

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 1579**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ  
ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΠΟΛΩΝ ΙΣΧΥΟΣ 90KW/125hp**

**STUDY AND DESIGN OF A FOUR-POLE 90KW/125HP  
INDUCTION MOTOR**

**ΒΑΣΙΛΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**ΖΗΣΗΣ ΣΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:**

**ΔΡΟΣΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2017**

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάται ένας επαγωγικός κινητήρας τεσσάρων πόλων, ισχύος 90kW/125hp με 36 αυλάκια στον στάτη. Η μελέτη περιλαμβάνει τον υπολογισμό των διαστάσεων του στάτη, του δρομέα, των στοιχείων του ισοδυνάμου κυκλώματος, του ρεύματος μαγνήτισης, των απωλειών και του βαθμού απόδοσης και τέλος των ροπών εκκίνησης και ανατροπής του κινητήρα

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Έχει εκτιμηθεί ότι πάνω από τα 2/3 της χρησιμοποιούμενης ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται από ηλεκτροκινητήρες διαφόρων τύπων και μεγεθών. Σε μία κατοικία υπάρχουν συνήθως 15-40 ηλεκτρικοί κινητήρες σε διάφορες εφαρμογές, όπως ανεμιστήρες, αντλίες, πλυντήρια, ψυγεία, φούρνοι, κλιματιστικά κλπ. Στη βιομηχανία το πλήθος των ηλεκτρικών κινητήρων πολλαπλασιάζεται και περιλαμβάνει από πολύ μικρούς κινητήρες κλασματικής ισχύος σε συστήματα αυτοματισμών μέχρι τεράστιους κινητήρες ισχύος χιλιάδων ίππων.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάται ένας επαγωγικός κινητήρας τεσσάρων πόλων, ισχύος 90kW/125hp με 36 αυλάκια στον στάτη. Η μελέτη περιλαμβάνει τον υπολογισμό των διαστάσεων του στάτη, του δρομέα, των στοιχείων του ισοδυνάμου κυκλώματος, του ρεύματος μαγνήτισης, των απωλειών και του βαθμού απόδοσης και τέλος των ροπών εκκίνησης και ανατροπής του κινητήρα

Οι κινητήρες αυτοί παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως, χαμηλό κόστος, στιβαρή κατασκευή, εύκολη σύνδεση με το δίκτυο, προσαρμογή σε διάφορα περιβάλλοντα λειτουργίας, εύκολη συντήρηση και επισκευή. Οι ισχείς τους κυμαίνονται από δεκάδες W έως MW. Τα βασικά μειονεκτήματά τους είναι η κατανάλωση αέργου ισχύος, η δύσκολη προσαρμογή τους στις στροφές του φορτίου, καθώς έχουν περίπου σταθερή ταχύτητα περιστροφής και η εκκίνησή τους. Τα δύο κύρια μέρη του ηλεκτροκινητήρα είναι ο στάτης (stator) και ο δρομέας (rotor). Και ο στάτης και ο δρομέας είναι κατασκευασμένοι από σιδηρομαγνητικό υλικό, έτσι ώστε να παρέχουν κατάλληλο δρόμο για την μαγνητική ροή. Ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα ο κινητήρας χαρακτηρίζεται ως κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel-cage induction motor) ή κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor induction motor).

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	II
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	7
Η ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ .....	7
1.1. Βασικά Μέρη Ηλεκτρικών Μηχανών .....	7
1.2. Κατηγορίες Ασύγχρονων Τριφασικών Κινητήρων .....	11
1.2.1. Κινητήρες τυλιγμένου δρομέα ή δακτυλιοφόροι .....	11
1.2.2. Κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα ή τύπου κλωβού .....	12
1.2.3. Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών .....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	15
ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ .....	15
2.1. Γενικά χαρακτηριστικά λειτουργίας .....	15
2.2. Δημιουργία ροπής στον κινητήρα .....	16
2.3. Χαρακτηριστική Ροπής – Ολίσθησης .....	20
2.4. Ισοδύναμο Κύκλωμα 3Φ Ασύγχρονου Κινητήρα .....	21
2.4.1. Ισοδύναμο Κύκλωμα μιας Φάσης Ανηγμένο στο Τύλιγμα του Στάτη 23	
2.4.2. Απλουστευμένη μορφή ισοδύναμου κυκλώματος μιας φάσης 3Φ ασύγχρονου κινητήρα. ....	23
2.5. Ροή της Ισχύος .....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	25
ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ .....	25
3.1. Ανάγκη περιορισμού του ρεύματος εκκίνησης .....	25
3.2. Άμεση εκκίνηση .....	25
3.3. Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα – τριγώνου. ....	26
3.4. Εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη. ....	29
3.5. Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή. ....	30
3.6. Εκκίνηση δακτυλιοφόρων κινητήρων .....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	33
ΠΕΔΗΣΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ .....	33
4.1. Δυναμική πέδηση .....	33
4.2. Δυναμική πέδηση με συνεχές ρεύμα .....	36
4.3. Πέδηση με αλλαγή του αριθμού των πόλων .....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....	40
Η ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ .....	40
5.1. Στοιχεία κινητήρα .....	40
5.2. Διαστασιολόγηση του κινητήρα .....	41

5.3. Στάτης.....	44
5.3.1. Τυλίγματα στάτη.....	44
5.3.2. Υπολογισμός αυλακιών του στάτη.....	49
5.4. Δρομέας.....	54
5.4.1. Υπολογισμός των διαστάσεων των αγωγών του δρομέα.....	56
5.4.2. Υπολογισμός της διαμέτρου του άξονα.....	57
5.5. Ρεύμα μαγνήτισης.....	59
5.6. Ισοδύναμο κύκλωμα.....	62
5.6.1. Υπολογισμός ωμικών αντιστάσεων.....	62
5.6.2. Υπολογισμός Επαγωγικών Αντιδράσεων.....	65
5.7. Υπολογισμός $V_{TH}$ ΚΑΙ $R_{TH}$ .....	70
5.8. Απώλειες και βαθμός απόδοσης.....	72
5.9. Υπολογισμός Χαρακτηριστικών λειτουργίας.....	74
5.10. Χαρακτηριστική Ροπής - Ταχύτητας.....	76
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	<b>80</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>82</b>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούν μια κατηγορία στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών. Η βασική λειτουργία μιας στρεφόμενης ηλεκτρικής μηχανής είναι η μετατροπή ενέργειας από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή και αντίστροφα. Υπάρχουν τρεις τρόποι λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών. Η λειτουργία τους σαν κινητήρες, σαν γεννήτριες και σαν πέδες.

Η λειτουργία τόσο των ηλεκτρικών γεννητριών όσο και των ηλεκτρικών κινητήρων στηρίζεται στη ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Σύμφωνα με το φαινόμενο της επαγωγής, όταν ένας αγωγός (δηλαδή ένα αγώγιμο ηλεκτρικά υλικό) κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε πάνω στον αγωγό αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή, δηλαδή ηλεκτρικό δυναμικό το οποίο είναι και το αίτιο εμφάνισης ηλεκτρικού ρεύματος στον αγωγό. Στους κινητήρες αντίστοιχα αξιοποιείται ένα άλλο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο τότε στον αγωγό αυτό ασκείται από το μαγνητικό πεδίο μια δύναμη που τείνει να τον κινήσει. Η δύναμη αυτή είναι ανάλογη με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, την ένταση του μαγνητικού πεδίου, αλλά και το μήκος του αγωγού. Σημειώνεται πως η φορά της ασκούμενης στον αγωγό δύναμης αντιστρέφεται είτε αν αλλάξει η φορά του ρεύματος, είτε αν αντιστραφεί η πολικότητα του μαγνητικού πεδίου.

Διακρίνουμε δύο μεγάλες κατηγορίες ηλεκτρικών κινητήρων: τους επαγωγικούς και τους σύγχρονους κινητήρες. Κάθε κατηγορία έχει πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα

### Επαγωγικοί κινητήρες

#### Πλεονεκτήματα

- § Χαμηλό κόστος.
- § Στιβαρή-ανθεκτική κατασκευή.
- § Μικρές απαιτήσεις συντήρησης μεγάλη διάρκεια ζωής.
- § Μεγαλύτερη ισχύ με μικρότερο όγκο-βάρος.

#### Μειονεκτήματα

- § Χαμηλός συντελεστής ισχύος σε μικρές ταχύτητες.
- § Μεγάλο ρεύμα εκκίνησης.
- § Δυσκολία σε μεταβλητές ταχύτητες (απαιτείται σύστημα με αντιστροφέα) (χρήση κυρίως σε σταθερής ταχύτητας εφαρμογές π.χ. Ανεμιστήρες, αντλίες).

## Σύγχρονοι κινητήρες

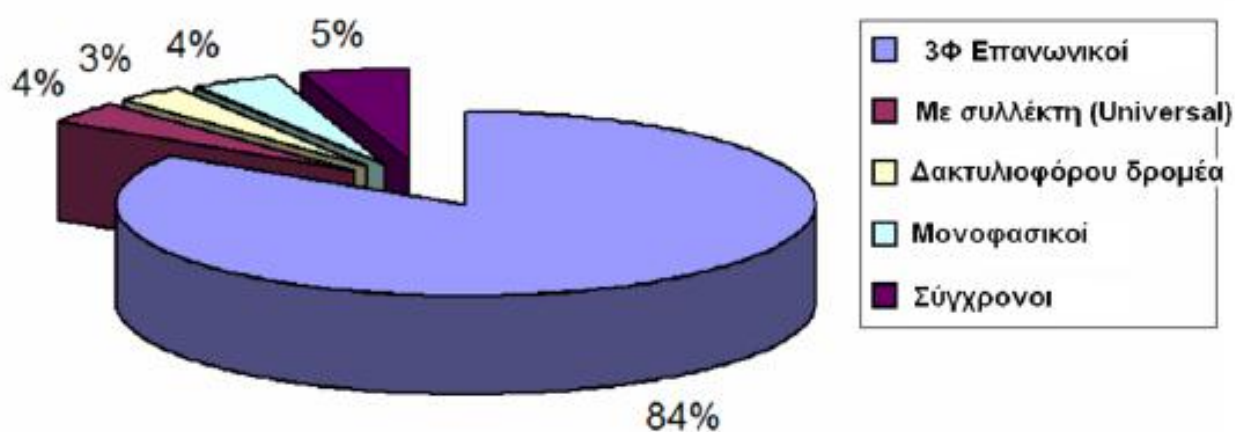
### Πλεονεκτήματα

- § Υψηλή απόδοση
- § Ελεγχόμενος συντελεστής ισχύος.
- § Χαμηλό ρεύμα εκκίνησης (σε σχέση με βραχ.κλπ.)

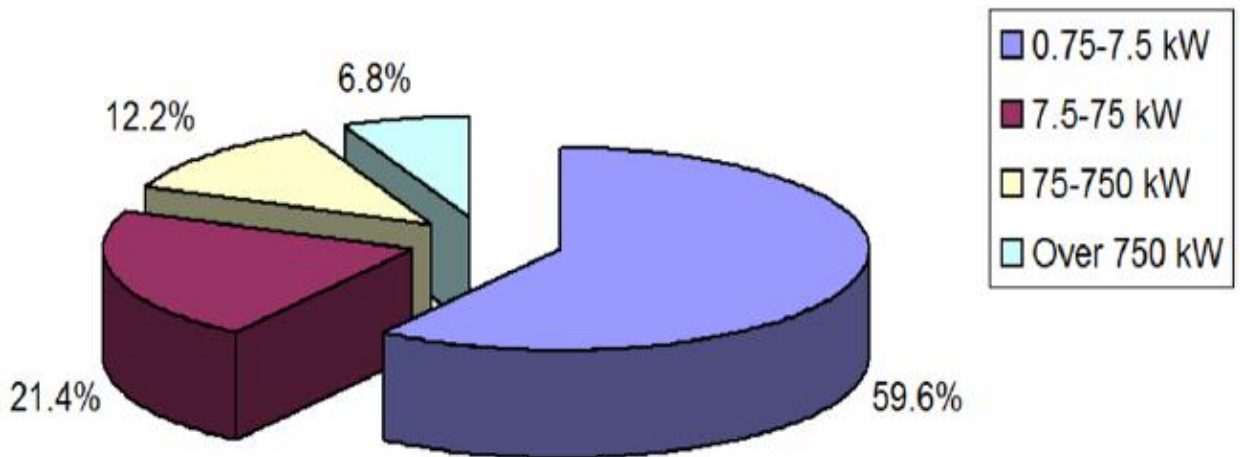
### Μειονεκτήματα

- § Μεγάλο κόστος
- § Χαμηλή ροπή εκκίνησης.
- § Απαιτείται κύκλωμα διέγερσης.

Οι επαγωγικοί κινητήρες καταλαμβάνουν τη μερίδα του λέοντος στην αγορά όπως εξάλλου φαίνεται και στην Εικόνα 1, και οι ισχείς τους κυμαίνονται από 0.75kW μέχρι 750kW (Εικόνα 2) με κυρίαρχα μεγέθη έως 75kW.

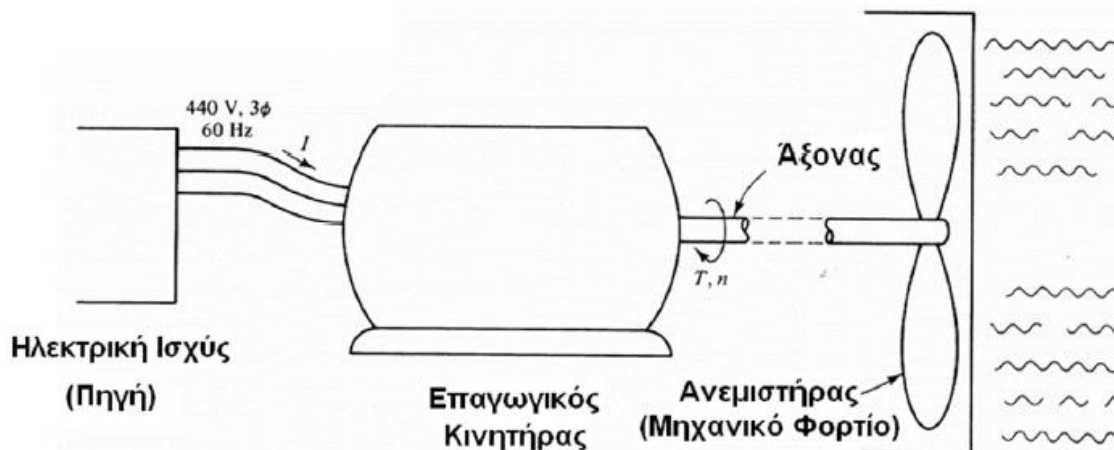


**Εικόνα 1: Κατανομή κινητήρων στην αγορά**



**Εικόνα 2. Μεγέθη ασύγχρονων κινητήρων**

Με διαφορά είναι οι πιο διαδομένοι κινητήρες στην περιοχή 1-150kW, χρησιμοποιώντας το 90% της ενέργειας που καταναλώνουν όλοι οι κινητήρες στην περιοχή αυτή. Συνήθως πρόκειται για τριφασικούς κινητήρες. Υπάρχουν και μονοφασικοί, που όμως είναι ακριβότεροι, λιγότερο αποδοτικοί και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος (π.χ. σε οικιακές συσκευές όπως πλυντήρια, στεγνωτήρες μαλλιών κλπ).



**Εικόνα 3. Απλό λειτουργικό διάγραμμα επαγωγικού κινητήρα**

### Προδιαγραφές

Όταν γίνεται παραγγελία ενός ηλεκτροκινητήρα πρέπει αυτός να έχει προδιαγραφεί σωστά με βάση αφενός μεν τις λειτουργικές απαιτήσεις του μηχανισμού ή του μηχανήματος που θα κινήσει, αφετέρου δε τις προϋπάρχουσες συνθήκες και παραμέτρους της βιομηχανικής εγκατάστασης στη συγκεκριμένη περιοχή του πεδίου. Οι προδιαγραφές των ηλεκτροκινητήρων αφορούν



- § το σύστημα τροφοδοσίας
- § τις συνθήκες της συγκεκριμένης περιοχής του πεδίου
- § τις απαιτήσεις της ηλεκτρικής ισχύος που θα πρέπει να προσφέρεται στο ενεργοποιούμενο μηχάνημα και της μηχανικής ισχύος που θα πρέπει αυτό να αποδίδει
- § τα λοιπά λειτουργικά χαρακτηριστικά του
- § τα κατασκευαστικά στοιχεία του κινητήρα και
- § τον τρόπο σύνδεσης των καλωδίων της εξωτερικής πηγής ισχύος με αυτόν.

Αναλυτικότερα αναφορικά με την τροφοδοσία του κινητήρα δίνονται παράμετροι της περιοχής του πεδίου όπως το αν η πηγή τροφοδοσίας είναι μονοφασική ή τριφασική, αν είναι 220V ή 380V, αν η συχνότητα του ρεύματος είναι 50 Hz (στις ΗΠΑ για παράδειγμα η συχνότητα διαφέρει), αν υπάρχει διακύμανση τάσης ή συχνότητας και σε ποιο ποσοστό της ονομαστικής τιμής ανέρχεται η μέγιστη διακύμανση εκάστου μεγέθους, αλλά και των δύο μεγεθών συνδυαστικά. Τέλος δίνονται στοιχεία σχετικά με τον τύπο της υπάρχουσας στην περιοχή του πεδίου γείωσης, στην οποία θα συνδεθεί ο αγωγός γείωσης του κινητήρα.

Αναφορικά με τις συνθήκες στη συγκεκριμένη περιοχή του πεδίου δίνονται πληροφορίες σχετικά

- § με το αν η εγκατάσταση του ηλεκτροκινητήρα θα γίνει σε εσωτερικό ή υπαίθριο χώρο
- § με το αν υπάρχει προστασία από βροχή ή από χιόνι (στην περίπτωση που η εγκατάσταση θα γίνει σε εξωτερικό χώρο)
- § με το αν η περιοχή εγκατάστασής του είναι διαβαθμισμένη (δηλαδή αν υπάρχουν εκεί εκρηκτικά αέρια) και ποιά η κλάση της επικινδυνότητας και
- § με το αν η περιβάλλουσα τον κινητήρα ατμόσφαιρα έχει διαβρωτικές ιδιότητες και τα φυσικά ή χημικά μέσα που μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση. Αναφορικά με την περιβάλλουσα ατμόσφαιρα δίνονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας.

Αναφορικά με τα ζητούμενα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα σημειώνονται ενδεικτικά από τον πελάτη αλλά εντελώς συγκεκριμένα από τον κατασκευαστή,

- § η αποδιδόμενη ισχύς
- § η απορροφούμενη ένταση ρεύματος
- § οι αντίστοιχες στροφές λειτουργίας του κινητήρα
- § ο αριθμός των πόλων του
- § ο βαθμός απόδοσης του.
- § η ένταση του απορροφούμενου ρεύματος κατά την εκκίνησή τους
- § το είδος της εκκίνησης (απευθείας ή όχι)
- § ο χρόνος επανεκκίνησης (reacceleration)

§ η παραμένουσα τάση.

Στα λεπτομερή λειτουργικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνονται

- § το  $\cos\phi$  (που σχετίζεται με τον ακριβή σχεδιασμό του συγκεκριμένου κινητήρα)
- § η ροπή αδρανείας του στρεφόμενου τμήματος
- § η στάθμη του παραγόμενου θορύβου
- § το σημείο «υπερλειτουργίας» του κινητήρα στο οποίο αυτός θα καεί.

Τα αναλυτικά κατασκευαστικά στοιχεία τα δίνει ο κατασκευαστής και αναφέρονται

- § στο βάρος του κινητήρα και των διαφόρων μερών του
- § στο αν η κατασκευή του κελύφους τους υπακούει σε προδιαγραφές μηχανικής (IP) ή αντιακρηκτικής (Exd) προστασίας
- § στον τρόπο στήριξης του και στη μέθοδο ψύξης του
- § στον τύπο των ρουλεμάν του κιβωτίου μετάδοσης
- § στη ενδεικνυόμενη μέθοδο λίπανσης.

Αναφορικά με το τερματικό κουτί σύνδεσης των καλωδίων της εξωτερικής πηγής αναφέρεται

- § ο τύπος του καλωδίου σύνδεσης (από τον πελάτη)
- § οι τύποι μηχανικής και αντιακρηκτικής προστασίας
- § ο αριθμός των τερματικών, η θέση και ο προσανατολισμός τους

## **Εφαρμογές**

Οι ηλεκτροκινητήρες, όπως όλοι γνωρίζουμε, χρησιμοποιούνται για να δώσουν κίνηση σε μια σχεδόν απεριόριστη γκάμα μηχανισμών. Καλύπτουν μια τεράστια σειρά εφαρμογών, από τα μηχανήματα οικιακής χρήσης μέχρι τις μεγαλύτερες και πολυπλοκότερες βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Οι κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος καλύπτουν το μεγαλύτερο όγκο εφαρμογών στη βιομηχανία. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα σε σχέση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι μπορούν να προσφέρουν πολύ μεγαλύτερη ισχύ για το ίδιο μέγεθος κινητήρα. Επίσης ο βαθμός απόδοσης τους είναι αρκετά μεγάλος και η οικονομικότητά τους ως προς την κατανάλωση ρεύματος ικανοποιητική, με συνέπεια να επιλέγονται για εφαρμογές όπου έχουμε μηχανήματα πολύ μεγάλης ισχύος που εργάζονται στο βιομηχανικό πεδίο σε συνεχή βάση. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν οι αντλίες και οι συμπιεστές με πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις τα πολύ μεγάλα φυγοκεντρικά μηχανήματα (είτε αντλίες είτε συμπιεστές) η ισχύς των οποίων μπορεί να είναι της τάξης μέχρι και ενός (η περισσότερων) MW. Ωστόσο και τα βιομηχανικά μηχανήματα

μικρής ισχύος και όχι ειδικών απαιτήσεων στην πλειοψηφία τους ενεργοποιούνται από ηλεκτροκινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος λόγω του ότι διαθέτουν μεγάλη ευκολία στον έλεγχο της ταχύτητας του άξονά τους προσφέρουν σημαντική ευκολία στον αξιόπιστο έλεγχο των κινήσεων σε βιομηχανισμούς μηχανισμούς που ενεργοποιούνται από αυτούς. Ένα δεύτερο βασικό τους πλεονέκτημα σε σχέση με τους κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος είναι ότι για δεδομένη ισχύ έχουν τη δυνατότητα να αναπτύσσουν σημαντικά μεγαλύτερη μηχανική ροπή στο άξονα τους με αποτέλεσμα να είναι οι πλέον κατάλληλοι για τον έλεγχο των κινήσεων σε βιομηχανικούς μηχανισμούς, στους οποίους χρειάζεται να διαχειριστούν σημαντικά μηχανικά φορτία..

Οι κινητήρες παράλληλης διέγερσης χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές που έχουμε σταθερή ταχύτητα κινητήρα. Οι κινητήρες διέγερσης εν σειρά χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή μηχανική ροπή εκκίνησης(π.χ γερανοί, αναβατόρια κ.λ.π). Οι κινητήρες σύνθετης διέγερσης προσφέρουν τη μεγαλύτερη ευελιξία που είναι χρήσιμη για τις εφαρμογές ελέγχου κίνησης γιατί δίνει τη δυνατότητα με κατάλληλο σχεδιασμό να προσαρμόζεται η καμπύλη ταχύτητας - ροπής στις ιδιαιτερότητες του εκάστοτε φορτίου λειτουργίας.

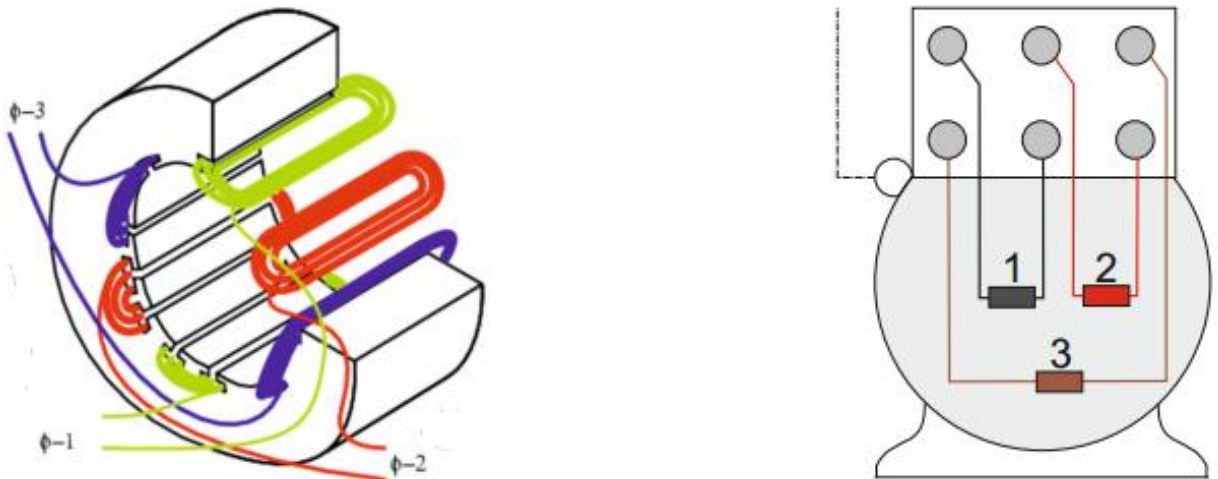
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Η ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

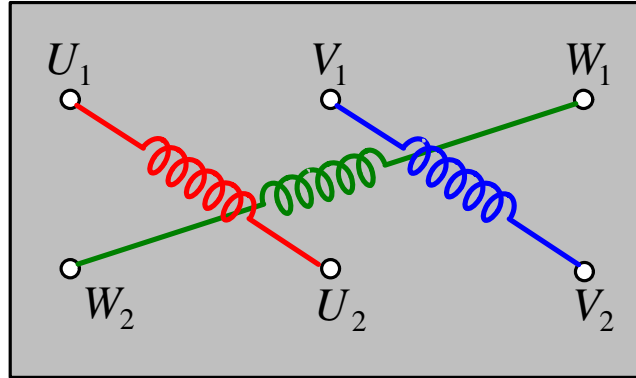
### 1.1. Βασικά Μέρη Ηλεκτρικών Μηχανών

- Σταθερό μέρος (πυρήνας στάτη και τύλιγμα)
- Στρεφόμενο μέρος (πυρήνας δρομέα και τύλιγμα)
- Διάκενο αέρα, απαραίτητο για τη σχετική κίνηση στάτη και δρομέα

Το τύλιγμα του στάτη, είναι γνωστό και ως **τύλιγμα τυμπάνου**. Κατασκευαστικά το τύλιγμα του στάτη, στην περίπτωση του τριφασικού κινητήρα αποτελείται από τρία όμοια διανεμημένα μονοφασικά τυλίγματα, μετατιθέμενα στο χώρο κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες.



**Εικόνα 4: Τομή στάτη με τα τυλίγματα (αριστερά) και σύνδεση τυλιγμάτων στάτη στο ακροκιβώτιο του κινητήρα (δεξιά)**



**Εικόνα5: Εσωτερική σύνδεση των τυλιγμάτων του στάτη**

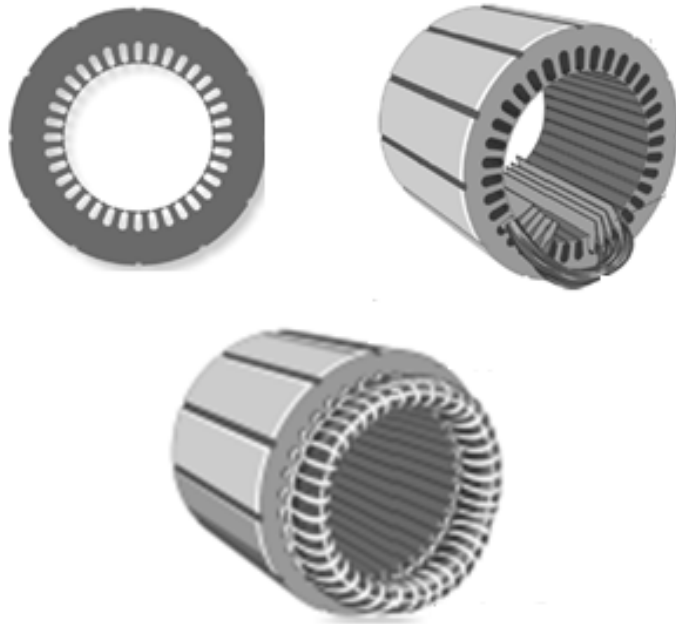
Ο αριθμός των πόλων των τυλιγμάτων αυτών, για δεδομένη συχνότητα τροφοδοσίας, καθορίζει τις ονομαστικές στροφές του κινητήρα.

$$n_s = 120 \frac{f_1}{P}$$



**Εικόνα 6: Λεπτομέρειες στάτη: Περιλαμβάνει τα τυλίγματα των 3 φάσεων που είναι εγκλωβισμένα σε ειδικές εσοχές-αυλάκια.**

**Κατασκευάζεται συνήθως από δυναμοελάσματα. Με την κατασκευή δημιουργείται το επιθυμητό πλήθος ζευγών πόλων**



**Εικόνα7: Κατασκευή στάτη: πυρήνας από εκατοντάδες λεπτά στοιβαγμένα δυναμοελάσματα, δεμένα με μονωμένο καλώδιο. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται τα αυλάκια. Τα δυναμοελάσματα δημιουργούν κοίλο κύλινδρο. Στα αυλάκια του πυρήνα αφού καλυφθούν με μονωτικό (συνήθως χαρτί), τοποθετούνται τα τυλίγματα**

Οι περιελίξεις-τυλίγματα ενώνονται και ομαδοποιούνται με κατάλληλο τρόπο έτσι ώστε να δημιουργηθεί ο επιθυμητός αριθμός πόλων. Κάθε ομάδα τυλιγμάτων μαζί με τον πυρήνα αποτελούν έναν ηλεκτρομαγνήτη. Τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται απευθείας με το δίκτυο.

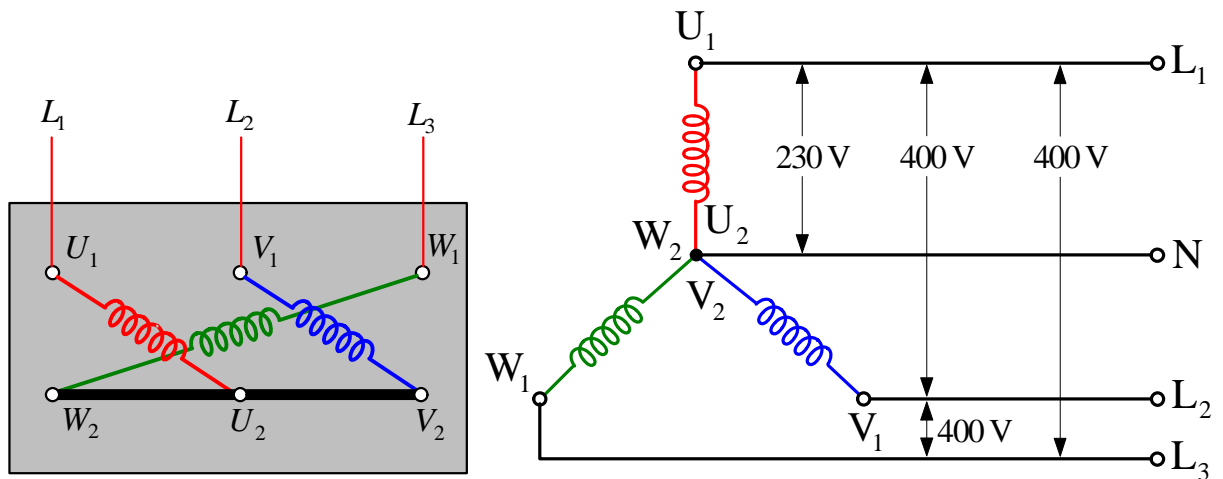
Το τύλιγμα του δρομέα είναι βραχυκυκλωμένο και τροφοδοτείται με Ε.Ρ. έμμεσα από το στάτη λόγω επαγωγής, όπως ακριβώς και το δευτερεύον τύλιγμα στην περίπτωση των μετασχηματιστών. Για το λόγο αυτό, ο ασύγχρονος κινητήρας ονομάζεται και **κινητήρας επαγωγής**.

Μιας και για τη λειτουργία του ασύγχρονου κινητήρα, απαιτείται η τροφοδότηση με εναλλασσόμενη τάση μόνο του ενός από τα δύο τυλίγματα (και συγκεκριμένα του τυλίγματος του στάτη), ο ασύγχρονος κινητήρας χαρακτηρίζεται και σαν **κινητήρας απλής τροφοδότησης**.

Σε αντίθεση με το μετασχηματιστή, **το ρεύμα διέγερσης** που απαιτείται για τη δημιουργία της συνισταμένη μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής, είναι αρκετά μεγαλύτερο (της τάξης του 40% περίπου του ονομαστικού ρεύματος), λόγω της σημαντικά αυξημένης

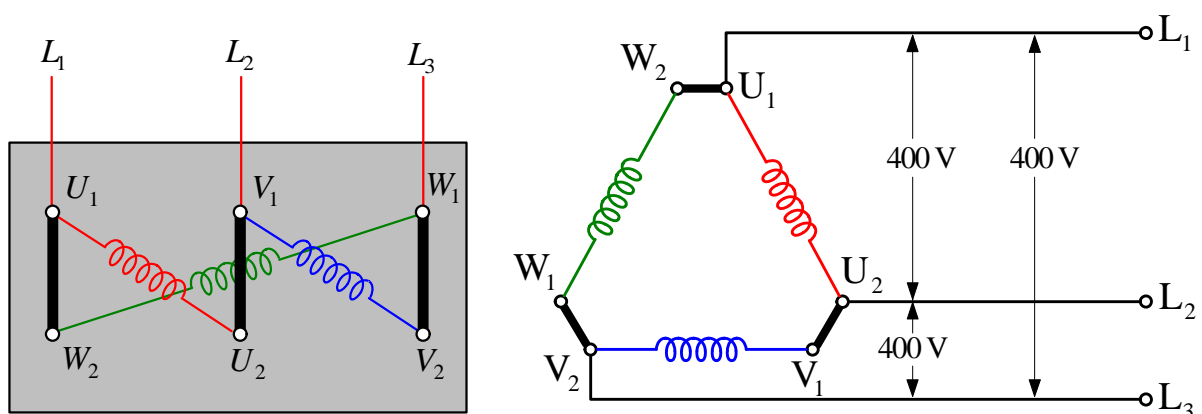
μαγνητικής αντίστασης που εισάγεται στα σιδηρομαγνητικό κύκλωμα από την ύπαρξη του διακένου.

Ανάλογα δε με τις τάσεις τροφοδοσίας και τον τύπο του κινητήρα, τα τυλιγμάτα του στάτη συνδέονται είτε σε αστέρα είτε σε τρίγωνο.



**Εικόνα 8: Σύνδεση των τυλιγμάτων του στάτη σε αστέρα**

Για να συνδέσω έναν κινητήρα σε αστέρα στο δίκτυο της ΔΕΗ (πολική 400V) πρέπει η πινακίδα του αναγράφει 230/400V ΔΥ ή 400V Υ. Η πρώτη τάση που αναγράφεται αντιστοιχεί στη συνδεσμολογία Δ. Αν δηλαδή έχουμε πολική τάση 230V πρέπει να συνδέσουμε τον κινητήρα σε τρίγωνο. Η δεύτερη τάση που αναγράφεται αντιστοιχεί στη συνδεσμολογία Υ. Αν δηλαδή έχουμε πολική τάση 400V, όπως το δίκτυο της ΔΕΗ, πρέπει ο κινητήρας να συνδεθεί σε αστέρα.



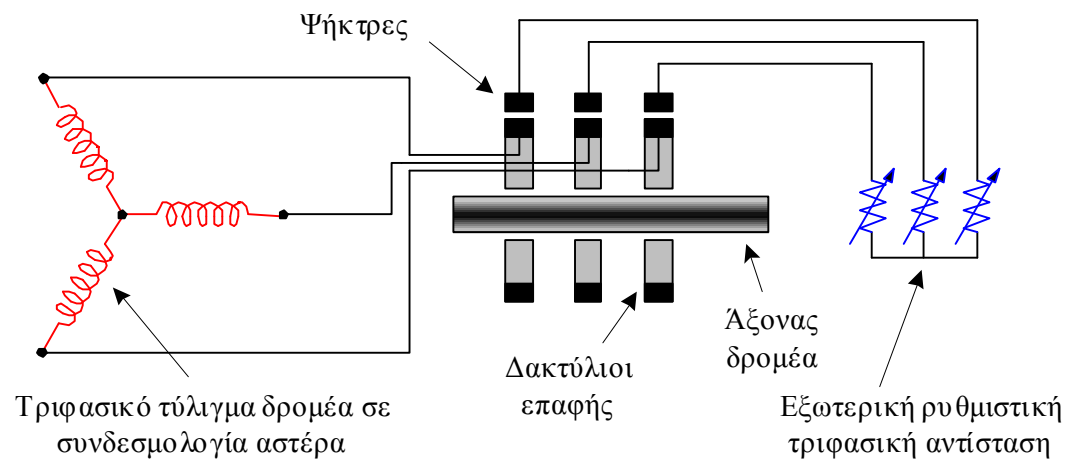
**Εικόνα 9: Σύνδεση των τυλιγμάτων του στάτη σε τρίγωνο**

Για να συνδέσω έναν κινητήρα σε τρίγωνο στο δίκτυο της ΔΕΗ (πολική 400V) πρέπει η πινακίδα του αναγράφει 400/700V ΔΥ ή 400V Δ. Η πρώτη τάση που αναγράφεται αντιστοιχεί στη συνδεσμολογία Δ. Αν δηλαδή έχουμε πολική τάση 400V πρέπει να συνδέσουμε τον κινητήρα σε τρίγωνο. Υπάρχει όμως η δυνατότητα να συνδεθεί ο κινητήρας σε Υ σε κάποια άλλο δίκτυο με πολική τάση 700V

## 1.2. Κατηγορίες Ασύγχρονων Τριφασικών Κινητήρων

### 1.2.1. Κινητήρες τυλιγμένου δρομέα ή δακτυλιοφόροι

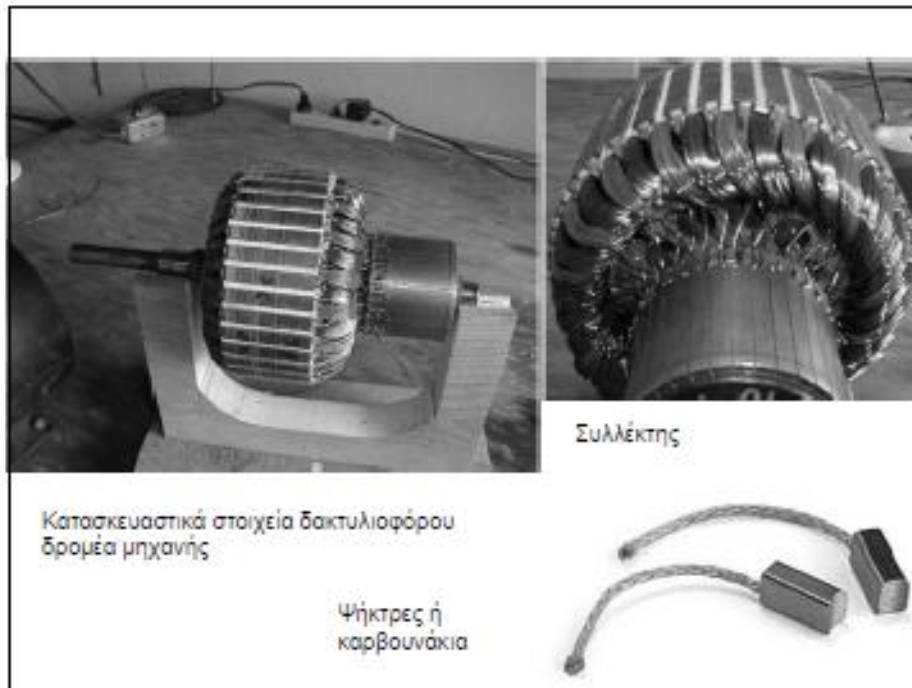
Στους κινητήρες τυλιγμένου δρομέα, υπάρχει η δυνατότητα μέσω των ψηκτρών, παρεμβολής πρόσθετης εξωτερικής ωμικής αντίστασης σε σειρά σε κάθε φάση του τυλίγματος του δρομέα.



**Εικόνα 10: Σύνδεση κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα με εξωτερικές αντιστάσεις**

Χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγάλες ισχείς και σε περιπτώσεις υψηλών απαιτήσεων σε ροπή εκκίνησης.

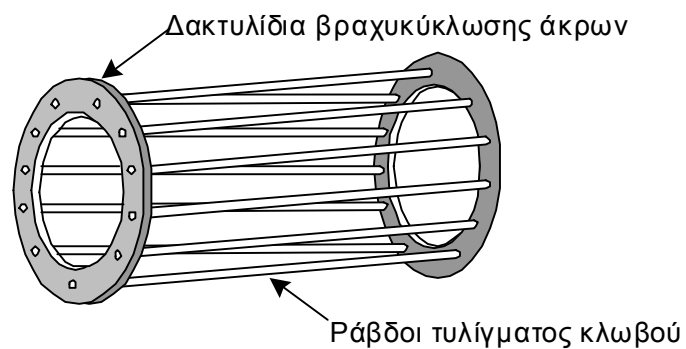




**Εικόνα11: Λεπτομέρειες δακτυλιοφόρου δρομέα**

### 1.2.2. Κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα ή τύπου κλωβού

Ο πυρήνας αποτελείται από δυναμοελάσματα. Αγώγιμες ράβδοι από αλουμίνιο ή χαλκό (για μεγαλύτερα μεγέθη) είναι τοποθετημένες σε ειδικά αυλάκια στον πυρήνα και δαχτυλίδια στα δύο άκρα των αγώγιμων ράβδων τις βραχυκυκλώνουν.



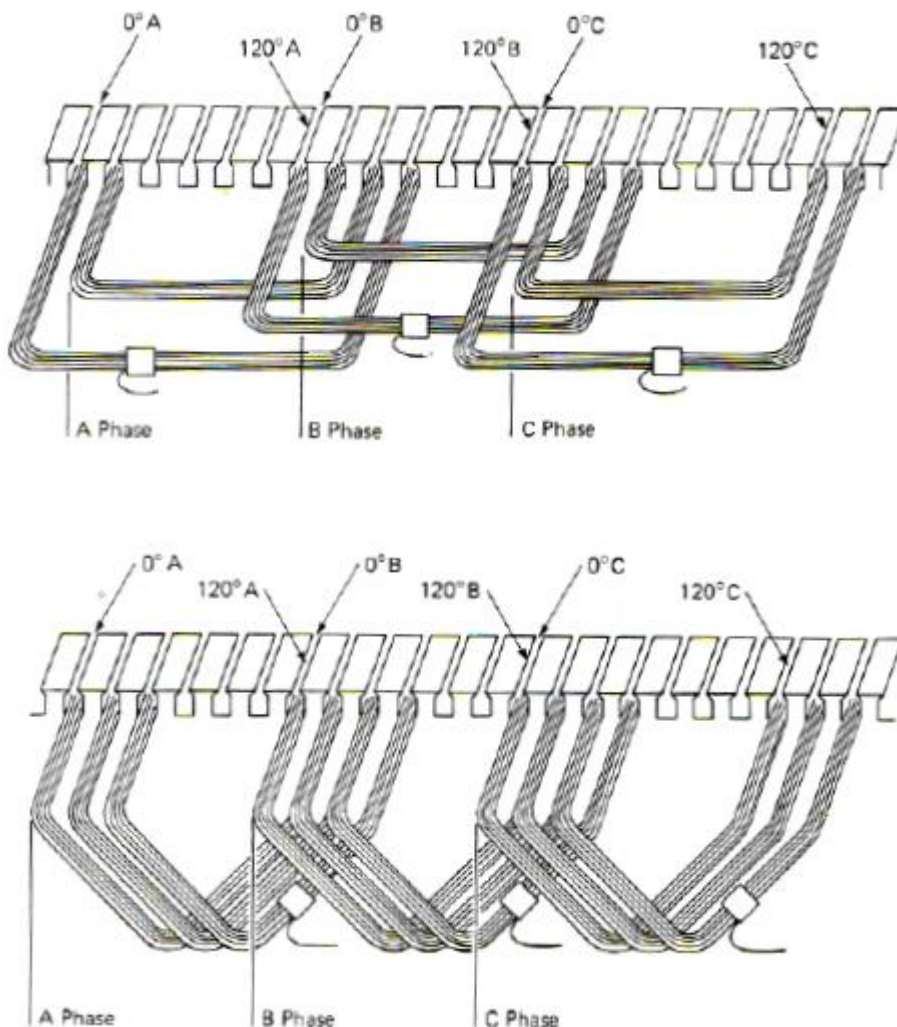
**Εικόνα12: Κατασκευή δρομέα τύπου κλωβού**

Η επιφάνεια του δρομέα καλύπτεται από ένα στρώμα οξειδίου, που λειτουργεί ως μονωτικό για την αποφυγή δινορρευσμάτων.

Αν και οι κινητήρες τυλιγμένου δρομέα, παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία για τον έλεγχο της ροπής και των στροφών, οι κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα, λόγω χαμηλότερου κόστους, μικρότερου όγκου και στιβαρότερης κατασκευής, προτιμώνται περισσότερο στις συνηθισμένες βιομηχανικές εφαρμογές. Σε περιπτώσεις που απαιτούνται υψηλές ροπές κατά την εκκίνηση, μπορεί να γίνει χρήση δρομέα διπλού κλωβού.

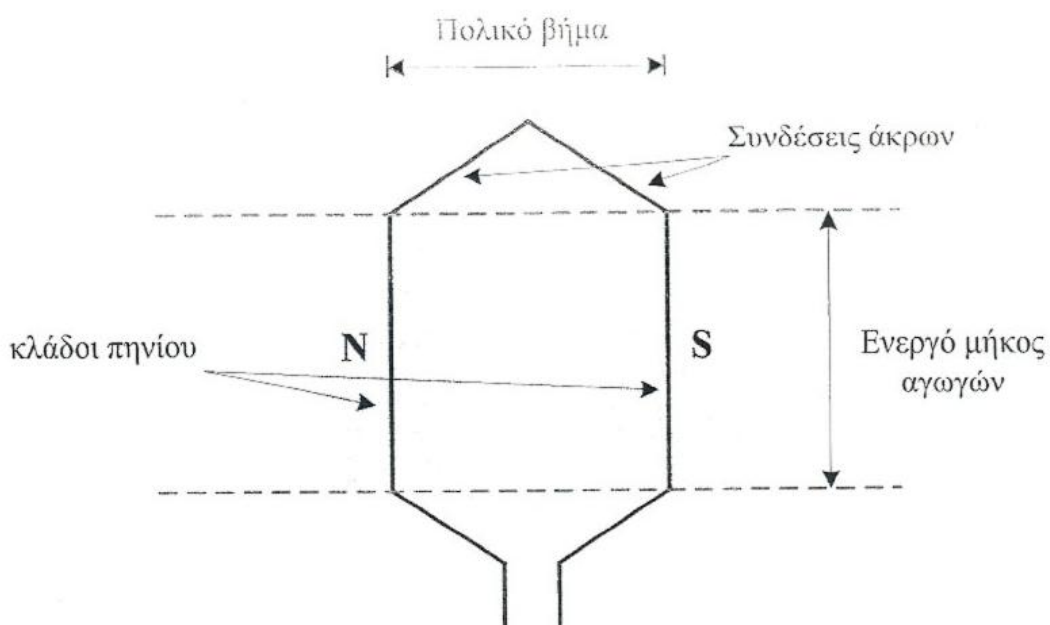
### 1.2.3. Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών

Σκοπός των τυλίγμάτων είναι η δημιουργία και η κατάλληλη διαμόρφωση (μορφή και μέγεθος) των μαγνητικών πεδίων. Η συστατική μονάδα ενός τυλίγματος είναι το πηνίο το οποίο αποτελείται από  $N$  ελίγματα συνδεδεμένα σε σειρά.



**Εικόνα 13: Τα τυλίγματα που χρησιμοποιούνται στους επαγωγικούς κινητήρες**

Ο αριθμός των πηνίων που απαρτίζουν το τύλιγμα καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αυτά είναι διασυνδεδεμένα μεταξύ τους, έχει άμεση σχέση με τη συνολική τάση και ρεύμα για τα οποία είναι σχεδιασμένο να φέρει το τύλιγμα και γενικότερα η ηλεκτρική μηχανή. Το ενεργό μήκος του πηνίου αντιστοιχεί στα μήκη των αγωγών που βρίσκονται υπό την επενέργεια του συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου. Η απόσταση μεταξύ των δύο πλευρών του πηνίου είναι ένα πολικό βήμα ή 180 ηλεκτρικές μοίρες, με αποτέλεσμα οι επαγόμενες τάσεις και ροπές στους δύο κλάδους να είναι ίσες σε μέγεθος και δρούν αθροιστικά.



**Εικόνα 14: Πηνίο τυλίγματος στρεφόμενης ηλεκτρικής μηχανής**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

#### 2.1. Γενικά χαρακτηριστικά λειτουργίας

Όταν τροφοδοτήσουμε το τύλιγμα του στάτη με ένα τριφασικό συμμετρικό σύστημα τάσεων, δημιουργείται στο διάκενο της μηχανής ένα **στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο**. Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη είναι:

$$n_s = 120 \frac{f_1}{P}$$

Όπου  
 $f_1$ : Η συχνότητα του δικτύου  
 $P$ : ο αριθμός των πόλων της μηχανής

Και η γωνιακή ταχύτητα

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2}{P} 2\pi f_1 = \frac{2}{P} \omega_1$$

Ο ασύγχρονος κινητήρας, συμπεριφέρεται όμοια με ένα **μετασχηματιστή**, στο μαγνητικό κύκλωμα του οποίου παρεμβάλλεται και κάποιο διάκενο αέρος. Οι επαγόμενες τάσεις στα τυλίγματα του ακινητοποιημένου δρομέα, οι οποίες σε αντίθεση με το μετασχηματιστή δεν οφείλονται στη χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής, αλλά **στο στρεφόμενο κύμα σταθερού μεγέθους της μαγνητικής ροής στο διάκενο**, έχουν την ίδια **συχνότητα** με εκείνη των τάσεων τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη. Για τις επαγόμενες Η.Ε.Δ. στα τυλίγματα στάτη και δρομέα ισχύει ότι

$$E_s = \frac{E_{s,m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f_1 K_{ws} N_{ph,s} F_{sr,m}$$

$$E_r = \frac{E_{r,m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f_1 K_{wr} N_{ph,r} F_{sr,m}$$

Όπου:

$E_s, E_r$ : Ενεργές τιμές επαγόμενων ΗΕΔ στα τυλίγματα στάτη και δρομέα (V)

$K_{ws}, K_{wr}$ : κατασκευαστικοί συντελεστές των τυλιγμάτων

$N_{ph,s}, N_{ph,r}$ : συνολικοί αριθμοί σπειρών ανά κλάδο και φάση

$\Phi_{sr,m}$ : μέγιστη τιμή της συνισταμένης μαγνητικής ροής διακένου (Wb)

Για **σταθερή τάση και συχνότητα**, η μέγιστη μαγνητική ροή ανά πόλο, παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από τις συνθήκες φόρτισης του κινητήρα.

$$F_{sr,m} = \frac{E_s}{4.44 f_1 K_{w1} N_{ph,1}} = \frac{V_1}{4.44 f_1 K_{w1} N_{ph,1}}$$

Η σχέση μετασχηματισμού των τυλιγμάτων στάτη και δρομέα

$$a = \frac{E_s}{E_r} = \frac{K_{ws}}{K_{wr}} \frac{N_{ph,s}}{N_{ph,r}}$$

## 2.2. Δημιουργία ροπής στον κινητήρα

- **Δρομέας Ανοιχτοκυκλωμένος:** Τα ρεύματα των τυλιγμάτων του στάτη αποτελούν ταυτόχρονα και τα ρεύματα διέγερσης του κινητήρα και είναι υπεύθυνα για την εγκατάσταση της απαιτούμενης μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής.
- **Δρομέας Βραχυκυκλωμένος:** Λόγω των επαγόμενων Η.Ε.Δ. θα κυκλοφορήσουν ρεύματα στο δρομέα, της ίδια συχνότητας με τη συχνότητα των τάσεων τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη. Τα ρεύματα αυτά στο δρομέα, θα δημιουργήσουν και αυτά με τη σειρά τους ένα **στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο δρομέα**, στρεφόμενο επίσης με τη **σύγχρονη ταχύτητα** και με την ίδια φορά περιστροφής με το αντίστοιχο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος του στάτη.

Η **αλληλεπίδραση** των δύο μαγνητικών πεδίων στάτη και δρομέα ή του συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου με το μαγνητικό πεδίο του δρομέα, δημιουργούν κινούσα ροπή στην κατεύθυνση της φοράς

περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, ο δρομέας στρέφεται με ταχύτητα  $n_r$  μικρότερη της σύγχρονης ταχύτητας  $n_s$ .

Ο λόγο της σχετικής ταχύτητας του πεδίου ως προς το δρομέα προς τη σύγχρονη ταχύτητα ονομάζεται ολίσθηση

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad s(\%) = \frac{n_s - n_r}{n_s} \cdot 100$$

Η συχνότητα  $f_2$  των επαγόμενων τάσεων στα τυλίγματα του δρομέα ονομάζεται συχνότητα ολίσθησης και συνδέεται με τη συχνότητα  $f_1$  του δικτύου

$$f_2 = \frac{P}{2} \frac{(n_s - n_r)}{60} = \frac{P}{2} s \frac{n_s}{60} = s f_1$$

Η επαγόμενη Η.Ε.Δ. στα τυλίγματα του δρομέα κατά την κανονική λειτουργία ( $n_r < n_s$ )

$$E_{rs} = 4.44 K_{wr} f_2 N_{ph,r} \Phi_{sr,m} = s E_r$$

Απαραίτητη προϋπόθεση για την παραγωγή μη μηδενικής μέσης ροπής σε έναν κινητήρα, είναι να μην υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ των δύο αλληλεπιδρώντων μαγνητικών πεδίων στάτη και δρομέα. Δηλαδή, τα δύο μαγνητικά πεδία είτε θα είναι ακίνητα στο χώρο (μηχανές Σ.Ρ.), είτε θα κινούνται με την ίδια ταχύτητα (μηχανές Ε.Ρ.). Το μέγεθος της παραγόμενης ροπής, είναι ανάλογο του γινομένου των μεγεθών των δύο πεδίων καθώς και της μεταξύ τους γωνίας.

$$t = - \frac{\mu_0 P}{2 \pi} \frac{D l}{2 g} F_{s,m} F_{r,m} \sin \alpha$$

Όπου

P: αριθμός των πόλων της μηχανής

$\mu_0$ : Μαγνητική διαπερατότητα του κενού

D: Το μήκος του δρομέα

$l$  : ενεργό μήκος των αγωγών του τυλίγματος τυμπάνου

$g$ : μήκος διακένου

$F_{s,m}$  και  $F_{r,m}$ : Μέγιστες τιμές των θεμελιωδών συνιστωσών των μαγνητεγερτικών δυνάμεων στάτη και δρομέα

$\theta$ : η γωνία μεταξύ των μαγνητεγερτικών δυνάμεων

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι, η ροπή ενεργεί προς την κατεύθυνση μείωσης της γωνίας των δύο πεδίων και την ευθυγράμμιση τους.

Εναλλακτική έκφραση της ροπή του κινητήρα, είναι με τη χρήση της συνισταμένης μαγνητικής ροής διακένου.

$$t = - \frac{p}{2} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} = - \frac{p}{2} \frac{\partial}{\partial \theta} (F_{sr,m} F_{r,m} \sin \alpha_r)$$

Για σταθερή τάση και συχνότητα τροφοδοσίας, η μαγνητική ροή στο διάκενο παραμένει σταθερό, οπότε:

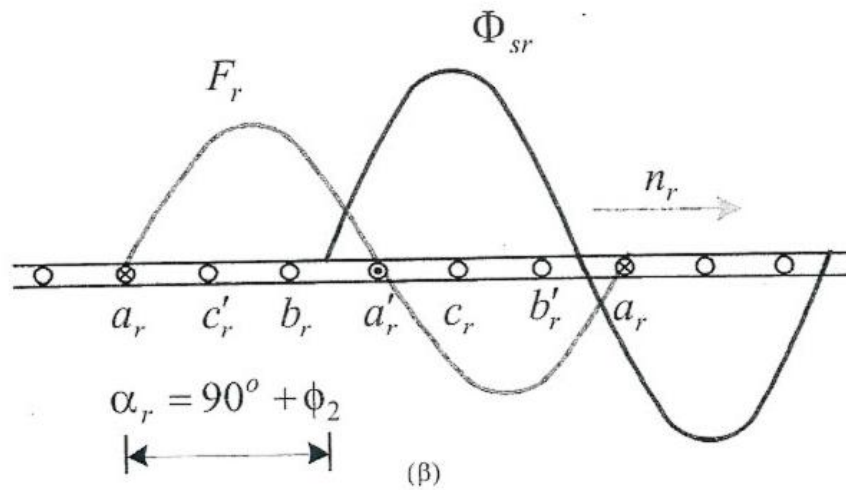
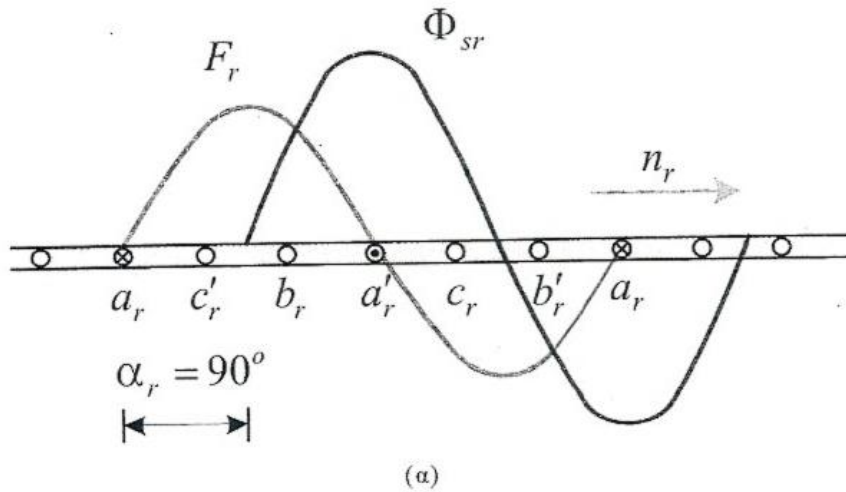
$$t = K F_{r,m} \sin \alpha_r = K \Phi_r \sin \alpha_r$$

Όπου

$K, K'$ : κατασκευαστικές σταθερές

$I_r$ : ενεργός τιμή του ρεύματος στο δρομέα, (A)

$\alpha_r$ : η γωνία μεταξύ της θεμελιώδους συνιστώσας της μαγνητεγερτικής δύναμης του τυλίγματος του δρομέα και της θεμελιώδους συνιστώσας του κύματος χώρου της συνιστάμενης μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής



**Εικόνα 15: Θεμελιώδεις συνιστώσες χωρικών κατανομών της μαγνητοεγερτικής δύναμης του δρομέα και της συνιστάμενης μαγνητικής ροής**

**(α) μηδενική αντίδραση σκέδασης τυλίγματος δρομέα**

**(β) Μη μηδενική αντίδραση σκέδασης τυλίγματος δρομέα**



Για λειτουργία κοντά στο σύγχρονο αριθμό στροφών (μικρές τιμές της ολίσθησης), η  $r_2 \gg x_2$  και το τυλίγμα του δρομέα εμφανίζει ωμική συμπεριφορά. Δηλαδή, το ρεύμα στο δρομέα με την επαγόμενη Η.Ε.Δ, είναι σχεδόν συμφασικά και επίσης  $\varphi_2 = 0^\circ$  και  $\alpha_r = 90^\circ$

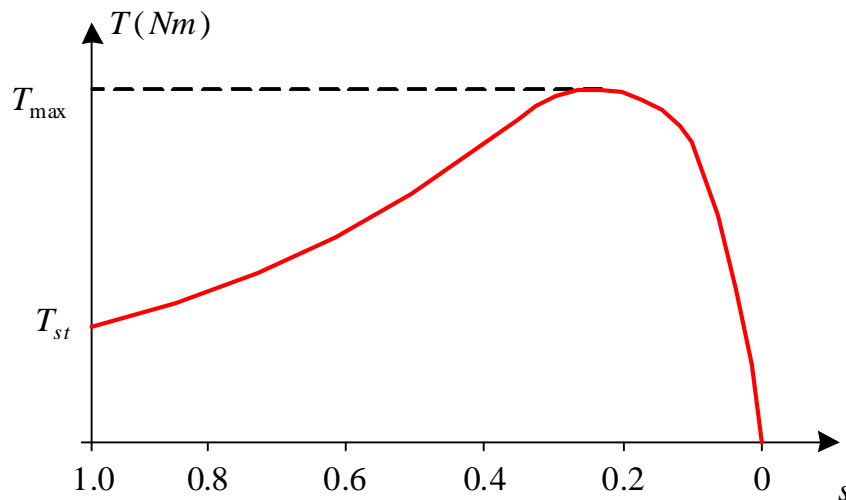
$$t = K \Phi_r = K \Phi \frac{E_{r,s}}{r_2} = \frac{K \Phi E_r}{r_2} s$$

Όπου

$E_r$ : Η επαγόμενη ΗΕΔ στα τυλίγματα του δρομέα

$r_2$ : ωμική αντίσταση ανά φάση του τυλίγματος του δρομέα ( $\Omega$ )

### 2.3. Χαρακτηριστική Ροπής – Ολίσθησης



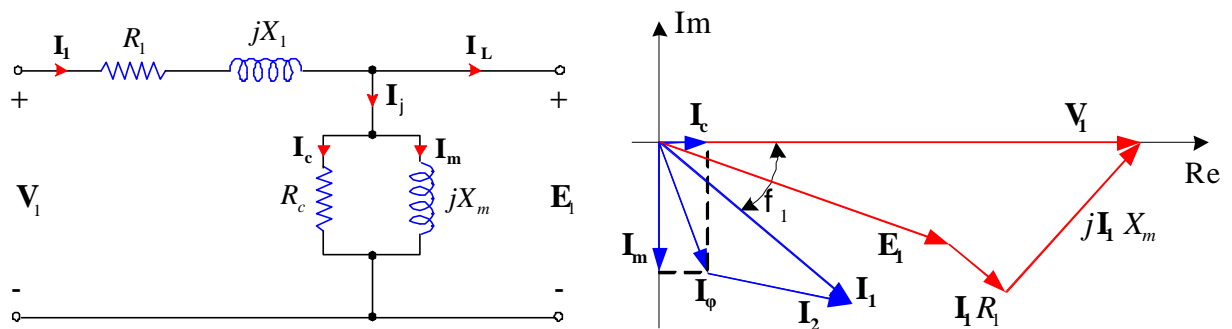
Εικόνα 16: Η χαρακτηριστική ροπής-στροφών

- Για μικρές ολίσθησεις, η παραγόμενη ροπή μεταβάλλεται γραμμικά με την ολίσθηση.
- Η μείωση της ολίσθησης προκαλεί αύξηση της παραγόμενης ροπής όχι πλέον σε γραμμική σχέση, μέχρι μιας μέγιστης τιμής η οποία καθορίζει και τα μέγιστα όρια βραχείας υπερφόρτισης του κινητήρα.

- Κάθε μείωση της ολίσθησης επάνω από την τιμή που αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή, προκαλεί μείωση της παραγόμενης ροπής και σταδιακή μείωση των στροφών, καθότι στο συγκεκριμένο κλάδο της χαρακτηριστικής ο κινητήρας αδυνατεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις του φορτίου.

## 2.4. Ισοδύναμο Κύκλωμα 3Φ Ασύγχρονου Κινητήρα

Η ανάλυση λειτουργίας του 3Φ ασύγχρονου κινητήρα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας γίνεται μέσω του ισοδύναμου κυκλώματος της μιας φάσης όπως ακριβώς και με το μετασχηματιστή



**Εικόνα 17: Ισοδύναμο κύκλωμα και διανυσματικό διάγραμμα μιας φάσης επαγωγικού κινητήρα**

Από το κύκλωμα με εφαρμογή κανόνα τάσεων παίρνουμε:

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{I}_1 (R_1 + jX_1) + \mathbf{E}_1$$

Όπου:

$I_1$ : ενεργός τιμή του φασικού ρεύματος στάτη, (A)

$E_1 = E_s$ : ενεργός τιμή της επαγόμενης ΑΗΕΔ στο στάτη, (V)

$R_1$ : ωμική αντίσταση τυλίγματος στάτη, ( $\Omega$ )

$X_1 = 2\pi fL$ : αντίδραση σκέδασης τυλίγματος στάτη, ( $\Omega$ )

Σε πλήρη αναλογία με το M/Σ, το ρεύμα του τυλίγματος του στάτη αποτελείται από δύο συνιστώσες, τη **συνιστώσα φορτίου** και τη **συνιστώσα διέγερσης**:

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_j + \mathbf{I}_2$$

Η **συνιστώσα της διέγερσης**, παρέχει το ρεύμα που απαιτείται για την εγκατάσταση της συνιστάμενης μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής και το οποίο είναι πρακτικά σταθερό και ανεξάρτητο από τις συνθήκες φόρτισης του κινητήρα.  $I_\varphi = (40-50\%) I_{0n}$

Η **συνιστώσα φορτίου του ρεύματος του στάτη**, αντισταθμίζει πλήρως τη Μ.Ε.Δ. που δημιουργεί το αντίστοιχο ρεύμα στο τύλιγμα του δρομέα και ευθύνεται για την ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας.

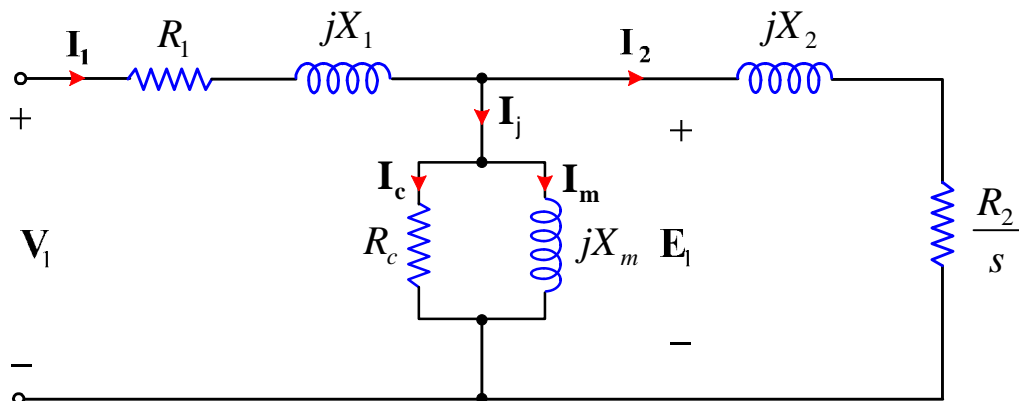
$$\mathbf{I}_\varphi = \mathbf{I}_m + \mathbf{I}_c$$

Όπου:

$I_m$ : συνιστώσα του ρεύματος μαγνήτισης (A)

$I_c$ : συνιστώσα απωλειών μαγνητικής υστέρησης και δινορρευμάτων (A)

**2.4.1. Ισοδύναμο Κύκλωμα μιας Φάσης Ανηγμένο στο Τύλιγμα του Στάτη**



**Εικόνα 18: Ισοδύναμο κύκλωμα ανηγμένο στο στάτη**

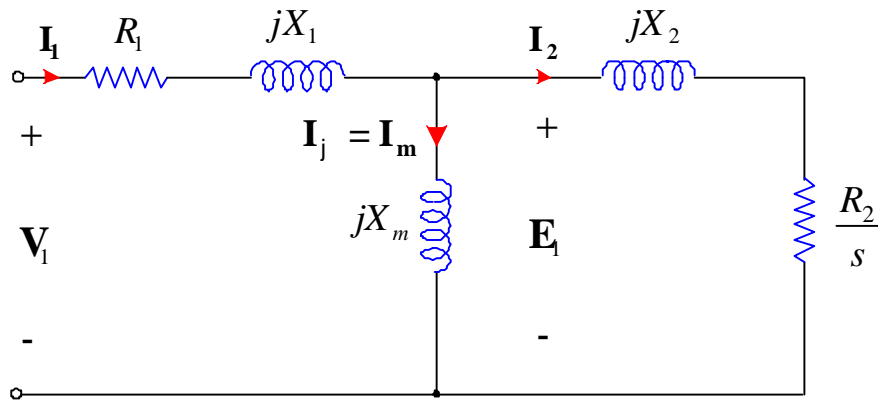
$$\mathbf{I}_\phi = \mathbf{I}_m + \mathbf{I}_c \quad \mathbf{E}_{2s} = s\mathbf{E}_1 \quad \mathbf{I}_{2s} = \mathbf{I}_2$$

$$\frac{\mathbf{E}_{2s}}{\mathbf{I}_{2s}} = \frac{s\mathbf{E}_1}{\mathbf{I}_2} = R_2 + jsX_2$$

$$\frac{\mathbf{E}_1}{\mathbf{I}_2} = \mathbf{z}_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2$$

**2.4.2. Απλουστευμένη μορφή ισοδύναμου κυκλώματος μιας φάσης 3Φ ασύγχρονου κινητήρα.**

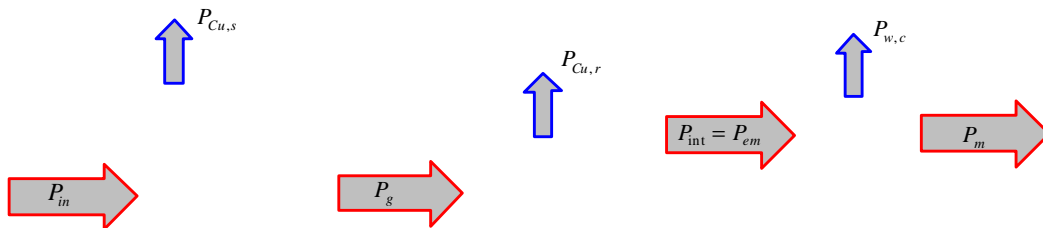
Το σφάλμα είναι πρακτικά αμελητέο, αν αμελήσουμε τη συνιστώσα των απωλειών πυρήνα (μαγνητικής υστέρησης και δινορρευμάτων) του ρεύματος του στάτη και μαζί της την  $R_c$ , υπό την προϋπόθεση ότι οι συγκεκριμένες απώλειες θα ενσωματωθούν μαζί με τις μηχανικές απώλειες τριβών και ανεμισμού, οι οποίες συνήθως θεωρούνται σταθερές (ανεξάρτητες από το φορτίο και την ταχύτητα περιστροφής).



**Εικόνα 19: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης 3Φ ασύγχρονου κινητήρα.**

## 2.5. Ροή της Ισχύος

Κατά μήκος του κινητήρα από την είσοδο στην έξοδο υπάρχει απώλεια ισχύος, όπως φαίνεται και από την παρακάτω εικόνα



**Εικόνα 20: Ροή ισχύος από την είσοδο του κινητήρα (αριστερά) προς την έξοδο του κινητήρα (δεξιά)**

$P_{in}$ : Ηλεκτρική ισχύς την είσοδο του κινητήρα, (W)

$P_{Cu,s}$ : Απώλειες χαλκού στα τυλίγματα του στάτη, (W)

$P_g$ : Ισχύς διακένου, (W)

$P_{Cu,r}$ : Απώλειες χαλκού στα τυλίγματα του δρομέα, (W)

$P_{int}$ : Εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ισχύς, (W)

$P_{w,c}$ : Μηχανικές απώλειες και απώλειες πυρήνα, (W)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

#### 3.1. Ανάγκη περιορισμού του ρεύματος εκκίνησης

Κατά τη στιγμή της εκκίνησης είναι  $n = 0$  και  $s = 1$ . Άρα το ρεύμα της εκκίνησης γράφεται:

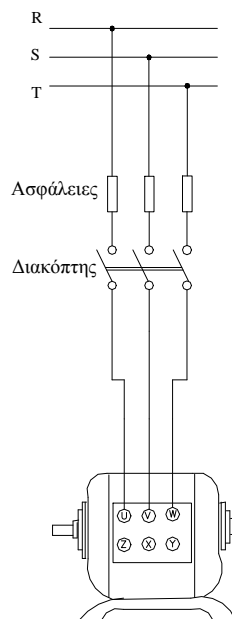
$$I_{\phi_{\text{εκκ}}} = \frac{E_1}{\sqrt{(R_1 + R_{\phi})^2 + (X_1 + X_{\phi})^2}}$$

Η παραπάνω τιμή του ρεύματος είναι πολύ μεγαλύτερη από το ρεύμα κανονικής λειτουργίας του κινητήρα. Αποδεικνύεται ότι το ρεύμα εκκίνησης είναι:  $I_{\text{εκκ}} = (6 - 8) I_{\text{ov}}$

Παρακάτω περιγράφονται διάφοροι τρόποι εκκίνησης των τριφασικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα και δακτυλιοφόρων

#### 3.2. Άμεση εκκίνηση

Η άμεση εκκίνηση των κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα γίνεται με την χρήση μόνο ενός απλού τριπολικού διακόπτη και είναι η απλούστερη και η φθηνότερη μέθοδος που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία. Η συνδεσμολογία φαίνεται στην εικόνα 204.



**Εικόνα 21: Άμεσης εκκίνηση κινητήρα – Συνδεσμολογία**

## Πλεονεκτήματα

- Υψηλή ροπή εκκινήσεως
- Μικρό κόστος εγκαταστάσεως

## Μειονεκτήματα:

- Μεγάλο ρεύμα εκκινήσεως
- Μεγάλη στιγμιαία πτώση τάσεως(βύθιση τάσεως)στο δίκτυο της(βύθιση τάσεως) στο δίκτυο της Δ.Ε.Η.

Το μέγεθος της βυθίσεως τάσεως δεν εξαρτάται μόνο από το ρεύμα εκκινήσεως που είναι μεγάλο, αλλά και από την ικανότητα του δικτύου τροφοδοσίας. Για το λόγο αυτό, πριν από την εγκατάσταση των κινητήρων πρέπει να γίνεται συνεννόηση με τη Δ.Ε.Η. αν είναι δυνατή η εγκατάσταση κινητήρων με άμεση εκκίνηση.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς, επιτρέπεται χωρίς έγκριση η εγκατάσταση τριφασικών κινητήρων με άμεση εκκίνηση εάν η σχέση του ρεύματος εκκινήσεως προς το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα είναι μικρότερη του 2 για κινητήρες μέχρι 10 HP και του 1.6 για μεγαλύτερους κινητήρες.

### 3.3. Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα – τριγώνου.

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, το τυλίγμα του κινητήρα το οποίο είναι κατασκευασμένο να λειτουργεί κανονικά σε συνδεσμολογία τριγώνου, στην εκκίνηση συνδεσμολογείται σε αστέρα.

Αν η εκκίνηση του κινητήρα γίνει χωρίς διακόπτη αστέρα – τριγώνου με έμμεση εκκίνηση σε συνδεσμολογία του τυλίγματος σε τρίγωνο, το ρεύμα που θα διέρρευε το τυλίγμα της κάθε φάσεως, θα ήταν:

$$I_{\phi} = \frac{U}{Z}$$

όπου: U η πολική τάση του δικτύου και Z η σύνθετη αντίσταση κάθε φάσεως του τυλίγματος.

Κατά συνέπεια η ένταση της γραμμής θα ήταν :

$$I_{\Delta} = \sqrt{3} I_{\phi} = \frac{\sqrt{3} \times U}{Z}$$

Εκκίνηση όμως του κινητήρα με ζεύξη του τυλίγματος σε αστέρα, στην κάθε φάση επικρατεί τάση:

$$U_{\Phi} = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

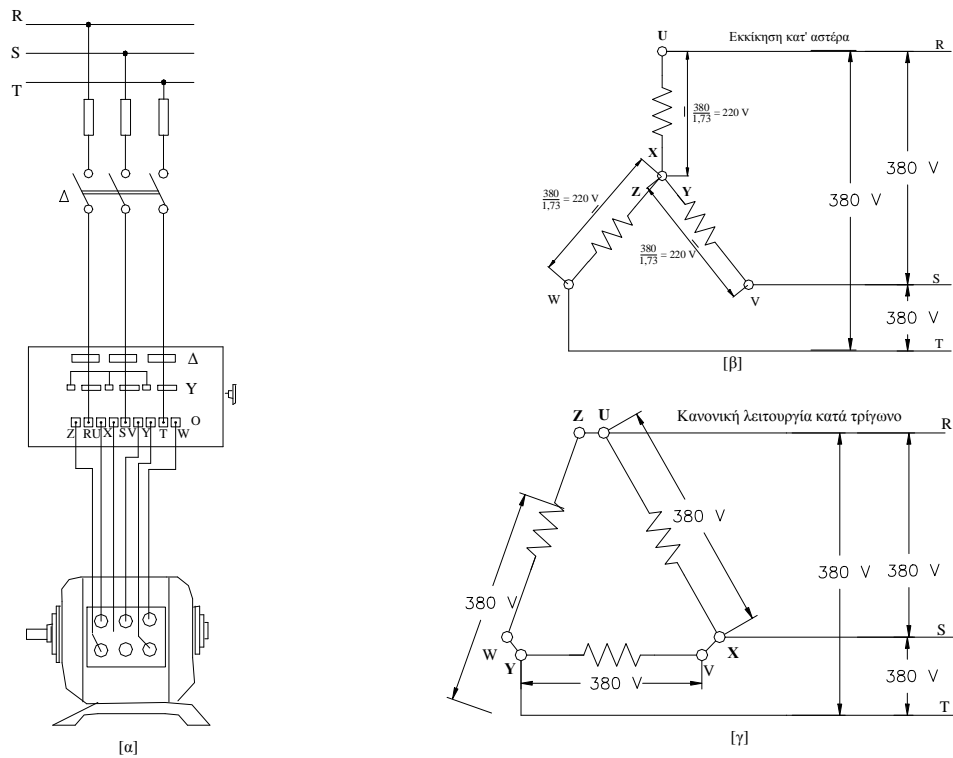
Κατά συνέπεια η ένταση του ρεύματος ανά φάση η οποία τώρα είναι κα ένταση της γραμμής τροφοδοσίας, θα είναι:

$$I_Y = \frac{U_{\Phi}}{Z} = \frac{U}{\sqrt{3} \times Z}$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει

$$I_Y = \frac{I_{\Delta}}{3}$$

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι κατά την εκκίνηση του κινητήρα σε αστέρα, το ρεύμα εκκινήσεως είναι τρεις φορές μικρότερο από το ρεύμα που θα απορροφούσε ο κινητήρας στην εκκίνηση σε ζεύξη του τυλίγματος σε τρίγωνο. Με τον ίδιο τρόπο μειώνεται και η ροπή εκκινήσεως του κινητήρα, επειδή αυτή είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσεως τροφοδοσίας. Η συνδεσμολογία φαίνεται στην εικόνα 21.



**Εικόνα 22: Εκκίνηση επαγωγικού τριφασικού κινητήρα με διακόπτη αστέρα-τριγώνου**



Συνοψίζοντας τα παραπάνω σε ότι αφορά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου έχουμε:

### **Πλεονεκτήματα**

- Μείωση του ρεύματος εκκινήσεως κατά 1/3
- Εκκίνηση μεγάλων κινητήρων

### **Μειονεκτήματα:**

- Μείωση της οπής εκκινήσεως στο 1/3
- Σωστή εκλογή του χρόνου μεταγωγής από τον αστέρα στο τρίγωνο

Για να κάνουμε χρήση του διακόπτη αστέρα – τριγώνου πρέπει ο κινητήρας να είναι κατασκευασμένος έτσι ώστε να μπορεί να εργάζεται κανονικά τροφοδοτούμενος με την τάση του δικτύου σε συνδεσμολογία τριγώνου. Για το τριφασικό δίκτυο της Δ.Ε.Η. του οποίου η πολική τάση είναι 380 V, για να κάνουμε χρήση του διακόπτη αστέρα – τριγώνου πρέπει ο κινητήρας να μπορεί να λειτουργεί σε συνδεσμολογία τριγώνου.

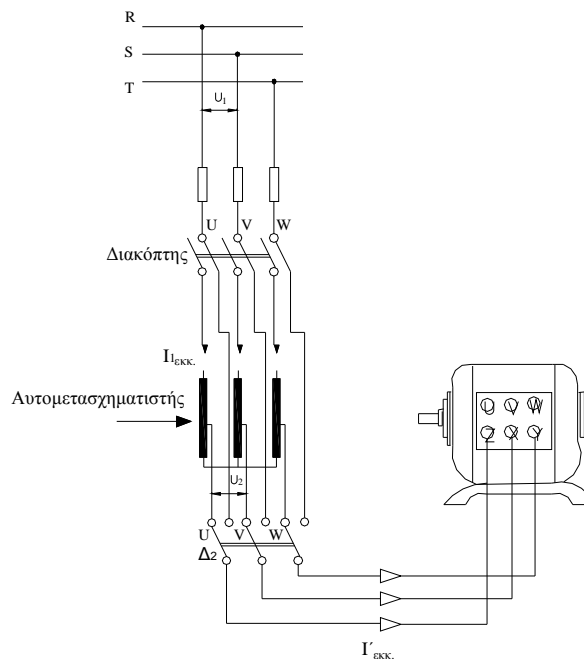
Εάν στην πινακίδα του κινητήρα αναγράφεται 220/380 V, αυτό σημαίνει ότι το τύλιγμα του κινητήρα μπορεί να συνδεθεί σε συνδεσμολογία αστέρα για πολική τάση 380 V και σε συνδεσμολογία τριγώνου για πολική τάση 220 V (το τρίγωνο συνδέεται πάντα στην μικρότερη τάση).

Για το δίκτυο της Δ.Ε.Η. οι κινητήρες που μπορούν να ξεκινήσουν με διακόπτη αστέρα – τριγώνου είναι αυτοί που στην πινακίδα τους αναγράφεται: **380 Δ 380/660 V.**



### 3.5. Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για μεγάλους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα οι οποίοι δεν μπορούν και δεν επιτρέπεται να ξεκινήσουν με διακόπτη αστέρα – τριγώνου επειδή είναι μεγάλης ισχύος. Η συνδεσμολογία φαίνεται στην εικόνα 23.



**Εικόνα 24: Εκκίνηση τριφασικού επαγωγικού κινητήρα με αυτομετασχηματιστή**

Κατά την εκκίνηση συνδέουμε τον κινητήρα με τη βοήθεια του διακόπτη διπλής ενέργειας  $\Delta_2$  με τις λήψεις u, v, w του αυτομετασχηματιστή. Στη συνέχεια κλείνουμε το διακόπτη  $\Delta_1$  και τροφοδοτείται ο αυτομετασχηματιστής. Έτσι ο κινητήρας ξεκινά με μειωμένη τάση η οποία εξαρτάται από την κατασκευή του αυτομετασχηματιστή.

Μετά την εκκίνηση του κινητήρα μεταθέτουμε τις επαφές του διακόπτη  $\Delta_2$  προς τα δεξιά και ο κινητήρας δέχεται όλη την τάση του δικτύου. Στην συνέχεια ανοίγουμε το διακόπτη  $\Delta_1$  και ο αυτομετασχηματιστής αποσυνδέεται από το δίκτυο.

Με τον τρόπο αυτό το ρεύμα εκκινήσεως του κινητήρα μειώνεται σύμφωνα με τη σχέση μεταφοράς του αυτομετασχηματιστή ενώ το ρεύμα που απορροφά ο αυτομετασχηματιστής από το δίκτυο μειώνεται στο  $\frac{1}{4}$ . Ανάλογα μειώνεται και η ροπή εκκινήσεως.

### Πλεονεκτήματα:

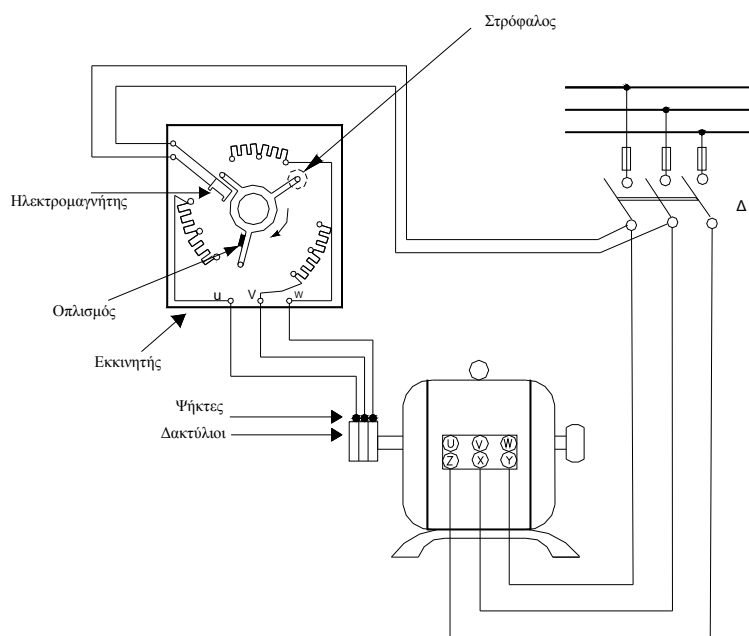
- Μείωση του ρεύματος εκκινήσεως
- Μικρές θερμικές απώλειες

### Μειονεκτήματα:

- Μεγάλο κόστος εγκαταστάσεως
- Μείωση της ροπής εκκινήσεως

## 3.6. Εκκίνηση δακτυλιοφόρων κινητήρων

Η απλούστερη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε πάρα πολύ στην βιομηχανία για την εκκίνηση των δακτυλιοφόρων κινητήρων είναι η σύνδεση στα δακτυλίδια του δρομέα ενός τριφασικού ωμικού εκκινητή. Η συνδεσμολογία φαίνεται στην εικόνα 24.



**Εικόνα 25: Εκκίνηση τριφασικού επαγωγικού κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα**

Σύμφωνα με την παραπάνω συνδεσμολογία, αφού κλείσει ο διακόπτης τροφοδοσίας Δ, το τύλιγμα του στάτη συνδέεται με το τριφασικό δίκτυο τροφοδοσίας. Ο στρόφαλος του εκκινητή βρίσκεται στη θέση ηρεμίας και κατά συνέπεια ο δρομέας είναι ανοικτός. Η τάση που επάγεται στο τριφασικό τύλιγμα του δρομέα δεν

εφαρμόζεται σε κανένα φορτίο και γι' αυτό δεν είναι δυνατό να δημιουργηθεί ροπή στρέψεως (δεν κυκλοφορεί ρεύμα στα τυλίγματα).

Μόλις γυρίσουμε το στρόφαλο στην αρχική θέση των αντιστάσεων, η τάση του δρομέα εφαρμόζεται στις αντιστάσεις του εκκινητή και αρχίζει η κυκλοφορία του ρεύματος στα τυλίγματα του δρομέα και αναπτύσσεται ροπή στρέψεως. Με τον τρόπο αυτό γίνεται έλεγχος του ρεύματος του δρομέα άρα και του ρεύματος του στάτη δηλαδή του ρεύματος εκκινήσεως. Στην τελευταία θέση οι αντιστάσεις βραχυκυκλώνονται και ο κινητήρας συμπεριφέρεται σαν κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Πολλοί κινητήρες διαθέτουν σύστημα ανυψώσεως των ψηκτρών και έτσι αυτές δεν φθείρονται. Σε μεγάλους κινητήρες ο εκκινητής βρίσκεται μέσα σε λάδι για να ψύχεται.

#### **Πλεονεκτήματα:**

- Μείωση του ρεύματος εκκινήσεως κατά βούληση
- Μεγάλη ροπή εκκινήσεως
- Βελτίωση του συντελεστή ισχύος κατά την εκκίνηση

#### **Μειονεκτήματα:**

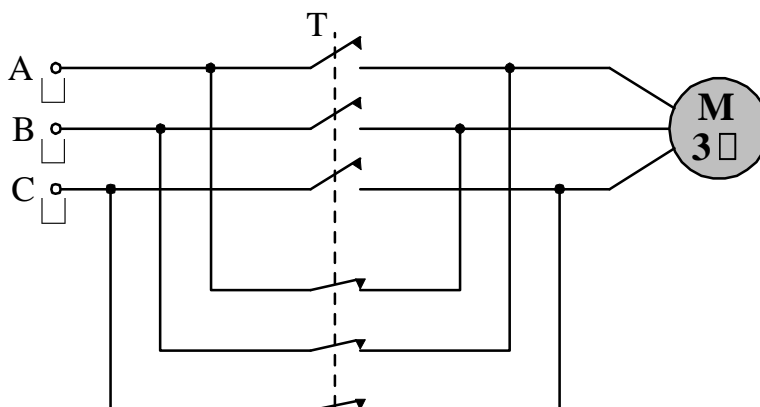
- Απαιτείται συντήρηση του συστήματος των ψηκτρών
- Η μέθοδος δεν συμφέρει σε κινητήρες μικρής ισχύος

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΠΕΔΗΣΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

#### 4.1. Δυναμική πέδηση

Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά αποτελεσματική και επιτυγχάνεται με την απότομη αλλαγή της φοράς περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του τυλίγματος του στάτη, αλλάζοντας τη διαδοχή δύο οποιονδήποτε από τις τρεις φάσεις της τάσης τροφοδοσίας.

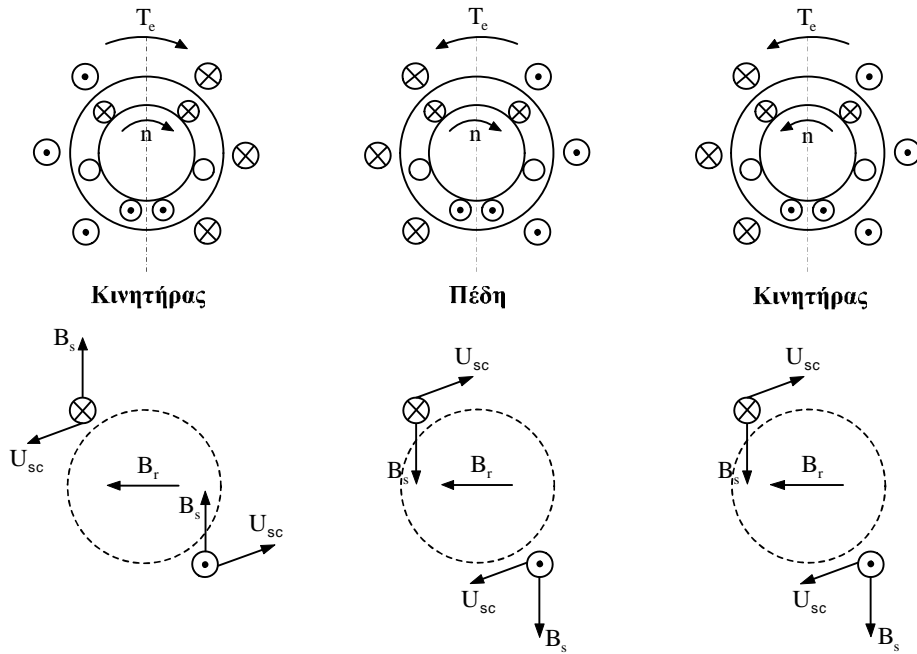


Εικόνα 26: Συνδεσμολογία δυναμικής πέδησης. Αλλαγή της διαδοχής των φάσεων

Ας υποθέσουμε ότι, αρχικά η ασύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας, με ολίσθηση " $s$ ", αριστερόστροφα. Τη στιγμή της εναλλαγής της φοράς περιστροφής του πεδίου, ο δρομέας, ο οποίος συνεχίζει και κινείται αριστερόστροφα, αποκτά ολίσθηση " $2-s$ ". Η αναπτυσσόμενη ηλεκτρική ροπή αλλάζει και αυτή πρόσημο, και μαζί με τη ροπή του φορτίου (εφόσον υπάρχει) προστίθεται αλγεβρικά, ώστε να επαναφέρει τον κινητήρα στη σωστή φορά περιστροφής (δηλαδή, τη φορά εκείνη που συμπίπτει με τη φορά περιστροφής του κύριου μαγνητικού πεδίου).

Η παραγόμενη μηχανική ισχύς, στην περιοχή λειτουργίας,  $2 < s < 1$ , είναι αρνητική. Οι απώλειες χαλκού του δρομέα είναι αρκετά υψηλές, καθόσον είναι ίσες με το άθροισμα της ισχύος διακένου και της μηχανικής ισχύος στον άξονα περιστροφής ( $P_g = -P_L + P_{cur}$ ).

Απαραίτητη προϋπόθεση για το σταμάτημα του κινητήρα, είναι η ύπαρξη ενός αισθητήριου ταχύτητας, έτσι ώστε μόλις οι στροφές φτάσουν κοντά στο μηδέν, μέσω κατάλληλου αυτοματισμού να αποσυνδεθεί ο κινητήρας από το δίκτυο. Σε αντίθετη περίπτωση, σύμφωνα με την εικόνα 26, θα έχουμε αλλαγή τεταρτημορίου και λειτουργία του κινητήρα με αντίθετη φορά περιστροφής.



**Εικόνα 27: Δυναμική πέδηση,**  
**(α) Επαγόμενες τάσεις, ρεύματα, ροπές**  
**(β). Χαρακτηριστική ροπή στροφών**

Υποθέτοντας τώρα ότι, ο κινητήρας οδηγεί ένα καθαρά αδρανειακό φορτίο (π.χ. σφόνδυλος) και αμελώντας τη σταθερά τριβών "B", έχουμε

$$T(t) = J \frac{dw_r(t)}{dt} = Jw_s \frac{d(1-s)}{dt} = -Jw_s \frac{ds}{dt} \quad (1.1)$$

Αντικαθιστώντας την ηλεκτρική ροπή

$$T = \frac{3}{w_s} \frac{sV_1^2 R_2}{e^2 (R_1^2 + X^2 + R_2^2 + 2sR_1R_2)}$$

και επιλύοντας ως προς dt, έχουμε

$$dt = - \frac{Jw_s^2}{3V_1^2 R_2} \frac{1}{s} \dot{s}^2 (R_1^2 + X^2) + 2sR_1R_2 + R_2^2 \dot{s} \quad (1.2)$$

Ο χρόνος πέδησης, προκύπτει από την ολοκλήρωση της (1.2), στο διάστημα,  $2-s_1 < s < 1$ , όπου  $s_1$  είναι η αρχική ολίσθηση του κινητήρα πριν την πέδηση. Πράγματι, αμέσως μετά την αλλαγή της διαδοχής των φάσεων (δηλαδή την αλλαγή της φοράς του μαγνητικού πεδίου), η ολίσθηση του κινητήρα είναι

$$s = \frac{n_s - (-n_r)}{n_s} = 1 + \frac{n_r}{n_s} = 2 - s_1 \quad (1.3)$$

Επανερχόμενοι, μετά από λίγες πράξεις, καταλήγουμε στην εξής έκφραση για το χρόνο πέδησης.

$$\Delta t = \frac{Jw_s^2}{3V_1^2 R_2} \frac{\dot{s}}{s} R_2^2 \ln(2 - s_1) + 2R_1R_2(1 - s_1) + \frac{1}{2}(R_1^2 + X^2)(3 - 4s_1 + s_1^2) \dot{s} \quad (1.4)$$

Με τον ίδιο συλλογισμό, ο απαιτούμενος χρόνος για μια πλήρη αντιστροφή της ταχύτητας περιστροφής (από  $+n_s$  σε  $-n_s$ ), δίνεται

$$\Delta t = \frac{Jw_s^2}{3V_1^2 R_2} \frac{\dot{s}}{s} (1 - s_1^2) \frac{R_1^2 + X^2}{2} \dot{s} + 2R_1R_2(1 - s_1) + R_2^2 \ln \frac{1}{s_1} \dot{s}$$

Από την (1.4) είναι προφανές ότι, ο χρόνος πέδησης είναι συνάρτηση της αντίστασης του δρομέα. Επομένως, για ασύγχρονους κινητήρες τυλιγμένου δρομέα, υπάρχει κάποια συγκεκριμένη τιμή της αντίστασης  $R_2$ , για την οποία ο χρόνος πέδησης ελαχιστοποιείται. Παραγωγίζοντας λοιπόν την (1.4) ως προς  $R_2$ , έχουμε

$$\frac{d\Delta t}{dR_2} = 0 \text{ @ } [2R_2 \ln(2 - s_1) + 2R_1(1 - s_1)]R_2 -$$

$$- R_2^2 \ln(2 - s_1) + 2R_1R_2(1 - s_1) + \frac{1}{2}(R_2^2 + X^2)(3 - 4s_1 + s_1^2) = 0$$

και τελικά καταλήγουμε στην έκφραση



$$R_2(D_{\min}) = \sqrt{\frac{(R_1^2 + X^2)(3 - 4s_1 + s_1^2)}{2 \ln(2 - s_1)}} \quad (1.5)$$

Οι απώλειες χαλκού του δρομέα, στη γενική περίπτωση, δίνονται από τη σχέση

$$P_{\text{Cur}} = 3I_2^2 R_2 = sP_g = sw_s T = sw_s J \frac{dw_r}{dt} \textcircled{R} 3I_2^2 R_2 = -Jw_s^2 \frac{ds}{dt} \quad (1.6)$$

Επομένως, η ενέργεια που καταναλίσκεται στην αντίσταση του δρομέα κατά τη διάρκεια της πέδησης, είναι

$$E(R_2) = \int_0^D 3I_2^2 R_2 dt = - \int_{s=2}^{s=1} Jw_s^2 s ds = Jw_s^2 \frac{s^2}{2} \Big|_1^2 = 3 \frac{Jw_s^2}{2} \quad (1.7)$$

Παρατηρούμε ότι, η καταναλισκόμενη ενέργεια, είναι ίση με το τριπλάσιο της κινητικής ενέργειας των στρεφόμενων μαζών του συστήματος.

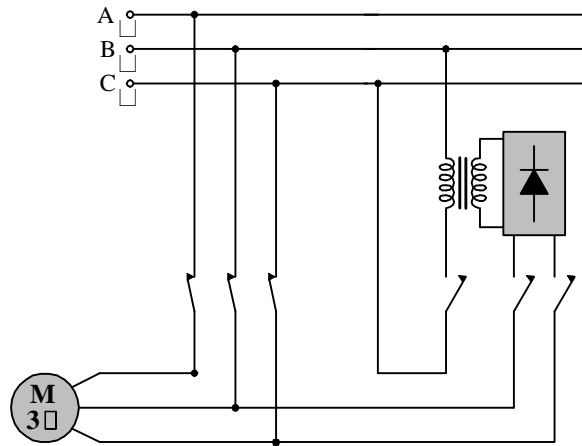
Αντίστοιχα, με την αλλαγή του ορίου της ολοκλήρωσης στην προηγούμενη σχέση (από  $s = 2$  έως  $s = 0$ ), υπολογίζουμε την καταναλισκόμενη ενέργεια των τυλιγμάτων του δρομέα κατά τη διάρκεια μιας πλήρους αντιστροφής. Εύκολα βρίσκουμε ότι

$$E(s = 2 \textcircled{R} s = 0) = 4 \frac{Jw_s^2}{2} \quad (1.8)$$

Προφανώς, η διαφορά των δύο ενεργειών ( $Jw_s^2/2$ ), είναι η καταναλισκόμενη ενέργεια των τυλιγμάτων του δρομέα κατά τη φάση της εκκίνησης ( $s = 1, s = 0$ ) και η οποία ισούται με την κινητική ενέργεια των στρεφόμενων μαζών του συστήματος.

## 4.2. Δυναμική πέδηση με συνεχές ρεύμα

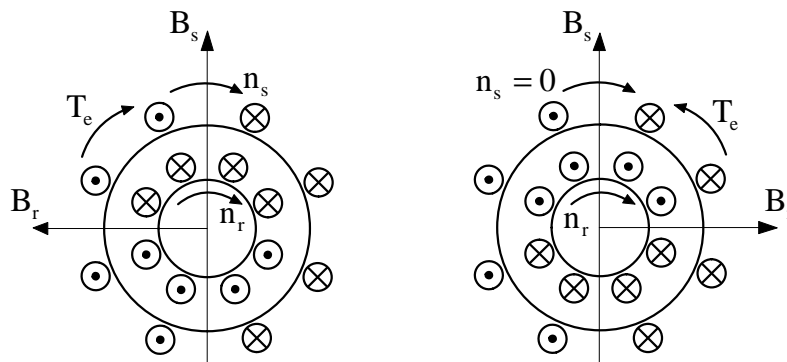
Στην περίπτωση της πέδησης με συνεχές ρεύμα (εικόνα 27), το τύλιγμα του στάτη αποσυνδέεται από το δίκτυο του Ε.Ρ. και τροφοδοτείται με Σ.Ρ., μέσω κατάλληλης ανορθωτικής διάταξης.



**Εικόνα 28: Διάταξη πέδησης τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με Συνεχούς Ρεύματος**

Σύμφωνα λοιπόν με την εικόνα 27, κατά την ενεργοποίηση του μεταγωγέα (ρελαί) – διαδικασία πέδησης – οι δύο φάσεις του τυλίγματος του στάτη, συνδέονται σε σειρά και διεγείρονται με συνεχές ρεύμα.

Η κατάσταση λειτουργίας, είναι ανάλογη με εκείνη της σύγχρονης γεννήτριας, με ανεστραμμένα χωροταξικά τα τυλίγματα διέγερσης και τυμπάνου. Δηλαδή, στην περίπτωση αυτή, το τύλιγμα διέγερσης βρίσκεται στο σταθερό μέρος, ενώ το τύλιγμα του δρομέα αποτελεί το τύλιγμα τυμπάνου της γεννήτριας.

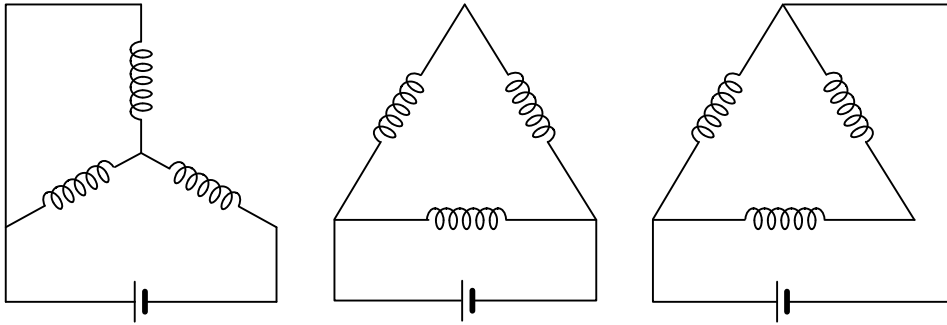


**Εικόνα 29: Επαγόμενες τάσεις και ρεύματα, πριν και μετά την πέδηση**

Προφανώς, η κινητική ενέργεια των στρεφόμενων μαζών του συστήματος, μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια στο ωμικό μέρος του τυλίγματος του δρομέα.

Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής σε σχέση με την προηγούμενη είναι ότι, μετά το μηδενισμό των στροφών δεν υπάρχει ο κίνδυνος της επανεκκίνησης. Δηλαδή, η μηχανή σταματάει ολοκληρωτικά.

Οι διάφορες συνδεσμολογίες του στάτη, που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη μέθοδο, είναι



**Εικόνα 30: Δυναμική πέδηση με Σ.Ρ. Συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων του στάτη**

### 4.3. Πέδηση με αλλαγή του αριθμού των πόλων

Η μέθοδος αυτή, αφορά αποκλειστικά και μόνο στους κινητήρες στους οποίους υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής του αριθμού των πόλων. Π.χ. διπλασιάζοντας τον αριθμό των πόλων, η ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου υποδιπλασιάζεται, με αποτέλεσμα στην περιοχή στροφών,  $n_2 \ll n_1$  (όπου  $n_2 = n_1 / 2$ ), η μηχανή να λειτουργεί ως γεννήτρια επιστρέφοντας ισχύ στο δίκτυο. Η ολίσθηση, πριν και μετά την αλλαγή των πόλων, είναι

$$s_1 = \frac{n_{s1} - n_1}{n_{s1}} = 1 - \frac{n_1}{n_{s1}} \quad (1.9)$$

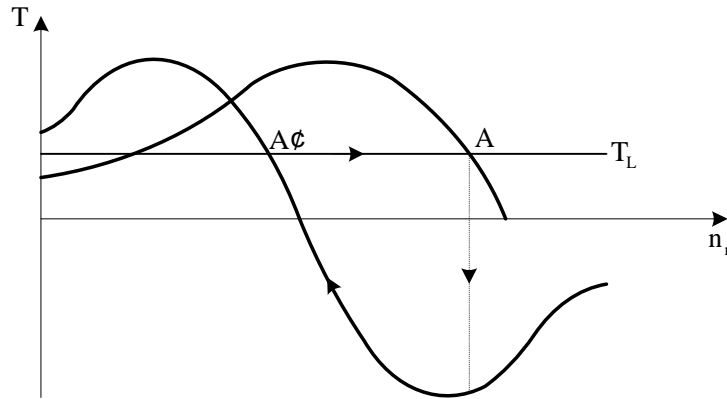
Και

$$s_2 = \frac{\frac{n_{s1}}{2} - n_1}{\frac{n_{s1}}{2}} = 1 - \frac{2n_1}{n_{s1}} = s_1 - \frac{n_1}{n_{s1}} = \frac{\frac{n_1}{2} - n_1}{\frac{n_{s1}}{2}} = s_1 \frac{\frac{n_1}{2} - n_1}{\frac{n_1}{2}} \quad (1.10)$$

Π.χ. έστω  $n_{s1} = 1500 \text{ rpm}$  και  $n_1 = 1460 \text{ rpm}$ , τότε

$$s_1 = 0.0267 \quad \text{ή} \quad 2.67\% \quad \text{και} \quad s_2 = -0.946 \quad \text{ή} \quad -94.6\%$$

Οι χαρακτηριστικές ροπής-στροφών κατά τη διάρκεια της αλλαγής του αριθμού των πόλων, για σταθερό μηχανικό φορτίο, παρουσιάζονται στην εικόνα 30.



**Εικόνα 31: Αναγεννητική πέδηση, Σταθερό μηχανικό φορτίο  
Χαρακτηριστικές ροπής-στροφών**

Σύμφωνα με την εικόνα 30, κάτω από την επίδραση της δημιουργούμενης αντιρροπής (στην οποία προστίθεται και η ροπή του φορτίου), έχουμε σταδιακή μείωση των στροφών. Μόλις οι στροφές ελαττωθούν κάτω από το νέο σύγχρονο αριθμό στροφών, η ηλεκτρική ροπή αλλάζει πρόσημο, με αποτέλεσμα η μηχανή να λειτουργεί ξανά ως κινητήρας.

Για την πλήρη πέδηση του κινητήρα, θα πρέπει η παραπάνω μέθοδος να συνδυαστεί στο διάστημα,  $0 < n_r < n_{s2}$  και με άλλη βοηθητική διάταξη πέδησης (μηχανική ή ηλεκτρική).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **Η ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ**

#### **5.1. Στοιχεία κινητήρα**

Ονομαστική Ισχύς: 90kW/125HP

Ονομαστική ταχύτητα: 1483στρ./λεπτό

Ολίσθηση: 1.133%

Πόλοι: 4

Τάση τροφοδοσίας: 400V

Συνδεσμολογία τυλιγμάτων: Τρίγωνο

Συχνότητα: 50Hz

Συντελεστής Ισχύος: 0.90

Βαθμός απόδοσης: 0,9468

Αντίσταση Στάτη: 0.071Ω

Ονομαστική Ροπή: 579.71N.m

Ροπή Εκκίνησης:  $2.49 \times 579.71 = 1443.48 \text{N.m}$

Ροπή Ανατροπής:  $2.93 \times 579.71 = 1698.5 \text{N.m}$

## 5.2. Διαστασιολόγηση του κινητήρα

Η εσωτερική διάμετρος του στάτη  $D_{IS}$  δίνεται από τη σχέση:

$$D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2p_i}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{p_i}{f} \cdot \frac{S_{gap}}{C_0}} \quad (1)$$

Στην παραπάνω σχέση  $p_i$  είναι τα ζεύγη πόλων,  $f$  η συχνότητα λειτουργίας,  $S_{gap}$  η φαινόμενη ισχύς διακένου,  $\lambda$  ο λόγος του μήκους του πυρήνα προς το πολικό βήμα και  $C_0$  μια σταθερά.

Η ισχύς διακένου υπολογίζεται από την σχέση:

$$S_{gap} = \frac{K_E \cdot P_n}{n_N \cdot \cos\varphi}$$

Στην παραπάνω σχέση  $P_n$  είναι η ονομαστική ισχύς,  $n_N$  ο βαθμός απόδοσης και  $\cos\varphi$  ο συντελεστής ισχύος.

Όπου:

$$K_E = \frac{E_A}{V_\varphi} \approx 0.98 - 0.005 \cdot p_i = 0.98 - 0.005 \cdot 2 = 0.97$$

Οπότε

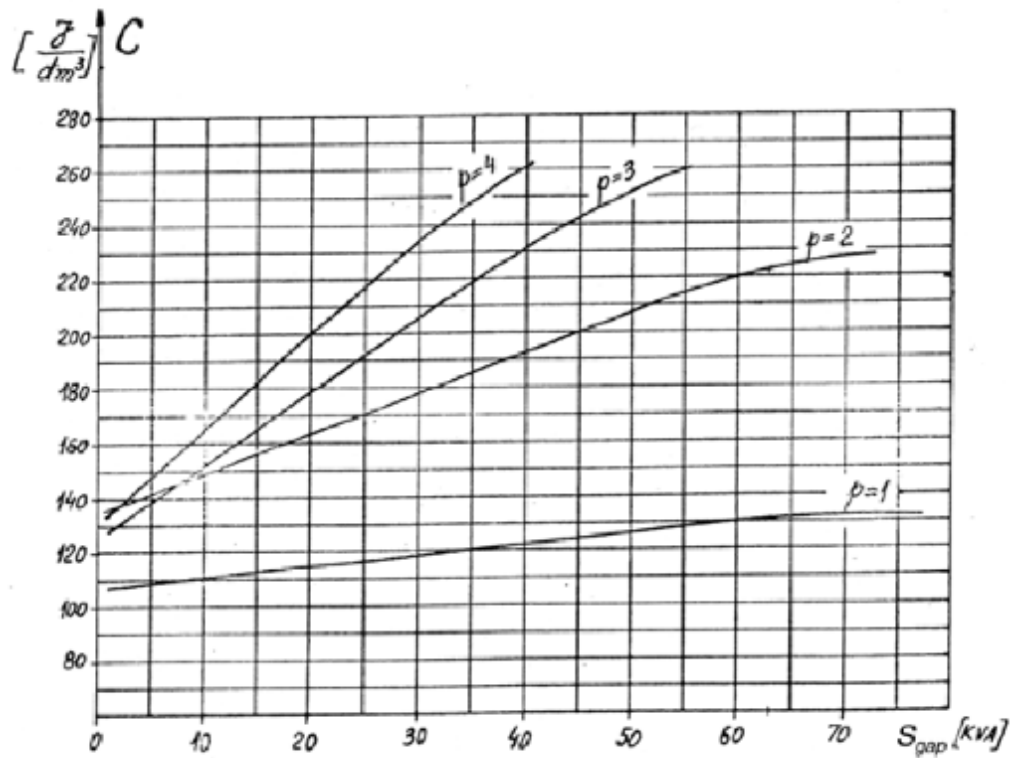
$$S_{gap} = \frac{K_E \cdot P_n}{n_N \cdot \cos\varphi} = \frac{0.97 \cdot 90000}{0.9468 \cdot 0.9} = 102450.36VA$$

Ο λόγος του μήκους του πυρήνα προς το πολικό βήμα, είναι ανάλογο με τον αριθμό των πόλων και δίνεται από τον παρακάτω πίνακα

$2p_i$	2	4	6	8
$\lambda$	0.6 – 1.0	1.2 – 1.8	1.6 – 2.2	2 – 3

Στην περίπτωση μας επιλέγουμε  $\lambda=1.5$

Το  $C_0$  ονομάζεται σταθερά του Esson και μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά. Εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως οι σπείρες ανά φάση, η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο του κινητήρα, η πυκνότητα του ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη κλπ. Δύναται όμως να υπολογιστεί και από την παρακάτω γραφική παράσταση η οποία ισχύει για μικρής ισχύος κινητήρες:



**Διάγραμμα 1: Διάγραμμα υπολογισμού της σταθεράς Esson**

Από το παραπάνω διάγραμμα για  $p=2$  η καμπύλη σταμάτα στα 73KVA, οπότε παίρνουμε μία προσεγγιστική τιμή προεκτείνοντας νοητά την καμπύλη. Έχουμε

$$C_0 = 230 \times 10^3 \text{ J/m}^3$$

Αντικαθιστώντας όλα τα παραπάνω στην σχέση (1) υπολογίζουμε:

$$D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2p_i}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{p_i}{f} \cdot \frac{S_{gap}}{C_0}} \Rightarrow D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 2}{\pi \cdot 1.5} \cdot \frac{2}{50} \cdot \frac{102450.36}{230 \cdot 10^3}} = 0.247m = 24.7cm$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε το μήκος του πυρήνα. Θα χρησιμοποιήσουμε την σχέση:

$$\lambda = \frac{L}{\tau} \rightarrow L = \lambda \cdot \tau = 1.5 \cdot 19.39 \rightarrow L = 29.085cm = 0.29085m$$

όπου  $\tau$  είναι το πολικό βήμα, δηλαδή η απόσταση ανάμεσα σε δυο διαδοχικούς πόλους (polepitch):

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{IS}}{2 \cdot p_i} = \frac{3.14 \cdot 0.247m}{2 \cdot 2} = 0.1939m = 19.39cm$$

Η εξωτερική διάμετρος του κινητήρα υπολογίζεται αρχικά από το λόγο  $D_{is}/D_{out}$

$2p_i$	2	4	6	8
$\frac{D_{is}}{D_{out}}$	0.54 0.58	0.61 0.63	0.68 0.71	0.72 0.74

Για  $2p_i=4$ , ο λόγος  $D_{is}/D_{out}$  παίρνει τις τιμές από 0,61 έως 0,63. Λαμβάνουμε την ενδιάμεση τιμή 0.62. Άρα η εξωτερική διάμετρος πυρήνα είναι:

$$\frac{D_{is}}{D_{out}} = 0.62 \rightarrow D_{out} = \frac{D_{is}}{0.62} = \frac{24.7}{0.62} = 39.84 \text{ cm}$$

Αυτό που απομένει είναι να υπολογίσουμε το διάκενο μεταξύ του δρομέα και του στάτη. Το διάκενο υπολογίζεται από την σχέση:

$$g = (0.1 + 0.012 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} \text{ m} = (0.1 + 0.012 \cdot \sqrt[3]{90000}) \cdot 10^{-3} \\ = 0.6377 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι τα διάκενα είναι συγκεκριμένα, π.χ. 0,35mm, 0,4mm, 0,45mm, 0,5mm κλπ. Εμείς θα διαλέξουμε το διάκενο ίσο με 0,65mm. Ένα πολύ μικρό διάκενο προκαλεί μαγνητικά πεδία με υψηλότερες αρμονικές και μεγαλύτερες απώλειες, ενώ ένα μεγάλο διάκενο μειώνει τον συντελεστή ισχύος και την απόδοση του κινητήρα.  $g=0,65\text{mm}$



### 5.3. Στάτης

#### 5.3.1. Τυλίγματα στάτη

Η μελέτη των τυλιγμάτων του στάτη ξεκινά με την επιλογή του αριθμού των αυλακιών, μέσα στα οποία θα μπουν τα τυλίγματα. Για να υπολογίσουμε τον συνολικό αριθμό των αυλακιών χρησιμοποιούμε την σχέση:

$$N_s = 2 \cdot p_i \cdot q \cdot m$$

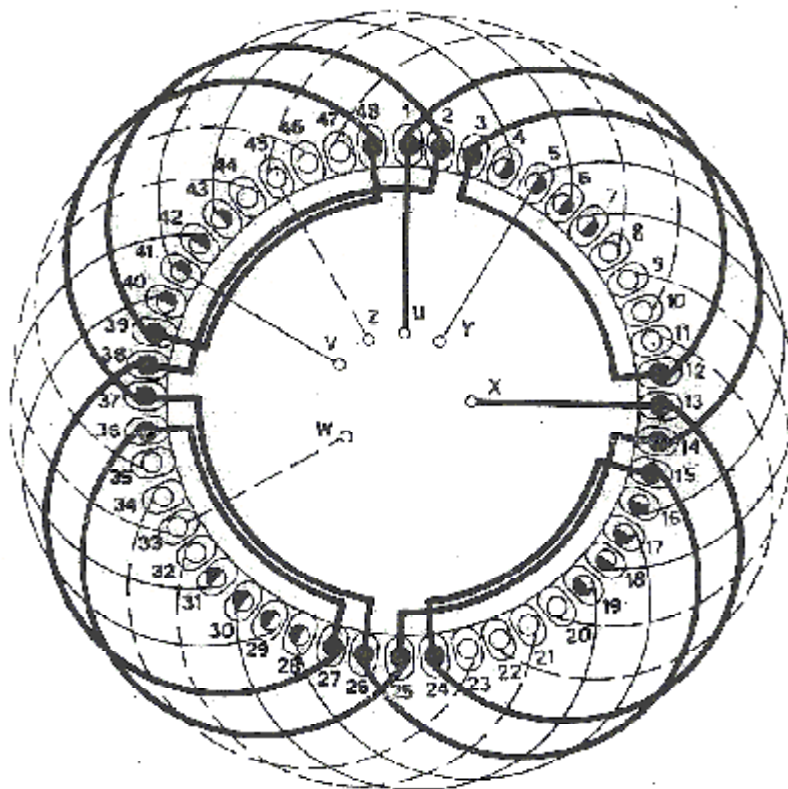
όπου  $p_i$  τα ζεύγη πόλων,  $m$  ο αριθμός των φάσεων και  $q$  ο αριθμός των αυλακιών ανά φάση και πόλο. Επιλέγουμε τρία αυλάκια ανά φάση και πόλο άρα ( $q=3$ ):

$$N_s = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 = 36 \text{ αυλάκια}$$

Το πολικό βήμα θα είναι:

$$y_\pi = \frac{36}{2 \cdot 2} = 9 \text{ αυλάκια}$$

Θα φτιαχτεί ένα τυλίγμα με μια στρώση (1 μάτσο ανά αυλάκι), με δυο πραγματικούς και δυο φανταστικούς πόλους το οποίο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα



Εικόνα 32: 4 πραγματικοί και 4 φανταστικοί πόλοι, 28 αυλάκια

Ο συντελεστής τυλίγματος δίνεται από την σχέση:

$$K_{\tau} = \frac{\sin \frac{q \cdot \alpha}{2}}{q \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \cdot 20}{2}}{3 \cdot \sin \frac{20}{2}} = 0.959$$

όπου  $\alpha$  είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών αυλακιών σε ηλεκτρικές μοίρες, οι οποίες δίνονται από την σχέση:

$$\alpha = p_i \cdot \alpha_r$$

όπου  $\alpha_r$  η γεωμετρική γωνία ( $360^\circ / 36$  αυλάκια =  $10^\circ$  στην περίπτωση μας).

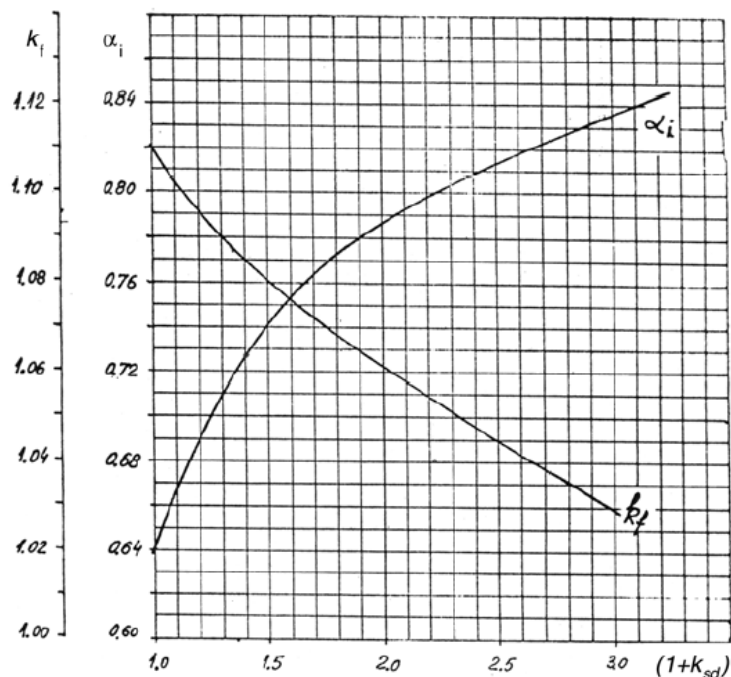
Άρα

$$\alpha = p_i \cdot \alpha_r = 2 \cdot 10 = 20$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τον αριθμό σπειρών ανά φάση. Ο υπολογισμός στηρίζεται στην μαγνητική ροή που περνά από το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα και δίνεται από την σχέση:

$$\varphi = a_i \cdot \tau \cdot L \cdot B_g$$

όπου  $\varphi$  η μαγνητική ροή,  $\tau$  το πολικό βήμα σε μέτρα,  $L$  το μήκος του πυρήνα άρα και του διακένου και  $B_g$  η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο. Η σταθερά  $a_i$  ονομάζεται flux density shape factor και προσδιορίζεται από την παρακάτω γραφική παράσταση:



Διάγραμμα 2: Προσδιορισμός σταθεράς  $a_i$

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, η σταθερά εξαρτάται από το  $1+K_{ST}$  που ονομάζεται tooth saturation factor. Υποθέτουμε ότι η παραπάνω σταθερά παίρνει τιμή ίση με 1,5 άρα από την γραφική παράσταση το  $a_i=0,74$ . Αναλυτικός υπολογισμός του  $1+K_{ST}$  θα γίνει αργότερα σε άλλη φάση της μελέτης.

Για μηχανές με τέσσερις πόλους συνίσταται η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο να είναι μεταξύ 0,65-0,78T.

$$B_g = (0.5 - 0.75)T \text{ for } 2p_1 = 2$$

$$B_g = (0.65 - 0.78)T \text{ for } 2p_1 = 4$$

$$B_g = (0.7 - 0.82)T \text{ for } 2p_1 = 6$$

$$B_g = (0.75 - 0.85)T \text{ for } 2p_1 = 8$$

Εμείς θα διαλέξουμε μια μαγνητική επαγωγή ίση με 0,75T. Άρα, η μαγνητική ροή στο διάκενο θα είναι ίση με:

$$\varphi = a_i \cdot \tau \cdot L \cdot B_g = 0.74 \cdot 0.1939 \cdot 0.29085 \cdot 0.75 = 31.3 \cdot 10^{-3} Wb$$

Στην συνέχεια, υπολογίζουμε τον αριθμό σπειρών ανά φάση:

$$W_i = \frac{K_E \cdot V_\varphi}{4 \cdot K_f \cdot K_\tau \cdot f \cdot \varphi}$$

όπου η σταθερά  $K_f$  ονομάζεται form factor και εξαρτάται από τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του υλικού του πυρήνα και παίρνει τιμές  $1,02 < K_f < 1,11$ . Όπως και με την σταθερά  $a_i$  την βρίσκουμε από την παραπάνω γραφική. Στην εν λόγω περίπτωση παίρνει τιμή  $K_f=1,08$ .

Άρα

$$W_i = \frac{K_E \cdot V_\varphi}{4 \cdot K_f \cdot K_\tau \cdot f \cdot \varphi} = \frac{0.97 \cdot 400}{4 \cdot 1.08 \cdot 0.959 \cdot 50 \cdot 31.3 \cdot 10^{-3}} \approx 60 \text{ σπειρες} / \text{φάση}$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τον αριθμό αγωγών ανά αυλάκι:

$$n_s = \frac{a_i \cdot W_i}{p_1 \cdot q} = \frac{4 \cdot 60}{2 \cdot 3} = 40 \text{ αγωγοί} / \text{αυλάκι}$$

Ο συντελεστής  $a_i$  εκφράζει τον αριθμό των παράλληλων αγωγών που στην περίπτωσή μας είναι 4. Στη συνέχεια, θα υπολογίσουμε την διατομή των αγωγών που θα χρησιμοποιήσουμε στον στάτη.

Το ονομαστικό ρεύμα (φασικό, ο κινητήρας είναι συνδεδεσμένος σε τρίγωνο) είναι ίσο με:

$$I_{ov} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_{\pi} \cdot \cos\varphi \cdot \eta \cdot \sqrt{3}} = \frac{90000W}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.90 \cdot 0.9468 \cdot \sqrt{3}} = 88A$$

Για να υπολογίσουμε την διατομή των αγωγών, θα επιλέξουμε μια πυκνότητα ρεύματος. Για κινητήρες τεσσάρων πόλων συνίσταται η πυκνότητα ρεύματος να βρίσκεται μεταξύ:

$$J_{cos} = (4 \dots 7) A/mm^2$$

$$J_{cos} = (4 \dots 7) A/mm^2 \text{ for } 2p_1 = 2, 4,$$

$$J_{cos} = (5 \dots 8) A/mm^2 \text{ for } 2p_1 = 6, 8$$

Όσο μεγαλώνει η πυκνότητα του ρεύματος, μειώνεται η διατομή των αγωγών αλλά μεγαλώνουν οι απώλειες χαλκού. Επιλέγουμε μια πυκνότητα ρεύματος ίση με  $5 A/mm^2$ , για να μην έχουμε μεγάλες απώλειες και υπολογίζουμε την διατομή:

$$A_{cu} = \frac{I_{ov}}{J_{cos}} = \frac{88}{5 \cdot 4} = 4.4 mm^2$$

Με διάμετρο ίση με:

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{cu}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4.4}{\pi}} = 2.3675 mm$$

Γενικά αν η διάμετρος του αγωγού σε μικρούς κινητήρες είναι μεγαλύτερη από 1,3 ( $d_{cu} > 1,3$ ), θα πρέπει να αυξηθεί ο αριθμός των παράλληλων αγωγών. Επομένως θα χρησιμοποιηθούν 3 παράλληλοι αγωγοί για να επιτευχθεί αποδεκτή τιμή.

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{co}}{a_p \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4.4}{3 \cdot \pi}} = 1.36688 \approx 1.4 mm$$

Μετά θα πρέπει να επιλεχτεί διατομή αγωγού από τον παρακάτω πίνακα. Η διατομή είναι ίση με 1.4mm

**Πίνακας 1: Διατομές τυποποιημένες αγωγών**

Rated diameter [mm]	Insulated diameter [mm]
0.3	0.327
0.32	0.348
0.33	0.359
0.35	0.3795
0.38	0.4105
0.40	0.4315
0.42	0.4625
0.45	0.4835
0.48	0.515
0.50	0.536
0.53	0.567
0.55	0.5875
0.58	0.6185
0.60	0.639
0.63	0.6705
0.65	0.691
0.67	0.7145
0.70	0.742
0.71	0.7525
0.75	0.749
0.80	0.8455
0.85	0.897
0.90	0.948
0.95	1.0
1.0	1.051
1.05	1.102
1.10	1.153
1.12	1.173
1.15	1.2035
1.18	1.2345
1.20	1.305
1.25	1.305
1.30	1.356
1.32	1.3765
1.35	1.407
1.40	1.4575
1.45	1.508
1.5	1.559

### 5.3.2. Υπολογισμός αυλακιών του στάτη

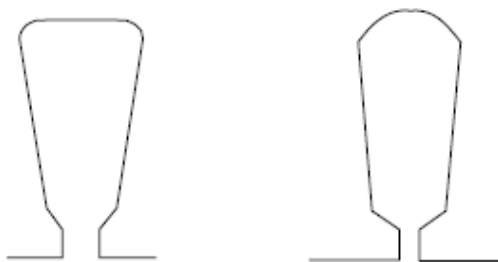
Από την στιγμή που γνωρίζουμε την διατομή των αγωγών και τον αριθμό τους, μπορούμε να υπολογίσουμε τη απαιτούμενη διατομή των αυλακιών του στάτη από την σχέση:

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_p \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}}$$

Όπου  $K_{fill}$  είναι μια σταθερά (fillfactor), η οποία εξαρτάται από το πάχος της μόνωσης που χρησιμοποιούμε και παίρνει τιμές από 0,4 έως 0,44. Επιλέγουμε τιμή 0,44 οπότε η διατομή των αυλακιών θα είναι ίση με:

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_i \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}} = \frac{\pi \cdot 1.4^2 \cdot 4 \cdot 40}{4 \cdot 0.44} = 559.49 \text{mm}^2$$

Η μορφή των αυλακιών του στάτη έχει συνήθως μία από τις παρακάτω μορφές:



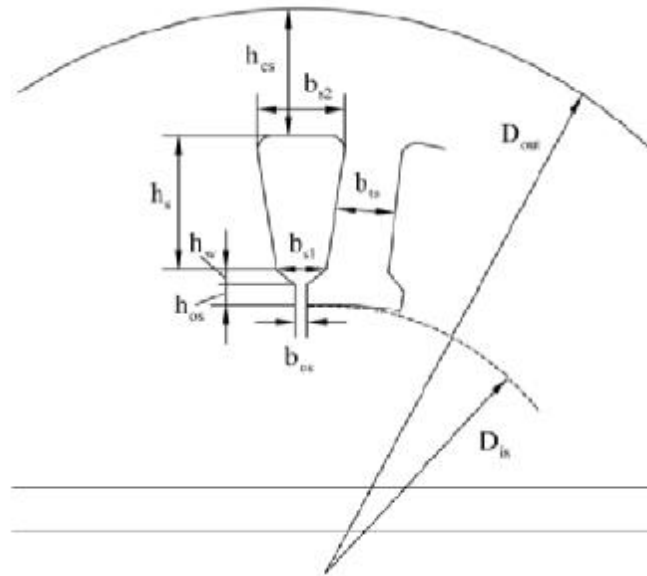
**Εικόνα 33: Τυπικές μορφές αυλακιών στάτη**

Η επόμενη εικόνα απεικονίζει αναλυτικά τις διαστάσεις που θα πρέπει να υπολογιστούν. Κάποιες από τις διαστάσεις αυτές υπολογίζονται εμπειρικά. Πιο συγκεκριμένα:

$b_{os}=2\text{-}3\text{mm}$ , επιλέγουμε 2.5mm.

$h_{os}=0.5\text{-}1\text{mm}$ , επιλέγουμε 0.5mm.

$h_w=1\text{-}4\text{mm}$ , επιλέγουμε 1mm.



**Εικόνα 34: Τυπικές διαστάσεις του στάτη**

Από τον πίνακα που ακολουθεί, παίρνουμε συνηθισμένες (τυποποιημένες) τιμές της καμπύλης μαγνήτισης για σιδηρομαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές μηχανές

**Πίνακας 2: Τυποποιημένες Τιμές της καμπύλης μαγνήτισης για σιδηρομαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές μηχανές**

B[T]	H[A/m]	B[T]	H[A/m]
0.05	22.8	1.05	237
0.1	35	1.1	273
0.15	45	1.15	310
0.2	49	1.2	356
0.25	57	1.25	417
0.3	65	1.3	482
0.35	70	1.35	585
0.4	76	1.4	760
0.45	83	1.45	1050
0.5	90	1.5	1340
0.55	98	1.55	1760
0.6	106	1.6	2460
0.65	115	1.65	3460
0.7	124	1.7	4800
0.75	135	1.75	6160
0.8	148	1.8	8270
0.85	162	1.85	11170
0.9	177	1.9	15220
0.95	198	1.95	22000
1.0	220	2.0	34000

$b_{os}=2-3\text{mm}$ , επιλέγουμε  $2.5\text{mm}$ .

$h_{os}=0.5-1\text{mm}$ , επιλέγουμε  $0.5\text{mm}$ .

$h_w=1-4\text{mm}$ , επιλέγουμε  $1\text{mm}$ .

Εάν υποθέσουμε ότι όλη η μαγνητική ροή περνά μέσα από το «δόντι» του στάτη, τότε ισχύει η σχέση:

$$B_g \cdot \tau_s \cdot L = B_{ts} \cdot b_{ts} \cdot L \cdot K_{Fe}$$

Αριστερά της σχέσης είναι η μαγνητική ροή στο διάκενο και δεξιά η μαγνητική ροή στο «δόντι» του αυλακιού. Ο  $K_{Fe}$  είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα της μόνωσης μεταξύ των μεταλλικών φύλλων από τα οποία αποτελείται ο στάτης και  $B_{ts}$  είναι η μαγνητική επαγωγή στον στάτη, η οποία συνίσταται να παίρνει τιμές μεταξύ  $1,5\text{T}$  έως  $1,65\text{T}$ . Η μαγνητική επαγωγή είναι φυσικά μεγαλύτερη σε σχέση με την μαγνητική επαγωγή του διακένου λόγω της παρουσίας του σιδηρομαγνητικού υλικού.

Άρα:

$$b_{ts} = \frac{B_g \cdot \tau_s}{B_{ts} \cdot K_{Fe}} = \frac{0.6 \cdot 21.54 \cdot 10^{-3}}{1.65 \cdot 0.96} = 8.159 \cdot 10^{-3} \text{m}$$

$$\tau_s = \frac{\tau}{3 \cdot q} = \frac{0.1939}{3 \cdot 3} = 21.54 \cdot 10^{-3} \text{m}$$

Θα πρέπει να τονιστεί ότι το πλάτος του δοντιού δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο από  $3.5\text{mm}$  για κατασκευαστικούς λόγους.

Από την γεωμετρία του αυλακιού προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} b_{s1} &= \frac{\pi \cdot (D_{is} + 2h_{os} + 2h_w)}{N_s} - b_{ts} \\ &= \frac{\pi \cdot (247 + 2 \cdot 0.5 + 2 \cdot 1) \cdot 10^{-3}}{36} - 8.839 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow b_{s1} = 12.97 \cdot 10^{-3} \text{m} = 13.65 \text{mm}$$



Επίσης:

$$b_{s2} = \sqrt{4 \cdot A_{su} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_s}\right) + b_{s1}^2} = \sqrt{4 \cdot 559.49 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{36}\right) + 13.65^2} \text{mm} \\ = 19.5478 \text{mm}$$

$$A_{su} = h_s \cdot \frac{(b_{s1} + b_{s2})}{2} \rightarrow h_s = \frac{2 \cdot A_{su}}{(b_{s1} + b_{s2})} \rightarrow h_s = \frac{2 \cdot 559.49}{(13.65 + 19.5478)} = 33.7 \text{mm}$$

$$F_{mg} = K_c \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_o} = 1.2 \cdot 0.65 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0.6}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 372.6 \text{At}$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη στον στάτη  $F_{mts}$ , δίνεται από την σχέση:

$$F_{mts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w)$$

όπου  $H_{ts}$  είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου στον στάτη.

Επιλέγοντας  $B_{ts}=1,6\text{T}$  (συνήθως παίρνει τιμές μεταξύ  $1,5\text{T} - 1,65\text{T}$ ) προκύπτει ότι  $H_{ts}=2460\text{At}$ .

Άρα:

$$F_{mts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w) = 2460 \cdot (33.7 + 0.5 + 1) \cdot 10^{-3} = 86.592 \text{At}$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη στον δρομέα υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_{mtr} = K_{st} \cdot F_{mg} - F_{mts} = 0.5 \cdot 372.6 - 86.592 = 99.708 \text{A}$$

Οι τιμές των  $F_{mts}$  και  $F_{mtr}$  πρέπει να είναι κοντά.

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε το  $h_{cs}$ . Αυτό υπολογίζεται από την σχέση:

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{IS} + 2 \cdot (h_{os} + h_w + h_s))}{2} = \frac{398.4 - (247 + 2 \cdot (0.5 + 1 + 29.8))}{2} \\ \rightarrow h_{cs} = \frac{398.4 - 309.6}{2} \rightarrow h_{cs} = 44.4 \text{mm}$$

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε την μαγνητική επαγωγή στον στάτη και συγκεκριμένα στον χώρο μεταξύ των αυλακιών και της εξωτερικής περιμέτρου  $B_{cs}$  (Backcorefluxdensity). Η συγκεκριμένη μαγνητική ροή θα υπολογιστεί από την σχέση:

$$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot h_{cs}} = \frac{27.84 \cdot 10^{-3} Wb}{2 \cdot 0.29085m \cdot 44.4 \cdot 10^{-3}m} = 1.077T$$

Η τιμή του  $B_{cs}$  είναι μικρή. Για να είναι επιτρεπτό το  $B_{cs}$  θα πρέπει να πάρει τιμές από 1.4 έως 1.7. Για να επιλυθεί το πρόβλημα παρουσιάζονται τρεις δυνατότητες:

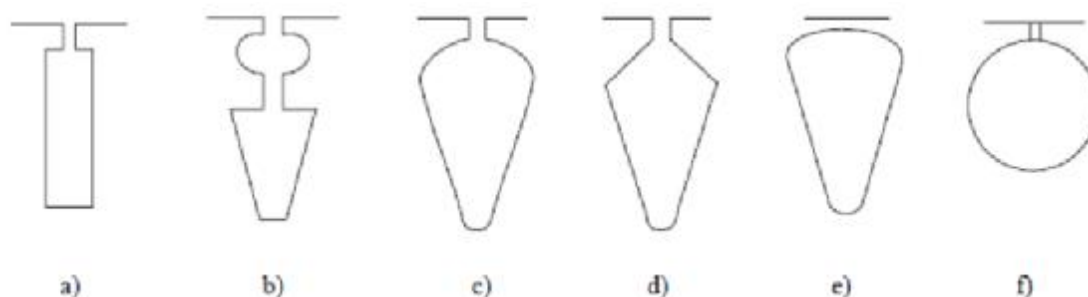
1. Να μειώσουμε την εξωτερική διάμετρο του στάτη.
2. Να εισάγουμε μια μικρότερη τιμή για τον συντελεστή  $\lambda$  (stackaspectratio) κάτι που θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη εσωτερική διάμετρο του στάτη άρα και σε μεγαλύτερο δρομέα.
3. Να αυξήσουμε και άλλο το  $h_s$  δηλαδή να αυξήσουμε την διατομή των αυλακιών, κάτι που δεν μπορεί να γίνει στην περίπτωση μας.

Επιλέγουμε την πρώτη λύση. Για να αυξηθεί η μαγνητική επαγωγή στον πυρήνα του στάτη σε τιμή ίση με 1,5T θα πρέπει το  $h_{cs}$  να γίνει ίσο με:

$$h_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot B_{cs}} = \frac{27.84 \cdot 10^{-3} Wb}{2 \cdot 0.29085m \cdot 1.5T} = 31.906mm$$

## 5.4. Δρομέας

Αρχικά θα υπολογίσουμε τη μορφή και τον αριθμό των αγωγών του δρομέα. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι τυπικές μορφές των αγωγών του δρομέα:



**Εικόνα 35: Τυπικές μορφές των αυλακιών του δρομέα**

Για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών που θα ακολουθήσουν επιλέγουμε την πρώτη μορφή. Στην συνέχεια θα επιλέξουμε τον αριθμό των αγωγών. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τυποποιημένες τιμές που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία:

**Πίνακας 3: Αριθμός αγωγών δρομέα σε συνάρτηση με τον αριθμό των πόλων και τον αριθμό των αυλακιών του στάτη.**

$2p_1$	$N_s$	$N_r$ – skewed rotor slots
2	24	18, 20, 22, 28, 30, 33, 34
	36	25, 27, 28, 29, 30, 43
	48	30, 37, 39, 40, 41
4	24	16, 18, 20, 30, 33, 34, 35, 36
	36	28, 30, 32, 34, 45, 48
	48	36, 40, 44, 57, 59
	72	42, 48, 54, 56, 60, 61, 62, 68, 76
6	36	20, 22, 28, 44, 47, 49
	54	34, 36, 38, 40, 44, 46
	72	44, 46, 50, 60, 61, 62, 82, 83
8	48	26, 30, 34, 35, 36, 38, 58
	72	42, 46, 48, 50, 52, 56, 60
12	72	69, 75, 80
	90	86, 87, 93, 94

Επιλέγουμε 28 αγωγούς και συνεχίζουμε με τον υπολογισμό του ονομαστικού ρεύματος ενός αγωγού του δρομέα:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_w \cdot I_{ov} \cdot K_I}{N_r}$$

$$K_I = 0.8 \cdot \cos\varphi + 0.2 = 0.8 \cdot 0.9 + 0.2 = 0.92$$

Οπότε:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_w \cdot I_{ov} \cdot K_I}{N_r} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 60 \cdot 0.959 \cdot 88 \cdot 0.92}{28} = 998.2368A$$

Για κινητήρες με μεγάλη απόδοση θα πρέπει η πυκνότητα ρεύματος στον αγωγό (μπάρα) του δρομέα να είναι ίση με 3,42A/mm<sup>2</sup>. Για να το επιτύχουμε αυτό θα πρέπει η διατομή της κάθε μπάρας του δρομέα να είναι ίση με:

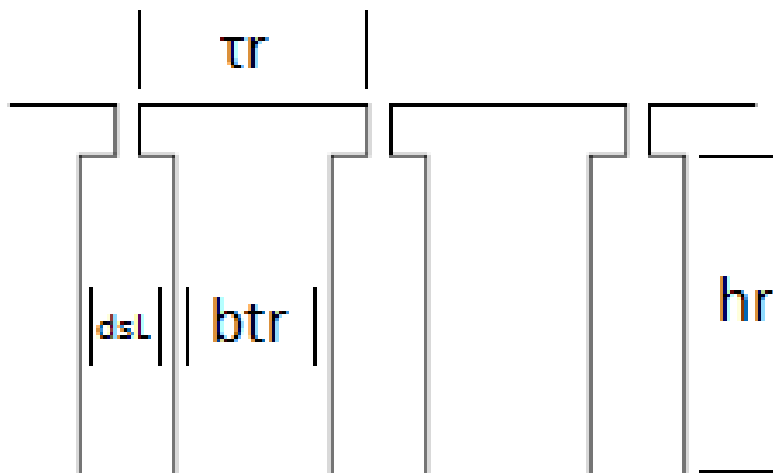
$$A_b = \frac{998.2368A}{3.42 A/mm^2} = 291.88mm^2$$

Το ρεύμα στους δακτυλίους που βραχυκυκλώνουν τις μπάρες του δρομέα (end ring current) θα είναι ίσο με:

$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p_i}{N_r}} = \frac{998.2368}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 2}{28}} = 2243.0177A$$

Η διατομή του δακτυλίου βραχυκύκλωσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$A_{er} = \frac{I_{er}}{J_{er}} = \frac{2243.0177}{0.8 \times 3.42 A/mm^2} = 819.8164mm^2$$



Εικόνα 36. Οι βασικές διαστάσεις των αγωγών του δρομέα.

#### 5.4.1. Υπολογισμός των διαστάσεων των αγωγών του δρομέα

Θα υπολογίσουμε αρχικά την απόσταση ανάμεσα σε δυο αγωγούς του δρομέα (Rotor slot pitch).

$$\tau_r = \frac{\pi \cdot (D_{is} - 2g)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (247 - 2 \cdot 0.65)}{28} = 27.5674mm$$

Θεωρώντας ότι η μαγνητική επαγωγή στο «δόντι» του δρομέα είναι ίση με 1,6T υπολογίζουμε την διάσταση  $b_{tr}$  από την σχέση:

$$b_{tr} \cdot K_{fe} \cdot B_{tr} = B_g \cdot \tau_r$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει θεωρώντας ότι η μαγνητική ροή στο δόντι του στάτη και στο διάκενο είναι ίση. Άρα προκύπτει ότι:

$$b_{tr} = \frac{B_g \cdot \tau_r}{K_{fe} \cdot B_{tr}} = \frac{0.75T \cdot 27.5674}{0.96 \cdot 1.6T} = 13.46 mm$$

Λόγω της πολύ μικρής απόστασης του δρομέα από την εσωτερική περιφέρεια του στάτη θεωρούμε κατά προσέγγιση ότι η διάμετρος του δρομέα είναι ίση με:

$$D_{re} = D_{is} = 247mm$$

Άρα η περιφέρεια του δρομέα θα είναι:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot \frac{247}{2} = 775,973385mm$$

Από το σχήμα των αγωγών προκύπτει ότι:

$$d_{SL} = \tau_r - b_{tr} = 27.5674mm - 13.46mm = 14.1074mm$$

Το βάθος του αγωγού θα είναι :

$$h_r = \frac{A_b}{d_{SL}} = \frac{291.88mm^2}{14.1074mm} = 20.69mm$$

Οι άλλες δυο διαστάσεις  $b_{or}$  και  $h_{or}$  παίρνουν τυποποιημένες τιμές 1,5mm και 0,5mm αντίστοιχα.

Γνωρίζοντας τις ακριβείς διαστάσεις του δρομέα και των αγωγών του θα υπολογίσουμε την μαγνητεγερτική δύναμη στο «δόντι» του δρομέα. Αν θέλουμε η μαγνητική επαγωγή να είναι ίση με 1,6T τότε από τον πίνακα 3 για το υλικό που χρησιμοποιούμε η ένταση του

μαγνητικού πεδίου θα είναι 2460A/m. Άρα η μαγνητεγερτική δύναμη που απαιτείται είναι ίση με:

$$F_{mtr} = H_{tr} \cdot (h_r + h_{or} + d_{SL}) = 2460(20.69 + 0.5 + 14.1074) \cdot 10^{-3} = 86.831At$$

Η τιμή που υπολογίσαμε είναι σχεδόν ίση με τη μαγνητεγερτική δύναμη του στάτη  $F_{mts}$  όπως πρέπει να είναι κάτι που κάνει την σχεδίαση μέχρι τώρα αποδεκτή.

Αυτό που απομένει είναι ο υπολογισμός της απόστασης του δρομέα πίσω (κάτω) από τα αυλάκια. Η μαγνητική επαγωγή στο χώρο αυτό του δρομέα θα πρέπει να είναι μεταξύ 1,4T έως 1,7T. Επιλέγοντας τιμή ίση με 1,6T έχουμε:

$$h_{cr} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot B_{cr}} = \frac{27.84 \cdot 10^{-3} Wb}{2 \cdot 0.29085 \cdot 1.6} = 29.912mm$$

#### 5.4.2. Υπολογισμός της διαμέτρου του άξονα

Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε την διάμετρο του άξονα της μηχανής. Η μέγιστη δυνατή διάμετρος εξαρτάται από τις διαστάσεις του δρομέα και των αυλακιών και παίρνει τιμή ίση με:

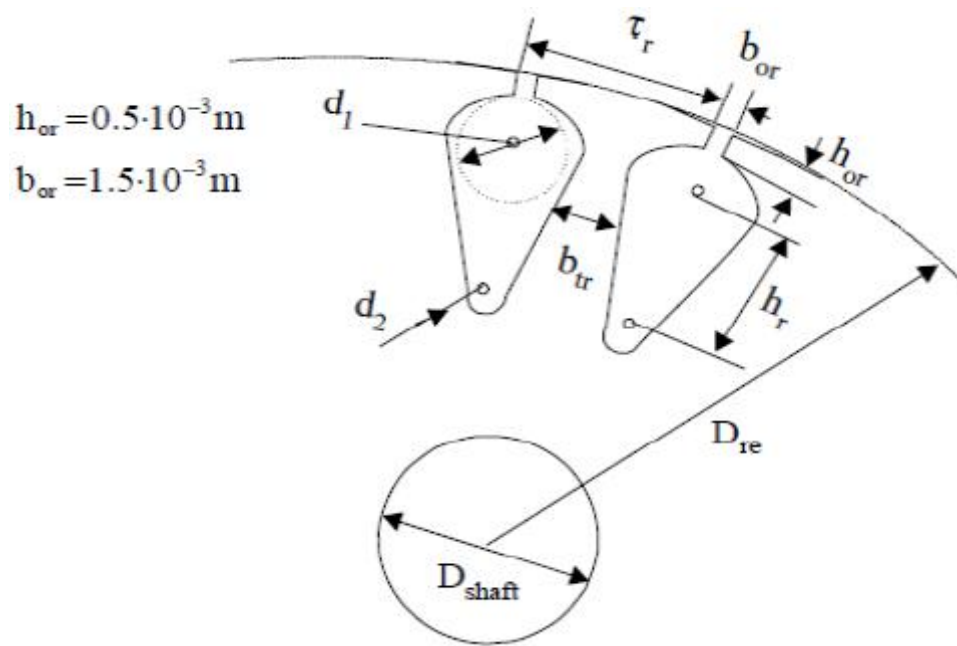
$$D_{shaft} \leq D_{is} - 2 \cdot (h_r + h_{or} + h_{cr}) - 2 \cdot g$$

$$\Rightarrow D_{shaft} \leq 247 - 2 \cdot (20.69 + 0.5 + 29.912) - 2 \cdot 0.65 = 143.496mm$$

Η ροπή στον άξονα του κινητήρα (και θέτοντας ολίσθηση  $s=0.01133$ ) υπολογίζεται ως εξής:

$$T = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{90000W}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot (1 - 0.01133)} = 579.524Nm$$

Με βάση την βιομηχανική εμπειρία για μια τέτοια ροπή η διάμετρος του άξονα είναι ικανοποιητική.



**Εικόνα 37.** Γενική μορφή του δρομέα και του άξονα του.

## 5.5. Ρεύμα μαγνήτισης

Έχοντας καθορίσει τις διαστάσεις της μηχανής μας και γνωρίζοντας την απαιτούμενη μαγνητεγερτική δύναμη ώστε να έχουμε την μαγνητική επαγωγή που θέλουμε στα διάφορα σημεία του κινητήρα, θα υπολογίσουμε το ρεύμα μαγνήτισης που απαιτείται για την δημιουργία των πεδίων αυτών.

Αρχικά θα υπολογίσουμε την ολική μαγνητεγερτική δύναμη που απαιτείται, η οποία είναι το άθροισμα των επιμέρους μαγνητεγερτικών δυνάμεων (βλέπε και *εικόνα 5*):

$$F_{1m} = 2 \cdot (K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} + F_{mts} + F_{mtr} + F_{mcs} + F_{mcr})$$

Όπου  $K_c$  είναι ο συντελεστής Carter για τον οποίο είχαμε μέχρι τώρα θεωρήσει μια τυπική τιμή ίση με 1,2. Τώρα που γνωρίζουμε τις διαστάσεις του κινητήρα μπορούμε να του υπολογίσουμε αναλυτικά ως εξής:

$$K_c = K_{c1} \cdot K_{c2}$$

Όπου:

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1}$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_r - \gamma_2}$$

Και:

$$\gamma_1 = \frac{b_{os}^2}{5 \cdot g + b_{os}} = \frac{2.5^2}{5 \cdot 0.65 + 2.5} = 1.08695$$

$$\gamma_2 = \frac{b_{or}^2}{5 \cdot g + b_{or}} = \frac{1.5^2}{5 \cdot 0.65 + 1.5} = 0.4736$$

Άρα:

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1} = \frac{21.54}{21.54 - 1.08695} = 1.053$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_r - \gamma_2} = \frac{27.5674}{27.5674 - 0.4736} = 1.01748$$

$$K_c = K_{c1} \cdot K_{c2} = 1.053 \cdot 1.01748 = 1.0714$$



Η τιμή του  $K_c$  που υπολογίστηκε είναι σχετικά κοντά στην θεωρούμενη τιμή που είχε τεθεί αρχικά ( $K_c=1.2$ ). Άρα οι υπολογισμοί που έχουν γίνει θεωρούνται σωστοί.

Για  $B_{cs}=1.6$  T και  $B_{cr}=1.6$ T , η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ίση με  $H_{cs}= 2460$  A/m στο στάτη και  $H_{cr}=2460$  A/m στο δρομέα.

$$F_{mcs}=C_{cs} \frac{\pi \cdot (D_{out}-h_{cs})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cs} = 0.316 \frac{\pi \cdot (398.4-31.906) \cdot 10^{-3}}{4} \cdot 2460=223.758 \text{Aturns}$$

$$F_{mcr}=C_{cr} \frac{\pi \cdot (D_{shaft}+h_{cr})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cr} \\ = 0.316 \frac{\pi \cdot (143.496+29.912) \cdot 10^{-3}}{4} \cdot 2460=105.872 \text{Aturns}$$

Όπου

$$C_{CS} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot B_{cs}^2} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot 1.6^2} = 0.316$$

$$C_{Cr} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot B_{cr}^2} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot 1.6^2} = 0.316$$

Οπότε

$$F_{1m}=2 \cdot \left( K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} + F_{mts} + F_{mtr} + F_{mcs} + F_{mcr} \right) = \\ 2 \cdot \left( 1.0714 \cdot 0.65 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0.6}{1.256 \cdot 10^{-6}} + 86.592 + 86.831 + 223.758 + 105.872 \right) \\ = 1671.466 \text{Aturns}$$

Ο συντελεστής  $1+K_{st}$  είναι:

$$1 + K_{st} = \frac{F_{1m}}{2 \cdot F_{mg}} = \frac{1671.466}{2 \cdot 372.6} = 2.243$$

Μετά τον υπολογισμό της ολικής μαγνητεγερτικής δύναμης μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα μαγνήτισης

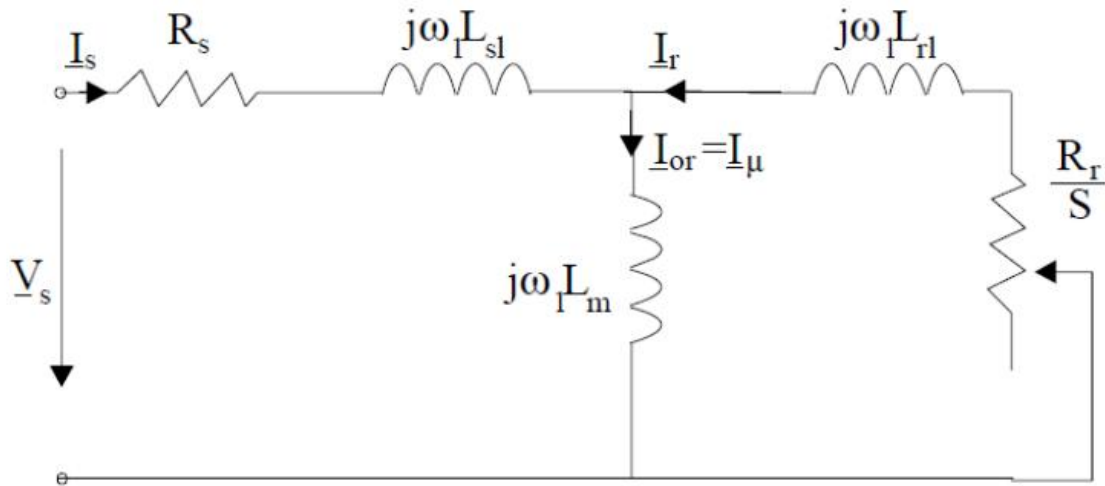
$$I_{\mu} = \frac{\pi \cdot p_i \cdot \frac{F_{im}}{2}}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot W_i \cdot K_{wi}} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot \frac{1671.466}{2}}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 60 \cdot 0.959} = 21.51A$$

Με σχετικό ρεύμα μαγνήτισης ίσο με:

$$i_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_{ov}} = \frac{21.51}{88} \cdot 100\% = 24.44\%$$

## 5.6. Ισοδύναμο κύκλωμα

Το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα φαίνεται παρακάτω



Εικόνα 38: Το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα

### 5.6.1. Υπολογισμός ωμικών αντιστάσεων

Στο παραπάνω ισοδύναμο δεν εμφανίζεται η ωμική αντίσταση  $R_{fe}$  που αντιστοιχεί στις απώλειες σιδήρου. Η ωμική αντίσταση (ανά φάση) του στάτη δίνεται από τη σχέση:

$$R_S = \rho_{co} \cdot \frac{l_c \cdot W_i}{A_{co} \cdot a_i}$$

Όπου  $\rho_{co}$  είναι η ειδική αντίσταση του χαλκού στους  $80^\circ \text{C}$  και  $l_c$  είναι το μήκος του τυλίγματος κάθε φάσης

$$l_c = 2 \cdot (L + l_{end})$$

Όπου  $L$  είναι το μήκος του στάτη και  $l_{end}$  είναι το μήκος του τυλίγματος που είναι ουσιαστικά έξω από τα αυλάκια του στάτη. Το μήκος  $l_{end}$  για μηχανές 4 πόλων δίνεται προσεγγιστικά από την σχέση:

$$l_{end} = 2 \cdot y - 0.02$$

Όπου  $y$  είναι το βήμα του τυλίγματος. Στην περίπτωση μας ισχύει:

$$\frac{y}{\tau} = \frac{7}{9} \Rightarrow y = \frac{7}{9} \cdot 0.1939m = 0.1508m$$

Άρα

$$l_{end} = 2 \cdot y - 0.02 = 2 \cdot 0.1508 - 0.02 = 0.2816m$$

Η ειδική αντίσταση του χαλκού στους 20°C είναι  $1,78 \times 10^{-8} \Omega m$ .  
Στους 80°C η ειδική αντίσταση θα είναι ίση με:

$$\rho_{80} = \rho_{20} \cdot \left( 1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20) \right) = 2,17 \cdot 10^{-8} \Omega m$$

Το συνολικό μήκος του τυλίγματος κάθε φάσης θα είναι:

$$l_c = 2 \cdot (L + l_{end}) = 2 \cdot (0.29085 + 0.2816) = 1.1449m$$

Η αντίσταση τυλιγμάτων στάτη θα είναι:

$$R_S = \rho_{Co} \cdot \frac{l_c \cdot W_i}{A_{Co} \cdot a_i} = 2.17 \cdot 10^{-8} \Omega m \cdot \frac{1.1449m \cdot 60}{4.4 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot 4} = 84.7 m\Omega$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την αντίσταση του δρομέα. Η συνδυασμένη αντίσταση των αγωγών του δρομέα και των δακτυλίων βραχυκύκλωσης δίνεται από την σχέση:

$$R_{be} = \rho_{Al} \cdot \left[ \frac{L}{A_b} \cdot K_R + \frac{l_{er}}{2 \cdot A_{er} \cdot \sin^2 \left( \frac{\pi P_1}{N_r} \right)} \right]$$

Στην παραπάνω σχέση ο συντελεστής  $K_R$  ονομάζεται skin effect resistance coefficient. Η ειδική αντίσταση του αλουμινίου στους 20°C είναι ίση με  $3,1 \times 10^{-8} \Omega m$  (οι αγωγοί του δρομέα είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο). Το μήκος του τομέα του δακτυλίου βραχυκύκλωσης που αντιστοιχεί σε έναν αγωγό του δρομέα θα είναι:

$$l_{er} = \frac{\pi \cdot (D_{er} - b)}{N_r}$$

Όπου  $b$  είναι το ύψος (ή βάθος) του δακτυλίου βραχυκύκλωσης:

$$b = h_r + h_{or} + d_{SL} = 20.69 + 0.5 + 14.1074 = 35.2974 \text{ mm}$$

$$D_{er} = D_{re} - 3,5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot g = 0.247 - 0.0035 - 2 \cdot 0.00065 = 0.2422 \text{ m}$$

Συνεπώς το μήκος του τομέα του δακτυλίου βραχυκύκλωσης θα είναι:

$$l_{er} = \frac{\pi \cdot (D_{er} - b)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (0.2422 - 0.0352974)}{28} = 23.214 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την σταθερά  $K_R$  από την σχέση:

$$K_R = \frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \xi \cdot \frac{(\sinh 2\xi + \sin 2\xi)}{(\cos 2\xi - \cos 2\xi)} \approx \xi$$

Όπου

$$\xi = \beta_s \cdot h_r \cdot \sqrt{s}$$

Το  $h_r$  είναι το βάθος των αγωγών του δρομέα και ο συντελεστής  $\beta_s$  είναι ο λόγος, του βάθους του αγωγού, προς το μέρος εκείνο του αγωγού που διαπερνάται από μαγνητικό πεδίο. Ο συντελεστής δίνεται από την σχέση:

$$\beta_s = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_o}{2 \cdot \rho_{Al}}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 50 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3,1 \cdot 10^{-8}}} = 79.776 \text{ m}^{-1}$$

$$\xi = \beta_s \cdot h_r \cdot \sqrt{s} = 79.776 \text{ m}^{-1} \cdot 0.02069 \text{ m} \cdot 1 = 1.65 = k_R$$

Άρα η αντίσταση του δρομέα στους 80°C θα είναι ίση με:

$$\rho_{Al80} = \rho_{Al20} \cdot \left( 1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20) \right) = 3.1 \cdot 10^{-8} \cdot \left( 1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20) \right) \\ = 3.78 \cdot 10^{-8} \Omega m$$

$$R_{be}^{80} = \rho_{Al} \cdot \left[ \frac{L}{A_b} \cdot K_R + \frac{l_{er}}{2 \cdot A_{er} \cdot \sin^2 \left( \frac{\pi P_1}{N_r} \right)} \right] = \\ 3.78 \cdot 10^{-8} \cdot \left[ \frac{0,29085}{291.88 \cdot 10^{-6}} \cdot 1.65 + \frac{23.214 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 819.8164 \cdot 10^{-6} \cdot \sin^2 \left( \frac{2\pi}{28} \right)} \right] = 72.958 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Η παραπάνω αντίσταση είναι η πραγματική αντίσταση του δρομέα. Στο ισοδύναμο κύκλωμα η αντίσταση είναι ανηγμένη στον στάτη. **Η ανηγμένη αντίσταση υπολογίζεται από την σχέση:**

$$R_2 = \frac{4 \cdot m}{N_r} \cdot (W_1 \cdot K_w)^2 \cdot R_{be}^{80} = \frac{4 \cdot 3}{28} \cdot (60 \cdot 0.959)^2 \cdot 72.958 \cdot 10^{-6} = 0,1035 \Omega$$

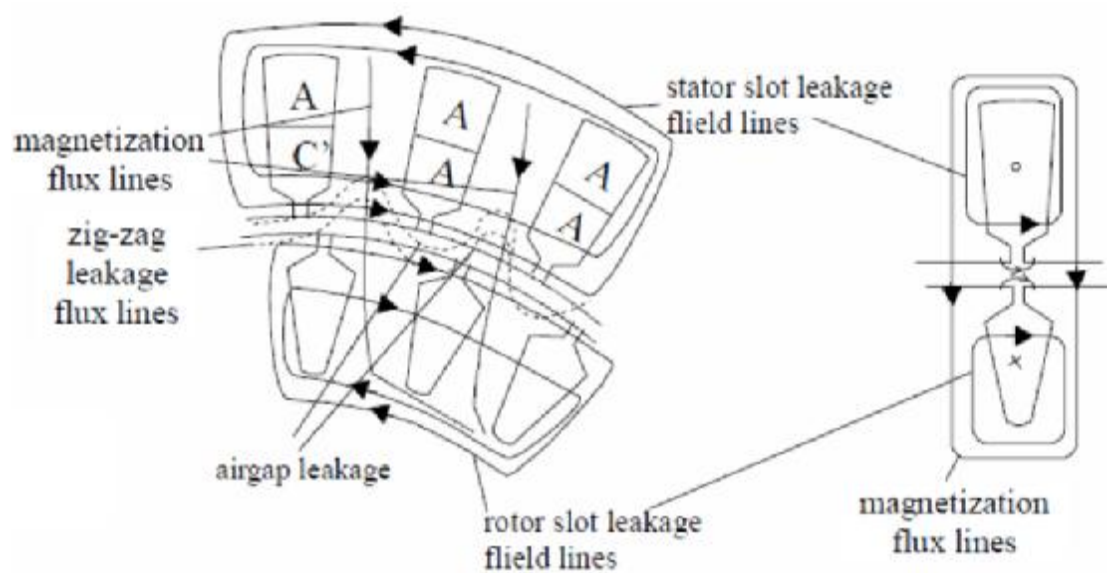
### 5.6.2. Υπολογισμός Επαγωγικών Αντιδράσεων

Σε μια επαγωγική μηχανή ένα μέρος του μαγνητικού πεδίου διαπερνά τόσο τον στάτη όσο και τον δρομέα (magnetization flux lines – αμοιβαία ροή) ενώ υπάρχουν και δυναμικές γραμμές που περνούν μόνο από τον στάτη ή μόνο από τον δρομέα (leakage flux lines – ροή σκέδασης). Τόσο η αμοιβαία ροή όσο και η ροή σκέδασης στο εσωτερικό ενός επαγωγικού κινητήρα απεικονίζονται στην εικόνα 38 παρακάτω.

Η επαγωγική αντίδραση του στάτη (ανά φάση) δίνεται από τη σχέση:

$$X_{SL} = 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega_1 \cdot L \cdot \frac{W_i^2}{p_1 \cdot q} \cdot (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{er})$$

Όπου  $\lambda_s$ ,  $\lambda_{ds}$ ,  $\lambda_{er}$  είναι συντελεστές που ονομάζονται slot coefficient, differential coefficient και end ring coefficient αντίστοιχα.



**Εικόνα 39: Αμοιβαία ροή και ροή διαρροής στο εσωτερικό μιας επαγωγικής μηχανής.**

Ο συντελεστής  $\lambda_s$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda_s = \left[ \frac{2}{3} \cdot \frac{h_s}{b_{s1} + b_{s2}} + \frac{2 \cdot h_w}{b_{os} + b_{s1}} + \frac{h_{os}}{b_{os}} \right] \cdot \left( \frac{1 + 3\beta}{4} \right)$$

Όπου  $\beta = y/\tau = 7/9$ . Οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης αντιστοιχούν στις διαστάσεις των αυλακιών του στάτη (βλέπε εικόνα 4). Αντικαθιστώντας τις τιμές στην παραπάνω εξίσωση έχουμε:

$$\begin{aligned} \lambda_s &= \left[ \frac{2}{3} \cdot \frac{h_s}{b_{s1} + b_{s2}} + \frac{2 \cdot h_w}{b_{os} + b_{s1}} + \frac{h_{os}}{b_{os}} \right] \cdot \left( \frac{1 + 3\beta}{4} \right) = \\ &= \left[ \frac{2}{3} \cdot \frac{33.7}{13.65 + 19.548} + \frac{2 \cdot 1}{2.5 + 13.65} + \frac{0.5}{2.5} \right] \cdot \left( \frac{1 + 3 \cdot \frac{7}{9}}{4} \right) = 0.8338 \end{aligned}$$

Ο συντελεστής  $\lambda_{ds}$  υπολογίζεται από τη σχέση

$$\lambda_{ds} = \frac{0.9 \cdot \tau_s \cdot q^2 \cdot K_w^2 \cdot C_s \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{st})}$$

Οπου

$$C_s = 1 - 0.033 \cdot \frac{b_{os}^2}{g \cdot \tau_s} = 1 - 0.033 \cdot \frac{2.5^2}{0.65 \cdot 21.54} = 0.98527$$

Και

$$\gamma_{ds} = (0.18 \cdot \sin\varphi_1 + 1.24) \cdot 10^{-2}$$

$$\text{με } \varphi_1 = \pi \cdot (6\beta - 5.5) = 180 \left( 6 \cdot \frac{7}{9} - 5.5 \right) = -150^\circ$$

οπότε

$$\gamma_{ds} = (0.18 \cdot \sin(-150^\circ) + 1.24) \cdot 10^{-2} = 0.0115$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= \frac{0.9 \cdot \tau_s \cdot q^2 \cdot K_{w1}^2 \cdot C_s \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{sd})} \\ &= \frac{0.9 \cdot 21.54 \cdot 10^{-3} \cdot 3^2 \cdot 0.959^2 \cdot 0.98527 \cdot 0.0115}{1.0714 \cdot 0.65 \cdot 10^{-3} \cdot 2.243} = 1.181 \end{aligned}$$

Ο συντελεστής  $\lambda_{er}$  για τύλιγμα μονού στρώματος (single layer winding) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \lambda_{er} &= 0.67 \cdot \frac{q}{L} \cdot (l_{end} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau) \\ &= 0.67 \cdot \frac{3}{0.29085} \cdot \left( 0.2816 - 0.64 \cdot \frac{7}{9} \cdot 0.1939 \right) \Rightarrow \lambda_{er} = 1.279 \end{aligned}$$

Από τα παραπάνω υπολογίζεται η επαγωγική αντίδραση του στάτη από τη σχέση:

$$\begin{aligned} X_{SL} &= 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega \cdot L \cdot \frac{W_1^2}{p_1 \cdot q} \cdot (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{er}) \\ &= 2 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0.29085 \cdot \frac{60^2}{2 \cdot 3} \\ &\quad \cdot (0.8338 + 1.181 + 1.279) = 0.4536 \Omega \end{aligned}$$



Η επαγωγική αντίδραση του δρομέα (δεν είναι ανηγμένη στο στάτη) δίνεται από τη σχέση:

$$X_{be} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (\lambda_r \cdot K_X + \lambda_{dr} + \lambda_{er})$$

Όπου

$$\lambda_r = 0,66 + \frac{2 \cdot h_r}{3 \cdot d_{SL}} + \frac{h_{or}}{b_{or}} = 0,66 + \frac{2 \cdot 20,69}{3 \cdot 14,1074} + \frac{0,5}{1,5} = 1,971$$

Θα πρέπει να διευκρινιστεί εάν ο παραπάνω τύπος ισχύει για δρομείς με αγωγούς ορθογώνιας διατομής.

$$\lambda_{dr} = \frac{0,9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr}}{K_c \cdot g} \cdot \left( \frac{N_r}{6 \cdot p_i} \right)^2$$

Ο συντελεστής  $\gamma_{dr}$  δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_{dr} = 9 \cdot \left( \frac{6 \cdot p_i}{N_r} \right)^2 \cdot 10^{-2} = 9 \cdot \left( \frac{6 \cdot 2}{28} \right)^2 \cdot 10^{-2} = 16,53 \cdot 10^{-3}$$

Άρα

$$\lambda_{dr} = \frac{0,9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr}}{K_c \cdot g} \cdot \left( \frac{N_r}{6 \cdot p_i} \right)^2 = \frac{0,9 \cdot 27,5674 \cdot 16,53 \cdot 10^{-3}}{1,0714 \cdot 0,65} \cdot \left( \frac{28}{6 \cdot 2} \right)^2 = 3,206$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον συντελεστή  $\lambda_{er}$  από τη σχέση

$$\lambda_{er} = \frac{2,3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin^2 \left( \frac{\pi \cdot P_1}{N_r} \right)} \cdot \log \left[ \frac{4,7 \cdot (D_{er} - b)}{b + 2a} \right]$$

Στην παραπάνω σχέση το  $D_{er}=0.2422m$  και το  $b$  (το βάθος του δακτυλίου βραχυκύκλωσης) είναι ίσο με:

$$b = h_r + h_{or} + d_{SL} = 20,69 + 0,5 + 14,1074 = 35,2974$$

Το  $a$  είναι το πλάτος του δακτυλίου βραχυκύκλωσης και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{A_{er}}{b} = \frac{819.8164mm^2}{35,2974mm} = 23.226mm$$

Άρα

$$\lambda_{er} = \frac{2.3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r}\right)} \cdot \log\left[\frac{4.7 \cdot (D_{er} - b)}{b + 2a}\right] =$$

$$\frac{2.3 \cdot (242,2 - 35,2974)}{28 \cdot 290,85 \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot 2}{28}\right)} \cdot \log\left[\frac{4.7 \cdot (242,2 - 35,2974)}{35,2974 + 2 \cdot 23.226}\right] = 0.317$$

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τον συντελεστή επιδερμικού φαινομένου  $K_x$  (skin effect coefficient for leakage reactance) από τη σχέση:

$$K_x = \frac{3 \cdot [\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)]}{2 \cdot \xi \cdot [\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)]} = \frac{3 \cdot [\sinh(2 \cdot 1.65) - \sin(2 \cdot 1.65)]}{2 \cdot 1.65 \cdot [\cosh(2 \cdot 1.65) - \cos(2 \cdot 1.65)]}$$

$$= 0.974$$

Η επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι ίση με:

$$X_{be} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (\lambda_r \cdot K_x + \lambda_{dr} + \lambda_{er})$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot 0.29085$$

$$\cdot (1,971 \cdot 0.974 + 3.206 + 0.317) = 624,636 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Η ανοιγμένη στο στάτη επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι:

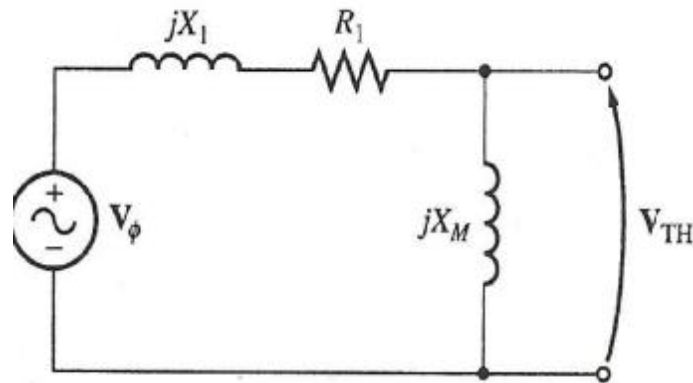
$$X_2 = 4 \cdot m \cdot \frac{(W_1 \cdot K_w)^2}{N_r} \cdot X_{be} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(60 \cdot 0.959)^2}{28} \cdot 624,636 \cdot 10^{-6} \Omega = 0.886 \Omega$$

Απομένει ο υπολογισμός της αντίδρασης μαγνήτισης από τη σχέση:

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V_{ph}}{I_\mu}\right)^2 - R_s^2} - X_{sl} = \sqrt{\left(\frac{400}{21.51}\right)^2 - (84.7 \cdot 10^{-3})^2} - 0.4536 = 18.14 \Omega$$

## 5.7. Υπολογισμός $V_{TH}$ ΚΑΙ $R_{TH}$

Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε την τάση Thevenin ( $V_{TH}$ ) και την αντίσταση Thevenin ( $R_{TH}$ ). Αυτά τα στοιχεία θα πρέπει να υπολογιστούν για να μπορέσουμε να κατασκευάσουμε την χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα.



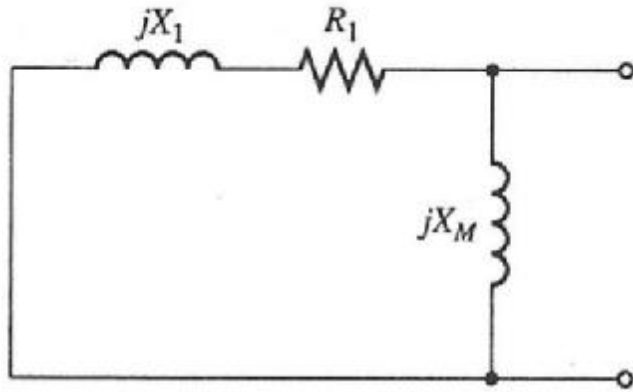
**Εικόνα 40: Η ισοδύναμη τάση κατά Thevenin του κυκλώματος εισόδου ενός επαγωγικού κινητήρα.**

Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται τα ανοικτά άκρα του κυκλώματος ως προς τα οποία υπολογίζεται η τάση Thevenin από την σχέση:

$$V_{TH} = V_{ph} \cdot \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} = 400 \cdot \frac{18.14}{\sqrt{(84.7 \cdot 10^{-3})^2 + (0.4536 + 18.14)^2}} \\ = 390,238V$$

Η αντίσταση  $R_{TH}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_{TH} = R_1 \left( \frac{X_m}{X_1 + X_m} \right)^2 = 84.7 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{18.14}{0.4536 + 18.14} \right)^2 = 0.0806\Omega$$



**Εικόνα 41:** Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση κατά Thevenin του κυκλώματος εισόδου.

## 5.8. Απώλειες και βαθμός απόδοσης

Το επόμενο βήμα της μελέτης περιλαμβάνει τον υπολογισμό των απωλειών του κινητήρα καθώς και του βαθμού απόδοσης. Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα υπολογίζονται από τη σχέση:

$$P_{απ} = P_{cu} + P_{Al} + P_{Fe} + P_{mech} + P_{stray}$$

Όπου  $P_{Al}$  είναι οι απώλειες στον δρομέα του οποίου οι αγωγοί είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο. Αναλυτικά:

Απώλειες χαλκού στον στάτη:

$$P_{cu} = 3 \cdot I_{ov}^2 \cdot R_s = 3 \cdot 88^2 \cdot 84,7 \cdot 10^{-3} = 1967,75W$$

Απώλειες στο δρομέα:

$$P_{al} = 3 \cdot I_{rn}^2 \cdot R_r = 3 \cdot K_f^2 \cdot I_n^2 \cdot R_r = 3 \cdot 0,92^2 \cdot 88^2 \cdot 0,1035 = 2035,18W$$

Οι μηχανικές απώλειες υπολογίζονται προσεγγιστικά από την εμπειρική σχέση

$$P_{mech} = 0,008 \cdot P_{ov} = 0,008 \cdot 90000W = 720W$$

Οι κατανεμημένες απώλειες υπολογίζονται και αυτές εμπειρικά από από τον τύπο:

$$P_{stray} = 0,01 \cdot P_{ov} = 0,01 \cdot 90000W = 900W$$

Οι απώλειες σιδήρου εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στον στάτη γιατί στον δρομέα η συχνότητα του ρεύματος είναι πολύ μικρή. Οι απώλειες σιδήρου στο στάτη χωρίζονται σε απώλειες στα «δόντια» (ανάμεσα στα λούκια)  $p_{t1}$  (stator teeth fundamental losses) και στο πυρήνα που βρίσκεται πίσω (πάνω) από τα λούκια  $p_{y1}$  (back iron losses – yoke).

Οι απώλειες στα δόντια υπολογίζονται από τη σχέση:

$$p_{t1} = K_t \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{ts}^{1,7} \cdot G_{t1}$$

Όπου  $p_{10}=2-3W/kg$  και  $K_t$  είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από την ποιότητα του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυρήνα και παίρνει τιμές (1,6-1,8). Η παράμετρος  $G_{t1}$  είναι το βάρος των δοντιών του πυρήνα (stator tooth weight) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$G_{t1} = \gamma_{iron} \cdot N_s \cdot b_{ts} \cdot (h_s + h_w + h_{os}) \cdot L \cdot K_{Fe}$$

$$\Rightarrow G_{t1} = 7800 \cdot 36 \cdot 8,169 \cdot 10^{-3} \cdot (33,7 + 1 + 0,5) \cdot 10^{-3} \cdot 0,29085 \cdot 0,97 = 22,8 \text{ kgr}$$

$$p_{t1} = K_t \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{ts}^{1,7} \cdot G_{t1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,6^{1,7} \cdot 22,8 = 258,53 \text{ W}$$

Οι απώλειες στον υπόλοιπο πυρήνα δίνονται από τη σχέση:

$$p_{y1} = K_y \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{cs}^{1,7} \cdot G_{y1}$$

Όπου

$$G_{y1} = \gamma_{\text{iron}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [D_{\text{out}}^2 - (D_{\text{out}} - 2 \cdot h_{cs})^2] \cdot L \cdot K_{Fe}$$

$$\Rightarrow G_{y1} = 7800 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [0,3984^2 - (0,3984 - 2 \cdot 0,0444)^2] \cdot 0,29085 \cdot 0,96 \Rightarrow G_{y1} = 107,54 \text{ W}$$

Άρα οι απώλειες στον υπόλοιπο πυρήνα θα είναι:

$$p_{y1} = K_y \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{cs}^{1,7} \cdot G_{y1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^2 \cdot 1,5^{1,7} \cdot 107,54 \text{ W} = 1092,7 \text{ W}$$

Οι συνολικές απώλειες σιδήρου θα είναι ίσες με:

$$P_{FE} = p_{t1} + p_{y1} = 258,3 \text{ W} + 1092,7 \text{ W} = 1351 \text{ W}$$

Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα θα είναι

$$P_{\alpha\pi} = P_{cu} + P_{Al} + P_{Fe} + P_{mech} + P_{stray}$$

$$= 1967,75 + 2035,18 + 1351 + 720 + 900 = 6973,93 \text{ W}$$

Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα θα είναι

$$\eta = \frac{90000 \text{ W}}{90000 + 6973,93} \cdot 100\% = 92,8\%$$

## 5.9. Υπολογισμός Χαρακτηριστικών λειτουργίας

Το ρεύμα του κινητήρα χωρίς φορτίο (το ενεργό, δεν συμπεριλαμβάνεται το ρεύμα μαγνήτισης) είναι ίσο με:

$$I_0 = \frac{P_{fe} + P_{MHX} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot R_s}{3 \cdot V_{ph}} = \frac{370,51 + 120 + 3 \cdot 4,57^2 \cdot 0,47}{3 \cdot 400} = 0,43A$$

$$I_0 = \frac{P_{FE} + P_{mech} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot R_s}{3 \cdot V_{ph}} = \frac{1351 + 720 + 3 \cdot 21,51^2 \cdot 84,7 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 400} = 1,824A$$

Η ολίσθηση υπολογίζεται από την σχέση:

$$s = \frac{P_{Al}}{P_{AG}} = \frac{P_{Al}}{P_n + P_{Al} + P_{mech} + P_{stray}} = \frac{2035,18}{90000 + 2035,18 + 720 + 900} = 0,02173$$

$= 2,173\%$

$$n_m = (1 - s) \cdot n_{sync} = (1 - 0,02173) \cdot 1500 = 1467,4 \text{rpm}$$

Η ονομαστική ροπή είναι ίση με:

$$T_n = \frac{P_n}{2\pi \cdot \frac{f}{p_1} (1 - s_n)} = \frac{90000W}{2\pi \cdot \frac{50}{2} (1 - 0,02173)} = 585,685Nm$$

Η ροπή ανατροπής υπολογίζεται από την σχέση:

$$T_{bk} = \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_{rl})^2}]^2}$$

Όπου:

$$C_1 = 1 + \frac{X_{sl}}{X_m} = 1 + \frac{0,4536}{18,14} = 1,025$$

Οπότε η ροπή ανατροπής είναι ίση με:

$$T_{bk} = \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}]^2}$$

$$= \frac{3 \cdot 2}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot \frac{400^2}{[84.7 \cdot 10^{-3} + \sqrt{(84.7 \cdot 10^{-3})^2 + (0.4536 + 1.025 \cdot 0.886)^2}]^2}$$

$$= 1054.4 Nm$$

Το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα είναι ίσο με:

$$I_{LR} = \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_{sl} + X_{rl})^2}}$$

$$= \frac{400}{\sqrt{(84.7 \cdot 10^{-3} + 0.1035)^2 + (0.4536 + 0.886)^2}} = 295.7 A$$

Η ροπή εκκίνησης είναι ίση με:

$$T_{LR} = \frac{3 \cdot I_{LR}^2 \cdot R_r}{\omega} \cdot p_1 = \frac{3 \cdot 295.7^2 \cdot 0.1035}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot 2 = 172.84 Nm$$

Ο συντελεστής ισχύος της μηχανής δίνεται από την σχέση:

$$\cos\varphi = \frac{P_n}{3 \cdot V_{ph} \cdot I_n \cdot \eta} = \frac{90000}{3 \cdot 400 \cdot 88 \cdot 0.928} = 0.918$$



## 5.10. Χαρακτηριστική Ροπής - Ταχύτητας

Έχοντας υπολογίσει παραπάνω τις τιμές των αντιστάσεων και τις επαγωγικές αντιδράσεις του κινητήρα καθώς και την τάση με την αντίσταση κατά Thevenin, περνάμε στο τελευταίο κομμάτι της μελέτης όπου είναι η κατασκευή της χαρακτηριστικής λειτουργίας του κινητήρα.

Θα χρησιμοποιήσουμε για ταχύτητα  $n_m=1483\text{rpm}$ , δηλαδή τις ονομαστικές στροφές. Άρα θα πρέπει να υπολογίσουμε την επαγόμενη ροπή ( $\tau_{ind}$ ) για διάφορες τιμές της ολίσθησης, όπως και την ροπή ανατροπής ( $\tau_{max}$ ).

Ο τύπος της επαγόμενης ροπής είναι:  $\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}}$

Όπου  $P_{AG}$  είναι η ισχύς που διέρχεται από το κύκλωμα του στάτη στο κύκλωμα του δρομέα μέσω του διακένου και υπολογίζεται:

$$P_{AG} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}$$

Οπότε

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[ \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]}$$

Για  $s=1$ ,  $n_m=0$

$$\begin{aligned} \tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[ \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\ &= \frac{3 \cdot 390,238^2 \cdot \left(\frac{0,1035}{1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[ \left(0,0806 + \frac{0,1035}{1}\right)^2 + (0,4536 + 0,886)^2 \right]} \end{aligned}$$

$$= 108,765\text{Nm}$$

Αυτή είναι η ροπή εκκίνησης

Για  $s=0,9$ ,  $n_m=150\text{rpm}$

$$\begin{aligned}
\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[ \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\
&= \frac{3 \cdot 390,238^2 \cdot \left(\frac{0,1035}{0,9}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[ (0,0806 + \frac{0,1035}{0,9})^2 + (0,4536 + 0,886)^2 \right]} \\
&= \mathbf{182,493Nm}
\end{aligned}$$

Για s=0,8, n<sub>m</sub>=300rpm

$$\begin{aligned}
\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[ \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\
&= \frac{3 \cdot 390,238^2 \cdot \left(\frac{0,1035}{0,8}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[ (0,0806 + \frac{0,1035}{0,8})^2 + (0,4536 + 0,886)^2 \right]} \\
&= \mathbf{204,65Nm}
\end{aligned}$$

Για s=0,7, n<sub>m</sub>=450rpm

$$\begin{aligned}
\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[ \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\
&= \frac{3 \cdot 390,238^2 \cdot \left(\frac{0,1035}{0,7}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[ (0,0806 + \frac{0,1035}{0,7})^2 + (0,4536 + 0,886)^2 \right]} \\
&= \mathbf{232,86Nm}
\end{aligned}$$

Για s=0,6, n<sub>m</sub>=600rpm

$$\begin{aligned}
\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[ \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\
&= \frac{3 \cdot 390,238^2 \cdot \left(\frac{0,1035}{0,6}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[ (0,0806 + \frac{0,1035}{0,6})^2 + (0,4536 + 0,886)^2 \right]} \\
&= \mathbf{269,93Nm}
\end{aligned}$$

Για s=0,5, n<sub>m</sub>=750rpm

$$\begin{aligned}
\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[ \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\
&= \frac{3 \cdot 390,238^2 \cdot \left(\frac{0,1035}{0,5}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[ \left(0,0806 + \frac{0,1035}{0,5}\right)^2 + (0,4536 + 0,886)^2 \right]} \\
&= 320,7Nm
\end{aligned}$$

Για s=0,4, n<sub>m</sub>=900rpm

$$\begin{aligned}
\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[ \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\
&= \frac{3 \cdot 390,238^2 \cdot \left(\frac{0,1035}{0,4}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[ \left(0,0806 + \frac{0,1035}{0,4}\right)^2 + (0,4536 + 0,886)^2 \right]} \\
&= 394Nm
\end{aligned}$$

Για s=0,3, n<sub>m</sub>=1050rpm

$$\begin{aligned}
\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[ \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\
&= \frac{3 \cdot 390,238^2 \cdot \left(\frac{0,1035}{0,3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[ \left(0,0806 + \frac{0,1035}{0,3}\right)^2 + (0,4536 + 0,886)^2 \right]} \\
&= 507,886Nm
\end{aligned}$$

Για  $s=0,2$ ,  $n_m=1200rpm$

$$\begin{aligned}\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[ \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\ &= \frac{3 \cdot 390,238^2 \cdot \left(\frac{0,1035}{0,2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[ (0,0806 + \frac{0,1035}{0,2})^2 + (0,4536 + 0,886)^2 \right]} \\ &= 699,32Nm\end{aligned}$$

Για  $s=0,1$ ,  $n_m=1350rpm$

$$\begin{aligned}\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[ \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\ &= \frac{3 \cdot 390,238^2 \cdot \left(\frac{0,1035}{0,1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[ (0,0806 + \frac{0,1035}{0,1})^2 + (0,4536 + 0,886)^2 \right]} \\ &= 990,5Nm\end{aligned}$$

Η ολίσθηση ανατροπής είναι:

$$\begin{aligned}s_{max} &= \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} = \frac{0,1035}{\sqrt{0,0806^2 + (0,4536 + 0,886)^2}} = 0,07864 \\ n_m &= (1 - s) \cdot n_{sync} = (1 - 0,07864) \cdot 1500 = 1382rpm\end{aligned}$$

Η ροπή ανατροπής είναι:

$$\begin{aligned}\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2}{2 \cdot \omega_{sync} \cdot \left[ R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right]} \\ &= \frac{3 \cdot 390,238^2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[ 0,0806 + \sqrt{0,0806^2 + (0,4536 + 0,886)^2} \right]} \\ &= 2044,4232Nm\end{aligned}$$

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε σχέση με τις αρχικές προδιαγραφές του κινητήρα παρατηρούμε τα εξής:

- Οι τιμές που υπολογίστηκαν για τον συντελεστή ισχύος, το βαθμό απόδοσης, την αντίσταση του στάτη, την ονομαστική ροπή την ολίσθηση είναι πολύ κοντά στις πραγματικές του κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα, ακολουθεί ο πίνακας

Μέγεθος	Αρχική τιμή	Υπολογισμένη τιμή
Βαθμός απόδοσης	0,9468	0,928
Συντελεστής ισχύος	0,9	0,918
Αντίσταση στάτη	0,071Ω	0,0847Ω
Ονομαστική ροπή	579,71Nm	585,765Nm
Ολίσθηση	1,133%	2,173%

- Η ροπή ανατροπής υπολογίστηκε 2044,4232Nm ενώ στα στοιχεία του κινητήρα δίνεται 1698,5. Ο τύπος με τον οποίο υπολογίζεται η ροπή ανατροπής είναι ο ακόλουθος

$$\tau_{max} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2}{2 \cdot \omega_{sync} \cdot \left[ R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right]}$$

Παρατηρούμε ότι η ροπή εξαρτάται από τα στοιχεία του κινητήρα (αντιστάσεις), τα οποία με τη σειρά τους εξαρτώνται από τον αριθμό των αυλακιών του στάτη και του δρομέα. Αλλαγή στον αριθμό των αυλακιών, ενδεχομένως θα επιφέρει μια ροπή ανατροπής πιο κοντά σε αυτή των προδιαγραφών.

- Η ροπή εκκίνησης υπολογίστηκε 108,765Nm ενώ στα στοιχεία του κινητήρα δίνεται 1443,48Nm

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left( \frac{R_2}{s} \right)}{\omega_{sync} \cdot \left[ \left( R_{TH} + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]}$$

Το ίδιο ισχύει και για τη ροπή εκκίνησης. Επειδή η τιμή της εξαρτάται από τις αντιστάσεις του στάτη και του δρομέα και οι τιμές των αντιστάσεων αυτών εξαρτώνται από τα αυλάκια του στάτη και του δρομέα, θα πρέπει να γίνει μια νέα μελέτη με επιλογή άλλου αριθμού αυλακιών

- Τέλος, η σταθερά  $1+K_{st}$  με βάση τους υπολογισμούς βγήκε ίση με 2,24 ενώ είχε θεωρηθεί ίση με 1.5. Αν από την αρχή της σχεδίασης είχε θεωρηθεί ίση με 2,24 θα άλλαζε ο αριθμός των σπειρών ανά φάση  $w_i$  και ο αριθμός των αγωγών ανά αυλάκι  $n_s$ , παράμετροι που επηρεάζουν τα στοιχεία του ισοδύναμου κυκλώματος του κινητήρα και κατ' επέκταση το βαθμό απόδοσής του και τις ροπές του.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- STEPHEN J. CHARMAN «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC», ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 1993
- ΜΑΛΑΤΕΣΤΑΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ Β., «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ», ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2015
- Δ. ΛΑΜΠΡΙΔΗΣ, Π. ΝΤΟΚΟΠΟΥΛΟΣ, Γ. ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗΣ, «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ», ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ, 2006
- ΜΠΙΤΖΙΩΝΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ, ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ: ΚΙΝΗΣΗ, ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΣ, ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2 ΕΚΔΟΣΗ, 2015
- 
- ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΙΙ, ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑΣ, ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε., ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
- [http://www.mie.uth.gr/ekp\\_yliko/HLMHX\\_EN6.pdf](http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/HLMHX_EN6.pdf)
- <https://openclass.teiwm.gr/modules/document/?course=EE115>
- [http://electrical-dep.teipir.gr/LotusQuickr/elec\\_mach\\_ii/Main.nsf/\\$defaultview/C6E41493A029015BC2257DCD002A197D/\\$File/%CE%91%CE%A3%CE%A5%CE%93%CE%A7%CE%A1%CE%9F%CE%9D%CE%9F%CE%99%203%CE%A6%20%CE%9A%CE%99%CE%9D%CE%97%CE%A4%CE%97%CE%A1%CE%95%CE%A3.pdf?OpenElement](http://electrical-dep.teipir.gr/LotusQuickr/elec_mach_ii/Main.nsf/$defaultview/C6E41493A029015BC2257DCD002A197D/$File/%CE%91%CE%A3%CE%A5%CE%93%CE%A7%CE%A1%CE%9F%CE%9D%CE%9F%CE%99%203%CE%A6%20%CE%9A%CE%99%CE%9D%CE%97%CE%A4%CE%97%CE%A1%CE%95%CE%A3.pdf?OpenElement)