφνικά ο δρομέας δέχεται μια τυχαία παροδική αύξηση της κινητήριας ροπής και συνεπώς επιταχύνεται γιατί παροδικά είναι  $P_m > P_h$



Έτσι μετά από μικρό χρονικό διάστημα ο δρομέας θα έχει πάει στη θέση  $\theta_0 + d\theta$  ενώ η μηχανική ισχύ θα έχει πάει πίσω στην παλιά τιμή της  $P_m$  εφόσον δεχθήκαμε παροδική αλλαγή ισχύος.

Η ηλεκτρική πέδηση  $P_h$  στη γωνία  $\theta = \theta_0 + d\theta$  θα αυξηθεί ενάντια της τιμής  $P_h(\theta_0)$  κατά  $dP_h$

$$\text{όπου } dP_h = \frac{dP_h}{d\theta} = \frac{E_q U_s}{X_d \cos\theta_0} d\theta$$

Αν επιζητούμε ευστάθεια πρέπει οι δυνάμεις που ασκούνται στο σύστημα να τείνουν να μειώσουν την γωνία  $\theta$  από  $\theta_0 + d\theta$  στην τιμή  $\theta_0$ . Αυτό γίνεται εάν η συνισταμένη ισχύς είναι σε αυτήν την περίπτωση επιβραδυντική.

Στη θέση  $\theta_0 + d\theta$  έχουμε μια επιτάχυνση:

$$P_m - [P_h(\theta_0) + dP_h] = \omega J d^2 \theta dt^2$$

Αυτή γράφεται και ως εξής αν λάβουμε υπόψη την έκφραση της  $dP_h$  και ότι  $P_m = P_h(\theta_0)$ .

$$-\left(\frac{E_p U_s}{X_d}\right) \sin\theta_0 d\theta = \frac{\omega J d^2 \theta}{X_d t^2}$$

Θα πρέπει για να επαναφερθεί στο σύστημα στην αρχική του θέση πρέπει

$$\eta \mu \theta_0 > 0 \Rightarrow \text{για } \frac{dP_h}{d\theta} > 0 \text{ ή } \theta_0 < \frac{\pi}{2} \text{ έχουμε ευστάθεια}$$

Σε μεγάλες διαταραχές π.χ βραχυκυκλώνοντας πρέπει το σημείο ευσταθούς λειτουργίας να είναι κάτω των  $90^\circ$  συνήθως  $60^\circ - 70^\circ$ .

$$M_m - M_h = \frac{d^2 J}{d^2 t}$$

## ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Οι σύγχρονοι κινητήρες έχουν ένα πολυφασικό τύλιγμα στον στάτη και ένα τύλιγμα διέγερσης που διαρρέεται από συνεχές ρεύμα και βρίσκεται στον δρομέα. Υπάρχουν δύο μαγνητοηλεκτρεγερτικές δυνάμεις. Η μία οφείλεται στο ρεύμα διέγερσης και η άλλη στο ρεύμα του στάτη. Η σύνθεση των  $m$  παράγουν την ροπή. Ο στάτης είναι ίδιος με αυτών των επαγωγικών κινητήρων, αλλά δεν υπάρχει επαγωγή στον δρομέα. Μια σύγχρονη μηχανή έχει σταθερή ταχύτητα και πάντοτε περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα, η οποία εξαρτάται από την συχνότητα και τον αριθμό των πόλων. Μια σύγχρονη μηχανή μπορεί να λειτουργήσει σαν κινητήρας ή γεννήτρια. Ο συντελεστής ισχύος μπορεί να ελεγχθεί με την μεταβολή του ρεύματος πεδίου. Οι κυκλομετατροπείς και οι αντιστροφείς χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές των σύγχρονων κινητήρων με οδηγούς μεταβλητής ταχύτητας. Οι σύγχρονοι κινητήρες μπορούν να ενταχθούν σε έξι κατηγορίες.

- 1) Κινητήρες κυλινδρικού δρομέα
- 2) Κινητήρες πόλου
- 3) Κινητήρες μαγνητικής αντίστασης
- 4) Κινητήρες μόνιμου μαγνήτη
- 5) Κινητήρες διακοπτόμενης μαγνητικής αντίστασης
- 6) DC και AC κινητήρες χωρίς ψήκτες

### Κινητήρες κυλινδρικού δρομέα

Το τύλιγμα διέγερσης βρίσκεται στο δρομέα, ο οποίος είναι κυλινδρικός και αυτοί οι κινητήρες έχουν ένα ομοιόμορφο κενό αέρος (διάκενο). Οι αντιδράσεις εξαρτώνται από τη θέση του δρομέα. Στο ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα, αγνοώντας τις εν κενώ απώλειες, η  $R_a$  είναι η αντίσταση οπλισμού ανά φάση και  $X_s$  είναι η σύγχρονη αντίδραση ανά φάση. Η  $V_f$  ( $E_p$ ) η οποία εξαρτάται από το ρεύμα πεδίου είναι γνωστή ως τάση διέγερσης ή πεδίου. Ο συντελεστής ισχύος εξαρτάται από το ρεύμα διέγερσης. Οι καμπύλες  $V$  στις οποίες φαίνονται οι τυπικές μεταβολές του ρεύματος δρομέα ως προς το ρεύμα διέγερσης φαίνονται στην εικόνα του κεφ 6.8.4 Για το ίδιο ρεύμα δρομέα, ο συντελεστής ισχύος μπορεί να υστερεί ή να προπορεύεται και εξαρτάται από το ρεύμα διέγερσης  $I_f$ .

Σχέσεις που διέπουν τον σύγχρονο κινητήρα.

Αν η  $\Theta_m$  είναι η γωνία υστέρησης του συντελεστή ισχύος του κινητήρα έχουμε:

$$\bar{E}_p = \bar{U}_s \angle 0^\circ - I_a \times (R_a + jX_s) \quad (1),$$

$$U_s \angle 0^\circ - I_a \times (\cos \phi + j \sin \phi) \times (R_a + jX_s) = (2),$$

$$U_s - I_a X_s \sin \phi - I_a R_a \cos \phi - j I_a (X_s \cos \phi - R_a \sin \phi) = E_p \angle \delta \quad (3)$$

όπου

$$\delta = \tan^{-1} \frac{I_a X_s \cos \phi - I_a R_a \sin \phi}{U_s - I_a X_s \sin \phi - I_a R_a \cos \phi} \quad (4) \quad \text{και}$$

$$\bar{E}_p = \bar{U}_f = [(U_s - I_a X_s \sin \phi - I_a R_a \cos \phi) + (I_a X_s \cos \phi - I_a R_a \sin \phi)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Το διάγραμμα φάσης δίνει

$$\bar{E}_p = \bar{U}_f = E_p (\cos \delta + j \sin \delta) \quad (6)$$

$$I_a = \frac{\bar{U}_s - \bar{E}_p}{R_a + jX_s} = \frac{[U_s - E_p (\cos \delta + j \sin \delta)](R_a + jX_s)}{R_a^2 + X_s^2} \quad (7)$$

Το πραγματικό μέρος είναι:  $I_a \cos \phi = \frac{R_a (U_s - E_p \cos \delta) - E_p X_s \sin \delta}{R_a^2 + X_s^2}$  (8)

Η ισχύς εισόδου είναι

$$P_1 = 3U_s I_a \cos \phi = \frac{3[R_a (U_s^2 - U_s E_p \cos \delta) - U_s E_p X_s \sin \delta]}{R_a^2 + X_s^2} \quad (9)$$

Οι απώλειες χαλκού του στάτη είναι  $P_{cu} = 3I_a^2 R_a$  (10)

Η ισχύς διακένου ίδια με την ισχύ απόδοσης

$$P_2 = P_\delta = P_1 - P_{cu} \quad (11)$$

Αν  $\omega_s$  είναι η σύγχρονη ταχύτητα, που είναι η ίδια με την ταχύτητα του δρομέα τότε η ροπή είναι

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega_s} \quad (12)$$

Αν αγνοηθεί η αντίσταση του δρομέα η ροπή γίνεται

$$M_2 = - \frac{3U_s E_p \sin \delta}{\omega_s X_s} \quad (13)$$

Και η εξίσωση (4) γίνεται

$$\delta = - \tan^{-1} \frac{I_a X_s \cos \phi}{U_s - I_a X_s \sin \phi} \quad (14)$$

Για τη λειτουργία σε κινητήρα το  $\delta$  είναι αρνητικό και η ροπή από την εξίσωση (13) γίνεται θετική. Στην περίπτωση λειτουργίας ως γεννήτριας, το  $\delta$  είναι θετικό και η ισχύς, ροπή γίνονται αρνητικές. Η γωνία  $\delta$ , ονομάζεται γωνία φόρτισης. Για σταθερή τάση και συχνότητα η ροπή εξαρτάται από την γωνία  $\delta$  και είναι ανάλογη της τάσης διέγερσης  $V_R$ . Για σταθερές τιμές της  $V_f$  και της γωνίας  $\delta$ , η ροπή εξαρτάται από το λόγο τάσης προς συχνότητα και ένας σταθερός λόγος της  $U/f$  (Volts/Hertz) θα δώσει έλεγχο ταχύτητας σε σταθερή ροπή. Αν οι  $V_a$ ,  $V_f$  και  $\delta$  παραμείνουν σταθερές, η ροπή μειώνεται με την ταχύτητα και ο κινητήρας λειτουργεί στον τύπο ασθενούς πεδίου.

Αν  $\delta = 90^\circ$ , η ροπή γίνεται μέγιστη και η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή που είναι η Pullout ροπή γίνεται:

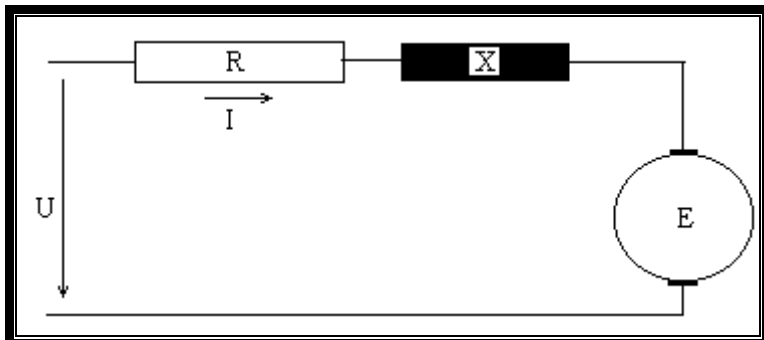
$$M_2 = \frac{-3U_s E_p}{X_s \omega_s} \quad 15.$$

Η γωνία ροπής του κινητήρα είναι στα όρια  $-90^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$

## Μονοφασικοί κινητήρες Ε.Ρ. με συλλέκτη

Η κατασκευή του κινητήρα αυτού έχει ως εξής ο στάτης φέρει ένα μονοφασικό τύλιγμα Ε.Ρ και ένα τύλιγμα Σ.Ρ στο δρομέα. Τα δύο αυτά τυλίγματα συνδέονται σε σειρά ο δρομέα φέρει συλλέκτη όπως μια μηχανή D.C

### Ισοδύναμο κύκλωμα



Βάσει αυτού μπορούμε να μελετήσουμε τις ιδιότητες του κινητήρα Ε.Ρ όμοια με την μηχανή Σ.Ρ με τη διαφορά ότι θα προστεθεί μια επαγωγική αντίσταση.

$$X = X_E + X_{\sigma E} + X_{\sigma \rho} \quad (1)$$

$X_E$  : επαγωγική αντίδραση διεγέρσεως

$X_{\sigma E}, X_{\sigma \rho}$  : επαγωγικές αντιστάσεις σκεδασμού της διέγερσης και των τυλιγμάτων του δρομέα.

$$\bar{U} = \bar{E}_{\pi \epsilon \rho} + \bar{I} \cdot (R + jX) \quad (2)$$

$$\Phi_E \sim L_E I = \frac{X_E}{2\pi f I} \quad (3)$$

$$U = \frac{C_n(X_E)}{(2\pi f)I} + I(R + jX) \quad (2),(3) \gg \gg \text{ότι ο αριθμός στροφών μπορεί να μεταβληθεί με}$$

μεταβολή της τάσεως εισόδου. Αυτό γίνεται με τις γνωστές μεθόδους ηλεκτρονικών ισχύος είτε με αυτομετασχηματιστή.

Το ρεύμα  $T$  άρα και η ροπή  $M \sim \Phi E I \sim I^2$  επειδή πήραμε σαν δεδομένο ότι ο κινητήρας δουλεύει στην γραμμική περιοχή της καμπύλης μαγνήτισης. Η ροπή παραμένει σταθερή επειδή το  $I$  είναι σταθερό.

$$M_H = \frac{C}{2 \cdot I_p} \Phi_{\text{μεγ. συνψ (μέση τιμή)}}.$$

ή

$$M = C \cdot I \cdot \Phi \sim C \cdot L_e \cdot I^2$$

Γι'αυτό το πλεονέκτημα ο κινητήρας αυτός είναι κατάλληλος για τη χρησιμοποίηση του σιδηρόδρομος, τρόλεϊ

### Κινητήρας μαγνητικής αντίδρασης

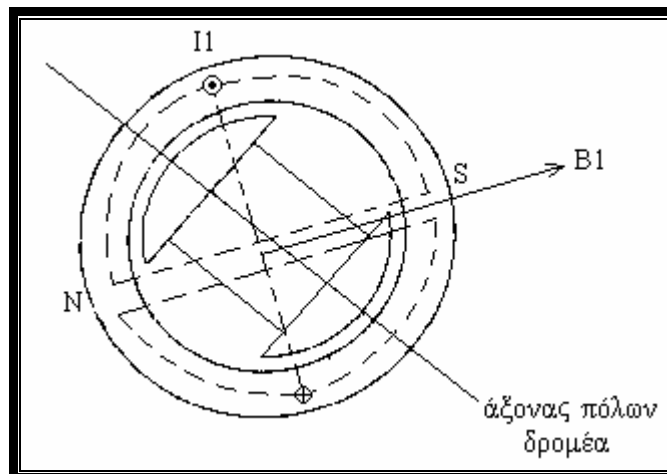
Είναι κινητήρας σύγχρονος με δρομέα με έκτυπους πόλους και χωρίς διέγερση (D.C) στο δρομέα.

Ο στάτης έχει τριφασικό ή μονοφασικό τύλιγμα που παράγει στρεφόμενο (κυκλικό ή ελλειπτικό) μαγνητικό πεδίο.

Η λειτουργία του στηρίζεται στην ελκτική δύναμη που ασκεί ένα μαγνητικό πεδίο πάνω σε οποιαδήποτε σιδηρομαγνητικό υλικό. Επειδή ο δρομέας έχει έκτυπους πόλους το διάκενο στάτη-δρομέα είναι μεταβλητό και έτσι η μαγνητική αντίσταση του διακένου είναι μεταβλητή. Για τον λόγο αυτό (ασυμμετρία στο διάκενο) ο δρομέας περιστρέφεται συνεχώς παρασυρόμενος από το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη.

Η ροπή αντίδρασης είναι πολύ μικρότερη από τη ροπή μιας σύγχρονης μηχανής με ίδιο μέγεθος. Γι'αυτό κατασκευάζονται από 50W-6KW. Για το ξεκίνημα ο δρομέας έχει ένα κλωβό όπως στον σύγχρονο κινητήρα.

Η ροπή εκκίνησης είναι  $M_{εκ}=3M_{ov}$  και το  $\cos\phi=0,4\sim 0,5$



### Κινητήρες μαγνητικής υστέρησης

Στον στάτη έχουμε ένα μονοφασικό τύλιγμα που δημιουργεί ένα στρεφόμενο ελλειπτικό πεδίο. Ο δρομέας δεν έχει περιέλιξη ούτε κλωβό. Έχει εξωτερικά μια στρώση από σιδηρομαγνητικό υλικό "σκληρό". Σκληρό λέμε όταν ο βρόχος της καμπύλης υστέρησης έχει μεγάλο πλάτος.

Η μαγνητική επαγωγή του δρομέα επιπορεύεται από το διάνυσμα του διαρρέυματος του στάτη κατά μια γωνία την οποία λέμε γωνία υστέρησης.

Η γωνία αυτή είναι τόσο μεγαλύτερη όσο πιο σκληρό είναι το υλικό.

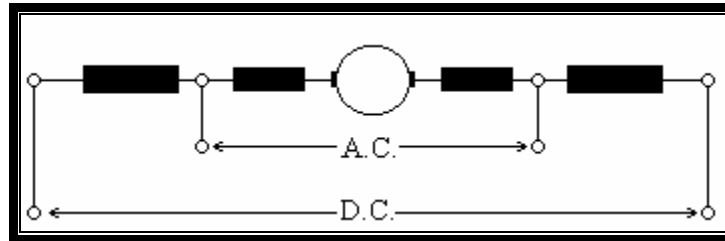
Εξ αιτίας αυτής της γωνίας δημιουργείται ροπή περιστροφής, που τείνει να περιστρέψει τον δρομέα στην διεύθυνση του στρεφόμενου πεδίου του στάτη.

Περιστρέφεται όπως ο Σύγχρονος κινητήρας με τον σύγχρονο αριθμό στροφών.

Για την εκκίνηση χρησιμοποιούμε πυκνωτή ο αριθμός στροφών είναι σταθερός ίσος προς τον σύγχρονο αριθμό στροφών.

Χρησιμοποιείται για την κίνηση ηλεκτρικών ωρολογίων ή χρονοδιακοπών καθώς και για την κίνηση των μαγνητοφώνων.

### Κινητήρες universal



Είναι κινητήρες που μπορούν να λειτουργήσουν τόσο με συνεχές όσο και με εναλλασσόμενο ρεύμα. σχεδόν με τα ίδια χαρακτηριστικά όταν το φορτίο είναι μικρό.

Οι πόλοι του κινητήρα που είναι στον στάτη κατασκευάζονται από λεπτά φύλλα δυναμοελάσματος. ο δρομέας φέρει τύλιγμα όπως η μηχανή Σ.Ρ. Σε λειτουργία με Σ.Ρ ο αριθμός στροφών είναι στα 15% μεγαλύτερος από ότι στο Ε.Ρ

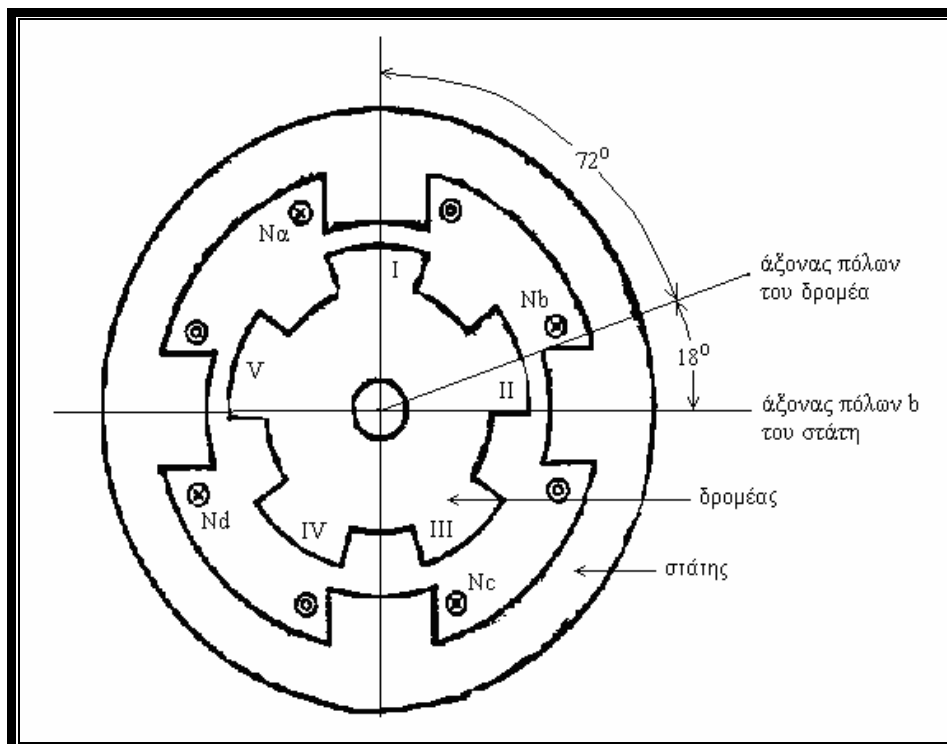
Ο βαθμός απόδοσης στο Ε.Ρ είναι μικρότερος απ'ότι στο Σ.Ρ. Ο συντελεστής ισχύος είναι  $0,5 \div 0,8$ .

Οι στροφές του είναι περίπου 10.000-rpm ανά λεπτό και η ισχύς του μικρή μέχρι 550W.

Για ρύθμιση των στροφών χρησιμοποιούμε μεταβλητή αντίσταση. Αλλαγή φοράς περιστροφής δεν γίνεται με ηλεκτρική μέθοδο.

Πλεονέκτημα αυτού του κινητήρα είναι η μεγάλη ροπή εκκίνησης

### Βηματικοί κινητήρες



Σταυρωτός διαχωρισμός μηχανής για διαφορικό χειρισμό



Ο βηματικός κινητήρας είναι ένας τύπος σύγχρονου κινητήρα ο οποίος σχεδιάζεται να περιστρέφεται για ένα ειδικό αριθμό μοιρών για κάθε ηλεκτρικό παλμό που δέχεται από την μονάδα ελέγχου. Τυπικά βήματα είναι 2,2.5,5,7.5 και 15° για κάθε παλμό. Ο βηματικός κινητήρας οδηγείται με δυαδικά συστήματα ελέγχου, όπου ο κινητήρας δέχεται οδηγίες από μια σειρά παλμών για να στρέψει ένα άξονα ή να κινήσει ένα πλατό σε μια ειδική απόσταση. Μια εφαρμογή για τον κινητήρα είναι να τρυπάει κάποια ταινία σε ορισμένες αποστάσεις. Με τον βηματικό κινητήρα δεν χρειάζεται να υπάρχει κάποιο Σ.Α.Ε (ανάδραση) ούτε να υπάρχουν οδηγίες που πρέπει να ακολουθηθούν.

Οι βηματικοί κινητήρες κατασκευάζονται έτσι ώστε να δέχονται σήματα τόσο γρήγορα όσο 1200 παλμούς ανά sec και με ισοδύναμη ονομαστική ισχύ πάνω από μερικά KW.

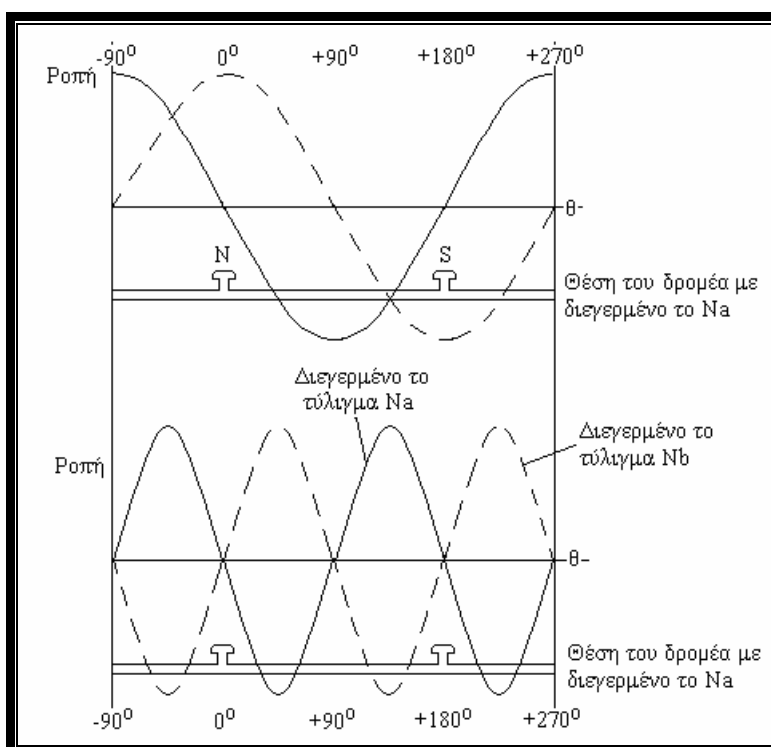
Οι βηματικοί κινητήρες σχεδιάζονται συνήθως με πολλούς πόλους και πολυφασικό τύλιγμα στο στάτη. Τυπικά έχουν 3 ή 4 τυλίγματα φασικά. Ο αριθμός των πόλων προσδιορίζεται από την απαιτούμενη γωνία αλλαγής ανά παλμό εισόδου.

Οι δρομείς είναι άλλοτε μεταβλητής αντίδρασης ή τύπος παραμένουτος μαγνητισμού.

Οι βηματικοί κινητήρες λειτουργούν με ένα εξωτερικό λογικό κύκλωμα οδήγησης όπως μια σειρά παλμών που εφαρμόζεται στην είσοδο του κυκλώματος οδήγησης το κύκλωμα διανέμει ρεύματα στα τυλίγματα του στάτη για να κάνει τον άξονα του πεδίου του διακένου να συμπίπτει με τους παλμούς εισόδου. Ανεξάρτητα από τους παλμούς την ροπή φορτίου και τα αποτελέσματα της αδράνειας. Ο δρομέας ακολουθεί τον άξονα του μαγνητικού πεδίου του διακένου "δυναμει" της ροπής αντίδρασης ή αντίστοιχα του μαγνητικού κινητήρα με 2 πόλους στο δρομέα φαίνεται στο σχήμα.

Ο δρομέας μπορεί να είναι από υλικό φερίτη η υλικό παραμένουτος μαγνητισμού. Ο δρομέας λαμβάνει τις γωνίες  $\theta=0,45,90^\circ, \dots$  όταν τα τυλίγματα είναι διεγερμένα με την σειρά  $N_a, N_b, N_c, N_d, \dots$

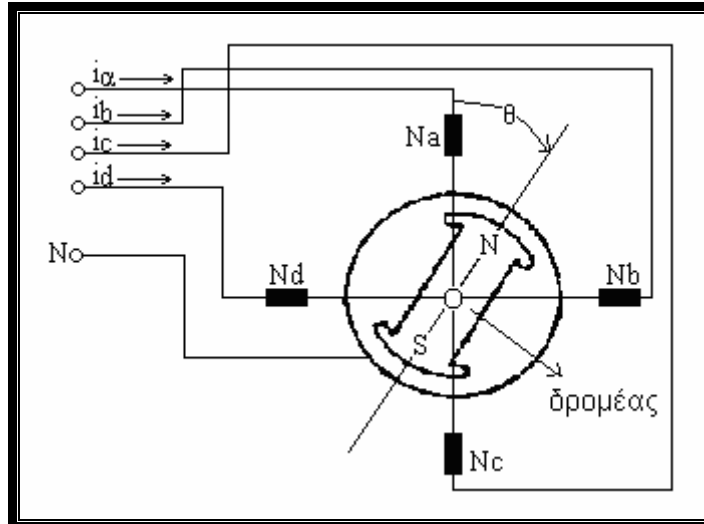
Αυτός ο κινητήρας μπορεί να λαμβάνει την θέση των βημάτων  $90^\circ$  αν διεγερθεί μόνο το ένα πηνίο. Οι χαρακτηριστικές Ροπής - γωνίας των 2 τύπων δρομέα, φαίνονται στο σχήμα.



Όπου ο μαγνητικού τύπου δρομέας έχει την  $M_{max}$  όταν η διέγερση είναι  $90^\circ$ . Ο φεριτομαγνητικού τύπου έχει μηδέν ροπή και μπορεί να κινηθεί σε άλλη διεύθυνση. Ο μαγνητικού τύπου έχει το επιπρόσθετο πλεονέκτημα ότι η θέση του δρομέα.  $\theta$  ορίζεται από τα ρεύματα των τυλιγμάτων.

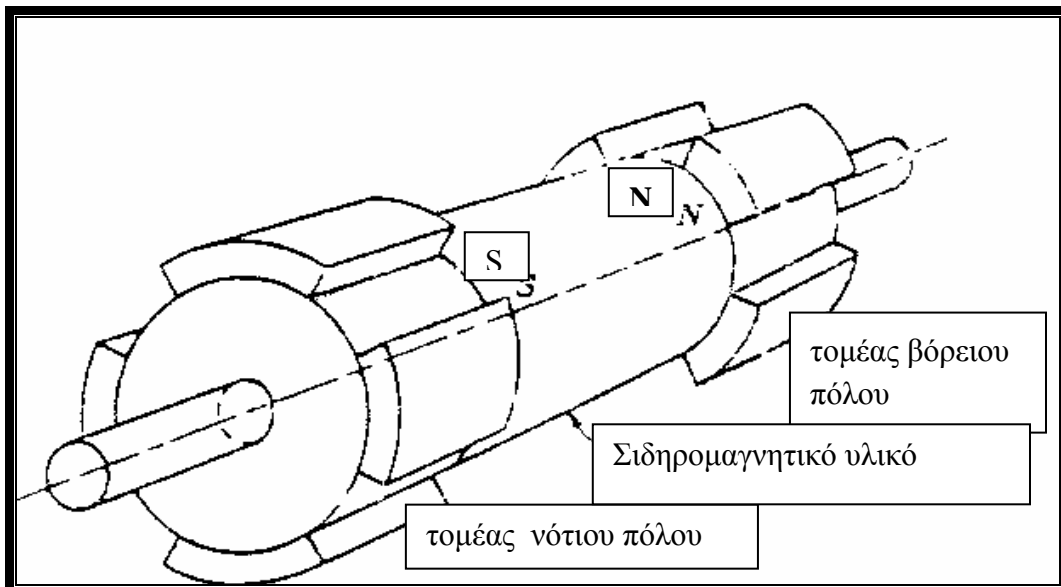
Τα βήματα εδώ είναι  $22.5^\circ, 11,25^\circ$  και μικρότερα ανά παλμό στο κύκλωμα εισόδου.

Για να παίρνουμε αναλογικά μικρά βήματα γωνίας χρειάζεται άλλη κατασκευή όπως φαίνεται στο σχήμα



Ο στάτης έχει 2 φασικά τυλίγματα ενώ ο δρομέας έχει 5 προεξέχοντες πόλους.

Η θέση αυτή είναι για ρεύμα στο τυλίγμα  $N_a$ . Αν το ρεύμα μεταφερθεί στο  $N_b$  ο δρομέας θα περιστραφεί με γωνία  $\theta = 90^\circ - 72^\circ = 18^\circ$  που να συμπίπτει ο πόλος 2 με τον  $N_b$  άξονα. Ο δρομέας μπορεί να είναι είτε από φεριτομαγνητικό υλικό ή μαγνητικού τύπου. Οι μαγνητικού τύπου είναι όπως στο σχήμα.



Δρομέας μηχανής με αξονικούς μόνιμους μαγνήτες

Το πλεονέκτημα των βηματικών κινητήρων είναι το μικρό μέγεθος και το χαμηλό κόστος του κυκλώματος οδήγησης σε σύγκριση με άλλα σερβοσυστήματα.

Οι φερομαγνητικού τύπου λειτουργούν σε βήματα 15° ή μικρότερα με παλμούς 1200 ανά sec οι μαγνητικού τύπου λειτουργούν σε μεγαλύτερα βήματα πάνω από 90° και με παλμούς 300 ανά sec. Χρησιμοποιούνται σε εργαλειομηχανές μαγνητόφωνα X-Y plotters.

### ΛΥΜΕΝΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

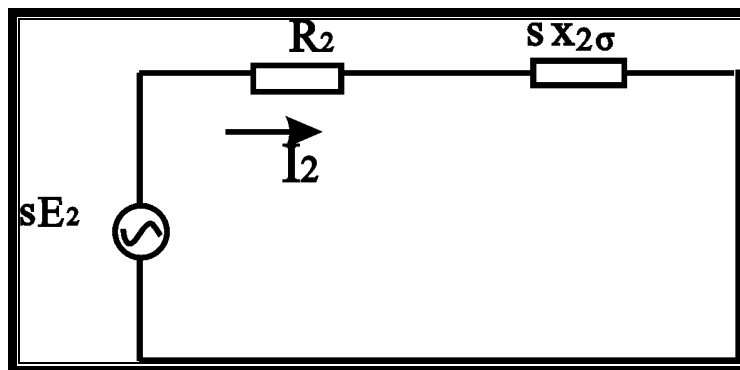
#### 1<sup>η</sup> ΑΣΚΗΣΗ

Τριφασικός ασύγχρονος ηλεκτροκινητήρας έχει στον δρομέα περιέλιξη αστέρα . Η επαγόμενη τάση ηρεμίας στο δρομέα είναι 100V ανά φάση . Η ωμική αντίσταση είναι 0,3Ω και η αντίσταση σκέδασης 1Ω . Ζητούνται

- Το ρεύμα του ακινητοποιημένου δρομέα και ο συντελεστής ισχύος (Σ.Ι) του κυκλώματος του δρομέα
- Το ρεύμα του δρομέα σε λειτουργία φορτίσεως με ολίσθηση 0,06 και ο Σ.Ι
- Οι ωμικές απώλειες και η μηχανική ισχύς στο ερώτημα β .

#### ΛΥΣΗ

- Το κύκλωμα του δρομέα φαίνεται παρακάτω



Όταν ο δρομέας είναι ακινητοποιημένος έχουμε  $n=0$  και  $s=1$

$$\vec{I}_2 = \frac{s \times E_2}{R_2 + j s \times X_{\sigma 2}} \Rightarrow \vec{I}_2 = \frac{1 \times 100 \text{ V}}{0,3\Omega + j \times 1 \times 1\Omega} \Rightarrow \vec{I}_2 = 95,78 \angle -73,3^\circ \text{ A}$$

$$\cos\phi = \cos(-73,3^\circ) = 0,287$$

$$\beta) \vec{I}_2 = \frac{s \times E_2}{R_2 + j s \times X_{\sigma 2}} \Rightarrow \vec{I}_2 = \frac{0,06 \times 100 \text{ V}}{0,3\Omega + j \times 0,06 \times 1\Omega} \Rightarrow \vec{I}_2 = 19,6 \angle -11,3^\circ \text{ A}$$

$$\cos\phi = \cos(11,3^\circ) = 0,981$$

γ) Οι ωμικές απώλειες είναι

$$P_{2Cu} = 3 \times I_2^2 \times R_2 \Rightarrow P_{2Cu} = 3 \times (19,6 \text{ A})^2 \times 0,3\Omega \Rightarrow P_{2Cu} = 346 \text{ W}$$

$$\text{Η ισχύς διακένου } P_{\delta} = \frac{P_{2Cu}}{s} \Rightarrow P_{\delta} = \frac{346W}{0,06} \Rightarrow P_{\delta} = 5769W$$

Και η μηχανική ισχύς

$$P_m = (1 - s) \times P_{\delta} \Rightarrow P_m = (1 - 0,06) \times 5769W \Rightarrow P_m = 5,42KW$$

### 2<sup>η</sup> ΑΣΚΗΣΗ

*Η ονομαστική ισχύς τριφασικού επαγωγικού κινητήρα είναι 75KW , συχνότητας f=50Hz . Οι απώλειες περιστροφής είναι 750W , οι απώλειες σιδήρου 3400W , οι απώλειες χαλκού του στάτη 2700W και η περιστροφική του ταχύτητα 1475rpm . Να υπολογιστεί η ολίσθηση και ο βαθμός απόδοσης*

#### ΛΥΣΗ

$$\text{Η ονομαστική ολίσθηση είναι } s = \frac{n_s - n}{n_s} \Rightarrow s = \frac{1500\text{rpm} - 1475\text{rpm}}{1500\text{rpm}} \Rightarrow s = 0,0167$$

ή s=1,67%

Από τον ισολογισμό ισχύος έχουμε :

$$\text{Η ισχύς διακένου είναι } P_{\delta} \times (1 - s) = P_{\tau p} + P_2 \Rightarrow P_{\delta} = \frac{P_{\tau p} + P_2}{1 - s}$$

$$\text{Η μηχανική ισχύς είναι } P_m = P_{\tau p} + P_2$$

$$\text{Και η ισχύς εισόδου } P_1 = P_{1Cu} + P_{Fe} + P_{\delta} \Rightarrow P_1 = P_{1Cu} + P_{Fe} + \frac{P_{\tau p} + P_2}{1 - s} \Rightarrow$$

$$P_1 = 2,7KW + 3,4KW + \frac{0,75KW + 75KW}{1 - 0,0167} \Rightarrow P_1 = 83,13KW$$

Έτσι ο βαθμός απόδοσης θα είναι

$$n = \frac{P_2}{P_1} \Rightarrow n = \frac{75KW}{83,13KW} \Rightarrow n = 90,2\%$$

### 3<sup>η</sup> ΑΣΚΗΣΗ

Ασύγχρονος τριφασικός ηλεκτροκινητήρας 15PS , 220V , 60Hz , 6 πόλων με περιέλιξη αστέρα έχει τις παρακάτω τιμές του ισοδύναμου κυκλώματος

$$R_1 = 0,128\Omega \quad R'_2 = 0,0935\Omega \quad x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2} = 0,496\Omega$$

$$R_{Fe} = 183\Omega \quad x_m = 8\Omega$$

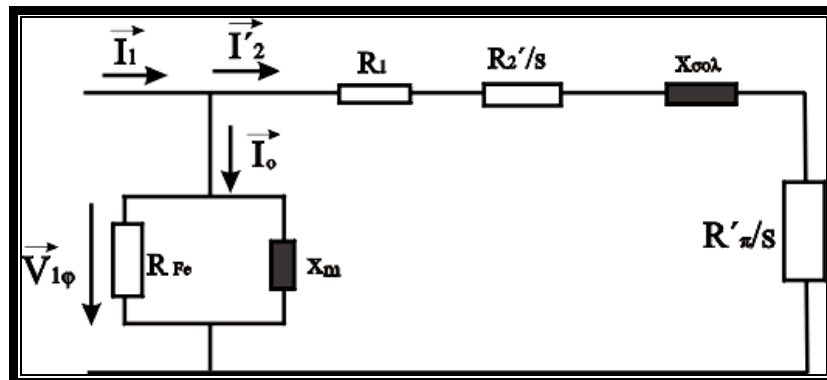
Οι απώλειες περιστροφής είναι ίσες με τις απώλειες σιδήρου του στάτη ( υστέρησης και δινορευμάτων ) . Για ολίσθηση 3% να βρεθεί με το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα

α) Το ρεύμα γραμμής και ο συντελεστής ισχύος

β) Η ισχύς και η ροπή στον άξονα

ΛΥΣΗ

α) Το σχήμα του απλοποιημένου ισοδύναμου κύκλωματος φαίνεται παρακάτω



Το ρεύμα  $\vec{I}_2$  σύμφωνα με τον νόμο του Kirckoff θα είναι

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{V}_{1\phi}}{R_1 + R_2'/s + j \times (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}')} \Rightarrow \vec{I}_2' = \frac{220 \text{ V} / \sqrt{3}}{0,128\Omega + 0,8835\Omega / 0,03 + j \times 0,496\Omega} \Rightarrow$$

$$\vec{I}_2' = \frac{127 \text{ V}}{3,24\Omega + j \times 0,496\Omega} \Rightarrow \vec{I}_2' = \frac{127 \text{ V}}{3,28 \angle 8,69^\circ \Omega} \Rightarrow \vec{I}_2' = 38,69 \angle -8,69^\circ \text{ A}$$

ή  $38,25 - j5,85 \text{ A}$

Το ρεύμα  $\vec{I}_0$  θα είναι

$$\vec{I}_0 = \frac{\vec{V}_{1\phi}}{R_{Fe}} + \frac{\vec{V}_{1\phi}}{jX_m} \Rightarrow \vec{I}_0 = \frac{220 / \sqrt{3} \text{ V}}{183\Omega} - j \frac{220 / \sqrt{3} \text{ V}}{8\Omega} \Rightarrow \vec{I}_0 = 0,694 - j15,88 \text{ A}$$

ή  $\vec{I}_0 = 15,89 \angle -87,5 \text{ A}$

Το ρεύμα  $\vec{I}_1$  θα είναι

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_0 + \vec{I}_2' \Rightarrow \vec{I}_1 = (0,694 - j15,88) \text{ A} + (38,25 - j5,85) \text{ A} \Rightarrow \vec{I}_1 = 38,94 - j21,7 \text{ A}$$

ή  $\vec{I}_1 = 44,6 \angle -29,16 \text{ A}$

ο συντελεστής ισχύος είναι  $\cos\phi = \cos(-29,16) = 0,873$

β) Οι επιμέρους απώλειες είναι

$$P_{Fe} = 3 \times \frac{V_{1\phi}^2}{R_{Fe}} \Rightarrow P_{Fe} = 3 \times \frac{[(220/\sqrt{3})\text{V}]^2}{183\Omega} \Rightarrow P_{Fe} = 264,4 \text{ W}$$

$$P_{1Cu} = 3 \times I_1^2 \times R_1 \Rightarrow P_{1Cu} = 3 \times (44,6 \text{ A})^2 \times 0,128\Omega \Rightarrow P_{1Cu} = 763,8 \text{ W}$$

$$P_{\tau p} = P_{Fe} = 264,4 \text{ W}$$

Η απορροφούμενη ισχύς από το δίκτυο θα είναι

$$P_1 = 3 \times V_{1\phi} \times I_1 \times \cos\varphi \Rightarrow P_1 = 3 \times \frac{220}{\sqrt{3}} \text{ V} \times 44,6 \text{ A} \times 0,873 \Rightarrow P_1 = 14835 \text{ W}$$

Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς (ισχύς διακένου) είναι

$$P_1 = P_{1\text{Cu}} + P_{\text{Fe}} + P_\delta \Rightarrow P_\delta = P_1 - P_{1\text{Cu}} - P_{\text{Fe}} \Rightarrow$$

$$P_\delta = 14835 \text{ W} - 763,8 \text{ W} - 264,4 \text{ W} \Rightarrow P_\delta = 13806,8 \text{ W}$$

Τα ζεύγη πόλων είναι  $2p=6 \Rightarrow p=3$

$$\text{Η σύγχρονη ταχύτητα } n_s = \frac{f60}{p} \Rightarrow n_s = \frac{3600 \text{ Hz}}{3} \Rightarrow n_s = 1200 \text{ rpm}$$

Και οι στροφές

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \Rightarrow n = (1 - s) \times n_s \Rightarrow n = (1 - 0,03) \times 1200 \text{ rpm} \Rightarrow n = 1164 \text{ rpm}$$

Η μαγνητική ισχύς είναι

$$P_m = (1 - s) \times P_\delta \Rightarrow P_m = (1 - 0,03) \times 13806,8 \text{ W} \Rightarrow P_m = 13393 \text{ W}$$

Η αποδιδόμενη ισχύς

$$P_m = P_{\tau p} + P_2 \Rightarrow P_2 = P_m - P_{\tau p} \Rightarrow P_2 = 13393 \text{ W} - 264,4 \text{ W} \Rightarrow P_2 = 13128 \text{ W}$$

ή 17,6HP . Όπως βλέπουμε ο κινητήρας υπερφορτίζεται

Η ροπή στον άξονα θα είναι

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega} \Rightarrow M_2 = \frac{P_2}{\frac{2\pi n}{60}} \Rightarrow M_2 = \frac{13128 \text{ W}}{2 \times 3,14 \times \frac{1164 \text{ rpm}}{60}} \Rightarrow M_2 = 107,7 \text{ Nm}$$

#### 4<sup>η</sup> ΑΣΚΗΣΗ

**Ασύγχρονος τριφασικός ηλεκτροκινητήρας τάσεως 440V , συχνότητας 50Hz , με ζεύγη πόλων  $2p=4$  , του οποίου ο στάτης είναι συνδεδεμένος κατά τρίγωνο και κατά αστέρα ο δρομέας , παρουσιάζει ανά φάση τα στοιχεία :  $R_2 = 0,3\Omega$  και  $L_2 = 0,0084\text{H}$  ενώ ο λόγος σπειρών των ανά φάση τυλιγμάτων των δρομέα και στάτη είναι  $w_{1\xi_1} / w_{2\xi_2} = 0,5$  . Να υπολογιστούν**

**α) Η τάση κενής λειτουργίας μεταξύ 2 δακτυλιδιών του δρομέα**

**β) Το ρεύμα του δρομέα 1) κατά την στιγμή της εκκίνησης και 2)**

**κατά την υπό  $s=0,03$  λειτουργική κατάσταση**

#### ΛΥΣΗ

α) Υπολογίζουμε την επαγωγική αντίσταση του δρομέα

$$x_{\sigma 2} = \omega \times L_2 \Rightarrow x_{\sigma 2} = 2\pi f \times L_2 \Rightarrow x_{\sigma 2} = 2 \times 3,14 \times 50 \text{ Hz} \times 0,0084 \text{ H} \Rightarrow x_{\sigma 2} = 2,5 \Omega$$

Η σύνθετη αντίσταση κατά την εκκίνηση είναι

$$Z = \sqrt{R_2^2 + x_{\sigma 2}^2} \Rightarrow Z = \sqrt{(0,3\Omega)^2 + (2,5\Omega)^2} \Rightarrow Z = 2,52\Omega$$

Ο λόγος σπειρών των ανά φάση τυλιγμάτων του δρομέα προς τον στάτη είναι ευθέως ανάλογος του λόγου των ανά φάση τάσεων του δρομέα προς τον στάτη

$$\frac{w_2 \xi_2}{w_1 \xi_1} = \frac{V_2}{V_1} \Rightarrow V_2 = V_1 \times \frac{w_2 \xi_2}{w_1 \xi_1} \Rightarrow V_2 = 0,5 \times 440V \Rightarrow V = 220V$$

Η τάση μεταξύ δύο δακτυλιδιών του δρομέα θα είναι πολική (επειδή είναι συνδεδεμένος σε αστέρα) και κατά  $\sqrt{3}$  μεγαλύτερη της φασικής που υπολογίσαμε προηγουμένως

$$V_\pi = \sqrt{3} \times V_2 \Rightarrow V_\pi = \sqrt{3} \times 220V \Rightarrow V_\pi = 380V$$

β) 1) Το ρεύμα του δρομέα κατά την εκκίνηση είναι

$$I_{2εκ} = \frac{V_\pi}{\sqrt{3} \times Z_{ρεκ}} \Rightarrow I_{2εκ} = \frac{380V}{\sqrt{3} \times 2,52\Omega} \Rightarrow I_{2εκ} = 87A$$

2) Το ρεύμα του δρομέα κατά την υπό  $s=0,03$  λειτουργική κατάσταση θα είναι :

Υπολογίζουμε την νέα σύνθετη αντίσταση

$$Z' = \sqrt{R_2^2 + (x_{\sigma 2} \times s)^2} \Rightarrow Z' = \sqrt{(0,3\Omega)^2 + (2,5\Omega \times 0,03)^2} \Rightarrow Z' = 0,309\Omega$$

$$\text{Έτσι } I'_2 = \frac{V_\pi \times s}{\sqrt{3} \times Z'} \Rightarrow I'_2 = \frac{380V \times 0,03}{\sqrt{3} \times 0,309\Omega} \Rightarrow I'_2 = 21,9A$$

### 5<sup>η</sup> ΑΣΚΗΣΗ

**Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας έχει  $2p=2$  πόλους , το τύλιγμα του στάτη είναι συνδεδεμένο κατά τρίγωνο οπότε όταν λειτουργεί στο τριφασικό δίκτυο  $380V$  ,  $50Hz$  στρέφεται με  $n_{ov} = 2920rpm$  . Ο κινητήρας είναι δακτυλιοφόρος και τα στοιχεία του τυλίγματος του δρομέα ανά φάση είναι  $R_2 = 0,2\Omega$  ,  $x_{\sigma 2} = 2\Omega$  . Ο δε λόγος σπειρών των τυλιγμάτων είναι**

$$\frac{w_1 \times \xi_1}{w_2 \times \xi_2} = 1 \text{ . Ζητούνται}$$

**α) Η ονομαστική ροπή στρέψης**

**β) Η μέγιστη ροπή στρέψης**

**γ) Ο αριθμός στροφών υπό την μέγιστη ροπή στρέψης**

ΛΥΣΗ

$$\alpha) \text{ Η σύγχρονη ταχύτητα } n_s = \frac{f \cdot 60}{p} \Rightarrow n_s = \frac{50 \times 60Hz}{1} \Rightarrow n_s = 3000rpm$$

Η ολίσθηση υπό ονομαστικές στροφές είναι

$$s_{ov} = \frac{n_s - n}{n_s} \Rightarrow s_{ov} = \frac{3000\text{rpm} - 2920\text{rpm}}{3000\text{rpm}} \Rightarrow s_{ov} = 0,026$$

Έτσι  $V_2 = \frac{w_2}{w_1} \times V \times s \Rightarrow V_2 = 1 \times 380\text{V} \times 0,026 \Rightarrow V_2 = 9,9\text{V}$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (x_{\sigma 2} \times s)^2} \Rightarrow Z_2 = \sqrt{(0,2\Omega)^2 + (2\Omega \times 0,026)^2} \Rightarrow Z_2 = 0,207\Omega$$

Το ρεύμα του δρομέα θα είναι

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_2} \Rightarrow I_2 = \frac{9,9\text{V}}{0,207\Omega} \Rightarrow I_2 = 47,8\text{A}$$

και οι ηλεκτρικές απώλειες (χαλκού) στο δρομέα είναι

$$P_{2Cu} = I_2^2 \times R_2 \Rightarrow P_{2Cu} = (47,8\text{A})^2 \times 0,2\Omega \Rightarrow P_{2Cu} = 456,9\text{W}$$

κατά προσέγγιση η ηλεκτρομαγνητική ισχύς θα είναι

$$P_\delta = \frac{P_{2Cu}}{s} \Rightarrow P_\delta = \frac{456,9\text{W}}{0,26} \Rightarrow P_\delta = 17573\text{W}$$

Η αποδιδόμενη ισχύς είναι

$$P_2 = P_\delta - P_{2Cu} \Rightarrow P_2 = 17573\text{W} - 456,9\text{W} \Rightarrow P_2 = 17116\text{W}$$

Η περιστροφική ταχύτητα είναι

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} \Rightarrow \Omega = \frac{2 \times 3,14 \times 3000\text{rpm}}{60} \Rightarrow \Omega = 314\text{sec}^{-1}$$

Προσδιορίζουμε την ονομαστική ροπή στρέψης από την σχέση

$$M_{ov} = \frac{P_\delta}{\Omega} \Rightarrow M_{ov} = \frac{17573\text{W}}{314\text{sec}^{-1}} \Rightarrow M_{ov} = 56\text{Nm}$$

β) Κατά την αντίστοιχη θεωρία όταν  $s \times x_{\sigma 2} = R_2$ , η ροπή γίνεται μέγιστη, αλλά τότε

$$s_{av} = \frac{R'_2}{x_{\sigma 2}} \Rightarrow s_{av} = \frac{0,2\Omega}{2\Omega} \Rightarrow s_{av} = 0,1$$

Επειδή όμως η ονομαστική ροπή μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση

$$M_{εσο\upsilon\nu} = \frac{3 \times V_{1\phi}^2}{\omega} \times \frac{1}{\left(R_1 + \frac{R'_2 + R'_\pi}{s}\right)^2 + x_{\sigma}^2} \times \frac{R'_2 + R'_\pi}{s}$$

$$\frac{M_{ov}}{M_{av}} = \frac{2}{\frac{s_{av}}{s} + \frac{s}{s_{av}}} \Rightarrow \frac{56\text{Nm}}{M_{av}} = \frac{2}{\frac{0,1}{0,026} + \frac{0,026}{0,1}} \Rightarrow \frac{56\text{Nm}}{M_{av}} = \frac{2}{3,85 + 0,26} \Rightarrow$$

$$M_{av} = \frac{56\text{Nm} \times 4,11}{2} \Rightarrow M_{av} = 115\text{Nm}$$



γ) Βρήκαμε την ολίσθηση ανατροπής , έτσι από τον τύπο

$$s_{av} = \frac{n_s - n}{n_s} \Rightarrow n = (1 - s_{av}) \times n_s \Rightarrow n = (1 - 0,01) \times 3000\text{rpm} \Rightarrow n = 2700\text{rpm}$$

### 6<sup>η</sup> ΑΣΚΗΣΗ

**Τετραπολικός ασύγχρονος κινητήρας ενώ λειτουργεί του δίνεται εντολή να αναστραφεί με αλλαγή φάσεων . Υπό μια λειτουργική κατάσταση της αναστροφής η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ήταν 370στρ/λεπτό και ανέπτυξε ροπή πέδησης  $M_2 = 380\text{Nm}$  . Αν η ισχύς απωλειών του στάτη είναι 3,5KW , να προσδιοριστούν**

**α) Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς του κινητήρα**

**β) Η ισχύς που απορροφά από το βιομηχανικό δίκτυο εναλλασσομένου ρεύματος**

#### ΛΥΣΗ

α) Τα ζεύγη πόλων του κινητήρα θα είναι  $2p=4 \Rightarrow p=2$

οι σύγχρονες στροφές του πεδίου είναι

$$n_s = \frac{f60}{p} \Rightarrow n_s = \frac{50\text{Hz} \times 60}{2} \Rightarrow n_s = 1500\text{rpm}$$

υπολογίζουμε την ολίσθηση  $s = \frac{n_s - n}{n_s} \Rightarrow s = \frac{1500\text{rpm} - 370\text{rpm}}{1500\text{rpm}} \Rightarrow s = 0,753$

Η ισχύς που αναπτύσσει ο κινητήρας στον άξονα υπό αυτή τη ροπή πέδησης και τις αντίστοιχες στροφές είναι

$$P_2 = M_2 \times \Omega_2 \Rightarrow P_2 = M_2 \times \frac{2\pi n}{60} \Rightarrow P_2 = 380\text{Nm} \times \frac{2 \times 3,14 \times 370\text{rpm}}{60} \Rightarrow$$

$$P_2 = 14,716\text{KW}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τις ηλεκτρικές απώλειες του δρομέα προσεγγιστικά αφού αμελήσουμε τις απώλειες σιδήρου και τις μηχανικές απώλειες του δρομέα αφού είναι μικρές

$$P_{2Cu} = P_\delta \times s \Rightarrow P_{2Cu} = M_2 \times \Omega_2 \times s \Rightarrow P_{2Cu} = M_2 \times \frac{2\pi n}{60} \times s \Rightarrow$$

$$P_{2Cu} = 380\text{Nm} \times \frac{2 \times 3,14 \times 370\text{rpm}}{60 \times 9,81} \times 0,753 \Rightarrow P_{2Cu} = 1130\text{W}$$

(Για να βγούν οι ηλεκτρικές απώλειες του δρομέα σε Watt εισήχθη ο συντελεστής 9,81 ,  $1\text{Krpm}=9,96\text{Nm}$ )

Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς είναι

$$P_\delta = P_2 + P_{2Cu} \Rightarrow P_\delta = 14,716\text{KW} + 1,13\text{KW} \Rightarrow P_\delta = 15,8\text{KW}$$

β) Η ισχύς που απορροφά από το βιομηχανικό δίκτυο εναλλασσομένου ρεύματος είναι

$$P_1 = P_\delta + \Sigma P_{\text{στατη}} \Rightarrow P_1 = 15,8\text{KW} + 3,5\text{KW} \Rightarrow P_1 = 19,3\text{KW}$$

## 7<sup>η</sup> ΑΣΚΗΣΗ

**Τριφασικός επαγωγικός κινητήρας , βραχυκυκλωμένου δρομέα , έχει ανά φάση**

$$R_1 = 0,5\Omega , R'_2 = 0,5\Omega , x_{10} = 4,92\Omega . \text{ Δίνεται } \frac{M_{2\max}}{M_{2\text{ov}}} = 2 . \text{ Να υπολογιστεί ο}$$

**λόγος της ενεργού ροπής στρέψης προς την ονομαστική όταν έχουμε**

- Άμεση εκκίνηση**
- Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα τρίγωνο**
- Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή , σε 75% της τάσης**

ΛΥΣΗ

$$\text{Η ροπή ανατροπής δίνεται από τον τύπο } M_{\text{av}} = \frac{3 \times V_{1\phi}^2}{\Omega_s} \times \frac{1}{2 \times \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_{10}^2} \right)}$$

ο όρος  $\frac{3}{\Omega_s}$  είναι σταθερός , έστω C

$$M_{\text{av}} = C V_{1\phi}^2 \times \frac{1}{2 \times \left( 0,5\Omega + \sqrt{(0,5\Omega)^2 + (4,92\Omega)^2} \right)} \Rightarrow M_{\text{av}} = C \times \frac{V_{1\phi}^2}{10}$$

$$M_{2\text{ov}} = \frac{1}{2} M_{\text{av}} \Rightarrow M_{2\text{ov}} = C \times \frac{V_{1\phi}^2}{20}$$

α) Άμεση εκκίνηση

$$\text{για } s=1 \quad M_{2\text{εκ}} = \frac{3 \times V_{1\phi}^2}{\Omega_s} \times \frac{R'_2}{(R_1 + R'_2)^2 + x_{10}^2} \Rightarrow$$

$$M_{2\text{εκ}} = C V_{1\phi}^2 \times \frac{0,5\Omega}{(0,5\Omega + 0,5\Omega)^2 + (4,92\Omega)^2} \Rightarrow M_{2\text{εκ}} = C \times \frac{V_{1\phi}^2}{56}$$

$$\text{Άρα } \frac{M_{2\text{εκ}\alpha}}{M_{2\text{ov}}} = \frac{C \times \frac{V_{1\phi}^2}{56}}{C \times \frac{V_{1\phi}^2}{20}} \Rightarrow \frac{M_{2\text{εκ}\alpha}}{M_{2\text{ov}}} = 0,357$$

β) Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα-τρίγωνο : Εδώ έχουμε μείωση .

$$\text{Λόγω του διακόπτη αστέρα-τρίγωνο } V_1 = \frac{V_1}{\sqrt{3}}$$

$$\text{Έτσι } M_{2εκβ} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 \times M_{2εκα} \Rightarrow M_{2εκβ} = \frac{M_{2εκα}}{3}$$

$$\text{Και } \frac{M_{2εκβ}}{M_{2ov}} = \frac{0,393}{3} \Rightarrow \frac{M_{2εκβ}}{M_{2ov}} = 0,131$$

γ) Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή , σε 75% της τάσης

$$M_{2εκβ} = 0,75^2 \times M_{2εκα}$$

$$\frac{M_{2εκγ}}{M_{2ov}} = 0,393 \times 0,75^2 \Rightarrow \frac{M_{2εκγ}}{M_{2ov}} = 0,221$$

### 8<sup>η</sup> ΑΣΚΗΣΗ

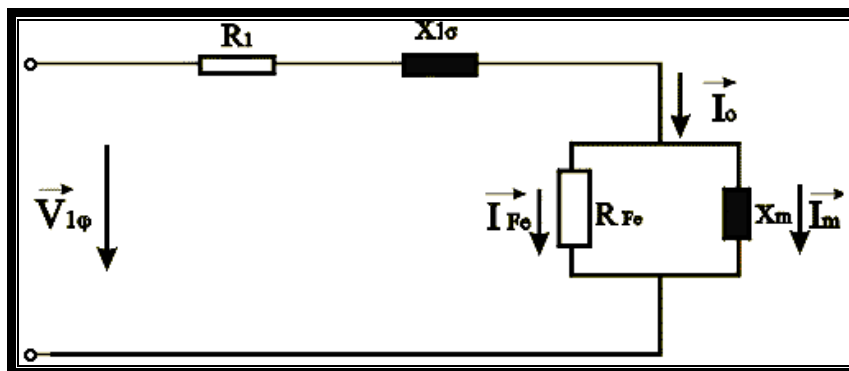
Σε τριφασικό ασύγχρονο ηλεκτροκινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα 2000V , με σύνδεση σε αστέρα στο στάτη και δρομέα , μετρήθηκαν τα εξής στοιχεία

Κενό :	2000V	15,3A	10,1KW
Βραχυκύκλωση :	440V	170A	36,4KW

Η αντίσταση του στάτη είναι 0,22Ω ανά φάση , οι απώλειες περιστροφής είναι 2KW . Να υπολογιστούν τα αναγκαία στοιχεία για το προσεγγιστικό ισοδύναμο κύκλωμα σε ολίσθηση 2% και να σχεδιασθεί το ισοδύναμο κύκλωμα με τις τιμές των αντιστάσεων

### ΛΥΣΗ

Το σχήμα του ισοδύναμου κυκλώματος στο κενό φαίνεται παρακάτω



Οι  $R_1, X_{1\sigma}$  είναι αμελητέες

Οι απώλειες σιδήρου είναι

$$P_{Fe} = P_o - P_{τρ} \Rightarrow P_{Fe} = 10,1KW - 2KW \Rightarrow P_{Fe} = 8,1KW$$

$$\text{Η φασική τάση είναι } V_{1\phi} = \frac{V_1}{\sqrt{3}} \Rightarrow V_{1\phi} = \frac{2000V}{\sqrt{3}} \Rightarrow V_{1\phi} = 1155V$$

Το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση σιδήρου είναι

$$P_{Fe} = 3 \times V_{1\phi} \times I_{Fe} \Rightarrow I_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{3 \times V_{1\phi}} \Rightarrow I_{Fe} = \frac{8100KW}{3 \times 1155V} \Rightarrow I_{Fe} = 2,34A$$

$$\text{Η αντίσταση σιδήρου είναι } R_{Fe} = \frac{V_{1\phi}}{I_{Fe}} \Rightarrow R_{Fe} = \frac{1155V}{2,34\Omega} \Rightarrow R_{Fe} = 494\Omega$$

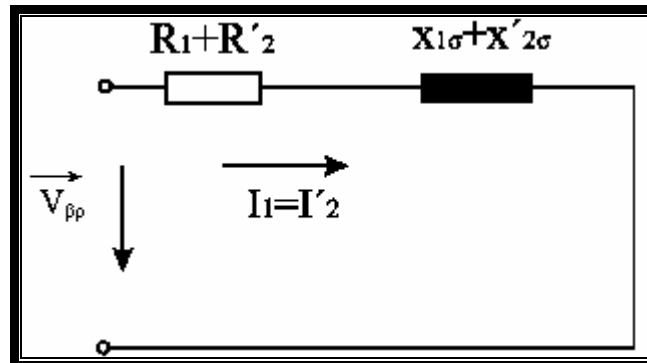
Το ρεύμα στην αντίσταση  $x_m$  θα είναι  $\vec{I}_o = \vec{I}_m + \vec{I}_{Fe}$ , παίρνοντας τα μέτρα τους και

$$\text{υψώνοντας στο τετράγωνο, έχουμε } I_o^2 = I_m^2 + I_{Fe}^2 \Rightarrow I_m = \sqrt{I_o^2 - I_{Fe}^2} \Rightarrow$$

$$I_m = \sqrt{(15,3A)^2 - (2,34A)^2} \Rightarrow I_m = 15,12A$$

$$\text{και η αντίσταση } x_m \text{ είναι } x_m = \frac{V_{1\phi}}{I_m} \Rightarrow x_m = \frac{1155V}{15,12A} \Rightarrow x_m = 76,4\Omega$$

Λόγω της μεγάλης πτώσης τάσεως στη σύνθετη αντίσταση  $R_1 + jx_{\sigma 1}$  (της τάξης του 50% της τάσης παροχής) οι απώλειες  $P_{Fe}$  καθώς και το  $I_m$  είναι αμελητέα. Το σχήμα του ισοδύναμου κυκλώματος κατά την δοκιμή της βραχυκύκλωσης φαίνεται παρακάτω (η βραχυκύκλωση σημαίνει ότι κρατάμε τον δρομέα ακίνητο και τροφοδοτούμε με τάση 440V και το ρεύμα είναι 170A).



Η ολική ωμική αντίσταση είναι

$$P_{2Cu} = 3 \times I_2'^2 \times (R_1 + R_2') \Rightarrow (R_1 + R_2') = \frac{P_{2Cu}}{3 \times I_2'^2} \Rightarrow$$

$$(R_1 + R_2') = \frac{36400W}{3 \times (170A)^2} \Rightarrow (R_1 + R_2') = 0,42\Omega$$

$$(R_1 + R_2') = 0,42\Omega \Rightarrow R_2' = 0,42\Omega - R_1 \Rightarrow R_2' = 0,42\Omega - 0,22\Omega \Rightarrow R_2' = 0,2\Omega$$

$$\text{Η σύνθετη αντίσταση } Z = \frac{V_{1\phi}}{I'_2} \Rightarrow Z = \frac{440\text{V}}{\frac{\sqrt{3}}{170\text{A}}} \Rightarrow Z = 1,49\Omega$$

Και η συνολική αντίσταση σκέδασης

$$Z = \sqrt{R_{o\lambda}^2 + x_{\sigma o\lambda}^2} \Rightarrow x_{\sigma o\lambda} = \sqrt{Z^2 - R_{o\lambda}^2} \Rightarrow x_{\sigma o\lambda} = \sqrt{(1,49\Omega)^2 - (0,42\Omega)^2} \Rightarrow x_{\sigma o\lambda} = 1,43\Omega$$

### 9<sup>η</sup> ΑΣΚΗΣΗ

Δίνεται τετραπολικός τριφασικός ασύγχρονος ηλεκτροκινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα με 380V αστέρα-τρίγωνο,  $f_1 = 50\text{Hz}$  και  $V_2 = 540\text{V}$  (τάση ηρεμίας). Σε δοκιμή βραχυκύκλωσης με  $V_{\beta\text{p}} = 100\text{V}$  μετρήθηκαν  $I_{\beta\text{p}} = 770\text{A}$  και  $P_{\beta\text{p}} = 14,5\text{KW}$ . Μετρήθηκε επίσης η φασική αντίσταση του στάτη  $R_1 = 3,4\text{m}\Omega$  (Το ρεύμα μαγνήτισης και οι απώλειες σιδήρου αμελούνται). Να βρεθούν

α) Το ρεύμα και η ροπή εκκίνησης για εξωτερική αντίσταση δρομέα  $R=0$

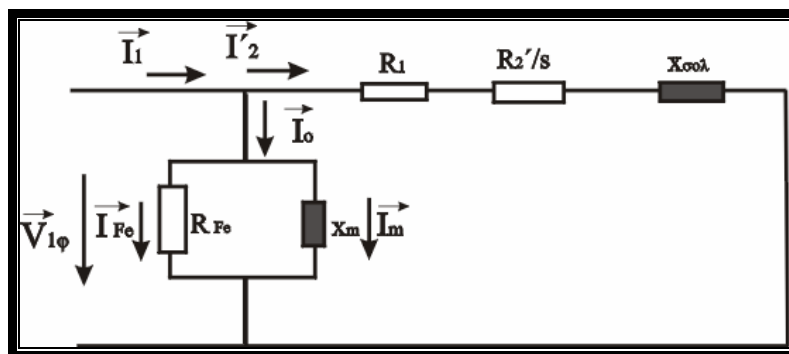
β) Η ολίσθηση και η ροπή ανατροπής για  $R=0$

γ) Η τιμή της  $R'$  (τιμή της  $R$  ανηγμένη στο στάτη) έτσι ώστε η ροπή εκκίνησης να γίνει ίση με

- 1) Τη ροπή ανατροπής
- 2) Τη μισή ροπή ανατροπής

ΛΥΣΗ

α) Το σχήμα του ισοδύναμου κυκλώματος φαίνεται παρακάτω



Για  $R=0$  και αφού  $I_m = 0 \Rightarrow R_{Fe} = X_m = \infty$ , και  $s=1$

$$I'_{2\text{EK}} \cong I_{\text{EK}}$$

$$(I'_{2\text{EK}})_{100\text{V}} = I_{\beta\text{p}} = 770\text{A}$$

$$(I'_{2εκ})_{380V} = \frac{380V}{100V} \times I_{βρ} \Rightarrow (I'_{2εκ})_{380V} = \frac{380V}{100V} \times 770A \Rightarrow (I'_{2εκ})_{380V} = 2926A$$

Ισχύει  $(P_{εκ} = P_{βρ})_{100V}$

Έτσι

$$(P_{εκ})_{380V} = \left(\frac{380V}{100V}\right)^2 \times (P_{εκ})_{100V} \Rightarrow (P_{εκ})_{380V} = \left(\frac{380V}{100V}\right)^2 \times 14,5KW \Rightarrow$$

$$(P_{εκ})_{380V} = 209,38KW$$

Και ο συντελεστής ισχύος

$$(P_{εκ})_{380V} = \sqrt{3} \times V \times I_{εκ} \times \text{συνφ} \Rightarrow \text{συνφ} = \frac{(P_{εκ})_{380V}}{\sqrt{3} \times V \times I_{εκ}} \Rightarrow$$

$$\text{συνφ} = \frac{209380W}{\sqrt{3} \times 380V \times 2926A} \Rightarrow \text{συνφ} = 0,10872 \text{ άρα } \varphi = 83,76^\circ$$

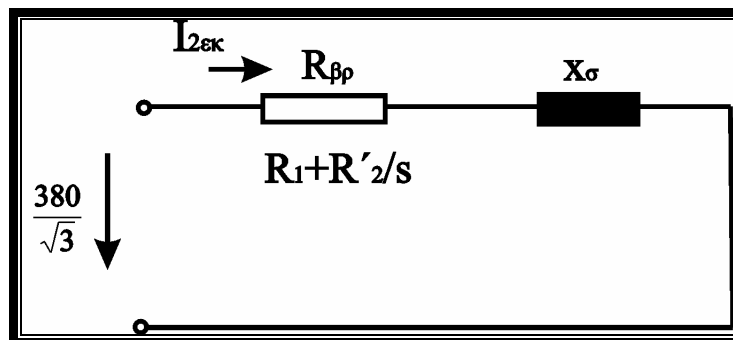
$$\vec{I}_{εκ} = 2926 \angle -83,76^\circ \text{ ή } 318,12 - j2908,66A$$

$$\text{Οι σύγχρονες στροφές είναι } n_s = \frac{f60}{p} \Rightarrow n_s = \frac{50Hz \times 60}{2} \Rightarrow n_s = 1500\text{rpm}$$

Και η περιστροφική ταχύτητα

$$\Omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} \Rightarrow \Omega_s = \frac{2 \times 3,14 \times 1500\text{rpm}}{60} \Rightarrow \Omega_s = 157\text{sec}^{-1}$$

Το σχήμα του κυκλώματος κατά την βραχυκύκλωση είναι



Βρίσκουμε την σύνθετη αντίσταση

$$\vec{V} = \vec{I}_{2εκ} \times (R_{βρ} + jX_{βρ}) \Rightarrow R_{βρ} + jX_{βρ} = \frac{380V}{2926 \angle -83,76^\circ A} \Rightarrow$$

$$R_{βρ} + jX_{βρ} = 0,07498 \angle 83,76^\circ \Omega \text{ ή } R_{βρ} + jX_{βρ} = 0,00815 + j0,07454\Omega$$

$$R_{βρ} = 0,00815\Omega \text{ και } X_{βρ} = 0,07454\Omega$$

$$(R_1 + R'_2) = 0,00815\Omega \Rightarrow R'_2 = 0,00815\Omega - R_1 \Rightarrow R'_2 = 0,00815\Omega - 0,0034\Omega \Rightarrow R'_2 = 0,00475\Omega$$

Η ισχύς διακένου κατά την εκκίνηση θα είναι

$$P_{\delta\epsilon\kappa} = 3 \times I_{2\epsilon\kappa}'^2 \times R_2' \Rightarrow P_{\delta\epsilon\kappa} = 3 \times (2926\text{A})^2 \times 0,00475\Omega \Rightarrow P_{\delta\epsilon\kappa} = 122001\text{W}$$

$$\text{και η ροπή εκκίνησης } M_{\epsilon\kappa} = \frac{P_{\delta\epsilon\kappa}}{\Omega_s} \Rightarrow M_{\epsilon\kappa} = \frac{122001\text{W}}{157\text{sec}^{-1}} \Rightarrow M_{\epsilon\kappa} = 776,68\text{Nm}$$

β) Η ολίσθηση ανατροπής είναι

$$s_{av} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1'^2 + x_{\sigma\sigma\lambda}^2}} \Rightarrow s_{av} = \frac{0,00475\Omega}{\sqrt{(0,0034\Omega)^2 + (0,07454\Omega)^2}} \Rightarrow s_{av} = 0,06365$$

$$I_{2av}' = \frac{V_\phi}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_{av}}\right)^2 + x_{\sigma\sigma\lambda}^2}} \Rightarrow I_{2av}' = \frac{\frac{380\text{V}}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(0,0034\Omega + \frac{0,00475\Omega}{0,06365}\right)^2 + (0,07454\Omega)^2}} \Rightarrow$$

$$I_{2av}' = 2033,13\text{A}$$

$$P_{\delta av} = 3 \times I_{2av}'^2 \times \frac{R_2'}{s_{av}} \Rightarrow P_{\delta av} = 3 \times (2033,13\text{A})^2 \times \frac{0,00475\Omega}{0,06365} \Rightarrow P_{\delta av} = 925,43\text{KW}$$

$$\text{και έτσι } M_{av} = \frac{P_{\delta av}}{\Omega_s} \Rightarrow M_{av} = \frac{925433\text{W}}{157\text{sec}^{-1}} \Rightarrow M_{av} = 5891,48\text{Nm}$$

γ) 1) Αφού  $M_{\epsilon\kappa} = M_{av}$  τότε  $s_{\epsilon\kappa} = s_{av} = 1$  , έτσι  $M_{\epsilon\kappa} = 5891,48\text{Nm}$

Την αντίσταση θα την βρούμε από τον τύπο της ολίσθησης ανατροπής

$$s_{av} = \frac{R_2' + R'}{\sqrt{R_1'^2 + x_{\sigma\sigma\lambda}^2}} \Rightarrow R' = s_{av} \times \sqrt{R_1'^2 + x_{\sigma\sigma\lambda}^2} - R_2' \Rightarrow$$

$$R' = 1 \times 0,0746\Omega - 0,00475\Omega \Rightarrow R' = 0,06985\Omega$$

$$2) M_{\epsilon\kappa} = \frac{M_{av}}{2} \Rightarrow M_{\epsilon\kappa} = \frac{5891,5\text{Nm}}{2} \Rightarrow M_{\epsilon\kappa} = 2945,75\text{Nm}$$

$$M_{\epsilon\kappa} = \frac{3 \times V_{1\phi}^2}{\Omega_s} \times \frac{R_2' + R'}{(R_1 + R_2' + R')^2 + x_{\sigma\sigma\lambda}^2} \Rightarrow$$

$$2945,75\text{Nm} = \frac{3 \times \left(\frac{380\text{V}}{\sqrt{3}}\right)^2}{157\text{sec}^{-1}} \times \frac{0,00475\Omega + R'}{(0,0034\Omega + 0,00475\Omega + R')^2 + (0,07454\Omega)^2} \Rightarrow$$

$2945,75R'^2 - 871,264R' + 12,213 = 0$  . Λύνοντας την δευτεροβάθμια εξίσωση έχουμε

$$R' = \frac{0,29577}{2} \pm \sqrt{\frac{(0,29577)^2}{2} - 4,146 \times 10^{-3}} \Rightarrow$$

$R' = 0,281\Omega$  ή  $R' = 0,0148\Omega$  Διαλέγουμε την μεγαλύτερη τιμή για να έχουμε μικρότερο ρεύμα , δηλαδή  $R' = 0,281\Omega$

### 10<sup>η</sup> ΑΣΚΗΣΗ

**Τριφασικός ασύγχρονος ηλεκτροκινητήρας με ονομαστικά στοιχεία 380V (σε τρίγωνο) , 90KW , 170A , 1480rpm . Σε δοκιμή βραχυκύκλωσης σε τρίγωνο με τάση  $V_{\beta\rho} = 100V$  απορροφά  $I_{\beta\rho} = 270A$  και αναπτύσσει ροπή 60Nm . Με την παραδοχή ότι οι ωμικές και οι επαγωγικές αντιστάσεις είναι σταθερές , να βρεθούν**

**α) Οι σχετικές τιμές (λόγοι) του ρεύματος και της ροπής εκκίνησης καθώς και την απορροφούμενη ισχύ σε απ'ευθείας εκκίνηση**

**β) Τα ίδια όπως στο ερώτημα α , αλλά σε εκκίνηση με συνδεσμολογία σε αστέρα**

**γ) Την τάση ενός αυτομετασχηματιστή ( $V_1 = 380V$ ) με τον οποίο επιτυγχάνονται στην εκκίνηση ρεύμα δικτύου , ίσο με το 1,4 του ονομαστικού του κινητήρα . Πόση είναι η αντίστοιχη σχετική ροπή εκκίνησης ;**

ΛΥΣΗ

α) Η περιστροφική ταχύτητα είναι

$$\Omega = \frac{2\pi n_s}{60} \Rightarrow \Omega = \frac{2 \times 3,14 \times 1480 \text{rpm}}{60} \Rightarrow \Omega = 154,9 \text{sec}^{-1}$$

$$\text{Η ονομαστική ροπή } M_{ov} = \frac{P}{\Omega} \Rightarrow M_{ov} = \frac{90000 \text{W}}{154,9 \text{sec}^{-1}} \Rightarrow M_{ov} = 581 \text{Nm}$$

Στην απ' ευθείας εκκίνηση οι λόγοι είναι

$$\frac{I_{εκ}}{I_{\beta\rho}} = \frac{V}{V_{\beta\rho}} \Rightarrow \frac{I_{εκ}}{I_{\beta\rho}} = \frac{380 \text{V}}{100 \text{V}} \Rightarrow I_{εκ} = 3,8 \times I_{\beta\rho} \Rightarrow I_{εκ} = 3,8 \times 270 \text{A} \Rightarrow I_{εκ} = 1026 \text{A}$$

$$I_{εκ} = 6,04 \times I_{ov}$$

$$\frac{M_{εκ}}{M_{\beta\rho}} = \left( \frac{V}{V_{\beta\rho}} \right)^2 \Rightarrow M_{εκ} = 3,8^2 \times M_{\beta\rho} \Rightarrow M_{εκ} = 3,8^2 \times 60 \text{Nm} \Rightarrow M_{εκ} = 866,4 \text{Nm}$$

$$M_{εκ} = 1,49 \times M_{ov}$$

$$\frac{P_{εκ}}{P_{\beta\rho}} = \left( \frac{V}{V_{\beta\rho}} \right)^2 \Rightarrow P_{εκ} = 3,8^2 \times P_{\beta\rho} \Rightarrow P_{εκ} = 3,8^2 \times 14 \text{KW} \Rightarrow P_{εκ} = 202,2 \text{KW}$$



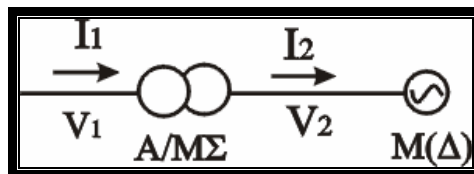
$$\beta) I_{\epsilon\kappa, \alpha\sigma\tau} = \frac{1}{3} \times I_{\epsilon\kappa, \tau\rho\iota} \Rightarrow I_{\epsilon\kappa, \alpha\sigma\tau} = \frac{1}{3} \times 6,04 \times I_{ov} \Rightarrow I_{\epsilon\kappa, \alpha\sigma\tau} = 2,01 \times I_{ov}$$

$$M_{\epsilon\kappa, \alpha\sigma\tau} = \frac{1}{3} \times M_{\epsilon\kappa, \tau\rho\iota} \Rightarrow M_{\epsilon\kappa, \alpha\sigma\tau} = \frac{1}{3} \times 1,49 \times M_{ov} \Rightarrow M_{\epsilon\kappa, \alpha\sigma\tau} = 0,497 \times M_{ov}$$

$$\text{Επίσης } \frac{P_{\epsilon\kappa, \alpha\sigma\tau}}{P_{\epsilon\kappa, \tau\rho\iota}} = \frac{\sqrt{3} \times V \times I_{\epsilon\kappa, \alpha\sigma\tau} \times \text{συνφ}_{\epsilon\kappa}}{\sqrt{3} \times V \times I_{\epsilon\kappa, \tau\rho\iota} \times \text{συνφ}_{\epsilon\kappa}} \Rightarrow \frac{P_{\epsilon\kappa, \alpha\sigma\tau}}{P_{\epsilon\kappa, \tau\rho\iota}} = \frac{I_{\epsilon\kappa, \alpha\sigma\tau}}{I_{\epsilon\kappa, \tau\rho\iota}} \Rightarrow \frac{P_{\epsilon\kappa, \alpha\sigma\tau}}{P_{\epsilon\kappa, \tau\rho\iota}} = \frac{1}{3}$$

$$P_{\epsilon\kappa, \alpha\sigma\tau} = \frac{1}{3} \times P_{\epsilon\kappa, \tau\rho\iota} \Rightarrow P_{\epsilon\kappa, \alpha\sigma\tau} = \frac{1}{3} \times 202,2 \text{KW} \Rightarrow P_{\epsilon\kappa, \alpha\sigma\tau} = 67,4 \text{KW}$$

γ) Το σχήμα με συνδεδεμένο τον Α/ΜΣ φαίνεται παρακάτω



Εδώ το απ' ευθείας ρεύμα είναι  $I_d = I_{\epsilon\kappa, \tau\rho\iota}$ , επίσης ισχύει  $V_1 = V_d$

$$\text{Σχέση μετασχηματισμού } \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1)$$

$$\text{Επίσης ισχύει } \frac{I_d}{I_2} = \frac{V_d}{V_2} \quad \text{ή} \quad \frac{I_{\epsilon\kappa, \tau\rho\iota}}{I_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2)$$

$$\text{Πολλαπλασιάζοντας τις (1), (2) παίρνουμε } \frac{I_1}{I_d} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2 \quad \text{και για } I_1 = 1,4 \times I_{ov} \quad \text{και}$$

$$I_d = I_{\epsilon\kappa, \tau\rho\iota} = 6,04 \times I_{ov}, \quad \text{έχουμε}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{I_d}{I_1}} \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{6,04 \times I_{ov}}{1,4 \times I_{ov}}} \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \sqrt{4,31} \Rightarrow V_2 = 2,07 \times V_1 \Rightarrow V_2 = 183 \text{V}$$

Για την ροπή ισχύει

$$\frac{M_1}{M_d} = \frac{I_1}{I_d} \Rightarrow \frac{M_1}{M_d} = \frac{1,4 \times I_{ov}}{6,04 \times I_{ov}} \Rightarrow \frac{M_1}{M_d} = \frac{1}{4,31} \Rightarrow M_d = M_{\epsilon\kappa, \tau\rho\iota} = 1,49 \times M_{ov}$$

$$\text{Έτσι } M = \frac{M_{\epsilon\kappa}}{4,31} \Rightarrow M = \frac{1,49 \times M_{ov}}{4,31} \Rightarrow M = 0,345 \times M_{ov}$$

### 11<sup>η</sup> ΑΣΚΗΣΗ

Ένας τριφασικός κινητήρας 11,2kw 1750rpm 460V 4πολικός σε σύνδεση αστέρα έχει τις παρακάτω παραμέτρους  $R_1=0$   $R'_2=0,38 \Omega$   $X_{1\sigma}=1,14 \Omega$   $X'_{2\sigma}=1,71 \Omega$  και  $X_m=33,2\Omega$ . Ο κινητήρας ελέγχεται μεταβάλλοντας την συχνότητα. Αν η ροπή ανατροπής είναι 35 Nm υπολογίστε την συχνότητα εισόδου και την ταχύτητα  $\omega_m$  στην μέγιστη ροπή.

$$U_1 = U_{1\phi} = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{460}{\sqrt{3}} = 258,8V, \quad \omega_b = 2\pi f = 2\pi \cdot 60 = 377 \text{ rad/sec}, \quad p = 4, P_2 = 11200W \text{ και}$$

$$M_{mb} \cdot \frac{2\pi n}{60} = P_2 \Rightarrow M_{mb} = 61,11 \text{ Nm και } M_m = 35 \text{ Nm α) Από την εξίσωση } \beta = \sqrt{\frac{M_{mb}}{M_m}}$$
$$= \sqrt{\frac{61,11}{35}} = 1,321$$

$\omega_1 = \beta \omega_b = 1,321 \cdot 377 = 498,01 \text{ rad/sec}$ . Από την εξίσωση της συχνότητας τροφοδοσίας έχω

$$\omega = \frac{4 \times 498,01}{2} = 996 \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \text{ ή } 158,51 \text{ Hz}$$

β) Από την εξίσωση της ολίσθησης για τη μέγιστη ροπή

$$s_m = \frac{\frac{R'_2}{\beta}}{X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}} = \frac{\frac{0,38}{1,321}}{1,14 + 1,71} = 0,109$$

$$\text{και } \omega_m = 498,01 + (1 - 0,109) = 447,711 \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \text{ ή } 4275 \text{ rpm}$$

### 12<sup>η</sup> ΑΣΚΗΣΗ

Ένας τριφασικός 11.2KW, 1750rpm, 460V, 60Hz τετραπολικός επαγωγικός κινητήρας έχει τα παρακάτω στοιχεία:  $R_1=0,66\Omega$ ,  $R'_2=0,38\Omega$ ,

$X_{1\sigma}=1,14\Omega$ ,  $X'_{2\sigma}=1,71\Omega$  και  $X_m=33,2\Omega$ . Ο κινητήρας ελέγχεται μεταβάλλοντας μαζί τάση και συχνότητα. Ο λόγος volts/Hz ο οποίος ανταποκρίνεται στην ονομαστική τάση και συχνότητα παραμένει σταθερός.

α) Υπολογίστε τη μέγιστη ροπή  $M_m$  και την ταχύτητα  $\omega_m$  για 60Hz και 30Hz.

β) Επαναλάβετε το (α) αν αγνοηθεί η  $R_1$ .

Λύση.

$$p=4, V\alpha = Vs = \frac{460}{\sqrt{3}} = 265,58V, \quad \omega = 2\pi \times 60 = 377 \text{ rad/sec}$$

$$\text{Και από την εξίσωση } \omega_b = \frac{2 \times 377}{4} = 188,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}. \text{ Από την εξίσωση}$$

$$(15) d = \frac{265,58}{188,5} = 1,409$$

(α) Στα 60Hz,  $\omega_b = \omega_s = 188,5 \text{ rad/sec}$  και

$V_\alpha = d \cdot \omega_s = 1406 \times 188,5 = 265,58V$  . Από την εξίσωση

$$S_m = \frac{0,38}{[0,66^2 + (1,14 + 1,71)^2]^{\frac{1}{2}}} = 0,1299$$

$$\omega_m = 188,51 + (1 - 0,1299) = 164,01 \frac{rad}{sec} \text{ ή } 1566rpm.$$

Από την εξίσωση της μέγιστης ροπής έχω

$$M_m = \frac{3 \times 265,58^2}{2 \times 188,5 \times [0,66 + \sqrt{0,66^2 + (1,14 + 1,71)^2}]} = 156,55 \text{ Nm}$$

$$\text{Στα } 30Hz, \omega_s = \frac{2 \times 2 \times \pi \times 30}{4} = 94,25 \frac{rad}{sec}, \beta = \frac{30}{60} = 0,5 \text{ και } V_\alpha = 265,58V. \text{ Από την}$$

εξίσωση της μέγιστης ροπής είναι  $M_m = 196,94N_m$ .

Σημείωση. Αγνοώντας την  $R_s$  μπορεί να δημιουργηθεί σημαντικό λάθος στον υπολογισμό της ροπής ειδικά στην χαμηλή συχνότητα.

### 13<sup>η</sup> ΑΣΚΗΣΗ

**Ένας τριφασικός 11,2 KW , 1750 rpm , 460 V , 60 Hz τετραπολικός επαγωγικός κινητήρας έχει τις παρακάτω παραμέτρους :**

**$R_1 = 0,66 \Omega$  ,  $R'_2 = 0,38 \Omega$  ,  $X_{1\sigma} = 1,14 \Omega$  ,  $X'_{2\sigma} = 1,71 \Omega$  και  $X_m = 33,2 \Omega$ . Οι απώλειες εν κενώ αγνοούνται. Ο κινητήρας ελέγχεται από inverter πηγής ρεύματος και το ρεύμα εισόδου διατηρείται σταθερό στα 20 A. Αν η συχνότητα είναι 40 Hz και η αναπτυσσόμενη ροπή είναι 55Nm υπολογίστε (α) την ολίσθηση για τη μέγιστη ροπή  $S_m$  και τη μέγιστη ροπή  $M_m$  , (β) την ολίσθηση  $s$  , (γ) την ταχύτητα του δρομέα  $\omega_m$  , (δ) την τάση ανά φάση  $V_\alpha$  και (ε) τον συντελεστή ισχύος  $P.f_m$**

Λύση

$$V_{\alpha(\text{ονομαστική})} = \frac{460}{\sqrt{3}} = 265,58V, I_L = 20A, I_L = T_d = 55Nm, P = 4.$$

$$\text{Στα } 40 \text{ Hz } \omega = 2\pi \times 40 = 251,33 \frac{rad}{sec} \quad \omega_s = 2 \times 251,33/4 = 125,66 \frac{rad}{sec}$$

$$R_1 = 0,66\Omega, R'_2 = 0,38\Omega, X_{1\sigma} = \frac{1,14 \times 40}{60} = 0,76\Omega,$$

$$X'_{2\sigma} = \frac{1,71 \times 40}{60} = 1,14\Omega \text{ και } X_m = \frac{33,2 \times 40}{60} = 22,13\Omega.$$

$$\text{α) Από την εξίσωση } S_m = \frac{0,38}{[0,66^2 + (1,14 + 1,71)^2]^{\frac{1}{2}}} = 0,1299$$

και αντικαθιστώντας αυτή στον τύπο της ροπής  $M_m = 94,68Nm$

β) Από την εξίσωση

$$I_d = 55 = \frac{3 \frac{R'_2}{s} (22,13 \times 20)^2}{125,66 \times [(0,66 + \frac{R'_2}{s})^2 + (22,13 + 0,76 + 1,14)^2]}$$

$$\eta \text{ οποία δίνει } \left(\frac{R'_2}{S}\right)^2 - 83,74\left(\frac{R'_2}{S}\right) + 578,04 = 0 \quad \text{και λύνοντας ως προς } \frac{R'_2}{S}$$

έχουμε  $\frac{R'_2}{S} = 76,144$  ή  $7,581$  και  $S = 0,00499$  ή  $0,0501$ . Καθώς ο κινητήρας λειτουργεί κανονικά με μεγάλη ολίσθηση στην αρνητική περιοχή της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας επιλέγουμε  $S = 0,0501$

$$\gamma) \omega_m = 123,656 \times (1 - 0,0501) = 119,36 \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \quad \text{ή } 1140 \text{rpm.}$$

$$\delta) \text{ η εμπέδηση εισόδου είναι } \overline{Z}_i = R_i + jX_i =$$

$$(R_i^2 + X_i^2)^{\frac{1}{2}} \angle \theta_m = Z_i \angle \theta_m \quad \text{όπου}$$

$$R_i = \frac{X_m^2 (R_1 + \frac{R'_2}{S})}{(R_1 + \frac{R'_2}{S})^2 + (X_m + X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2} = 6,26 \Omega$$

$$X_i = \frac{X_m^2 [(R_1 + \frac{R'_2}{S})^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}) \times (X_m + X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})]}{(R_1 + \frac{R'_2}{S})^2 + (X_m + X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2} = 3,899 \Omega$$

$$\text{και } \theta_m = \tan^{-1} \frac{X_i}{R_i} = 31,9^\circ$$

$$Z_i = (6,26^2 + 3,899^2)^{\frac{1}{2}} = 7,38 \Omega \quad 15-74$$

$$V_a = Z_i I_i = 7,38 \times 20 = 147,6 \text{V}$$

$$\epsilon) \text{ Pf}_m = \cos(31,9^\circ) = 0,849$$

**Σημείωση:** η μέγιστη ροπή υπολογίστηκε για  $I_m = 100,49$  και  $V_a(\text{για } S = S_m) = 313 \text{V}$ . Για

συχνότητα τροφοδοσίας 90Hz από τις μετρήσεις έχουμε  $\omega_s = 282,74 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$ ,  $X_{1\sigma} = 1,71 \Omega$ ,

$X'_{2\sigma} = 2,565 \Omega$ ,  $X_m = 49,8 \Omega$ ,  $S_m = 0,00726$ ,  $M_m = 96,1 \text{Nm}$ ,  $s = 0,0225$ ,  $V_a = 316 \text{V}$  και

$V_a(\text{για } S = S_m) = 699,6 \text{V}$ . Είναι φανερό ότι για υψηλή συχνότητα και μικρή ολίσθηση, η τάση θα υπερβεί την ονομαστική τάση και θα κορεστεί η ροή διακένου.

### **14<sup>η</sup> ΑΣΚΗΣΗ**

Οι ακόλουθες αναγνώσεις ελήφθησαν από τα αποτελέσματα δοκιμών ανοικτού κυκλώματος και βραχυκυκλώσεως σε στροβιλογεννήτρια  $S = 9,375 \text{MVA}$ , συνδεδεμένη κατά αστέρα, με πολική τάση  $U = 13800 \text{V}$ , 2 πόλους και  $F = 50 \text{Hz}$ . Η κίνηση της είναι στην σύγχρονη ταχύτητα.

Ρεύμα πεδίου 169 A 192 A

Ρεύμα τυμπάνου 392 A 446 A δοκιμή βραχυκυκλώσεως.

Πολική τάση 13000 V 13800 V χαρακτηριστική ανοικτού βραχυκυκλώματος.

Πολική τάση 15400 V 17500 V γραμμή διακένου

Η αντίσταση τυμπάνου είναι  $0,064 \Omega$  ανά φάση. Η αντίσταση σκεδάσεως τυμπάνου είναι  $0,1 \Omega$  ανά μονάδα με βάση την ικανότητα της γεννήτριας.

α) Να βρεθεί η ακόρεστη τιμή της σύγχρονης αντιδράσεως σε  $\Omega$  ανά φάση και επίσης ανά μονάδα.

β) Να βρεθεί ο λόγος βραχυκυκλώσεως.

γ) Να βρεθεί η τιμή της σύγχρονης αντιδράσεως προσαρμοσμένη για τον κορεσμό στην ονομαστική τάση.

δ) Εάν η τιμή βραχυκυκλώσεως γίνει στην μισή ταχύτητα, να βρεθεί το ρεύμα τυμπάνου και για το ρεύμα διεγέρσεως πεδίου 169 A.

### ΛΥΣΗ

α)  $E_f(\gamma\delta)$  = φασική τάση

$X_s(\gamma\delta)$  = ακόρεστη τιμή ανά φάση

$$\text{Η ακόρεστη } X_s(\gamma\delta) = \frac{E_f(\gamma\delta)}{I_{\alpha\beta\rho}} = \frac{15400}{\frac{\sqrt{3}}{392}} = 22,68 \Omega$$

Θεωρούμε βασικά μεγέθη  $S_{\beta\alpha\sigma} = 9,375 \text{ MVA}$ ,  $V_{\beta\alpha\sigma} = 13800 \text{ V}$   
(τριφασική ισχύς και τάση αντίστοιχα)

$$Z_{\beta\alpha\sigma} = \frac{(KV)^2}{MVA} = \frac{(13,8)^2}{9,375} = 203136 \Omega$$

$$\text{Άρα } X_{s(\alpha\kappa)\alpha.\mu.} = \frac{22,68}{203136} = 1,116 \Omega$$

β) Λόγος βραχυκυκλώσεως :

$$\Lambda B = \frac{I_f(\text{στα } 1800 \text{ V}_{(\alpha.\kappa.)})}{I_f(\text{οταν } I_{\alpha(\beta.\rho.)} = I_{ov})} I_{ov} = \frac{9375000}{\sqrt{3} * 13800} = 392 \text{ A}$$

$$\text{όπου αντιστοιχεί: } I_f = 169 \text{ A} \quad \text{Άρα } \Lambda B = \frac{192}{169} = 1,136$$

γ) Ζητάμε τη σύγχρονη κεκορεσμένη αντίδραση

$$X_s = \frac{V_t(\text{ονομ.τασησεα.κ.})}{I_{\alpha(\beta.\rho.)}} = \frac{13800}{\frac{\sqrt{3}}{446}} = 17,86 \Omega$$

$$X_{s(\alpha.\mu.)} = \frac{17,86}{203136} = 0,88_{(\alpha.\mu.)}, \text{ προφανώς}$$

$$\Lambda B = \frac{1}{X_{s(\alpha.\mu.)}} = \frac{1}{0,88} = 1,136$$

δ) Έχουμε δοκιμή βραχυκυκλώσεως με μισή ταχύτητα :

$$\omega' = \frac{\omega}{2} \Rightarrow f' = \frac{f}{2} = 25 \text{ Hz}$$

$$E'_f = 4,44 K W * N * \Phi * f' \Rightarrow E'_f = \frac{E_f}{2}$$

$$\text{Άρα } X'_S = \frac{E'_f (\text{ονομ.τασησεα.κ.})}{I'_{\alpha(\beta,\rho.)}}$$

$$X'_S = \frac{E'_f}{I'_{\alpha(\beta,\rho.)}} \Rightarrow \frac{X_S}{2} = \frac{\frac{E_f}{2}}{I'_{\alpha(\beta,\rho.)}} \Rightarrow I'_{\alpha(\beta,\rho.)} = 392 \text{ A}$$

ισχύει ότι  $X'_S = \frac{X_S}{2}$  διότι εργαζόμαστε στην ακόρεστη περιοχή.

### 15<sup>η</sup> ΑΣΚΗΣΗ

**Τριφασικός σύγχρονος κινητήρας με  $U_S = 2300 \text{ V}$  έχει αμελητέα ωμική αντίσταση και  $11 \Omega / \text{φάση}$  σύγχρονη αντίδραση  $= X_D$  ο κινητήρας αποδίδει  $200 \text{ Hp}$  όταν ο βαθμός απόδοσης είναι  $\eta = 90 \%$ . Οι απώλειες  $P_{Cu} + P_{Fe} = 0$**

**Η Ερ έπεται  $15^\circ$  της  $U_S$  δηλ.  $\theta = -15^\circ$**

**Ζητούνται :**

**α) Ερ ανά φάση**

**β)  $I_S$ , συνφ**

**γ) διανυσματικό διάγραμμα**

#### ΛΥΣΗ

$$P_1 = P_\delta \text{ επειδή } P_{Cu(\sigma\tau\alpha\tau\eta)} + P_{Fe} = 0$$

$$n = \frac{P_2}{P_1} \Rightarrow P_1 = \frac{P_2}{n} = \frac{200 * 0,746}{0,9} = 165700 \text{ W}$$

$$P_1 = P_\delta = 165700 \text{ W}$$

$$P_\delta = 3 * \frac{U_S * E_\rho}{X_D} * \eta \mu \vartheta \Rightarrow E_\rho = \frac{X_D * P_\delta}{3 * U_S * \eta \mu \vartheta}$$

και  $U_S = 1328 \text{ V}$  φασική τιμή

$$E_\rho = \frac{11 * 165700}{3 * 1328 * \eta \mu (-15^\circ)} = 1773 \text{ V} / \phi \alpha \sigma \eta$$

$$I_S = \frac{U_S \angle 0^\circ - E_\rho \angle -15^\circ}{jX_D} \Rightarrow I_S = \frac{1328 \angle 0^\circ - 1773 \angle -15^\circ}{11 \angle 90^\circ} = 54 \angle 40^\circ \text{ A}$$

Το συν40° είναι το cosφ και είναι χωρητικό.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΗΛ.ΜΗΧΑΝΕΣ D.C. –A.C (Ι. ΞΥΠΤΕΡΑ Α.Π.Θ.)
2. ΗΛ.ΜΗΧΑΝΕΣ (ΑΘ. ΣΑΦΑΚΑ ΠΑΝ.ΠΑΤΡΩΝ)
3. Σ.Η.Ε. ΤΟΜΟΣ 1 (Π. ΝΤΟΚΟΠΟΥΛΟΥ Α.Π.Θ.)
4. ΗΛ.ΜΗΧΑΝΕΣ D.C.-A.C (ΚΩΝ. ΦΩΤΙΑΔΗ Τ.Ε.Ι.Θ.)
5. ΗΛ.ΜΗΧΑΝΕΣ A.C. - D.C. (ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ Μ. ΜΑΝΤΕΛΑ)
6. ΠΡΟΣΩΠΙΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΟ Α.Π.Θ.
7. ΤΕΧΝΙΚΑ ΦΥΛΛΑΔΙΑ ΤΩΝ ΕΤΑΙΡΙΩΝ TERCO - EDUTEC