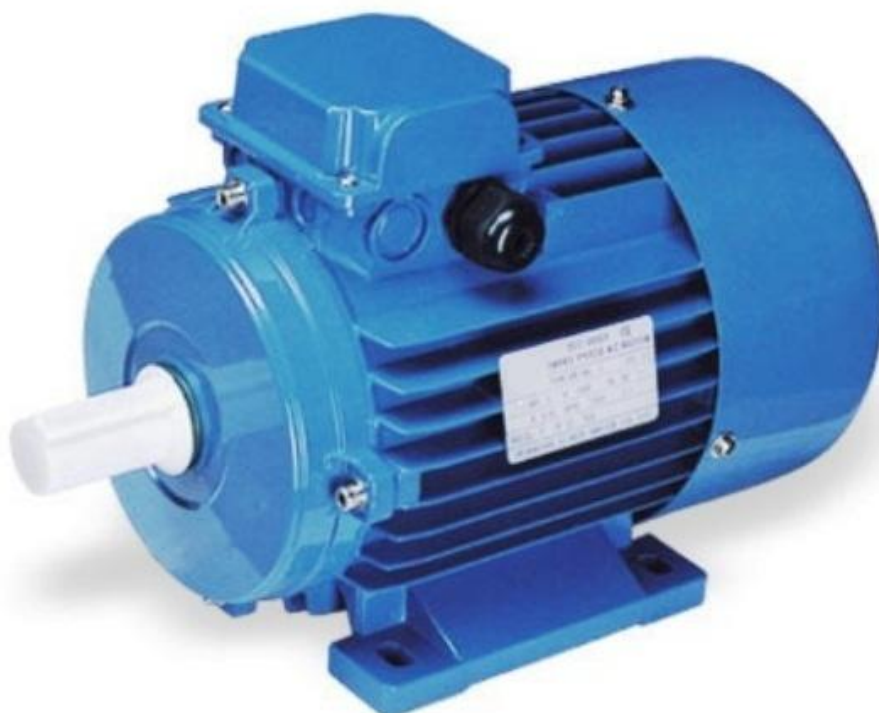


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Αριθμός 1421**

# **ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΔΥΟ ΠΟΛΩΝ ΙΣΧΥΟΣ 22KW**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:**  
**ΜΑΝΤΑΛΙΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**  
**ΛΟΥΚΑΝΑΡΗΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:**  
**ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ ΙΟΥΝΙΟΣ 2014**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα τον καθηγητή Δρ. Μηχανικό κύριο Χαραλαμπάκο Βασίλειο για την αμέριστη βοήθειά του κατά την πραγματοποίηση αυτής της Πτυχιακής Εργασίας.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ .....	5
1.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ .....	5
1.2 ΜΕΡΗ ΠΟΥ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ Ο ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ.....	6
1.3 ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΡΟΠΗΣ .....	7
1.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗΣ – ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ .....	9
1.5 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ .....	10
1.6 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ 2 ΠΟΛΩΝ ΙΣΧΥΟΣ 22kW ....	15
2.1 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ .....	16
2.2 ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΣΤΑΤΗ.....	18
2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΙΩΝ ΤΟΥ ΣΤΑΤΗ.....	23
2.4 ΔΡΟΜΕΑΣ.....	28
2.4.1 Υπολογισμός των διαστάσεων των αγωγών του δρομέα.....	29
2.4.2 Υπολογισμός της διαμέτρου του άξονα.....	32
2.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ .....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	35
3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ .....	35
3.2 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ .....	43
3.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗΣ – ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ .....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	51
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΕΠΙΛΟΓΟΣ .....	51
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	52
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	54

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιείται η μελέτη ενός διπολικού ασύγχρονου κινητήρα με τα εξής χαρακτηριστικά: ονομαστική ισχύς: 22kW, ονομαστική ταχύτητα: 2942 rpm, συντελεστής ισχύος: 0.890 και βαθμός απόδοσης: 0.910, ενώ ο τρόπος συνδεσμολογίας του κινητήρα θα είναι σε αστέρα.

Σκοπός της μελέτης είναι η σχεδίαση του κινητήρα με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σε θεωρητικό επίπεδο (υπολογιστικά).

Η πτυχιακή περιλαμβάνει 4 κεφάλαια. Το πρώτο περιλαμβάνει κάποιες γενικές πληροφορίες για τους επαγωγικούς κινητήρες, την αρχή λειτουργίας τους, το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, τα μέρη από τα οποία αποτελούνται, τις απώλειες, τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους και το ισοδύναμο κύκλωμα. Το δεύτερο περιλαμβάνει την μελέτη και σχεδίαση ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σε θεωρητικό επίπεδο. Συγκεκριμένα γίνεται αρχικά η διαστασιολόγηση του κινητήρα και στην συνέχεια ο υπολογισμός των τυλιγμάτων του στάτη, όπως ο αριθμός των σπειρών ανά φάση και ο αριθμός αγωγών ανά αυλάκι του στάτη, η επιλογή της μορφής του δρομέα και ο υπολογισμός του αριθμού των αγωγών του, ο υπολογισμός του ρεύματος μαγνήτισης. Επίσης, γίνεται ο υπολογισμός του ισοδύναμου κυκλώματος του κινητήρα όπου περιλαμβάνεται η εύρεση της αντίστασης του στάτη και του δρομέα, ο υπολογισμός των επαγωγικών αντιδράσεων και ο υπολογισμός τάσεως και αντίστασης κατά Thevenin. Σε αυτό το κεφάλαιο ακόμα πραγματοποιείται ο υπολογισμός των απωλειών και βρίσκουμε τον βαθμό απόδοσης του κινητήρα. Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών λειτουργίας του κινητήρα (ολίσθηση, ονομαστική ροπή, ροπή ανατροπής, ροπή εκκίνησης και συντελεστή ισχύος) και την χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας.

Τέλος, το τέταρτο κεφάλαιο περιέχει τα συμπεράσματα από την μελέτη και την σχεδίαση του επαγωγικού κινητήρα και τον επίλογο.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Ηλεκτρική μηχανή είναι η γενική ονομασία των συσκευών που είτε μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, είτε μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική, είτε αλλάζουν το ύψος της τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος. Μια τέτοια συσκευή, όταν χρησιμοποιείται για τη μετατροπή μηχανικής ενέργεια σε ηλεκτρική ονομάζεται γεννήτρια. Όταν η συσκευή μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ονομάζεται κινητήρας.

Οι υποκατηγορίες των ηλεκτρικών μηχανών είναι οι μετασχηματιστές, οι μηχανές επαγωγής ή ασύγχρονες μηχανές, οι σύγχρονες μηχανές και οι μηχανές συνεχούς ρεύματος.

Από τα διάφορα είδη ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, ο *τριφασικός ασύγχρονος ή επαγωγικός κινητήρας (induction motor)*, χρησιμοποιείται ευρύτατα στις βιομηχανικές εφαρμογές. Ενδεικτικό της καθολικής χρήσης της μηχανής αυτής είναι ότι οι επαγωγικοί κινητήρες απορροφούν το 60% περίπου, της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ως κινητήρες, εξαιτίας των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν όταν λειτουργούν ως γεννήτριες. Για το λόγο αυτό οι επαγωγικές μηχανές αναφέρονται ως επαγωγικοί κινητήρες.

Η αρχή λειτουργίας των ασύγχρονων κινητήρων διατυπώθηκε από τον *N. Tesla* στα τέλη της δεκαετίας του 1880. Επαγωγικοί κινητήρες με μορφή αντίστοιχη της σημερινής, ήταν εμπορικά διαθέσιμοι από το 1896. Από τότε έως το 1970, οι βελτιώσεις στην ποιότητα των υλικών κατασκευής, στις τεχνικές χύτευσης και στη μόνωση των τυλιγμάτων, επέτρεψε τη δραστική μείωση του μεγέθους και του κόστους κατασκευής των επαγωγικών κινητήρων. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ένας σημερινός ασύγχρονος κινητήρας των 100hp, έχει τις ίδιες διαστάσεις με ένα κινητήρα 7.5hp του 1897.

Η μείωση στις διαστάσεις των επαγωγικών κινητήρων δεν είχε συνοδευτεί από ουσιαστική βελτίωση του βαθμού απόδοσης, έως την πετρελαϊκή κρίση του 1973, εξαιτίας του μικρού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως, στη συνέχεια, όλοι οι κατασκευαστές ανέπτυξαν επαγωγικούς κινητήρες με το χαρακτηρισμό *υψηλής απόδοσης (high efficiency induction motors)*.

Οι κινητήρες αυτοί, αν και έχουν μεγαλύτερο κόστος από τους τυπικούς επαγωγικούς κινητήρες, αποκτούν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς.

## 1.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις *σύγχρονες (synchronous)* και τις *ασύγχρονες ή επαγωγικές μηχανές*. Οι σύγχρονες μηχανές, αντίθετα από τις επαγωγικές, χρησιμοποιούνται κυρίως ως γεννήτριες.

Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, όλων των κατηγοριών, έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας. Σύμφωνα μ' αυτή, ο δρομέας του κινητήρα στρέφεται από τη ροπή, η οποία τείνει να ευθυγραμμίσει τα μαγνητικά πεδία του αναπτύσσουν τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα.

Αν το μαγνητικό πεδίο του στάτη μπορούσε να στραφεί, τότε η αναπτυσσόμενη ροπή θα ανάγκαζε το δρομέα να ακολουθεί το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Επομένως, η λειτουργία όλων κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος στηρίζεται στη δυνατότητα παραγωγής από το τύλιγμα του στάτη ενός *στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου*.

Στους σύγχρονους κινητήρες η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίση με την ταχύτητα που στρέφεται το πεδίο του στάτη. Αντίθετα, στους ασύγχρονους κινητήρες, η ταχύτητα του δρομέα είναι μικρότερη από εκείνη του στρεφόμενου πεδίου του στάτη και εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου.

## 1.2 ΜΕΡΗ ΠΟΥ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ Ο ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ

Το εξωτερικό μέρος αποτελείται από ένα σωληνωτό κυλινδρικό πλαίσιο, που ονομάζεται *στάτης (stator)*. Στο εσωτερικό μέρος του στάτη και σε κατάλληλα διαμορφωμένα αυλάκια παράλληλα με τον άξονα του, υπάρχουν ηλεκτρικοί αγωγοί, τα τυλίγματα ή περιελίξεις, που καταλήγουν σε ακροκιβώτιο σύνδεσης στο εξωτερικό μέρος. Στην εξωτερική επιφάνεια του στάτη υπάρχουν συνήθως πτερύγια για καλύτερη ψύξη. Στο εσωτερικό του στάτη φωλιάζει ο *δρομέας (rotor)*, ένας σχεδόν συμπαγής κύλινδρος πάνω στον άξονα του κινητήρα, αφήνοντας ένα λεπτό διάκενο αέρα μεταξύ της εξωτερικής του επιφάνειας και της εσωτερικής του στάτη. Ο δρομέας αποτελεί το στρεφόμενο μέρος του κινητήρα. Και ο στάτης και ο δρομέας είναι κατασκευασμένοι από σιδηρομαγνητικό υλικό, έτσι ώστε να παρέχουν κατάλληλο δρόμο για την μαγνητική ροή.

Η κατασκευή του δρομέα εξαρτάται από τον τύπο του κινητήρα. Στους περισσότερους επαγωγικούς κινητήρες ο δρομέας αντί για τυλίγματα, έχει έναν ειδικό κλειστό κλωβό, που αποτελείται από ελάσματα χαλκού ή αλουμινίου, τοποθετημένα σε κατάλληλα διαμορφωμένες εσοχές. Τα δυο άκρα των ελασμάτων αυτών βραχυκυκλώνονται με κατάλληλους δακτύλιους από το ίδιο υλικό, δημιουργώντας έτσι ένα βραχυκυκλωμένο κλωβό. Ο κινητήρας αυτού του τύπου χαρακτηρίζεται σαν *ασύγχρονος κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel-cage induction motor)*.

Σε άλλους τύπους επαγωγικών κινητήρων, ο δρομέας διαθέτει κανονική τριφασική περιέλιξη, συνδεδεμένη σε αστέρα. Τα τρία ελεύθερα άκρα των πηνίων συνδέονται σε κατάλληλους δακτυλίους πάνω στο δρομέα. Ο τύπος αυτός του επαγωγικού κινητήρα χαρακτηρίζεται σαν *ασύγχρονος κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor induction motor)*. Στους δακτύλιους αυτούς συνδέονται με ψήκτρες κατάλληλες εξωτερικές μεταβλητές αντιστάσεις, επιτρέποντας έτσι τη ρύθμιση της ωμικής αντίστασης του δρομέα.



### 1.3 ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΡΟΠΗΣ

Για τη δημιουργία ροπής σε έναν ηλεκτροκινητήρα, είναι απαραίτητη η αλληλεπίδραση δυο μαγνητικών πεδίων, ενός περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στο στάτη και ενός άλλου στο δρομέα. Το στρεφόμενο πεδίο του στάτη, λειτουργώντας σαν μόνιμος μαγνήτης, παρασύρει το πεδίο του δρομέα, δημιουργώντας κατάλληλη ροπή και αναγκάζοντάς τον να περιστραφεί.

Για τη δημιουργία ενός στρεφόμενου πεδίου στο στάτη, είναι απαραίτητη η ύπαρξη δυο τουλάχιστον χωρικά μετατοπισμένων πηνίων τα οποία να διαρρέονται από κατάλληλα χρονικά μετατοπισμένα ρεύματα. Με τον τρόπο αυτό διεγείροντας εναλλάξ τα δύο τυλίγματα με κατάλληλα ρεύματα μπορεί να παραχθεί ένα κινούμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο.

Το συμμετρικό τριφασικό σύστημα είναι ένα σύστημα τριών χρονικά μετατοπισμένων τάσεων και ρευμάτων. Εάν ένα τέτοιο σύστημα τροφοδοτήσει τρία διαφορετικά πηνία, τοποθετημένα στο στάτη, με απόσταση 120 μοίρες το ένα από το άλλο, τότε στο διάκενο της μηχανής εμφανίζεται ένα συνιστάμενο περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Γίνεται λόγος στην περίπτωση αυτή για **στρεφόμενο πεδίο στο διάκενο**. Η κατανομή των τριών τυλιγμάτων στον στάτη ενδέχεται να μην καλύπτει όλη την περιφέρειά του, αλλά μια υποδιαίρεσή της και να επαναλαμβάνεται, δημιουργώντας έτσι περισσότερους από 2 μαγνητικούς πόλους, δηλαδή 4, 6, ...,  $2p$ . Στην περίπτωση αυτή ο κινητήρας έχει  **$p$  ζεύγη πόλων**. Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του πεδίου είναι σταθερή και εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας και το πλήθος των ζευγών των πόλων. Η σχέση που δίνει την καλούμενη **σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής (synchronous speed)** σε rad/s είναι,

$$n = \frac{2\pi f}{p} = \frac{100\pi}{p} \text{ [rad/s]}$$

για τη συχνότητα  $f = 50 \text{ Hz}$  του Ελληνικού δικτύου. Μία πιο συνηθισμένη μονάδα μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής είναι η ***rpm (revolutions per minute)***. Θεωρώντας ότι  $1 \text{ rev} = 2\pi \text{ rad}$ , τότε για  $f = 50 \text{ Hz}$ .

$$n = \frac{3000}{p} [\text{rpm}]$$

Καθώς το πεδίο που προκαλείται από το στάτη περιστρέφεται στο διάκενο, επάγει μια εναλλασσόμενη τάση στα πηνία του ακίνητου δρομέα. Η συχνότητα της επαγόμενης τάσης εξαρτάται από το ρυθμό της μεταβολής του πεδίου, δηλαδή για ακίνητο δρομέα είναι ίδια με εκείνη του στάτη. Το πεδίο του δρομέα συνεπώς δεν προέρχεται από ηλεκτρική τροφοδότηση του τυλίγματός του, αλλά από επαγωγή, όπως σε ένα μετασχηματιστή. Εξαιτίας του φαινομένου αυτού, ο κινητήρας αυτός ονομάζεται ***επαγωγικός (induction motor)***.

Τα πηνία του δρομέα είναι βραχυκυκλωμένα, είτε με κλωβό είτε μέσω εξωτερικών αντιστάσεων. Συνεπώς η επαγόμενη τάση προκαλεί τη ροή ισχυρών ρευμάτων στο δρομέα. Τα ρεύματα αυτά δημιουργούν μαγνητεγερτικές δυνάμεις οι οποίες αλληλεπιδρούν με το στρεφόμενο πεδίο του στάτη και δημιουργούν μηχανική ροπή, η οποία αναγκάζει το δρομέα να κινηθεί προς την κατεύθυνση της κίνησης του στρεφόμενου πεδίου.

Καθώς η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα αυξάνει, ο ρυθμός της μεταβολής του πεδίου του στάτη, όπως αυτός φαίνεται από το δρομέα, ελαττώνεται. Το σύστημα των πηνίων στάτη και δρομέα εξακολουθεί να λειτουργεί σαν ένας στρεφόμενος μετασχηματιστής που διεγείρεται από μια εναλλασσόμενη τάση η συχνότητα της οποίας ελαττώνεται, όσο αυξάνει η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Σε κάποια χρονική στιγμή η επαγόμενη στο δρομέα τάση φτάνει σε μια χαμηλή τιμή, ώστε η ΜΕΔ που δημιουργείται από τα ρεύματα στα πηνία του δρομέα, να δίνει μια ροπή ίση με εκείνη του επιβαλλόμενου μηχανικού φορτίου. Τότε ο κινητήρας έχει φτάσει στο σημείο λειτουργίας του και η ταχύτητα περιστροφής είναι λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα του πεδίου στο διάκενο.

Εάν ο κινητήρας λειτουργεί εν κενώ, δηλαδή χωρίς μηχανικό φορτίο στον άξονα, τότε η παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή ισούται με τις τριβές της περιστροφής του άξονα του κινητήρα. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να γίνει κατανοητό ότι όσο υπάρχει ένα μηχανικό φορτίο στο κινητήρα, οσοδήποτε μικρό, ***η ταχύτητα περιστροφής του θα είναι πάντοτε μικρότερη από τη σύγχρονη***. Καθώς η λειτουργία του κινητήρα στηρίζεται στην εξ επαγωγής διέγερση του δρομέα, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να υπάρχει, έστω και ελάχιστη, διαφορά ταχύτητας περιστροφής μεταξύ του πεδίου στο διάκενο και του δρομέα της μηχανής. Εάν οι δυο αυτές ταχύτητες ήταν ίσες τότε τα πηνία του δρομέα θα 'έβλεπαν' μια σταθερή τάση στο πρωτεύον και, φυσικά, η επαγόμενη τάση θα ήταν μηδέν.

Η διαφορά στη ταχύτητα περιστροφής, ή ***ολίσθηση (slip)*** ορίζεται σαν,

$$\text{Ολίσθηση} = n - n_m [\text{rpm}]$$

όπου ***nm*** η πραγματική μηχανική ταχύτητα του δρομέα σε rpm. Ο όρος ολίσθηση χρησιμοποιείται για να εκφράσει ότι, από έναν παρατηρητή που στρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα στο διάκενο, ο δρομέας φαίνεται να ολισθαίνει προς τα πίσω. Η ολίσθηση εκφράζεται συνηθέστερα σαν ποσοστό της σύγχρονης ταχύτητας, σύμφωνα με τη σχέση.

$$s = \frac{n - n_m}{n} \cdot 100\%$$



Η ολίσθηση ενός κινητήρα μπορεί, θεωρητικά, να μεταβάλλεται μεταξύ 0 και 1. Στην πράξη, είναι ιδιαίτερα χαμηλή και κυμαίνεται μεταξύ μερικών δεκάτων % έως το πολύ 10%.

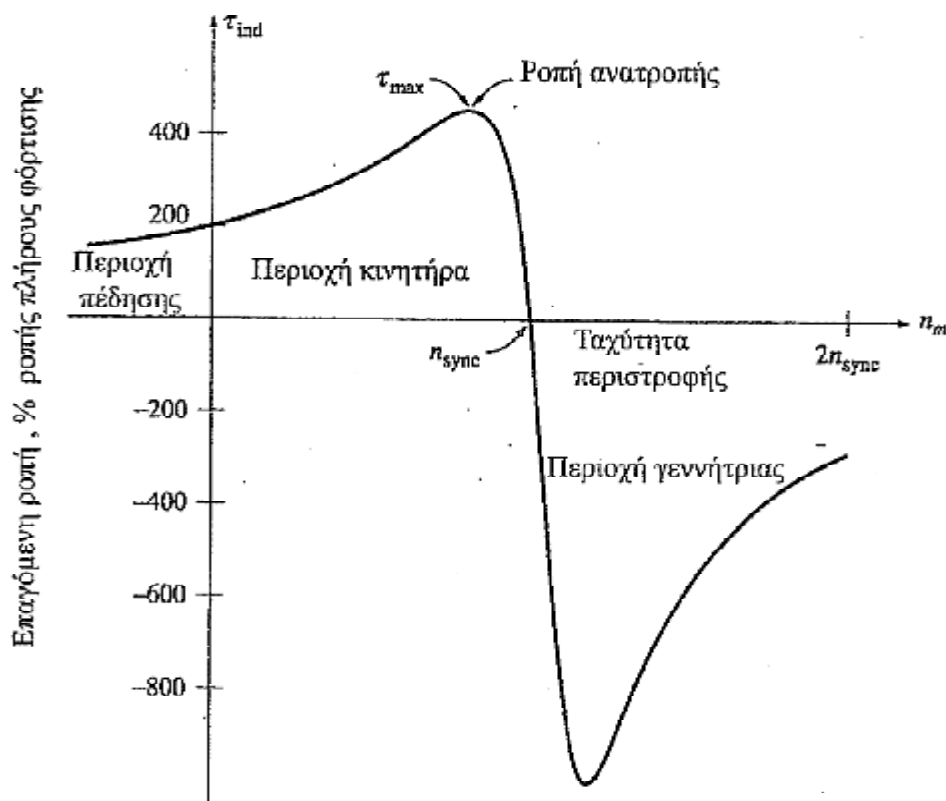
Η συχνότητα ρευμάτων και τάσεων στο δρομέα εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα μεταξύ του σύγχρονα στρεφόμενου πεδίου και του δρομέα, δηλαδή από την ολίσθηση και δίνεται από τη σχέση,

$$f_2 = sf_1$$

όπου  $f_2$  η συχνότητα στο δρομέα και  $f_1$  η συχνότητα τροφοδοσίας του στάτη. Στην ιδιότητα του δρομέα να περιστρέφεται με ταχύτητα διάφορη της σύγχρονης οφείλεται και η ονομασία **ασύγχρονη μηχανή (asynchronous machine)**.

## 1.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗΣ – ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Η καμπύλη ροπής – ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα (σχήμα 5) δίνει τις εξής πληροφορίες:



Σχήμα 5 : Η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, όπου φαίνονται η περιοχή πέδησης και η περιοχή λειτουργίας.

- Η επαγόμενη ροπή του επαγωγικού κινητήρα είναι μηδενική στη σύγχρονη ταχύτητα όπως προαναφέρθηκε.
- Υπάρχει μία μέγιστη ροπή που είναι αδύνατο να ξεπεραστεί. Αυτή η ροπή ονομάζεται ροπή ανατροπής ή ροπή κατάρρευσης (pullout – breakdown torque) και είναι συνήθως δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή του κινητήρα κατά την πλήρη φόρτιση.
- Η ροπή εκκίνησης του κινητήρα είναι λίγο μεγαλύτερη από την ροπή κατά την πλήρη φόρτιση. Έτσι, ο επαγωγικός κινητήρας μπορεί να ξεκινήσει με οποιοδήποτε από τα φορτία που είναι ικανός να κινήσει στη λειτουργία υπό πλήρη ισχύ.
- Αν ο δρομέας του κινητήρα περιστρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την σύγχρονη ταχύτητα, η φορά περιστροφής της επαγόμενης ροπής αντιστρέφεται, με αποτέλεσμα η μηχανή να λειτουργεί ως γεννήτρια.
- Αν η φορά περιστροφής του κινητήρα είναι αντίθετη από τη φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων στο εσωτερικό του, η επαγόμενη ροπή θα σταματήσει τον κινητήρα και θα προσπαθήσει να τον περιστρέψει προς την αντίθετη φορά. Αυτό το στοιχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σκοπό το απότομο σταμάτημα του κινητήρα που ονομάζεται ακαριαία πέδηση (plugging).

## 1.5 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Οι ωμικές αντιστάσεις του στάτη και του δρομέα εξαρτώνται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα (όπως το μήκος και τη διατομή των τυλιγμάτων του, την ποιότητα του χαλκού του, την κλάση μόνωσης) καθώς και από τη θερμοκρασιακή κατάστασή του. Επίσης οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων επηρεάζονται και από το επιδερμικό φαινόμενο.

Οι **απώλειες πυρήνα  $P_{core}$**  (ή αλλιώς σιδήρου) οφείλονται στα φαινόμενα υστέρησης και δινορρευμάτων που αναπτύσσονται στα σιδηρομαγνητικά υλικά των κινητήρων.

Οι **απώλειες υστέρησης (hysteresis losses)  $P_{core,h}$**  αναφέρονται στη μαγνητική ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη μαγνήτιση του πυρήνα, δηλαδή την αναδιάταξη των μαγνητικών τμημάτων του όπως αυτή συμβαίνει σε κάθε περίοδο της εναλλασσόμενης τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα. Μπορεί ν' αποδειχτεί ότι οι απώλειες ενέργειας σε κάθε περίοδο είναι ανάλογες του εμβαδού που καλύπτει ο βρόχος υστέρησης. Όσο μικρότερη είναι η μέγιστη τιμή της μαγνητεγερτικής δύναμης που εφαρμόζεται στον πυρήνα, τόσο μικρότερο είναι το εμβαδό του βρόχου υστέρησης, άρα και οι αντίστοιχες απώλειες.

Οι **απώλειες δινορρευμάτων (eddy current losses)  $P_{core,e}$**  αποτελούν μια ακόμα κατηγορία απωλειών προκαλούμενων από τις μεταβολές της επιβαλλόμενης μαγνητεγερτικής δύναμης σ' έναν πυρήνα. Οφείλονται στην ανάπτυξη δινορρευμάτων στον πυρήνα από τάσεις που επάγει μια χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή και είναι ουσιαστικά οι θερμικές απώλειες που καταναλώνονται στην

αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα. Εξαρτώνται από τη γεωμετρία του πυρήνα, την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού του, την πυκνότητα του ρεύματος και το πάχος των δυναμοελασμάτων.

Οι **μηχανικές απώλειες** ενός επαγωγικού κινητήρα συνίστανται στις **απώλειες λόγω τριβών** μεταξύ των μηχανικών τμημάτων της μηχανής (friction losses) **PF**, και στις **απώλειες εξαερισμού** (windage losses) **PW**. Οι τελευταίες είναι οι απώλειες που προκύπτουν από τις τριβές των μηχανικών τμημάτων του κινητήρα με τον αέρα λόγω περιστροφής. Για τις μηχανικές απώλειες χρησιμοποιείται ο συμβολισμός **PF&W**. Κατά προσέγγιση θεωρούνται ανάλογες του κύβου της περιστροφικής ταχύτητας του κινητήρα.

Τέλος, στις **κατανεμημένες απώλειες Pstray** περιλαμβάνονται όλες οι απώλειες που δεν μπορούν να υπολογιστούν σε καμία από τις προηγούμενες κατηγορίες και συνήθως οφείλονται στην αύξηση της μαγνητικής ροής σκέδασης κατά την αύξηση φορτίου και στις υψίσυχνες διακυμάνσεις της ροής αυτής (οι διακυμάνσεις της ροής προέρχονται από την παραμόρφωση της ημιτονοειδούς ιδανικά κατανομής της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο, λόγω της κατανομής των αγωγών στα αυλάκια). Τέτοιες μη υπολογίσιμες απώλειες μπορεί να είναι:

▼ Απώλειες δινορρευμάτων στις περιελίξεις εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου που προκαλεί η μαγνητική ροή σκέδασης, με συνέπεια την μείωση της ενεργού διατομής των αγωγών και άρα την αύξηση της ωμικής των αντιστάσεως.

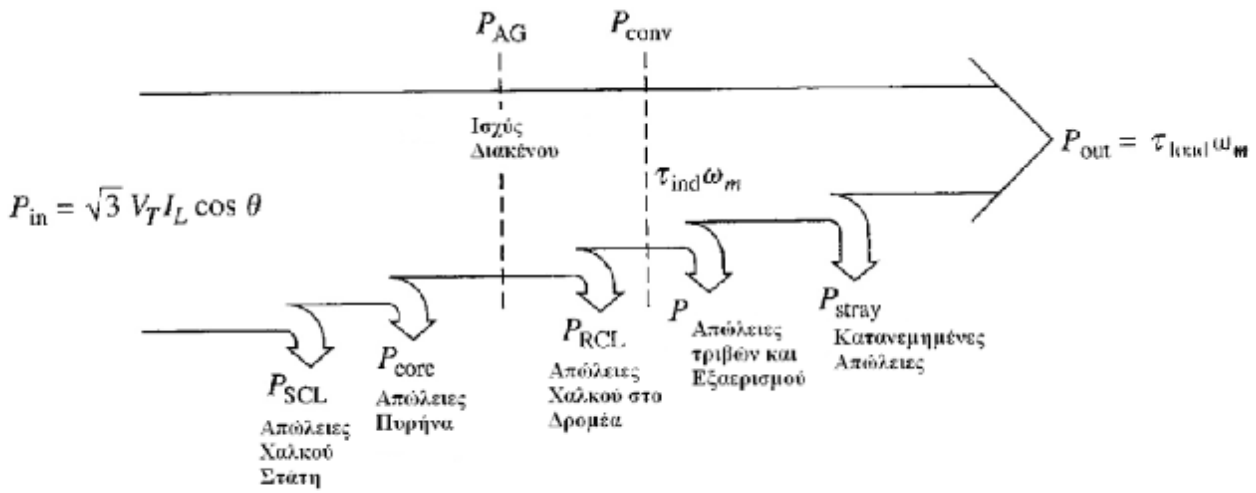
▼ Απώλειες δινορρευμάτων λόγω της μαγνητικής ροής σκέδασης στις κεφαλές των τυλιγμάτων του στάτη, με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών πυρήνα και την πρόκληση απωλειών σιδήρου στο περίβλημα και σε άλλα μη ενεργά μέρη του κινητήρα. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από τη γεωμετρία των κεφαλών του κινητήρα.

Η τιμή τους προσδιορίζεται συμβατικά ως το 1% επί της ισχύος εξόδου του κινητήρα κατά τη λειτουργία με πλήρες φορτίο.

Οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες πυρήνα συνήθως υπολογίζονται μαζί και ονομάζονται **απώλειες χωρίς φορτίο** ή **απώλειες της εν κενώ λειτουργίας**.

Οι απώλειες πυρήνα, οι μηχανικές και οι κατανεμημένες απώλειες πολλές φορές προστίθενται όλες μαζί και ονομάζονται **απώλειες περιστροφής** (rotational losses). Ο λόγος είναι ότι οι τιμές των παραπάνω απωλειών εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Έτσι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες τριβών, εξαερισμού και οι κατανεμημένες απώλειες. Από την άλλη μεριά οι απώλειες πυρήνα μειώνονται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα (όταν δηλαδή η  $n$  προσεγγίζει την  $n_{sync}$ ).

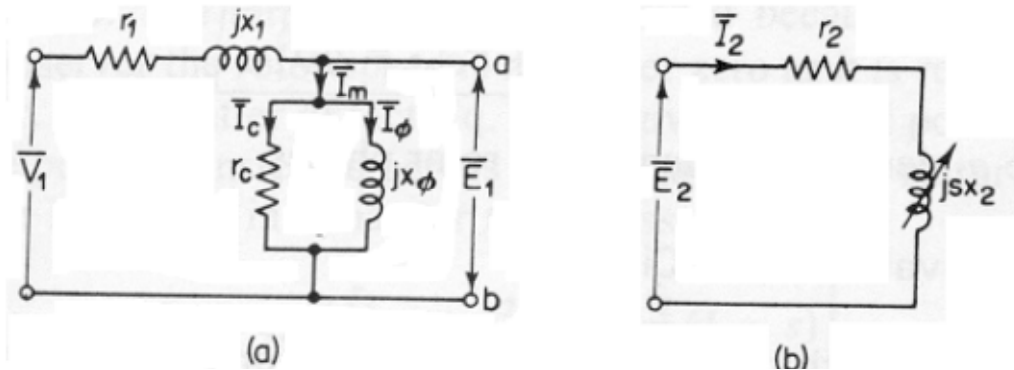
Παρά την παραπάνω εξάρτηση των επιμέρους απωλειών περιστροφής από την ταχύτητα περιστροφής, η συνολική τιμή τους θεωρείται σταθερή ακόμα και για μεταβαλλόμενη περιστροφική ταχύτητα κινητήρα, αφού οι επιμέρους απώλειες μεταβάλλονται προς αντίθετες κατευθύνσεις.



Σχήμα 4 : Το διάγραμμα ροής ισχύος ενός επαγωγικού κινητήρα.

## 1.6 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα μοιάζει με αυτό ενός τριφασικού μετασχηματιστή. Το πρωτεύον κύκλωμα αντιστοιχεί στο στάτη και το δευτερεύον κύκλωμα στο δρομέα. Μάλιστα τη στιγμή που ο δρομέας είναι ακίνητος, το ισοδύναμο κύκλωμα είναι ακριβώς το ίδιο με εκείνο του μετασχηματιστή. Οι αλλαγές που υπάρχουν ανάμεσα στα δύο ισοδύναμα οφείλονται μόνο στο γεγονός ότι το δευτερεύον τύλιγμα (ο δρομέας) περιστρέφεται και παράγει μηχανική ροπή. Το αρχικό ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα είναι:



Σχήμα 1.4 Αρχικό ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα

Στο σχήμα 1.4, το κύκλωμα στα αριστερά είναι ανεξάρτητο από το κύκλωμα στα δεξιά. Επίσης η τάση  $V_1$  είναι η φασική τάση που τροφοδοτούμε τον κινητήρα.

Από τα στοιχεία του κυκλώματος, οι ωμικές αντιστάσεις  $r_1$ ,  $r_2$  εκφράζουν τις απώλειες χαλκού στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα. Οι αντιδράσεις  $x_1 = L_1 \omega$  και  $sx_2$ , όπου  $x_2 = L_2 \omega$ , με  $\omega = 2\pi f \text{ rad/sec}$ , εκφράζουν τη σκέδαση στο στάτη και στο δρομέα αντίστοιχα, ενώ στον κλάδο μαγνήτισης οι  $r_c$ ,  $x_\phi$ , εκφράζουν τις απώλειες σιδήρου και την αντίδραση μαγνήτισης του κινητήρα.

Η πρώτη παρατήρηση αφορά στα μεγέθη του ισοδύναμου κυκλώματος του κινητήρα. Το ρεύμα μαγνήτισης ενός κινητήρα είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ενός μετασχηματιστή, λόγω του ότι στον κινητήρα το μαγνητικό κύκλωμα κλείνει μέσα από το διάκενο και όχι μέσα από πυρήνα όπως στο μετασχηματιστή. Έτσι το ρεύμα μαγνήτισης είναι 25-40% του ονομαστικού ρεύματος, συνεπώς ο κλάδος μαγνήτισης δεν μπορεί να αγνοηθεί. Για τους ίδιους λόγους και οι απώλειες σκέδασης είναι μεγαλύτερες από εκείνες ενός μετασχηματιστή.

Η δεύτερη παρατήρηση αναφέρεται στο ισοδύναμο κύκλωμα του δρομέα. Καθώς η συχνότητα στο δρομέα είναι  $f_2 = s f_1$ , η αντίδραση σκέδασης θα είναι

$$(s\omega)L_2 = s(\omega L_2) = sX_2 \quad (1.8)$$

εισάγοντας έτσι και την ολίσθηση στο ισοδύναμο κύκλωμα.

Είναι προφανές ότι τα ρεύματα και οι τάσεις του κυκλώματος του δρομέα στο σχήμα 1.4 αναφέρονται σε συχνότητα  $f_2 = s f_1$ , ενώ τα ρεύματα και οι τάσεις στο κύκλωμα του στάτη στα αριστερά αναφέρονται στη συχνότητα του δικτύου (πχ 50 Hz).

Τα δύο κυκλώματα δεν έχουν καμιά γαλβανική σύνδεσή αλλά συνδέονται μόνο μέσα από την πεπλεγμένη ροή στο διάκενο του κινητήρα.

Θεωρώντας ότι  $\Psi$  είναι η πεπλεγμένη ροή στο διάκενο, τότε για το πρωτεύον του κινητήρα θα ισχύει:

$$E_1 = j\omega\Psi = U_1 - j\omega L_{11}I_1 - r_1 I_1 \quad (1.9\alpha)$$

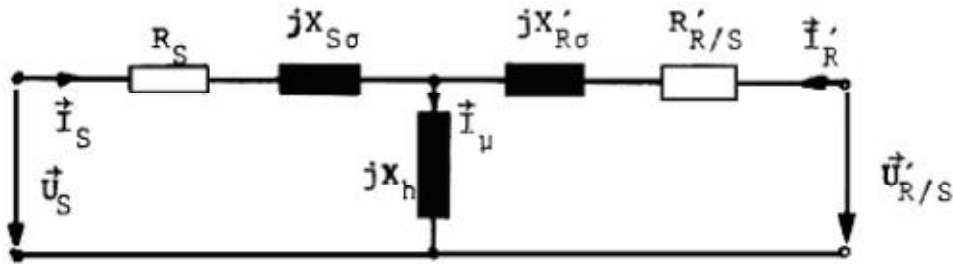
Αντίστοιχα για το βραχυκυκλωμένο δρομέα (δευτερεύον) και θεωρώντας ότι η συχνότητα είναι  $f_2 = s f_1$  ισχύει:

$$E_2 = j\omega\Psi = U_2 - j\omega L_{22}I_2 - r_2 I_2 \quad (1.9\beta)$$

Καθώς όμως  $E_2 = sE_1$ , για τη σύνδεση των δύο σχέσεων σε ένα κοινό ισοδύναμο, διαιρείται η (1.9β) με  $s$  δίνοντας τελικά:

$$\frac{E_2}{s} = j\omega\Psi = U_1 - j\omega L_{21}I_2 - \frac{r_2}{s} I_2$$

Μετά τη διαίρεση της σχέσης 1.9.β με το  $s$  έχουν ταυτόχρονα αναχθεί τα μεγέθη του κυκλώματος του δρομέα στη συχνότητα του δικτύου. Ο συνδυασμός των 1.9α και 1.9γ οδηγεί στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχ.1.5α, όπου ο κλάδος με τα στοιχεία μαγνήτισης έχει αντικατασταθεί με την πηγή τάσης  $E_1 = j\omega\Psi$  ( $jX_h$ ). Η πηγή αυτή είναι δυνατόν να μεταφερθεί στην είσοδο του κυκλώματος. Στα σχήματα αυτά  $U$  είναι η πολική τάση τροφοδοσίας του κινητήρα.



Σχήμα 1.5 Ισοδύναμο κύκλωμα ασύγχρονης μηχανής

Το ρεύμα του κινητήρα μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση

$$\mathbf{I} = \frac{U/\sqrt{3}}{\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right) + j\omega(L_1 + L_2)} \quad (1.10\alpha)$$

με μέτρο

$$I = \frac{U/\sqrt{3}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + ((L_1 + L_2)\omega)^2}} \quad (1.10\beta)$$

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή της ισοδύναμης ωμικής αντίστασης του δρομέα εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής και μεταβάλλεται μεταξύ των τιμών  $r_2$  και  $\infty$ , καθώς η ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλεται από 0 έως τη σύγχρονη, αντίστοιχα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ 2 ΠΟΛΩΝ ΙΣΧΥΟΣ 22kW**

Στην παρακάτω μελέτη αναφέρονται τα βασικά βήματα για την σχεδίαση ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα . Το πρώτο βήμα είναι ο προσδιορισμός των τεχνικών προδιαγραφών του κινητήρα όπου κυκλοφορεί στην αγορά και έχει κατασκευαστεί από την εταιρία VALIADIS S.A . Στην συγκεκριμένη μελέτη οι προδιαγραφές είναι οι ακόλουθες:

**ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ:** 22 kW

**ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ:** 2942 στρ./λεπτό

**ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (ΠΟΛΙΚΗ):** 400V

**ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ:** 50Hz

**ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΑΣΕΩΝ:** 3

**ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ:** ΑΣΤΕΡΑΣ

**ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ:** 0,89

**ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ:** 0,910

**ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗ:** 71,45Nm

**ΡΟΠΗ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ:** 3,1(επί την ονομαστική)Nm

**ΡΕΥΜΑ ΜΕ ΑΚΙΝΗΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΡΟΜΕΑ:** 7,6A

**ΡΟΠΗ ΑΝΑΤΡΟΠΗΣ:** 3,14(επί την ονομαστική)Nm

**ΚΛΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ:** B

Κάποια από τα παραπάνω στοιχεία (π.χ. συντελεστής απόδοσης, συντελεστής ισχύος, ροπή κλπ) θα επιδιώξουμε να τα πετύχουμε κατά την σχεδίαση του κινητήρα. Αν δεν τα καταφέρουμε θα πρέπει να αλλάξουμε κάποια από τα χαρακτηριστικά του κινητήρα μας.

Στην συνέχεια ξεκινάμε την σχεδίαση με την αρχική διαστασιολόγηση του κινητήρα. Κατά την διάρκεια της σχεδίασης αρκετές από τις διαστάσεις θα αλλάξουν!

## 2.1 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Ξεκινάμε με τον υπολογισμό της εσωτερικής διαμέτρου του στάτη  $D_{IS}$  η οποία δίνεται από τον τύπο:

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

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:

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

Όπου:

$$K_E = \frac{E_A}{V_\varphi} \approx 0,98 - 0,005 \cdot p_i = 0,98 - 0,005 \cdot 1 = 0,975$$

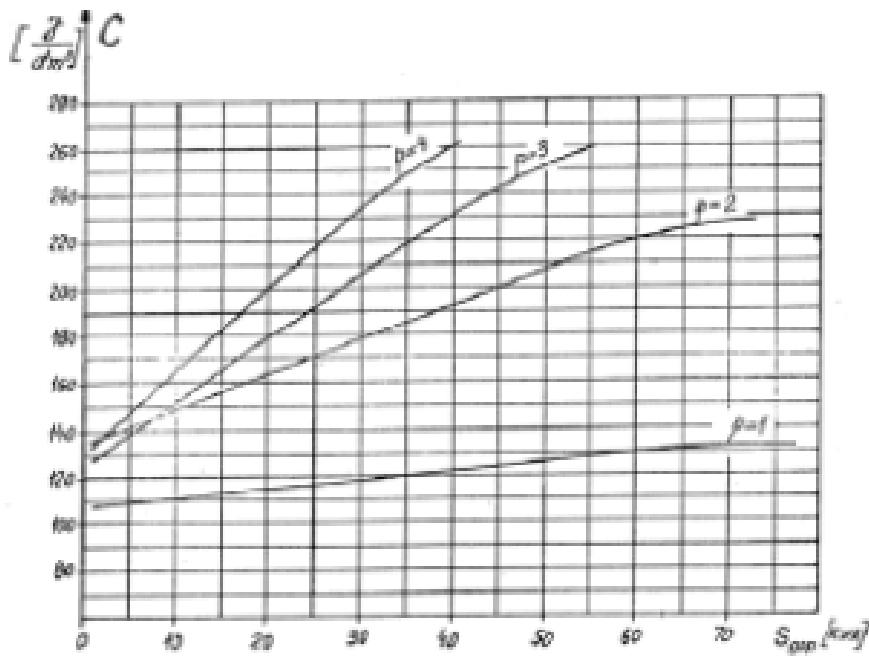
Άρα:

$$S_{gap} = \frac{K_E \cdot P_n}{\eta_N \cdot \cos\varphi} = \frac{0,975 \cdot 22000W}{0,910 \cdot 0,89} = 26484,75 VA$$

Ο συντελεστής  $\lambda$  είναι ο λόγος του μήκους του πυρήνα προς το πολικό βήμα και όταν πρόκειται για διπολικούς κινητήρες παίρνει τιμή μεταξύ 0,6 και 1 (εμπειρική τιμή – από τον πίνακα 15.1 σελ. 449). Στη συγκεκριμένη μελέτη επιλέγουμε τιμή ίση με 0,8.

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. Μπορεί όμως να υπολογιστεί και από την παρακάτω γραφική παράσταση η οποία ισχύει για μικρής ισχύος κινητήρες:





Σχήμα 2.1: Υπολογισμός του συντελεστή Esson

Από το παραπάνω διάγραμμα παίρνουμε μια προσεγγιστική τιμή:

$$C_0 \approx 118 \times 10^3 \text{ J/m}^3$$

Αντικαθιστώντας όλα τα παραπάνω στην σχέση (1) υπολογίζουμε:

$$D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 1}{\pi \cdot 0,8} \cdot \frac{1}{50} \cdot \frac{26484,75}{118 \cdot 10^3}} = 0,152 \text{ m} = 15,2 \text{ cm}$$

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

$$\lambda = \frac{L}{\tau} \Rightarrow L = \lambda \cdot \tau \Rightarrow L = \frac{\lambda \cdot \pi \cdot D_{IS}}{2 \cdot p_i} = \frac{0,8 \cdot 3,14 \cdot 0,152}{2 \cdot 1} \text{ m} = 0,191 \text{ m} = 19,1 \text{ cm}$$

Όπου  $\tau$  είναι το πολικό βήμα, δηλαδή η απόσταση ανάμεσα σε δυο διαδοχικούς πόλους (pole pitch):

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{IS}}{2 \cdot p_i} = \frac{3,14 \cdot 0,152 \text{ m}}{2 \cdot 1} = 0,24 \text{ m} = 24 \text{ cm}$$

Η εξωτερική διάμετρος του κινητήρα υπολογίζεται αρχικά από την εμπειρική σχέση:

$$\frac{D_{IS}}{D_{out}} = 0,58 \Rightarrow D_{out} = \frac{D_{IS}}{0,58} = 0,26 \text{ m} = 26 \text{ cm}$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει από εμπειρικά δεδομένα που εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα:

$2p_i$	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

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

$$g = (0,1 + 0,012 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} m = (0,1 + 0,012 \cdot \sqrt[3]{22000}) \cdot 10^{-3} m = 0,44 mm$$

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι τα διάκενα είναι συγκεκριμένα, π.χ. **0,35mm, 0,4mm, 0,45mm, 0,5mm** κλπ. Εμείς θα διαλέξουμε διάκενο ίσο με **0,45mm**. 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.

## 2.2 ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΣΤΑΤΗ

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:

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

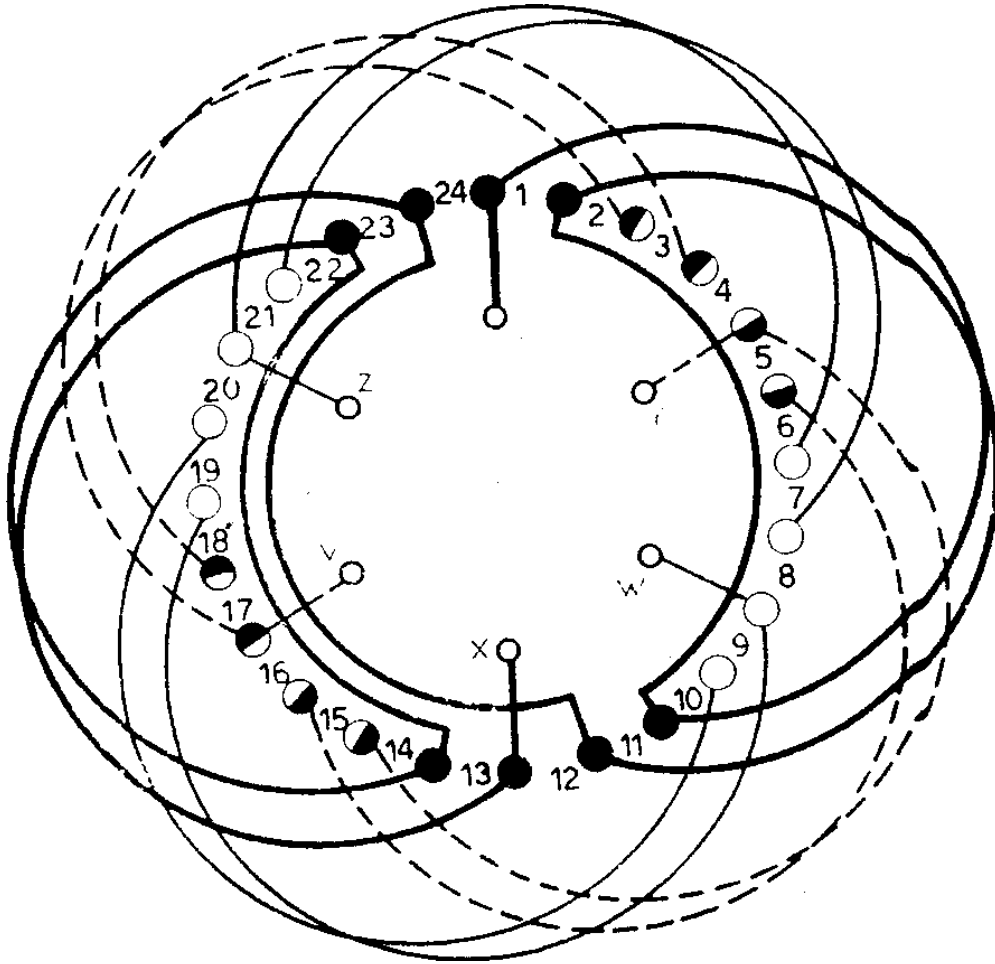
Όπου,  $p_i$ , τα ζεύγη πόλων,  $m$  ο αριθμός των φάσεων και  $q$  ο αριθμός των αυλακιών ανά φάση και ανά πόλο. Επιλέγουμε 4 αυλάκια ανά φάση και πόλο άρα:

$$N_S = 2 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 3 = 24 \text{ αυλάκια}$$

Το πολικό βήμα θα είναι:

$$y_\pi = \frac{24}{2 \cdot 1} = 12 \text{ αυλάκια}$$

Θα φτιάξουμε ένα τύλιγμα με μια στρώση (1 μάτσο ανά αυλάκι), με έναν πραγματικό και έναν φανταστικό πόλο, το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.2 : Το τύλιγμα της Μηχανής. 24 αυλακώσεις, 2 πόλοι (ένας πραγματικός και ένας φανταστικός)

Ο συντελεστής τυλίγματος θα δίνεται από την σχέση:

$$K_{\tau} = K_W = \frac{\sin \frac{q \cdot a}{2}}{q \cdot \sin \frac{a}{2}} = \frac{\sin \frac{4 \cdot 15}{2}}{4 \cdot \sin \frac{15}{2}} = 0,96$$

Όπου α είναι η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών αυλακιών σε ηλεκτρικές μοίρες οι οποίες δίνονται από την σχέση:

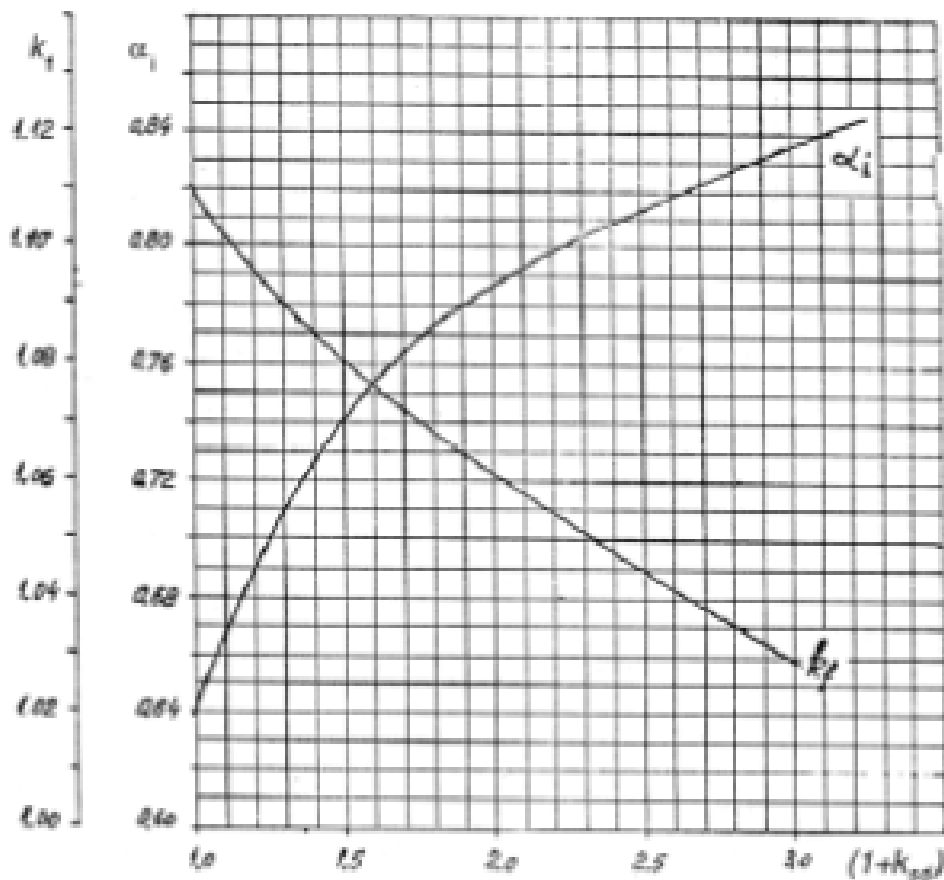
$$\alpha = p_i \cdot a_r$$

Όπου α<sub>r</sub> η γεωμετρική γωνία (360°/24 αυλάκια=15° στην περίπτωση μας).

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



Εικόνα 2: Form Factor  $K_f$  και flux density shape factor  $\alpha_i$  σαν συνάρτηση του  $1+K_{ST}$

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 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  $\alpha_i=0,73$ . Αναλυτικός υπολογισμός του  $1+K_{ST}$  θα γίνει αργότερα σε άλλη φάση της μελέτης.

Για μηχανές με 2 πόλους συνίσταται η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο να είναι μεταξύ 0,5-0,75T. Εμείς θα διαλέξουμε μια μαγνητική επαγωγή ίση με 0,5T. Άρα η μαγνητική ροή στο διάκενο θα είναι ίση με:

$$\varphi = 0,73 \cdot 0,24 \cdot 0,191 \cdot 0,5 = 16,7 \cdot 10^{-3} Wb$$

Στην συνέχεια υπολογίζουμε τον αριθμό σπειρών ανά φάση ο οποίος δίνεται από την σχέση:

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

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 γραφική παράσταση 2. Στην περίπτωση μας παίρνει τιμή 1,07. Άρα:

$$W_i = \frac{K_E \cdot V_\phi}{4 \cdot K_f \cdot K_\tau \cdot f \cdot \phi} = \frac{0,975 \cdot 400 / \sqrt{3}}{4 \cdot 1,07 \cdot 0,96 \cdot 50 \cdot 16,7 \cdot 10^{-3}} = 65 \text{ σπειρες} / \text{φάση}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον αριθμό αγωγών ανά αυλάκι:

$$n_s = \frac{a_i \cdot W_i}{p_i \cdot q} = \frac{1 \cdot 65}{1 \cdot 4} = 16 \text{ αγωγοί} / \text{αυλάκι}$$

Ο συντελεστής  $a_i$  εκφράζει τον αριθμό των παράλληλων αγωγών που στην περίπτωση μας είναι 1.

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε την διατομή των αγωγών που θα χρησιμοποιήσουμε στον στάτη. Το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα μας θα είναι ίσο με:

$$I_{ov} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_n \cdot \cos\phi \cdot \eta} = \frac{22000W}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,89 \cdot 0,910} = 39,2A$$

Για να υπολογίσουμε την διατομή των αγωγών θα επιλέξουμε μια πυκνότητα ρεύματος. Για κινητήρες 2 πόλων συνίσταται η πυκνότητα ρεύματος να βρίσκεται μεταξύ:

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

Όσο μεγαλώνει η πυκνότητα του ρεύματος μειώνεται η διατομή των αγωγών αλλά μεγαλώνουν οι απώλειες χαλκού. Επιλέγουμε μια πυκνότητα ρεύματος ίση με 7 A/mm<sup>2</sup> και υπολογίζουμε την διατομή:

$$A_{cu} = \frac{I_{ov}}{J_{\cos}} = \frac{39,2A}{7A/mm^2} = 5,6mm^2$$

Η διάμετρος του αγωγού θα είναι ίση με:

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{cu}}{\pi \cdot 5}} = 1,19mm$$

Από τον πίνακα της επόμενης σελίδας επιλέγουμε την αμέσως επόμενη τυποποιημένη διάμετρο η οποία είναι 1,20mm. **Αν η διάμετρος είναι μεγαλύτερη από 1,3mm τότε για κινητήρες μικρής ισχύος επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε παράλληλους κλάδους μικρότερης διαμέτρου.**

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

*Πίνακας 2: Τυποποιημένες διαμέτροι αγωγών σάττη.*

## 2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΙΩΝ ΤΟΥ ΣΤΑΤΗ

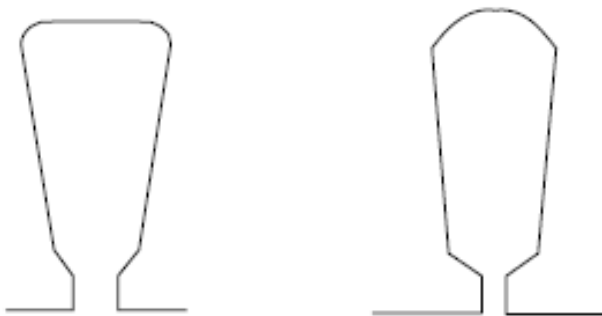
Από την στιγμή που γνωρίζουμε την διατομή των αγωγών και τον αριθμό τους μπορούμε να υπολογίσουμε τη απαιτούμενη διατομή των αυλακιών του στάτη από την σχέση:

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

Όπου  $K_{fill}$  είναι μια σταθερά (fill factor) η οποία εξαρτάται από το πάχος της μόνωσης που χρησιμοποιούμε και για κινητήρες μεγαλύτερους από 10kW παίρνει τιμές από 0,4 έως 0,44. Επιλέγουμε τιμή 0,44 οπότε η διατομή των αυλακιών θα είναι ίση με:

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_i \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}} = \frac{\pi \cdot 1,20^2 \cdot 5 \cdot 16}{4 \cdot 0,44} = 206mm^2$$

Η μορφή των αυλακιών του στάτη έχουν συνήθως μια από τις παρακάτω μορφές:



Εικόνα 3: Συννηθισμένη μορφή αυλακιών του στάτη.

Στην εικόνα 4 της επόμενης σελίδας φαίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις που θα πρέπει να υπολογιστούν. Κάποιες από τις διαστάσεις αυτές υπολογίζονται εμπειρικά από την βιομηχανική εμπειρία. Πιο συγκεκριμένα:

$b_{os}=2-3mm$ , επιλέγουμε 2,5mm.

$h_{os}=0,5-1mm$ , επιλέγουμε 0,5mm.

$h_w=1-4mm$ , επιλέγουμε 1mm.

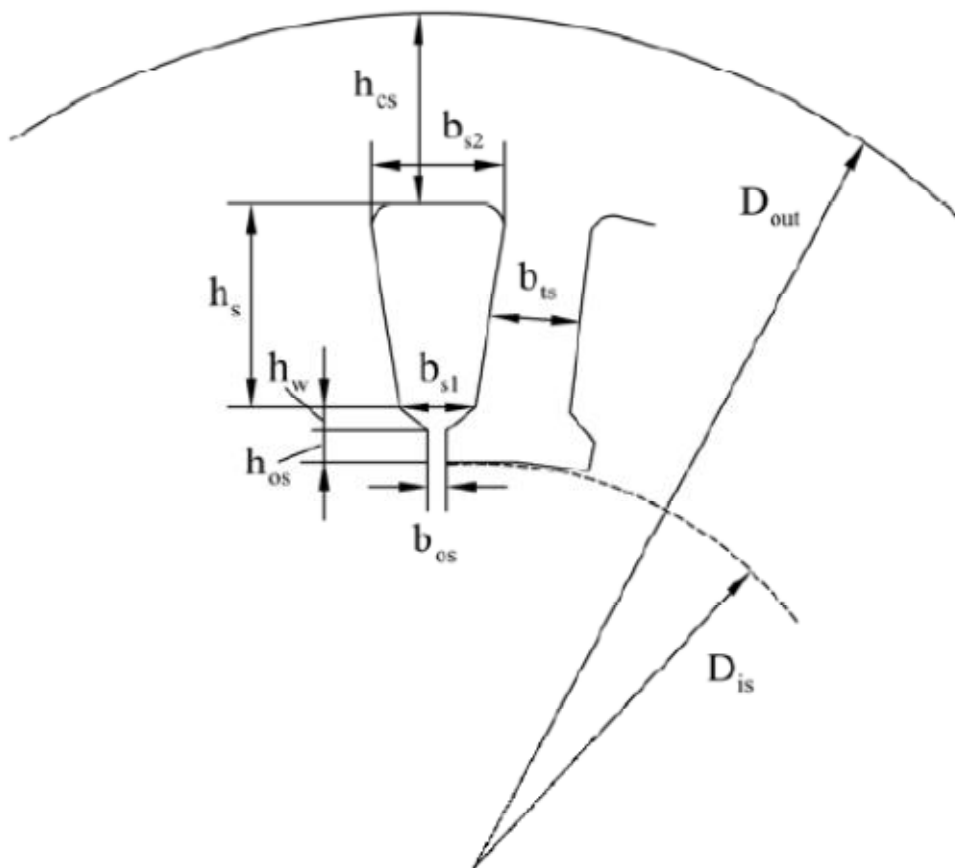
Αν υποθέσουμε ότι όλη η μαγνητική ροή περνά μέσα από το «δόντι» του στάτη τότε ισχύει η σχέση:

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

Αριστερά της παρένθεσης είναι η μαγνητική ροή στο διάκενο και δεξιά η μαγνητική ροή στο «δόντι» του αυλακιού.  $K_{Fe}$  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 1,5T έως 1,65T. Η μαγνητική επαγωγή είναι φυσικά μεγαλύτερη σε σχέση με την μαγνητική επαγωγή του διακένου λόγω της παρουσίας του σιδηρομαγνητικού υλικού. Άρα:

$$b_{ts} = \frac{B_g \cdot \tau_s \cdot L}{B_{ts} \cdot L \cdot K_{Fe}} = \frac{0,5 \cdot 0,02}{1,65 \cdot 0,96} = 6,3 \cdot 10^{-3} m$$

**Θα πρέπει να τονιστεί ότι το πλάτος του δοντιού δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο από 3,5mm για κατασκευαστικούς λόγους.**



Εικόνα 4: Οι διαστάσεις του στάτη αναλυτικά.

$$b_{s1} = \frac{\pi \cdot (D_{is} + 2h_{os} + 2h_w)}{N_s} - b_{ts}$$

$$= \frac{\pi \cdot (152 + 2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 1) \cdot 10^{-3}}{24} - 6,3 \cdot 10^{-3} \Rightarrow b_{s1} = 14mm$$



Επίσης:

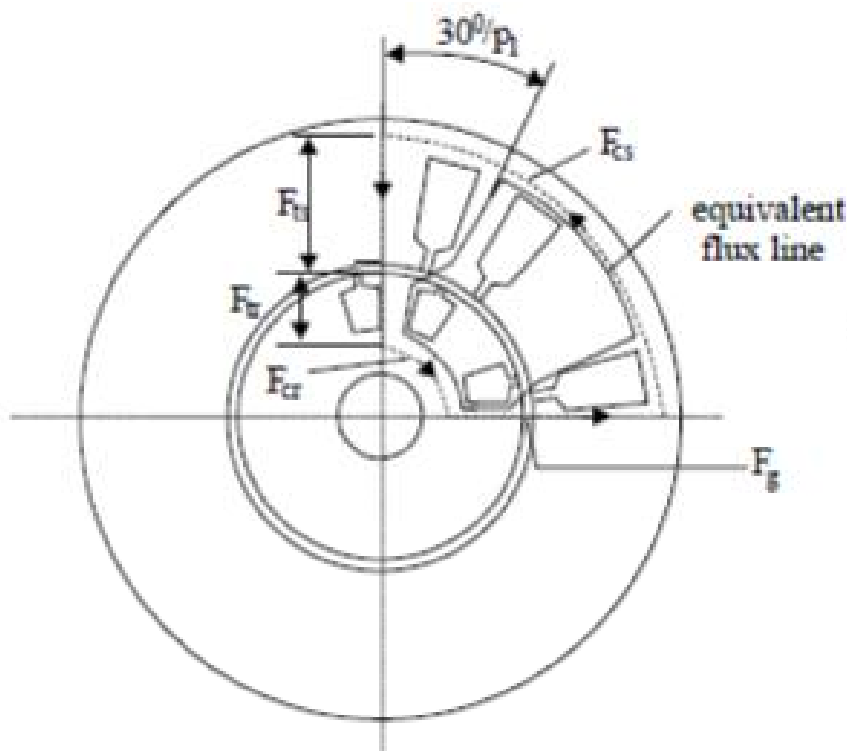
$$b_{s2} = \sqrt{4 \cdot A_{su} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_s}\right) + b_{s1}^2} = \sqrt{4 \cdot 206 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{24}\right) + 14^2} = 17,4mm$$

$$A_{su} = h_s \cdot \frac{(b_{s1} + b_{s2})}{2} \Rightarrow h_s = \frac{2 \cdot A_{su}}{(b_{s1} + b_{s2})} \Rightarrow h_s = \frac{2 \cdot 206}{(14 + 17,4)} = 13,1mm$$

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τον συντελεστή  $1+K_{st}$  (tooth saturation factor) στον οποίο αυθαίρετα είχαμε δώσει μια τιμή ίση με 1,5. Ο συντελεστής δίνεται από την σχέση:

$$1 + K_{st} = 1 + \frac{F_{mts} + F_{mtr}}{F_{mg}}$$

Όπου  $F_{mts}$ ,  $F_{mtr}$  και  $F_{mg}$  είναι η μαγνητεγερτική δύναμη στον στάτη, στον δρομέα και στο διάκενο αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 5.

Η μαγνητεγερτική δύναμη στο διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα δίνεται από την σχέση:

$$F_{mg} = K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_o}$$

Όπου  $K_C$  είναι ο συντελεστής Carter (Carter coefficient) ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$K_C = \frac{B_{g1max}}{B_{g1}}$$

Όπου  $B_{gmax}$  είναι η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο χωρίς ανώτερες αρμονικές και  $B_g$  είναι η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο με ανώτερες αρμονικές (αναφέρεται στην βασική).

Ο συντελεστής Κάρτερ μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά αλλά χρειάζονται κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του δρόμου. Για να συνεχίσουμε την μελέτη θεωρούμε μια τυπική τιμή για τον συντελεστή αυτό ίση με 1,2. Προκύπτει λοιπόν ότι:

$$F_{mg} = K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} = 1,2 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,5}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 215At$$

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. Από τον παρακάτω πίνακα παίρνουμε συνηθισμένες (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

Πίνακας 3. Δεδομένα από την καμπύλη μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού.

Επιλέγοντας  $B_{ts}=1,65T$  (συνήθως παίρνει τιμές μεταξύ  $1,5T - 1,65T$ ) προκύπτει ότι  $H_{ts}=3460At$ . Άρα:

$$F_{mts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w) = 3460 \cdot (13,1 + 0,5 + 1) \cdot 10^{-3} = 50,5At$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη στον δρομέα υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_{mtr} = K_{st} \cdot F_{mg} - F_{mts} = 0,5 \cdot 215 - 50,5 = 57At$$

Οι τιμές των  $F_{mts}$  και  $F_{mtr}$  πρέπει να είναι κοντά. Εάν το  $F_{mtr} \ll F_{mts}$ , θα πρέπει να θεωρήσουμε μικρότερη μαγνητική επαγωγή στο διάκενο και να επιστρέψουμε στον υπολογισμό της μαγνητικής ροής  $\Phi$ .

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε το  $h_{cs}$  (βλέπε εικόνα 4). Αυτό δίνεται από την σχέση:

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{IS} - 2 \cdot (h_{os} + h_w + h_s))}{2} = \frac{260 - (152 + 2 \cdot (0,5 + 1 + 13,1))}{2} \rightarrow h_{cs} = \frac{78,8}{2} = 39,4mm$$

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

$$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot h_{cs}} = \frac{16,7 \cdot 10^{-3}Wb}{2 \cdot 0,191m \cdot 39,4 \cdot 10^{-3}m} = 1,11T$$

Η συγκεκριμένη τιμή της μαγνητικής επαγωγής είναι μικρή αν λάβουμε υπόψη μας ότι θέλουμε να βρίσκεται μεταξύ  $1,4T-1,7T$ . Για να επιλύσουμε το πρόβλημα έχουμε τρεις δυνατότητες:

1. Να μειώσουμε την εξωτερική διάμετρο του στάτη.
2. Να εισάγουμε μια μικρότερη τιμή για τον συντελεστή  $\lambda$  (stack aspect ratio) 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:

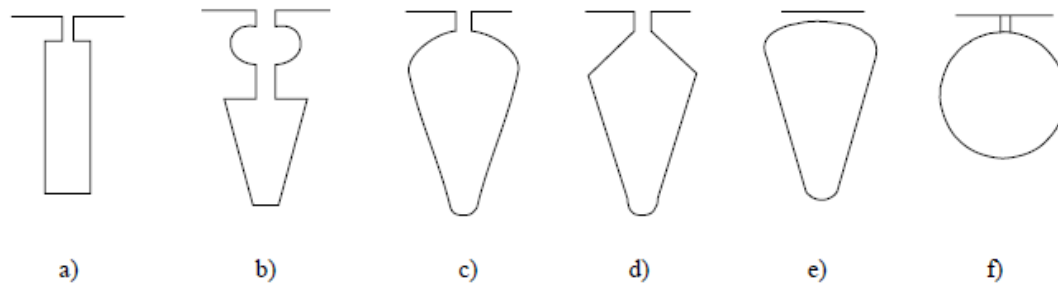
$$h_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot B_{cs}} = \frac{16,7 \cdot 10^{-3}Wb}{2 \cdot 0,191m \cdot 1,5T} = 29,1mm$$

Άρα η εξωτερική διάμετρος θα πρέπει να μειωθεί κατά  $2 \cdot (29,1 - 5)mm = 48,2mm$ . Άρα η εξωτερική διάμετρος της μηχανής θα είναι:

$$D_{out} = 260 - 48,2 = 211,8 = 212mm$$

## 2.4 ΔΡΟΜΕΑΣ

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



Επιλέγουμε την τρίτη μορφή. Στη συνέχεια θα επιλέξουμε τον αριθμό των αγωγών. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τυποποιημένες τιμές που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία:

$2p_1$	$N_s$	$N_r$ – 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

Πίνακας 4. Αριθμός αγωγών δρομέα σε συνάρτηση με τον αριθμό των πόλων και τον αριθμό των αυλακιών του στάτη.

Διαλέγουμε 18 αγωγούς και συνεχίζουμε με τον υπολογισμό του ονομαστικού ρεύματος ενός αγωγού του δρομέα:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_{w1} \cdot I_{1n} \cdot K_I}{N_r}$$

Όπου :

$$K_I = 0,8 \cdot \cos\varphi + 0,2 = 0,912$$

Το  $\cos\varphi$  είναι ο συντελεστής ισχύος της μηχανής που θέλουμε να επιτύχουμε (0,89 στην περίπτωση μας). Άρα:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_{w1} \cdot I_{1n} \cdot K_I}{N_r} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 65 \cdot 0,96 \cdot 39,2 \cdot 0,912}{18} = 743,6A$$

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

$$A_b = \frac{743,6A}{3,42 A/mm^2} = 217,4 \cdot 10^{-6} m^2$$

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

$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p_i}{N_r}} = \frac{743,6A}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 1}{18}} = 2141 A$$

Η διατομή του δακτυλίου βραχυκύκλωσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$A_{er} = \frac{I_{er}}{J_{er}} = \frac{2141A}{0,8 \cdot 3,42 A/mm^2} = 782,5 \cdot 10^{-6} m^2$$

## 2.4.1 Υπολογισμός των διαστάσεων των αγωγών του δρομέα

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

$$\tau_r = \frac{\pi \cdot (D_{is} - 2g)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (152 - 2 \cdot 0,45)}{18} = 26,37mm$$

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:

$$b_{tr} = \frac{B_g \cdot \tau_r}{K_{fe} \cdot B_{tr}} = \frac{0,5T \cdot 26,37 \cdot 10^{-3}}{0,96 \cdot 1,6T} = 8,58 \cdot 10^{-3} m$$

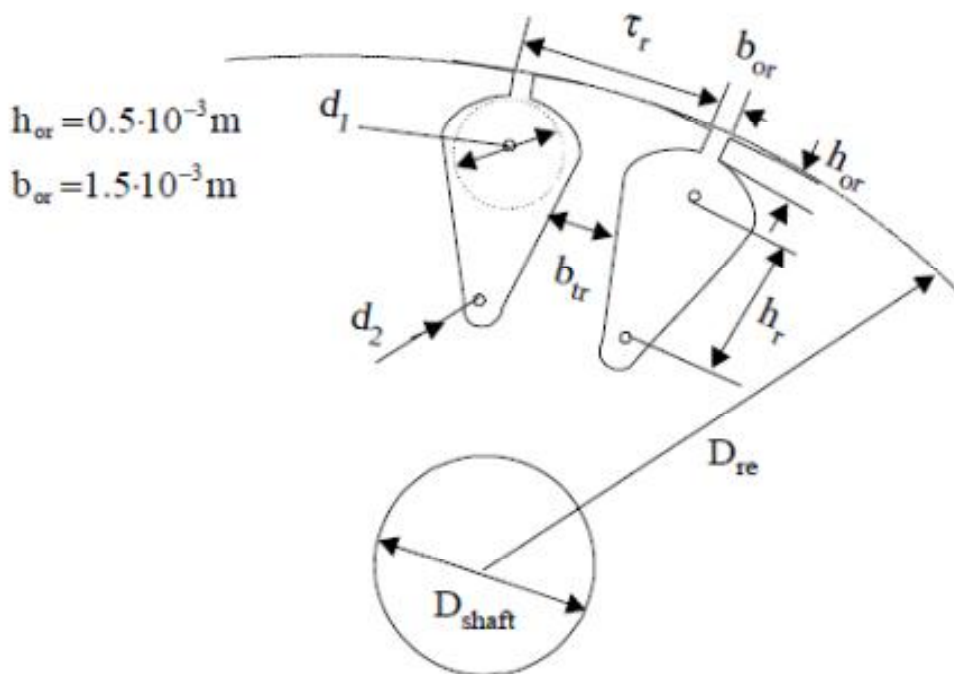
Λόγω της πολύ μικρής απόστασης του δρομέα από την εσωτερική περιφέρεια του στάτη θεωρούμε κατά προσέγγιση ότι η διάμετρος του δρομέα είναι ίση με:

$$D_{re} = D_{is} = 152 mm$$

Άρα η περιφέρεια του δρομέα θα είναι:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot \frac{152}{2} = 477,5 mm$$

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



Εικόνα 7. Γενική μορφή του δρομέα και του άξονα του

Η διάμετρος  $d_1$  βρίσκεται από:

$$\frac{\pi \cdot (D_{re} - 2h_{or} - d_1)}{N_r} = d_1 + b_{tr}$$

$$d1 = \frac{\pi \cdot (Dre - 2hor) - Nr \cdot btr}{\pi + Nr} = \frac{\pi \cdot (152 - 0,9 - 1) - 18}{\pi + 18} \cdot 8,58 \cdot 10^{-3}$$

$$= 15 \cdot 10^{-3} m$$

$$Ab = \frac{\pi}{8} \cdot (d1^2 + d2^2) + \frac{(d1+d2) \cdot hr}{2} \quad (1)$$

$$d1-d2 = 2 \cdot hr \cdot \frac{\tan\pi}{Nr} \quad (2)$$

Λύνοντας τις (1) και (2) (με  $d1 = 15 \cdot 10^{-3} m$  και  $Ab = 217,4 \cdot 10^{-6} m^2$ ) έχουμε:

$$d2 = 4 \cdot 10^{-3} m \text{ και } hr = 13 \cdot 10^{-3} m$$

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:

$$Fmtr = Htr \left( hr + hor + \frac{(d1+d2)}{2} \right) = 2460 \left( 13 + 0,5 + \frac{(15+4)}{2} \right) \cdot 10^{-3} =$$

$$= 56,6 \text{ Aturns}$$

Η τιμή που υπολογίσαμε είναι σχεδόν ίση με τη μαγνητεγερτική δύναμη του στάτη  $Fmts$  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 1,65T έχουμε:

$$h_{cr} = \frac{\Phi}{2} \cdot \frac{1}{L \cdot B_{cr}} = \frac{16,7 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{1}{0,191 \cdot 1,6T} = 29mm$$

## 2.4.2 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:

$$D_{shaft(max)} \leq D_{is} - 2 \cdot \left( h_r + h_{or} + h_{cr} + \frac{d1 + d2}{2} \right) - 2 \cdot g$$
$$\Rightarrow D_{shaft} \leq 152 - 2 \cdot (13 + 0,5 + 26,5 + 9,5) - 2 \cdot 0,45 = 47,4mm$$

Η ροπή στον άξονα του κινητήρα (και υποθέτοντας μια ολίσθηση ίση με 0,02) υπολογίζεται ως εξής:

$$T = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{22000W}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60} \cdot (1 - 0,02)} = 71,5Nm$$

Επίσης:

$$b = 1,0 \cdot (0,5 + 13 + \frac{(15+4)}{2}) = 23 \cdot 10^{-3} m$$

Η τιμή του a είναι:

$$a = \frac{Aer}{b} = \frac{782,5 \cdot 10^{-6} m^2}{23 \cdot 10^{-3} m} = 34 \cdot 10^{-3} m$$

## 2.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

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:

$$\gamma_1 = \frac{b_{os}^2}{5 \cdot g + b_{os}} = \frac{2,5^2}{5 \cdot 0,45 + 2,5} = 1,32$$

$$\gamma_2 = \frac{b_{or}^2}{5 \cdot g + b_{or}} = \frac{1,5^2}{5 \cdot 0,45 + 1,5} = 0,6$$

Άρα:

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1} = \frac{20}{20 - 1,32} = 1,07$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_r - \gamma_2} = \frac{26,37}{26,37 - 0,6} = 1,02$$

$$K_c = K_{c1} \cdot K_{c2} = 1,07 \cdot 1,02 = 1,09$$

Η τιμή του συντελεστή είναι κοντά στην τιμή 1,2 που υποθέσαμε αρχικά άρα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι υπολογισμοί μας ως τώρα είναι σωστοί.

Για  $B_{cs}=1,5T$  και  $B_{cr}=1,6T$  από τον πίνακα 3 οι εντάσεις του μαγνητικού πεδίου στον στάτη και στον δρομέα είναι  $H_{cs}=1340A/m$  και  $H_{cr}=2460A/m$  αντίστοιχα.

$$F_{mcs} = C_{cs} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{out} - h_{cs})}{2 \cdot \pi i} \cdot H_{cs} = 0,35 \cdot \frac{\pi \cdot (212 - 29,1) \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 1340 = 134,4At$$

$$F_{mcr} = C_{cr} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{shaft} + h_{cr})}{2 \cdot \pi i} \cdot H_{cr} = 0,316 \cdot \frac{\pi \cdot (47,4 + 29) \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 2460 = 93,2At$$

Οπότε:

$$F_{1m} = 2 \cdot (1,09 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,5}{1,256 \cdot 10^{-6}} + 50,5 + 56,6 + 134,4 + 93,2)$$

$$= 1063,5At$$

Ο συντελεστής  $1+K_{st}$  είναι:

$$1+K_s = \frac{F1m}{2 \cdot Fmg} = \frac{1063,5}{2 \cdot 215} = 2,47$$

Εφόσον υπολογίσαμε την ολική μαγνητεργετική δύναμη μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα μαγνήτισης, το οποίο δίνεται από την σχέση:

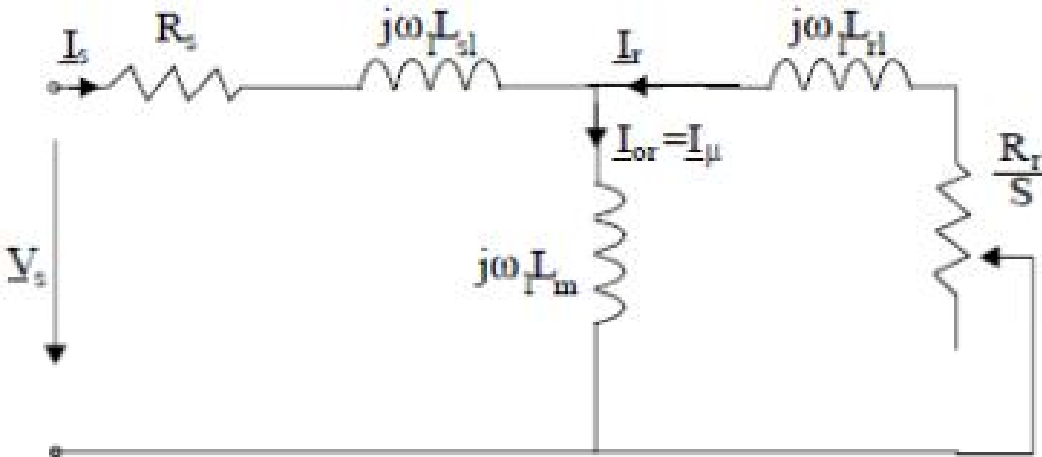
$$I_\mu = \frac{\pi \cdot 2 \cdot \left(\frac{Fm1}{2}\right)}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot W_i \cdot K_{wi}} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot \left(\frac{1063,5}{2}\right)}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 65 \cdot 0,96} = 12,62 \text{ A}$$

$$i_\mu = \frac{12,62}{39,2} = 0,322 = 32,2\%$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

### 3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα είναι το παρακάτω:



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 2 πόλων δίνεται προσεγγιστικά από την σχέση:

$$l_{end} = 2 \cdot y - 0,04m$$

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

$$\frac{y}{\tau} = \frac{7}{9} \Rightarrow y = \frac{7}{9} \cdot \tau = \frac{7}{9} \cdot 0,24m = 0,186m$$

Άρα:

$$l_{end} = 2 \cdot y - 0,04m = 2 \cdot 0,186 - 0,04 = 0,332m$$

Η ειδική αντίσταση του χαλκού στους 20°C είναι  $1,78 \times 10^{-8} \Omega m$ . Στους 80°C (ενδεικτική περίπτωση θερμοκρασίας κατά την λειτουργία της μηχανής) 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:

$$l_c = 2 \cdot (L + l_{end}) = 2 \cdot (0,191 + 0,332) = 1,046 m$$

Η αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη θα είναι ίση με:

$$R_S = \rho_{CO} \cdot \frac{l_c \cdot W_i}{A_{CO} \cdot a_i} = 2,17 \cdot 10^{-8} \Omega m \cdot \frac{1,046 m \cdot 65}{5,6 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot 1} = 0,263 \Omega$$

**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  $3,1 \times 10^{-8} \Omega$  (οι αγωγοί του δρομέα είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο). Το μήκος του τομέα του δακτυλίου βραχυκύκλωσης που αντιστοιχεί σε έναν αγωγό του δρομέα θα είναι:

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

$$= \frac{\pi \cdot (152 - 2 \cdot 0,45 - 23)}{18} \cdot 10^{-3} = 22,4 \cdot 10^{-3} m$$

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:

$$\beta_s = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \rho_{Al}}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 50 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3,1 \cdot 10^{-8}}} = 79,8m^{-1}$$

$$\xi = \beta_s \cdot h_r \cdot \sqrt{s} = 79,8m^{-1} \cdot 13 \cdot 10^{-3}m \cdot 1 = 1,04$$

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

$$\begin{aligned} R_{be}^{80} &= \rho_{Al} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{273} (80 - 20) \right] \cdot \left[ \frac{L}{A_b} \cdot K_R + \frac{l_{er}}{2 \cdot A_{er} \cdot \sin^2 \left( \frac{\pi P_1}{N_r} \right)} \right] \\ &= 3,78 \cdot 10^{-8} \cdot \left[ \frac{0,191 \cdot 1,04}{217,4 \cdot 10^{-6}} + \frac{22,4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 782,5 \cdot 10^{-6} \cdot \sin^2 \left( \frac{\pi}{18} \right)} \right] \\ &= 0,525 \cdot 10^{-4} \Omega \end{aligned}$$

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:**

$$R_2 = \frac{4 \cdot m}{N_r} \cdot (W_i \cdot K_{w1})^2 \cdot R_{be}^{80} = \frac{4 \cdot 3}{18} \cdot (65 \cdot 0,96)^2 \cdot 0,525 \cdot 10^{-4} \Omega = 0,13 \Omega$$

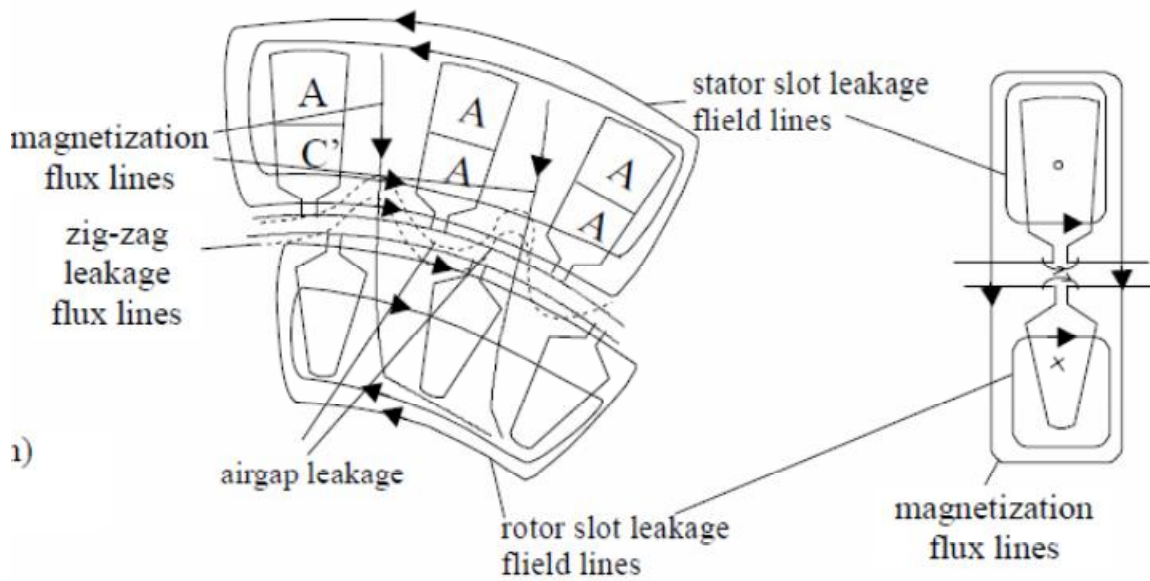
### Υπολογισμός επαγωγικών αντιδράσεων

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 στο σχήμα της επόμενης σελίδας.

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

$$\begin{aligned} \lambda_s &= \left[ \frac{2}{3} \cdot \frac{h_s}{(b_{s1} + b_{s2})} + \frac{2 \cdot h_w}{(b_{os} + b_{s1})} + \frac{h_{os}}{b_{os}} \right] \cdot \left( \frac{1 + 3\beta}{4} \right) \\ &= \left[ \frac{2}{3} \cdot \frac{13,1}{14 + 17,4} + \frac{2 \cdot 1}{2,5 + 14} + \frac{0,5}{2,5} \right] \cdot \left( \frac{1 + 3 \cdot 7/9}{4} \right) = 0,5 \end{aligned}$$

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

$$\lambda_{ds} = \frac{0,9 \cdot \tau_s \cdot q^2 \cdot K_{w1}^2 \cdot C_s \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{st})}$$

Όπου

$$C_s = 1 - 0,033 \cdot \frac{b_{os}^2}{g \cdot \tau_s}$$

Και

$$\gamma_{ds} = (0,14 \cdot \sin \varphi_1 + 0,76) \cdot 10^{-2}$$

$$\varphi_1 = \pi \cdot (6\beta - 5,5)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$\gamma_{ds} = (0,14 \cdot \sin\varphi_1 + 0,76) \cdot 10^{-2} = 0,69 \cdot 10^{-2}$$

$$C_s = 1 - 0,033 \cdot \frac{b_{os}^2}{g \cdot \tau_s} = 1 - 0,033 \cdot \frac{2,5^2}{0,45 \cdot 20} = 0,977$$

Και

$$\lambda_{ds} = \frac{0,9 \cdot \tau_s \cdot q^2 \cdot K_{w1}^2 \cdot C_s \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{st})} = \frac{0,9 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 4^2 \cdot 0,96^2 \cdot 0,977 \cdot 0,69 \cdot 10^{-2}}{1,09 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot 2,47} = 1,46$$

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

$$\lambda_{er} = 0,67 \cdot \frac{q}{L} \cdot (l_{end} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0,67 \cdot \frac{4}{0,191} \cdot \left(0,332 - 0,64 \cdot \frac{7}{9} \cdot 0,24\right) \Rightarrow \lambda_{er} = 2,97$$

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

$$X_{SL} = 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega_1 \cdot L \cdot \frac{W_i^2}{p_1 \cdot q} \cdot (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{er}) = 2 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,191 \cdot \frac{65^2}{1 \cdot 4} \cdot (0,5 + 1,6 + 2,97) = 0,7861 \Omega$$

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

$$\lambda_r = 0,66 + \frac{2 \cdot h_r}{3 \cdot (d_1 + d_2)} + \frac{h_{or}}{b_{or}} = 0,66 + \frac{2 \cdot 13}{3 \cdot (15 + 4)} + \frac{0,5}{1,5} = 1,45$$

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

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

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

Άρα:

$$\lambda_{dr} = \frac{0,9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr}}{K_c \cdot g} \cdot \left(\frac{N_r}{6 \cdot p_i}\right)^2 = \frac{0,9 \cdot 26,37 \cdot 10^{-2}}{1,09 \cdot 0,45} \cdot \left(\frac{18}{6 \cdot 1}\right)^2 = 4,32$$

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

$$\begin{aligned}\lambda_{er} &= \frac{2,3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r}\right)} \cdot \log\left[\frac{4,7 \cdot (D_{er} - b)}{b + 2a}\right] \\ &= \frac{2,3 \cdot 128,1}{18 \cdot 191 \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{18}\right)} \cdot \log\left[\frac{4,7 \cdot 128,1}{23 + 2 \cdot 34}\right] = 0,58\end{aligned}$$

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

$$K_x = \frac{3 \cdot [\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)]}{2 \cdot \xi \cdot [\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)]} = 1,44$$

Στην παραπάνω σχέση το  $\xi=1,04$ . Η επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι ίση με:

$$\begin{aligned}X_{be} &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (\lambda_r \cdot K_x + \lambda_{dr} + \lambda_{er}) \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 0,191 \cdot (1,45 \cdot 1,44 + 4,32 + 0,58) \\ &= 5,27 \cdot 10^{-4} \Omega\end{aligned}$$

Η ανηγμένη στο στάτη επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι:

$$X_2 = 4 \cdot m \cdot \frac{(W_1 \cdot K_{w1})^2}{N_r} \cdot X_{be} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(65 \cdot 0,96)^2}{18} \cdot 5,27 \cdot 10^{-4} \Omega = 1,37 \Omega$$

Απομένει ο υπολογισμός της αντίδρασης μαγνήτισης από τη σχέση:

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V_{ph}}{I_\mu}\right)^2 - R_s^2} - X_{sl} = \sqrt{\left(\frac{230}{12,62}\right)^2 - 0,263^2} - 0,8 = 17,42 \Omega$$

Οι παραπάνω τιμές είναι για ακινητοποιημένο δρομέα. Για ονομαστική ταχύτητα οι τιμές διαφοροποιούνται λίγο κυρίως λόγω εξάλειψης του επιδερμικού φαινομένου. Τις υπολογίζουμε αναλυτικά:

**Για S=1:**

$$(X_{sl}) = X_{sl}(0,7-0,8) = 0,8 \cdot 0,75 = 0,6 \Omega$$

$$(X_{rl}) = X_{rl}(0,6-0,7) = 1,37 \cdot 0,65 = 0,89 \Omega$$



Για  $K_x=K_R=1$  είναι:

$$\begin{aligned}
 R_{be}^{80} &= \rho_{Al} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{273} (80 - 20) \right] \cdot \left[ \frac{L}{A_b} \cdot K_R + \frac{l_{er}}{2 \cdot A_{er} \cdot \sin^2 \left( \frac{\pi P_1}{N_r} \right)} \right] \\
 &= 3,78 \cdot 10^{-8} \cdot \left[ \frac{0,191 \cdot 1}{217,4 \cdot 10^{-6}} + \frac{22,4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 782,5 \cdot 10^{-6} \cdot \sin^2 \left( \frac{\pi}{18} \right)} \right] \\
 &= 0,5 \cdot 10^{-4} \Omega
 \end{aligned}$$

$$(Rr) = 0,089 \cdot \frac{0,5 \cdot 10^{-4}}{0,525 \cdot 10^{-4}} = 0,085 \Omega$$

Στη συνέχεια:

$$X_m = X_m K_{skew}$$

$$K_{skew} = \frac{\sin \left( \frac{\pi}{18} \right)}{\frac{\pi}{18}} = 0,9954$$

Άρα:

$$X_m = 17,42 \cdot 0,9954 = 17,34 \Omega$$

$$X_{rlskew} = X_m (1 - K_{skew}^2) = 17,42 (1 - 0,9954^2) = 0,16 \Omega$$

Για  $S=1$ :

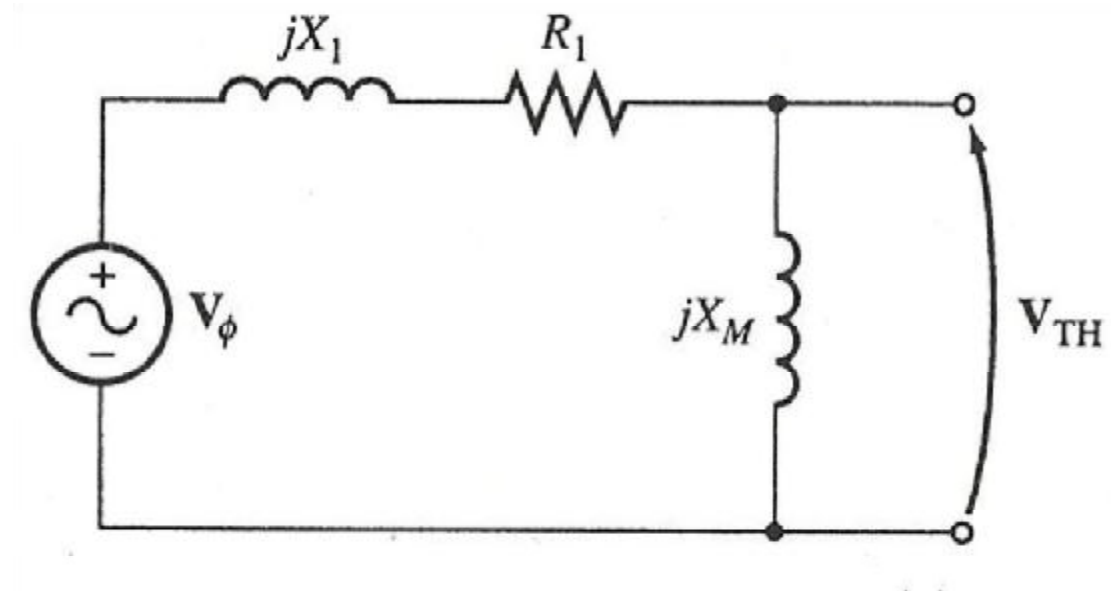
$$(X_{rl}) = (X_{rl}) + X_{rskew} = 0,89 + 0,16 = 1,05 \Omega$$

Για  $S=S_n$ :

$$(X_{rl}) = X_{rl} + X_{rskew} = 1,37 + 0,16 = 1,53 \Omega$$

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ $V_{TH}$ 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 9. Η ισοδύναμη τάση κατά Thevenin του κυκλώματος εισόδου ενός επαγωγικού κινητήρα.

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

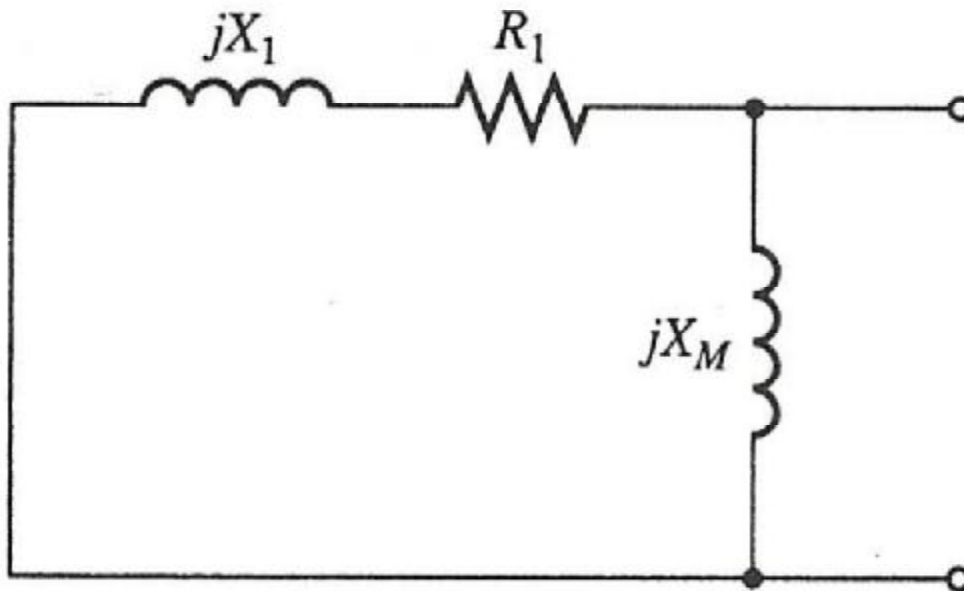
$$V_{TH} = V_{ph} \cdot \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}}$$

$$V_{TH} = 230,9 \cdot \frac{17,42}{\sqrt{0,263 + (0,7861 + 17,42)^2}} = 221,34V$$

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

$$R_{TH} = R_1 \cdot \left( \frac{X_m}{X_1 + X_m} \right)^2 =$$

$$0,263 \cdot \left( \frac{17,42}{0,7861 + 17,42} \right)^2 = 0,24\Omega$$



Εικόνα 10. Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση κατά Thevenin του κυκλώματος εισόδου.

### 3.2 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Το επόμενο βήμα της μελέτης περιλαμβάνει τον υπολογισμό των απωλειών του κινητήρα καθώς και του βαθμού απόδοσης.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{in} + \Sigma losses}$$

Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\Sigma losses = P_{cu} + P_{Al} + P_{fe} + P_{MHX} + P_{KAT}$$

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

Απώλειες χαλκού στον στάτη:

$$P_{cu} = 3 \cdot I_{ov}^2 \cdot R_s = 3 \cdot 39,2^2 \cdot 0,263W = 1212,4W$$

Απώλειες στον δρομέα:

$$P_{Al} = 3 \cdot I_{rn}^2 \cdot R_r = 3 \cdot K_f^2 \cdot I_n^2 \cdot R_r = 3 \cdot 0,912^2 \cdot 39,2^2 \cdot 0,13 = 485W$$

Οι μηχανικές απώλειες υπολογίζονται προσεγγιστικά από την εμπειρική σχέση:

$$P_{MHX} = 0,03 \cdot P_{ov} = 0,03 \cdot 22000W = 660W$$

Οι κατανεμημένες απώλειες υπολογίζονται και αυτές εμπειρικά από τη σχέση:

$$P_{KAT} = 0,01 \cdot 22000W = 220W$$

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. Η παράμετρος  $G_{t1}$  είναι το βάρος των δοντιών του πυρήνα (stator tooth weight) και υπολογίζεται από τη σχέση:

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

$$\Rightarrow G_{t1} = 7800 \cdot 24 \cdot 6,3 \cdot 10^{-3} \cdot (13,1 + 1 + 0,5) \cdot 10^{-3} \cdot 0,191 \cdot 0,96 = 3,157kgr$$

$$p_{t1} = K_t \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{ts}^{1,7} \cdot G_{t1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,65^{1,7} \cdot 3,157 = 38W$$

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:

$$\begin{aligned} G_{y1} &= \gamma_{iron} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [D_{out}^2 - (D_{out} - 2 \cdot h_{cs})^2] \cdot L \cdot K_{Fe} \\ \Rightarrow G_{y1} &= 7800 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [0,212^2 - (0,212 - 2 \cdot 0,0291)^2] \cdot 0,191 \cdot 0,96 \Rightarrow G_{y1} = 23,9W \end{aligned}$$

Άρα οι απώλειες στον υπόλοιπο πυρήνα θα είναι:

$$p_{y1} = K_y \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{cs}^{1,7} \cdot G_{y1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,5^{1,7} \cdot 23,9W = 242,5W$$

Οι συνολικές απώλειες σιδήρου θα είναι ίσες με:

$$P_{fe} = 38W + 242,5W = 280,5W$$

$$P_{iron} = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot \left[ \left( N_r \frac{f_1}{p_1} K_{ps} \cdot B_{ps} \right)^2 \cdot G_{ts} + \left[ \left( N_s \frac{f_1}{p_1} K_{pr} \cdot B_{pr} \right)^2 \cdot G_{tr} \right] \right]$$

$$K_{ps} = \frac{1}{2,2 - B_{ts}} = \frac{1}{2,2 - 1,65} = 1,82$$

$$K_{pr} = \frac{1}{2,2 - B_{tr}} = \frac{1}{2,2 - 1,6} = 1,66$$

$$B_{ps} = (K_{c2} - 1) B_g = (1,023 - 1) 0,5 = 0,0115T$$

$$B_{pr} = (K_{c1} - 1) B_g = (1,07 - 1) 0,5 = 0,0365T$$

$$G_{tr} = \gamma_{iron} \cdot N_r \cdot b_{tr} \cdot \left( h_r + \frac{d_1 + d_2}{2} \right) \cdot L \cdot K_{Fe} = 7800 \cdot 18 \cdot 8,58 \cdot 10^{-3} \cdot \left( 13 + \frac{15+4}{2} \right) \cdot 10^{-3} \cdot 0,191 \cdot 0,96 = 5 \text{ Kg}$$

Άρα:

$$P_{iron} = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot \left[ \left( \left( 18 \frac{50}{1} 1,82 \cdot 0,0115 \right)^2 \cdot 3,157 + \left[ \left( 24 \frac{50}{1} 1,54 \cdot 0,0365 \right)^2 \cdot 5 \right] \right) \right] = 1,385W$$

Άρα:

$$P_{iron_{ολ}} = 280,5 + 1,385 = 281,9W$$

**Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα θα είναι:**

$$\Sigma losses = P_{cu} + P_{Al} + P_{fe} + P_{MHX} + P_{KAT} = 1212,4 + 485 + 281,9 + 660 + 220 = 2859,3W$$

**Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα θα είναι:**

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in} + \Sigma losses} = \frac{22000}{22000 + 2859,3} = 0,885$$

**Ρεύμα χωρίς φορτίο**

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

$$I_0 = \frac{P_{fe} + P_{MHX} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot R_s}{3 \cdot V_{ph}} = \frac{281,9 + 660 + 3 \cdot 12,62^2 \cdot 0,263}{3 \cdot 230} = 1,55A$$

Η ολίσθηση υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_{Al} = s \cdot P_{AG} \Rightarrow s = \frac{P_{Al}}{P_{AG}} = \frac{485W}{22000 + 485 + 660 + 220W} = 0,021 = 2,1\%$$

$$n_m = (1 - s) n_{sync} = (1 - 0,021) 3000 = 2937 \text{ rpm}$$

Η ονομαστική ροπή είναι ίση με:

$$T_n = \frac{22000W}{2\pi \cdot \frac{50}{1} (1 - 0,021)} = \frac{22000}{307,56} = 71,5Nm$$

Επίσης:

$$T_e = \frac{3 \cdot p_1}{\omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2 \frac{R_r}{S}}{\left(R_s + C_m \frac{R_r}{S}\right)^2 + (X_{sl} + C_m \cdot X_2)^2}$$

$$C1 = C_m = 1 + \frac{X_{sl}}{X_m} = 1 + \frac{0,8}{17,42} = 1,046$$

Η ροπή ανατροπής υπολογίζεται από την σχέση:

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

$$\frac{3 \cdot 1}{2 \cdot 2\pi 50} \cdot \frac{230^2}{0,263 + \sqrt{0,263^2 + (0,8 + 1,046 \cdot 1,37)^2}} = 100,6 \text{ Nm}$$

Το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα είναι ίσο με:

$$I_{LR} = \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_{sl} + X_{rl})^2}} = \frac{230}{\sqrt{(0,263 + 0,13)^2 + (0,8 + 1,05)^2}} = 121,6A$$

Η ροπή εκκίνησης είναι ίση με:

$$T_{LR} = \frac{3 \cdot I_{LR}^2 \cdot R_r}{\omega_s} = \frac{3 \cdot 121,6^2 \cdot 0,13}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60}} = 18,35Nm$$

Τέλος ο συντελεστής ισχύος της μηχανής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos\varphi = \frac{P_n}{3 \cdot V_{ph} \cdot I_n \cdot \eta} = \frac{22000}{3 \cdot 230 \cdot 39,2 \cdot 0,885} = 0,92$$

### 3.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗΣ – ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

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  $n_m=2942$  rpm (βλέπε παράρτημα).

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:

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

Οπότε:

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

Για  $s=1$   $n_m=0$

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot 221,34^2 \cdot 0,13}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60} \left( (0,24 + 0,13)^2 + (0,7861 + 1,37)^2 \right)} = \mathbf{12,71 Nm}$$

Αυτή είναι και η ροπή εκκίνησης.

$\Gamma_{\alpha} s=0,9 \text{ nm}=300\text{rpm}$

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot 221,34^2 \cdot 0,144}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60} ((0,24+0,144)^2 + (0,7861 + 1,37)^2)} = 14,05 \text{ Nm}$$

$\Gamma_{\alpha} s=0,8 \text{ nm}=600\text{rpm}$

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot 221,34^2 \cdot 0,1625}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60} ((0,24+0,1625)^2 + (0,7861 + 1,37)^2)} = 15,8 \text{ Nm}$$

$\Gamma_{\alpha} s=0,7 \text{ nm}=900\text{rpm}$

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot 221,34^2 \cdot 0,1857}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60} ((0,24+0,1857)^2 + (0,7861 + 1,37)^2)} = 17,99 \text{ Nm}$$

$\Gamma_{\alpha} s=0,6 \text{ nm}=1200\text{rpm}$

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot 221,34^2 \cdot 0,2166}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60} ((0,24+0,2166)^2 + (0,7861 + 1,37)^2)} = 20,86 \text{ Nm}$$

$\Gamma_{\alpha} s=0,5 \text{ nm}=1500\text{rpm}$

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot 221,34^2 \cdot 0,26}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60} ((0,24+0,26)^2 + (0,7861 + 1,37)^2)} = 24,83 \text{ Nm}$$

$\Gamma_{\alpha} s=0,4 \text{ nm}=1800\text{rpm}$

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot 221,34^2 \cdot 0,325}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60} ((0,24+0,325)^2 + (0,7861 + 1,37)^2)} = 30,6 \text{ Nm}$$

$\Gamma_{\alpha} s=0,3 \text{ nm}=2100\text{rpm}$

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot 221,34^2 \cdot 0,433}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60} ((0,24+0,433)^2 + (0,7861 + 1,37)^2)} = 39,7 \text{ Nm}$$



Για  $s=0,2$   $n_m=2400$ rpm

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot 221,34^2 \cdot 0,65}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60} \left( (0,24+0,65)^2 + (0,7861 + 1,37)^2 \right)} = 55,89 \text{ Nm}$$

Για  $s=0,1$   $n_m=2700$ rpm

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot 221,34^2 \cdot 1,3}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60} \left( (0,24+1,3)^2 + (0,7861 + 1,37)^2 \right)} = 86,63 \text{ Nm}$$

Η ολίσθηση ανατροπής είναι:

$$S_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{(R_{TH})^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} = \frac{0,13}{\sqrt{(0,24)^2 + (0,7861 + 1,37)^2}} = 0,0599$$

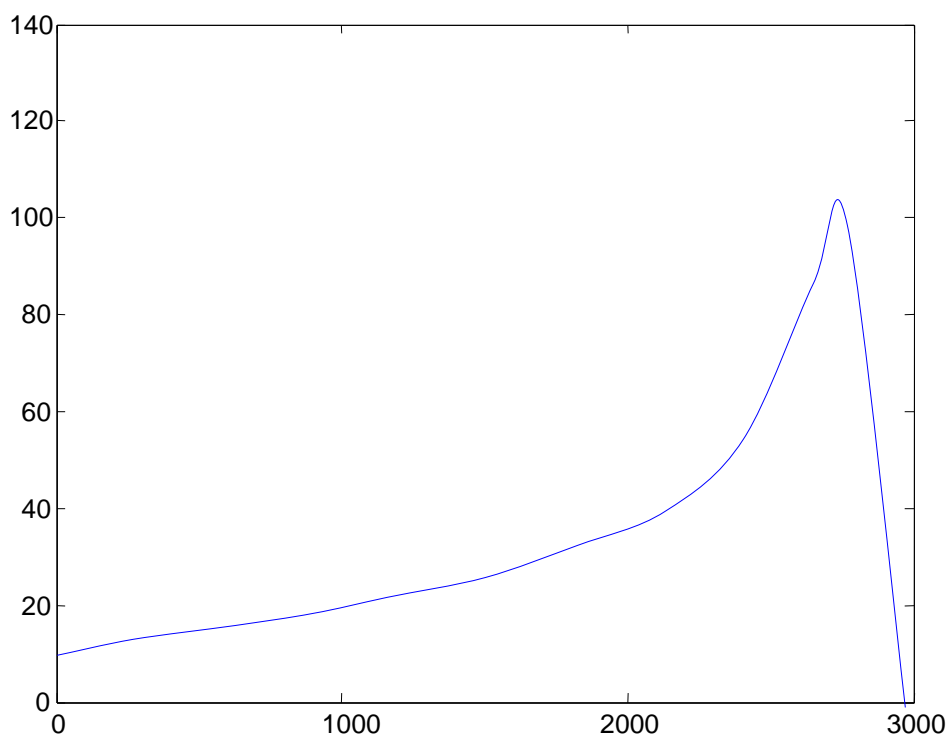
$$n_m = (1 - 0,0599) 3000 = 2820,3 \text{ rpm}$$

Η ροπή ανατροπής είναι:

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

$$= \frac{3 \cdot 221,34^2}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60} \left( (0,24) + \sqrt{(0,24)^2 + (0,7861 + 1,37)^2} \right)} = 97,1 \text{ Nm}$$

Οπότε η χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας είναι :



Σχήμα 1: Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Ολοκληρώνοντας την μελέτη είναι χρήσιμο να συγκρίνουμε τις τιμές που υπολογίστηκαν με αυτές της εταιρείας του Βαλιάδη (βλέπε παράρτημα). Θα πρέπει να τονιστεί ότι πολλά από τα στοιχεία του κινητήρα της εταιρείας του Βαλιάδη βρέθηκαν κατά την σχεδίαση του κινητήρα (πειραματικά), οπότε είναι λογικό να υπάρχουν σε συγκεκριμένα στοιχεία αποκλίσεις.

Ξεκινώντας από το ισοδύναμο κύκλωμα παρατηρούμε ότι είμαστε πολύ κοντά στην τιμή της αντίστασης του στάτη ( $R_s$ ), σε σχέση με αυτή της εταιρείας.

Παρακάτω συγκρίνοντας τον βαθμό απόδοσης και τον συντελεστή ισχύος βλέπουμε ότι υπάρχει μια μικρή απόκλιση η οποία οφείλεται σε μια μικρή απόκλιση στον υπολογισμό των απωλειών του κινητήρα.

Η ολίσθηση που υπολογίσαμε είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή που μας δίνει η εν λόγω εταιρία όμως είναι αποδεκτή, επομένως και η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα υπολογιστικά είναι λίγο μικρότερη.

Αυτή η μικρή διαφορά μπορεί να οφείλεται στις απώλειες αλουμινίου ( $P_{al}$ ) ή στις μηχανικές και τις κατανεμημένες όπου τις δύο τελευταίες τις υπολογίσαμε προσεγγιστικά.

Τέλος η ονομαστική ροπή ( $T_n$ ) που υπολογίσαμε είναι αποδεκτή, ενώ η ροπή ανατροπής ( $T_{bk}$ ) είναι μικρότερη από όσο θα θέλαμε καθώς θα έπρεπε να βγει τριπλάσια από την ονομαστική ενώ μας βγαίνει περίπου μισή φορά μεγαλύτερη.

Το πρόβλημα παρουσιάζεται στην ροπή εκκίνησης ( $T_{LR}$ ) που υπολογίστηκε και έχει μικρή τιμή από την στιγμή που θα έπρεπε να είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική.

Όμως το πρόβλημα αυτό, όπως και αυτό με την ροπή ανατροπής, θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με επανασχεδιασμό του κινητήρα.

# VALIADIS S.A.

## ELECTRIC MOTOR TEST REPORT - THREE PHASE INDUCTION MOTOR

<b>NAMEPLATE DATA</b>	<b>IEC TYPE</b>	<b>22 KW</b>	<b>2955 RPM</b>
K180M-2 FRAME	3 PHASE	400 VOLTS	50 HZ / CYCLES
92,1 EFFICIENCY	37,1 AMPS	55 IP	IC411 IC
2 POLE	S1 DUTY	0,922 PF	91,3 IE2
VALIADIS MANUFACTURER	SERIAL NO.	F INS.CLASS	DELTA CONNECTION

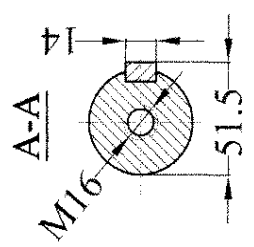
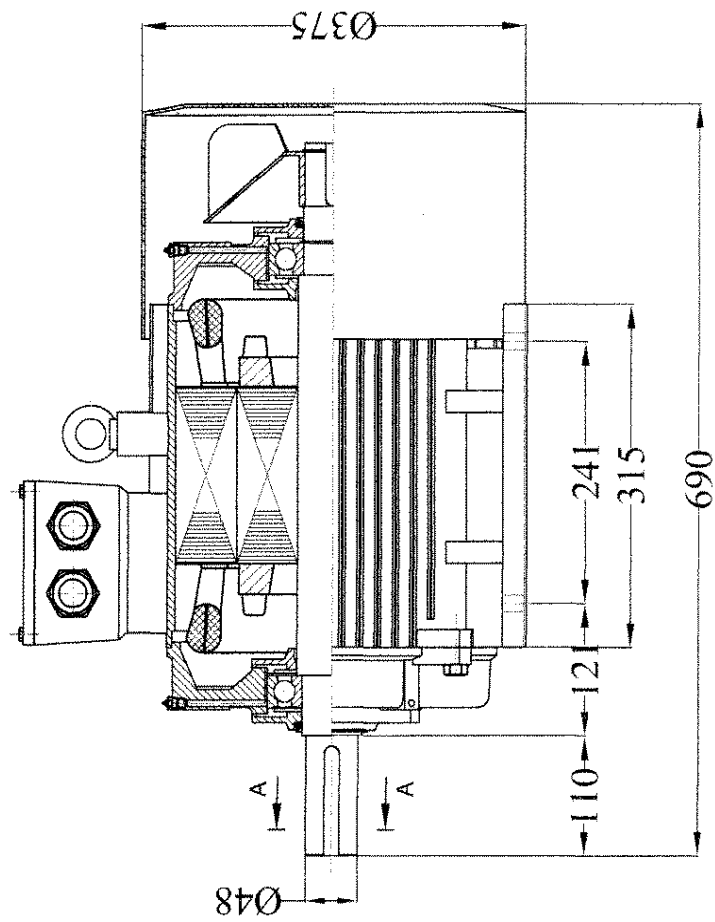
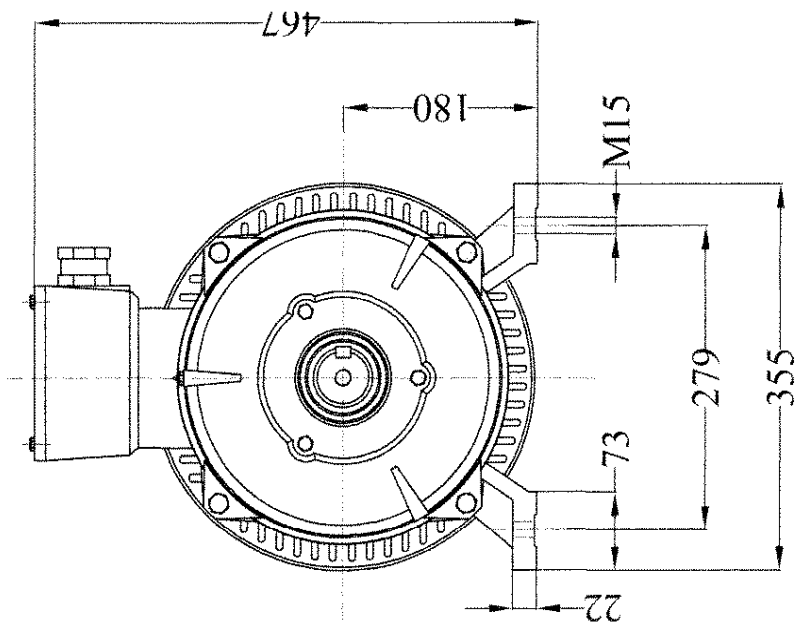
  

MAJOR CONTENTS	UNIT	TEST VALUE
STATOR RESISTANCE OF PHASE	OHM	0,3520
NO LOAD CURRENT	AMP	11,79
NO LOAD INPUT	W	825,4
CORE LOSS(Pfe)	W	474,5
WINDAGE FRICTION LOSS(Pfw)	W	306,2
STATOR WINDING LOSS(Pcu1)	W	492,8
ROTOR WINDING LOSS(Pcu2)	W	341,3
STRAY LOAD LOSS(Ps)	W	278,2
FULL LOAD CURRENT	AMP	37,39
LOCKED ROTOR CURRENT	AMP	296,21
LOCKED ROTOR CURRENT/FULL LOAD CURRENT	P.U.	8,0
LOCKED ROTOR INPUT @ FULL LOAD	kW	111,77
FULL LOAD TORQUE	N.m	71,13
LOCKED ROTOR TORQUE	N.m	183,81
LOCKED ROTOR TORQUE/FULL LOAD TORQUE	P.U.	2,58
PULL OUT TORQUE	N.m	225,2
PULL OUT TORQUE/FULL LOAD TORQUE	P.U.	3,17
EFFICIENCY @ FULL LOAD	%	92,1
EFFICIENCY @ 75% LOAD	%	92,1
POWER FACTOR @ FULL LOAD		0,92
FULL LOAD SLIP	%	1,489
FULL LOAD SPEED	r/min	2955
STATOR WINDING TEMPERATURE RISE	K	68
D.E. BEARINGS TEMPERATURE BY PT100	Deg. C	44,0
SOUND POWER LEVEL	dB(A)	74
VIBRATION	mm/s	0,7

standard methods for determining losses and efficiency from tests: pu determined from residual loss(IEC60034-2)

<b>VALIADIS S.A.</b>  K180M-2 22 kW 400 VOLTS 50 Hz	SCALE	N/A	
	DATE		REV
	DRAWN		DOCUMENT NO.
	APPRVD		
	CHECKED		

PERFORMANCE



Designed by	Checked by	Drawn by	Scale	<b>MOTOR TYPE K180M</b> <b>MOUNTING B3</b>	Replaced from Replace the
Date	Signature	Weight	Design Number		
VALIADIS HELLENIC MOTORS				VALLIADIS HELLENIC MOTORS	
DATE	DATE	NAME	NAME		

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Stephen J. Chapman “Ηλεκτρικές μηχανές”
2. Στέλιος Αντωνόπουλος “Τυλίγματα Ηλεκτρικών Μηχανών”
3. Ion Boldea & Syed A. Nasar “The Induction Machines Desing Handbook”

## **ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ**

<http://el.wikipedia.org/wiki/>

[http://chaos.c4lab.el.teithe.gr/kioskeridis/Industrial Automation\\_05\\_Induction Motors.pdf](http://chaos.c4lab.el.teithe.gr/kioskeridis/Industrial_Automation_05_Induction_Motors.pdf)

<http://alexander.ee.auth.gr:8083/eTHMMY/archive/106/customStore/elecmach.pdf>