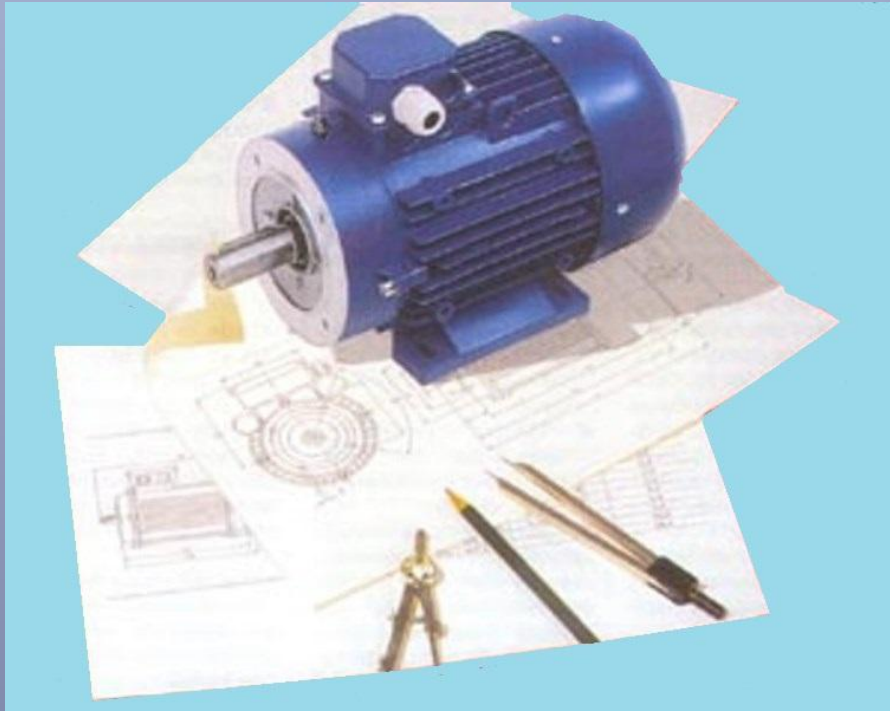


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ



ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Η Διπλωματική Εργασία υποβάλλεται στην εξεταστική επιτροπή του Τμήματος από τον Καραμανίδη Γεώργιο
Αριθμός Μητρώου 813

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής Θεοδουλίδης Θεόδωρος

Κοζάνη

Σεπτέμβριος 2013



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

Θεωρητική και Πειραματική Μελέτη Τριφασικού Κινητήρα

Η Διπλωματική Εργασία

υποβάλλεται

στην εξεταστική επιτροπή του Τμήματος

από τον

Καραμανίδη Γεώργιο

Αριθμός Μητρώου 813

Επιβλέπων:

Αναπληρωτής Καθηγητής

Θεοδουλίδης Θεόδωρος

Κοζάνη

Σεπτέμβριος 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα διπλωματική θέλαμε να δώσουμε μία ματιά στους ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες κλωβού. Το πόσο σωστά και αποτελεσματικά μπορούμε να τους προσομοιώσουμε στο υπολογιστικό πρόγραμμα του Comsol συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αναλυτικές μεθόδους καθώς και πειραματικά σε εργαστηριακό χώρο με χρήση των κινητήρων και μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Είναι κινητήρες που χρησιμοποιούνται ευρέως στην καθημερινότητά μας και η μελέτη τους δε θα μπορούσε παρά να είναι επίκαιρη.

Σημαντική βοήθεια για τη διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας πρόσφερε ο επιβλέπων Αν.Καθηγητής κ. Θεοδουλίδης που με την εμπειρία του μου έδωσε το κίνητρο και το ενδιαφέρον πάνω στους ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες και την πρακτική τους μελέτη.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας Εισαγωγή στους Ασύγχρονους Τριφασικούς Κινητήρες κάνουμε μία αναφορά γενικά στις Ηλεκτρικές Μηχανές και στα είδη μηχανών που υπάρχουν. Έπειτα, δίνουμε μία εισαγωγή για τους Ασύγχρονους κινητήρες, τα είδη και τον τρόπο που επιλέγουμε έναν κινητήρα. Αναφέρουμε βασικά Κατασκευαστικά Στοιχεία των κινητήρων και αναλύουμε τις επιμέρους κλάσεις σύμφωνα με τις οποίες κατηγοριοποιούνται. Τέλος, παραθέτουμε τις Βασικές Έννοιες που διέπουν τη λειτουργία και τη μελέτη τους για την καλύτερη κατανόησή τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο Θεωρητική Μελέτη των Ασύγχρονων Τριφασικών Κινητήρων παρουσιάζουμε την προσομοίωση που έγινε στο Comsol και μία μικρή εισαγωγή για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, μία υπολογιστική μέθοδο που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για την επίλυση των προβλημάτων. Παρακάτω, περιγράφουμε το πρόβλημα Νο.30 της TEAM WORKSHOP για έναν ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα όπως το επιλύει αναλυτικά ο Davey [12,13] και το οποίο προσομοιώνουμε κι εμείς στο Comsol. Τέλος, δίνουμε συγκριτικά διαγράμματα με τα αποτελέσματα τα δικά μας, του Davey και του Marcsa [9], ο οποίος έκανε και αυτός μία απόπειρα επίλυσης του προβλήματος με το Comsol.

Στο τρίτο κεφάλαιο Πειραματική Μελέτη των Ασύγχρονων Τριφασικών κινητήρων περιγράφουμε τις εργαστηριακές μετρήσεις σε έναν κινητήρα κλωβού. Αρχικά, παρουσιάζουμε τα Τεχνικά Χαρακτηριστικά του κινητήρα της εταιρίας De Lorenzo ο οποίος βρίσκεται στο εργαστήριο του τμήματός μας. Έπειτα, παρουσιάζουμε αναλυτικά τα τέσσερα πειράματα που διεξήγαμε, όπως προτείνει ο κατασκευαστής, με σκοπό την ορθή απεικόνιση των θεωρητικών διαγραμμάτων σε αυτά που λάβαμε από τις μετρήσεις μας.

Όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν τα αναπαράγαμε με χρήση του προγράμματος Matlab. Ένα λογισμικό που έγινε πολύ καλό εργαλείο για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων μας.

Ελπίζουμε η παρούσα διπλωματική να φανεί αντάξια των προσπαθειών μας για μία σωστή μελέτη των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων κλωβού και έμπνευση για επόμενους φοιτητές για την επίλυση περισσότερων προβλημάτων και τη διεξαγωγή ακόμα περισσότερων πειραμάτων. Η δουλειά μας στο εργαστήριο με τη συνδεδασμένη του κινητήρα και τον διάφορων οργάνων ήταν πολύ ενδιαφέρουσα και εκπαιδευτική, καθώς η εφαρμογή της θεωρίας των κινητήρων στην πράξη είναι ακόμα πιο εντυπωσιακή.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	2
1.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ	2
1.2 ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	2
1.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	4
1.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΩΝ ΑΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΤΡΙΦΑΣΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	11
1.4.1 Εκκίνηση Ασύγχρονων Τριφασικών Κινητήρων Κλωβού	15
1.4.2 Ρύθμιση Στροφών Ασύγχρονων Τριφασικών Κινητήρων Κλωβού.....	20
1.4.3 Αλλαγή Φοράς Περιστροφής Ασύγχρονων Τριφασικών Κινητήρων Κλωβού.....	21
1.4.4 Πέδηση Ασύγχρονων Τριφασικών Κινητήρων Κλωβού	22
1.5 ΕΛΕΓΧΟΣ, ΒΛΑΒΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΤΡΙΦΑΣΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	22
2.ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	31
2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟ-ΣΟΜΟΙΩΣΗΣ COMSOL	31
2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	32
2.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗ-ΤΗΡΑ ΣΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ COMSOL	35
2.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ.....	38
3.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	46
3.1 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	46
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑ ΠΡΩΤΟ	47
3.3 ΠΕΙΡΑΜΑ ΔΕΥΤΕΡΟ.....	49
3.4 ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΡΙΤΟ	55
3.5 ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΕΤΑΡΤΟ	61

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

1.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Η ηλεκτρική μηχανή είναι μία διάταξη που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική και αντιστρόφως. Στην πρώτη περίπτωση ονομάζεται κινητήρας και στην περίπτωση που μετατρέπει τη μηχανική σε ηλεκτρική ονομάζεται γεννήτρια. Ανάλογα με τη δράση του μαγνητικού πεδίου μπορεί η οποιαδήποτε ηλεκτρική μηχανή να μετατρέψει ενέργεια από τη μία μορφή στην άλλη. Μπορούν να είναι είτε συνεχούς ρεύματος (DC) είτε εναλλασσόμενου (AC). Οι μηχανές στις οποίες υπάρχει σταθερή σχέση μεταξύ της συχνότητας του ρεύματος και της ταχύτητας περιστροφής τους (δηλαδή αυτές που στρέφονται με σταθερή ταχύτητα) ονομάζονται σύγχρονες. Ασύγχρονες ονομάζονται αυτές στις οποίες η ταχύτητα περιστροφής τους εξαρτάται από το φορτίο τους. [1].

Στη σύγχρονη εποχή, οι ηλεκτρικές μηχανές καθώς και διατάξεις τους βρίσκονται παντού. Τις χρησιμοποιούμε για την παραγωγή ενέργειας, προϊόντων και υπηρεσιών, για την ασφάλεια, την άνεση και τη διασκέδασή μας.

Τα κυριότερα είδη ηλεκτρικών μηχανών είναι [3]:

- οι **γεννήτριες** είτε DC είτε AC. Χρησιμοποιούνται σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, πλοία, εργοστάσια, αεροπλάνα, αγροκτήματα και ως εφεδρικές πηγές σε νοσοκομεία, εργοστάσια, αεροδρόμια κλπ.
- οι **κινητήρες** είτε DC είτε AC. Χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την κίνηση αντλιών και άλλων εργαλειομηχανών, για την κίνηση οχημάτων και σε διάφορες οικιακές συσκευές.
- οι **μετασχηματιστές** που χρησιμοποιούνται για την ανύψωση ή την υποβάθμιση της τάσης του AC ρεύματος.
- οι **στρεφόμενοι μετατροπείς, τα ζεύγη κινητήρα-γεννήτριας και οι ανορθωτές** που μετατρέπουν το AC σε DC και το αντίστροφο.

1.2 ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Οι πιο διαδεδομένοι κινητήρες στη βιομηχανία είναι οι ασύγχρονοι εξαιτίας της απλότητας της κατασκευής τους, του χαμηλού κόστους, της ελάχιστης συντήρησης και της μεγάλης συγκέντρωσης ισχύος. Αυτοί οι κινητήρες αποκαλούνται και **επαγωγικοί**. Η ονομασία αυτή οφείλεται στο ότι τα ρεύματα στο δρομέα της μηχανής αναπτύσσονται εξ' επαγωγής από τα

ρεύματα του στάτη. Με άλλα λόγια, οι επαγωγικές μηχανές δεν έχουν ανεξάρτητη διέγερση στο δρομέα από κάποια άλλη πηγή, όπως οι συνηθισμένες σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές [1].

Οι επαγωγικοί κινητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά σε όλες τις εφαρμογές κινητήρων εκτός από αυτές που απαιτείται πολύ υψηλή ροπή ή πολύ λεπτή ρύθμιση ελέγχου ταχύτητας. Κυμαίνονται σε μεγέθη ισχύος από 1 hp έως και πάνω από 100000hp.

Τα είδη ασύγχρονων κινητήρων είναι [1]:

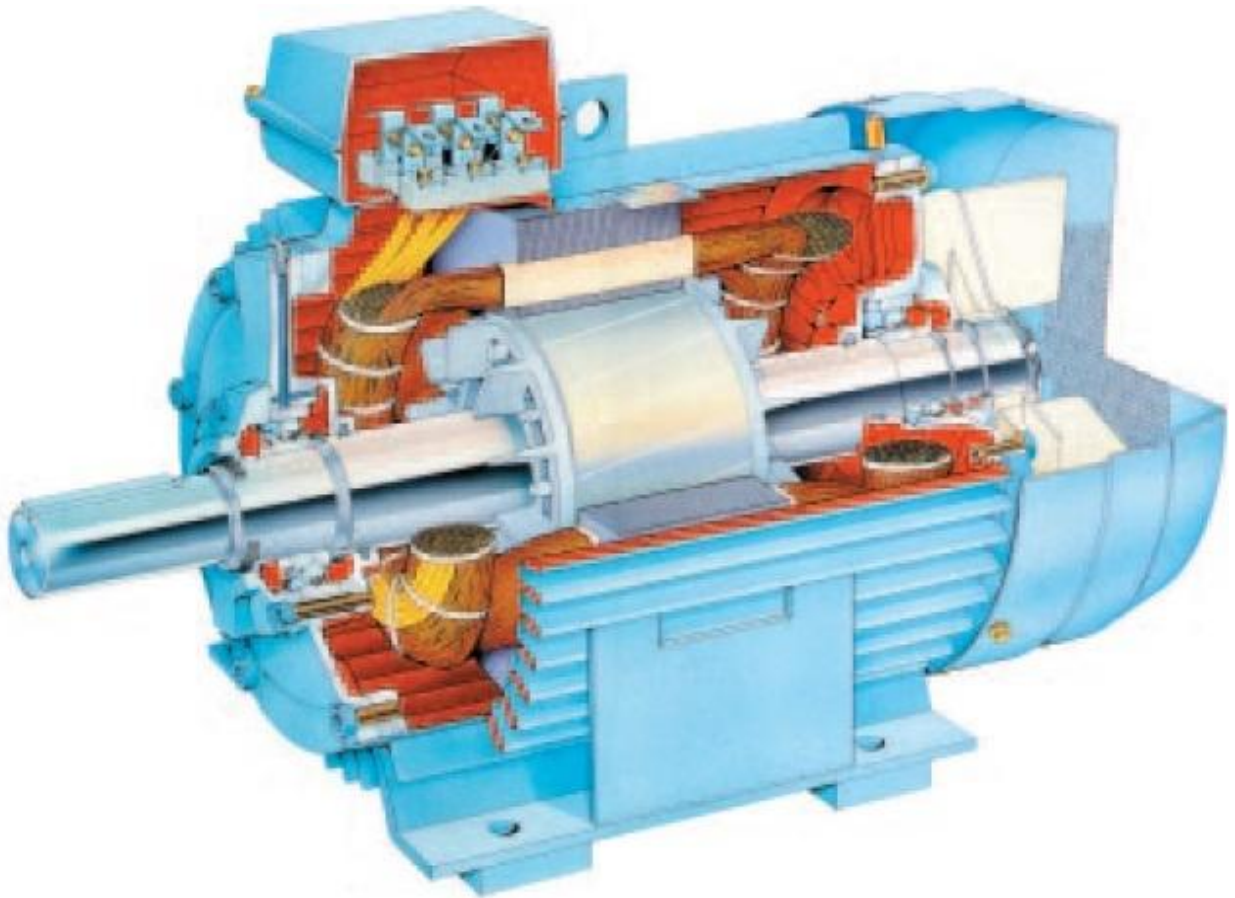
ανάλογα με την κατασκευή του στάτη

- μονοφασικοί
- τριφασικοί

ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα

- κλωβού
- δακτυλιοφόρου ή περιελιγμένου δρομέα

Εμείς θα αναλύσουμε τον ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα (ΑΤΚ) κλωβού ο οποίος είναι και το αντικείμενο της μελέτης μας.



Εικόνα 1.1. Κινητήρας κλωβού [3].

Επιλογή κινητήρα

Η επιλογή του επαγωγικού κινητήρα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ένα σύνθετο πρόβλημα με πολλούς παράγοντες και απαιτεί ορθή κρίση και εμπειρία. Για τη βέλτιστη απόδοση θέλουμε ο κινητήρας να ταιριάζει όσο το δυνατόν περισσότερο στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του φορτίου. Για να βοηθηθεί ο εκάστοτε αγοραστής στη σωστή επιλογή κινητήρα η NEMA (National Electrical Manufacturers Association) ανέπτυξε πρότυπα για κινητήρες τα οποία συμπεριλαμβάνουν [2]:

- τις διαστάσεις πλαισίου,
- την τάση,
- τη συχνότητα,
- τα ονομαστικά μεγέθη ισχύος,
- τους συντελεστές συντήρησης ισχύος,
- του συντελεστές επιτρεπόμενης αύξησης θερμοκρασίας
- και τις χαρακτηριστικές απόδοσης.

Τα δεδομένα αυτά αναγράφονται στις ονομαστικές πινακίδες κάθε μηχανής και εάν χρησιμοποιηθούν σωστά, δηλαδή μέσα στα όρια, ο κινητήρας θα είναι πιο αποδοτικός, αξιόπιστος και με μεγαλύτερο χρόνο ζωής. Για την παραγγελία ενός ΑΤΚ είναι απαραίτητο να δίνουμε την ισχύ του σε hp ή kW, την ταχύτητα, την τάση, τη συχνότητα, την έδραση, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τις συνθήκες λειτουργίας του (π.χ. αριθμός εκκινήσεων). Για οποιοδήποτε ανταλλακτικό πρέπει να γνωρίζουμε τον αριθμό σειράς του κινητήρα.

1.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στάτης

Ο στάτης είναι το ακίνητο μέρος του κινητήρα και είναι το μόνο μέρος που συνδέεται με την πηγή AC. Είναι κατασκευασμένος από πολλά μαγνητικά ελάσματα συνήθως πυριτιούχου χάλυβα περασμένα με ειδικό μονωτικό βερνίκι. Τα ελάσματα έχουν οδοντώσεις που επιδρούν στα χαρακτηριστικά του κινητήρα και συγκρατούνται με κοχλίες σχηματίζοντας το ζύγωμα της μηχανής. Μέσα στις οδοντώσεις ή αυλάκια τοποθετούνται οι τρεις φάσεις του τυλίγματος για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου. Η χρήση φύλλων χάλυβα για το μαγνητικό πεδίο ελαχιστοποιεί τις απώλειες υστέρησης και το μονωτικό βερνίκι τα δινορρεύματα. Η κατεργασία των ελασμάτων γίνεται με ειδικές πρέσες και έπειτα επικαλύπτονται με μονωτικό βερνίκι. Μονωμένα πηνία τοποθετούνται σε αυλακώσεις μέσα στον πυρήνα του στάτη. Τα αλληλεπικαλυπτόμενα πηνία συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα για να διαμορφώσουν ομάδες φάσης. Οι ομάδες φάσεις έπειτα συνδέονται είτε σε τρίγωνο είτε σε αστέρα ανάλογα με τις ανάγκες τάσης και ρεύματος.



Εικόνα 1.2. Μαγνητικά ελάσματα στάτη και μαγνητικό πεδίο [3].

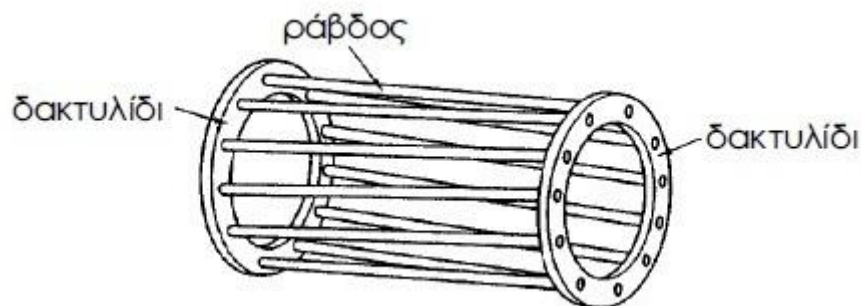


Εικόνα 1.3. Τύποι αυλακώσεων ελασμάτων [3].

Ρόλος του στάτη είναι να στηρίζει τη μηχανή και να την τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια του τριφασικού δικτύου [2,3].

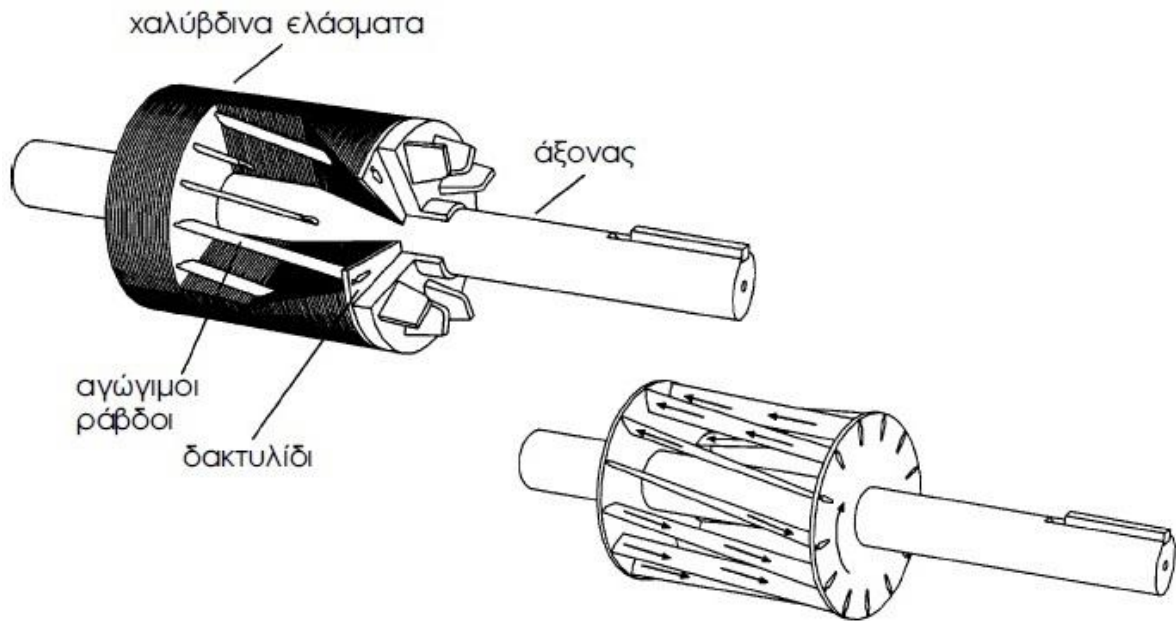
Δρομέας Κλωβού

Οι μικροί δρομείς χρησιμοποιούν έναν πυρήνα από ελάσματα χάλυβα μέσα στα αυλάκια των οποίων προστίθεται αλουμίνιο με χύτευση (χαλκός ή και μπρούντζος ανάλογα με τις απαιτήσεις και τη λειτουργία του κινητήρα), ώστε να αποτελέσει τους αγωγούς, τους δακτυλίους άκρων και την πτερωτή του ανεμιστήρα. Οι μεγαλύτεροι δρομείς είναι κατασκευασμένοι από ορειχάλκινους αγωγούς και δακτυλίους άκρων οι οποίοι συγκολλούνται μαζί για να αποτελέσουν τον κλωβό. Δεν υπάρχει και δε χρειάζεται μόνωση μεταξύ του σιδηροπυρήνα και των αγωγών. Οι τελικές συνδέσεις (αγωγοί και δακτύλιοι άκρων) διαμορφώνουν το κύκλωμα μέσα στο οποίο ρέει το ρεύμα που επάγεται στο δρομέα. Εάν έχουμε λοξεμένα αυλάκια μπορούμε να αποφύγουμε τη διολίσθηση, το να κλειδωθεί ο δρομέας σε υποσύγχρονες ταχύτητες και τη μείωση των δονήσεων.



Εικόνα 1.4. Κλωβός δρομέα [3].

Ρόλος του δρομέα είναι να βρίσκεται μέσα στο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη, να δημιουργεί στους αγωγούς του το φαινόμενο της επαγωγής και να περιστρέφεται [2].



Εικόνα 1.5. Κατασκευή τυλιγμάτων κλωβού [3].

Ψύξη

Όταν λειτουργούμε έναν κινητήρα θερμαίνονται τα τυλίγματά του και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται κάποιο σύστημα για την ψύξη του. Η κωδικοποιημένη γραφή για την ψύξη ενός κινητήρα αποτελείται από τα αρχικά IC (International Cooling) ακολουθούμενα από δύο αριθμούς. Ο πρώτος αναφέρεται στον τρόπο κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου στην κινητήρια μηχανή που κυκλοφορεί τον αέρα. Οι μέθοδοι ψύξης μπορεί να είναι:

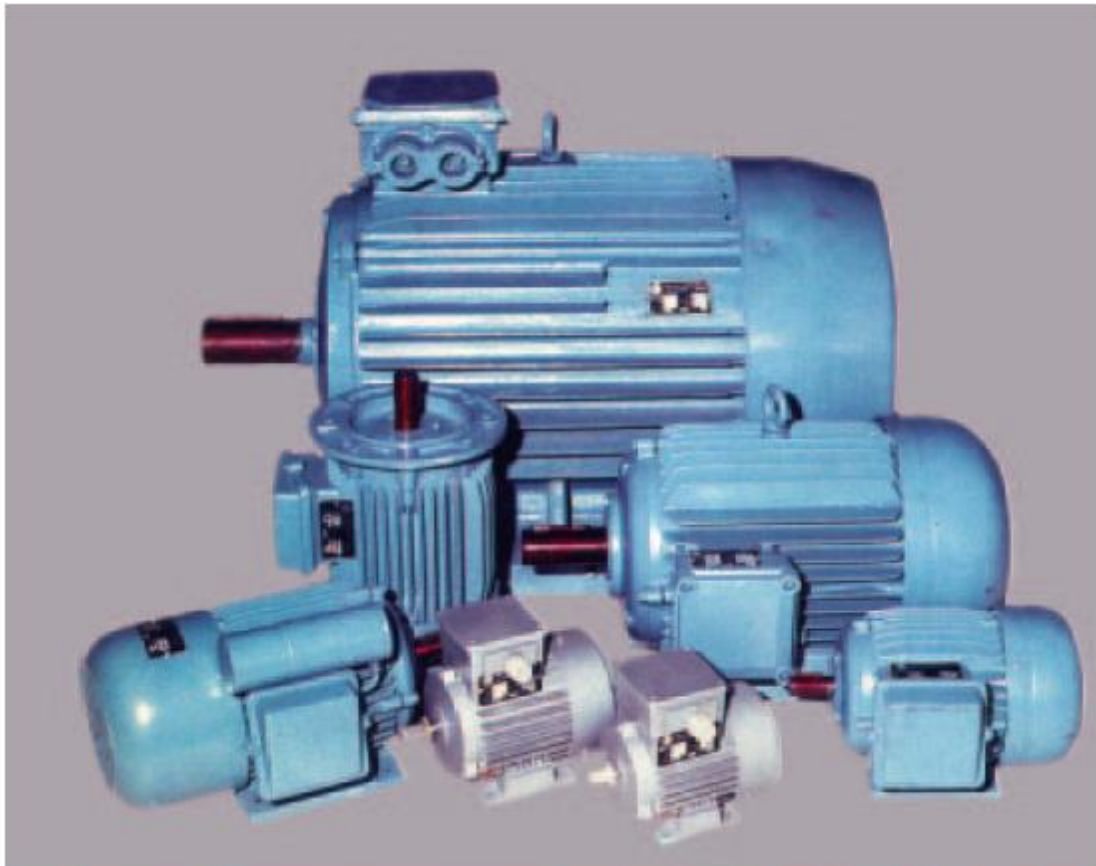
- με ελεύθερη είσοδο και έξοδο αέρα,
- με είσοδο και εξαναγκασμό αέρα από αεραγωγό,
- με επιφανειακή ψύξη και
- με διάφορα ψυκτικά υγρά που διακινούνται εξαναγκασμένα ή όχι.

Προστασία της περιέλιξης

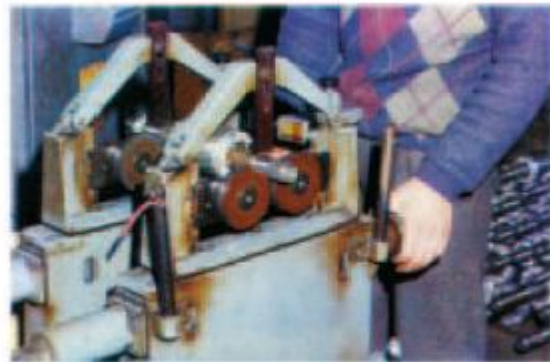
Κατά τη λειτουργία ενός ΑΤΚ μπορεί να δημιουργήσουμε υπερφόρτιση στα τυλίγματά του με τους εξής τρόπους:

- διφασική λειτουργία
- πολύ μεγάλη διάρκεια εκκίνησης
- μεγάλη πτώση τάσης
- υπέρταση
- μπλοκάρισμα δρομέα
- αυξημένη θερμοκρασία περιβάλλοντος και
- βλάβη στο σύστημα ψύξης.

Η υπερθέρμανση μειώνει τη διάρκεια ζωής του κινητήρα και γι' αυτό χρησιμοποιούμε ελεγκτές της θερμοκρασίας όπως θερμίστορ ή ψυχρές αντιστάσεις.



Ρεκτιφιέ αξόνων



Δυναμική ζυγοστάθμιση δρομέων



Συναρμολόγηση κινητήρων

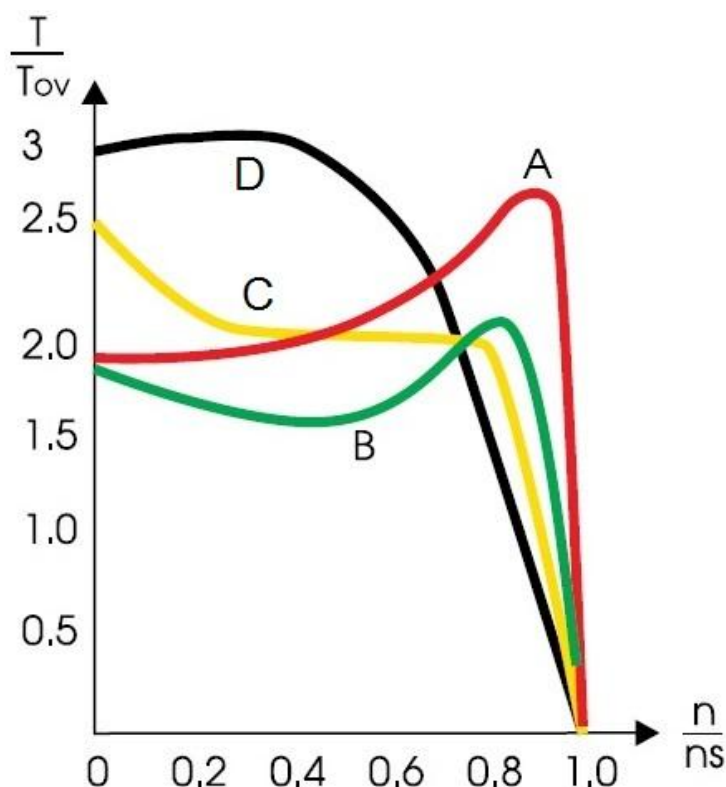


Κατεργασία μεγάλων χυτοσιδηρών εξαρτημάτων

Εικόνα 1.6. Φωτογραφίες κατά την κατασκευή ενός κινητήρα [3].

Κλάσεις κινητήρων κλωβού

Έχουμε πέντε βασικές κλάσεις σχεδίασης επαγωγικών κινητήρων σύμφωνα με τη NEMA, οι οποίες ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις ροπής-ταχύτητας των πιο κοινών τύπων μηχανικών φορτίων. Οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας των τεσσάρων βασικών κλάσεων φαίνονται στην Εικόνα 1.7.



Εικόνα 1.7. Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας των A,B,C,D κλάσεων σχεδίασης βραχυκυκλωμένου δρομέα [3].

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες είναι ιδανικές καμπύλες δηλαδή δε συμπεριλαμβάνουν την επίδραση των παρασιτικών ροπών. Οι παρασιτικές ροπές προκαλούν βυθίσεις στις καμπύλες και είναι σχεδόν πάντα παρούσες. Στην Εικόνα 1.8 παρουσιάζονται οι αντιπροσωπευτικές διατομές από τους τρεις συχνότερους δρομείς.



Εικόνα 1.8. Αντιπροσωπευτικές διατομές κλάσεων NEMA [2].

Αναλυτικά λοιπόν οι κλάσεις είναι [2]:

- κλάση B: είναι η βάση σύγκρισης της απόδοσης του κινητήρα με κινητήρες άλλων κλάσεων. Χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές όπως στην οδήγηση φυγοκεντρικών αντλιών, ανεμιστήρων και φυσητήρων εργαλειομηχανών.
- κλάση A: παρουσιάζει ίδια χαρακτηριστικά με τον κινητήρα κλάσης B όμως έχει μεγαλύτερη ροπή ανατροπής, αφού έχει και υψηλότερο ρεύμα εκκίνησης και περιορισμένο πεδίο εφαρμογών.
- κλάση C: έχει χαμηλότερη ροπή ανατροπής από τον κινητήρα κλάσης B αλλά μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης που τον καθιστά κατάλληλο για την οδήγηση αντλιών εμβόλου, δονούμενων καλυμμάτων και συμπιεστών χωρίς συσκευές αποφόρτισης. Σε ονομαστική ροπή η ολίσθηση και το ρεύμα εκκίνησης είναι παρόμοια με της κλάσης B.
- κλάση D: έχει πολύ υψηλή ροπή και ολίσθηση με κύριο πεδίο εφαρμογής τα φορτία υψηλής αδράνειας. Παραδείγματα είναι οι τροχοί που φέρουν οι πρέσες, ανελκυστήρες και ανυψωτικά.
- κλάση E: στην ίδια ονομαστική ισχύ και σύγχρονη ταχύτητα οι τιμές της ροπής ανατροπής, της ροπής κλειδωμένου δρομέα και της ροπής ανύψωσης είναι χαμηλότερες από αυτές της κλάσης B αλλά έχουν υψηλότερο ρεύμα εκκίνησης. Είναι κινητήρες υψηλής απόδοσης.

Nominal code letter	Locked rotor, kVA/hp	Nominal code letter	Locked rotor, kVA/hp
A	0-3.15	L	9.00-10.00
B	3.15-3.55	M	10.00-11.00
C	3.55-4.00	N	11.20-12.50
D	4.00-4.50	P	12.50-14.00
E	4.50-5.00	R	14.00-16.00
F	5.00-5.60	S	16.00-18.00
G	5.60-6.30	T	18.00-20.00
H	6.30-7.10	U	20.00-22.40
J	7.7-8.00	V	22.40 and up
K	8.00-9.00		

Εικόνα 1.9. Πίνακας κωδικών γραμμάτων της NEMA με τη φαινόμενη ισχύς προς την ονομαστική ισχύ του κινητήρα [1].

Στοιχεία πινακίδας

Η ονομαστική πινακίδα πρέπει να υπάρχει σε κάθε κινητήρα και να περιέχει όλα τα στοιχεία του κινητήρα. Σε αυτήν αναγράφονται οι ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας που είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχημένη λειτουργία των συσκευών.

ENERGY EFFICIENT		FRAME	TYPE	DESIGN
XE		445T	P	B
		IDENT. NO. P44G520A-G1-XJ		
DUTY MASTER A-C MOTOR		HP 150	VOLTS 460	
NEMA NOM. EFFICIENCY 96.2 %		RPM 1785	AMPS 163	
GUARANTEED EFFICIENCY 95.8 %		AMB 40 °C DUTY CONT		
POWER FACTOR 89.7		HZ 60	ALTERNATE RATING	
MAX. CORR. KVAR 17.5		S.F. 1.15	AMB °C 40	S.F. 1.00
RELIANCE		ENCL. TEFC 50	ALTITUDE 9000	
RELIANCE ELECTRIC COMPANY/CLEVELAND, OHIO 44117		PHASE 3	CODE G	INS. CLASS F
		DRIVE END BEARING	90BC03X30X26	
		OPP. D.E. BEARING	90BC03X30X26	

Εικόνα 1.10. Ονομαστική πινακίδα [2].

Τα χαρακτηριστικά που αναγράφονται είναι τα εξής [2]:

1. Ονομαστική απόδοση
Είναι η μέση απόδοση ενός μεγάλου αριθμού κινητήρων της ίδιας κλάσης.
2. Εγγυημένη απόδοση
Η ελάχιστη απόδοση που αναμένεται σε λειτουργία υπό ονομαστικές συνθήκες.
3. Γράμμα κλάσης
Υποδηλώνει τα χαρακτηριστικά της κλάσης NEMA της μηχανής.
4. Συντελεστής λειτουργίας
Ο αριθμός ο οποίος εάν πολλαπλασιαστεί με την ονομαστική ισχύ προσδιορίζει το επιτρεπτό επίπεδο φόρτισης, υπό την προϋπόθεση ότι η τάση και η συχνότητα διατηρούνται στην τιμή που αναγράφεται από την πινακίδα.
5. Κλάση μόνωσης
Το γράμμα που υποδηλώνει την κλάση μόνωσης προσδιορίζει τη μέγιστη επιτρεπτή αύξηση θερμοκρασίας πάνω από τη θερμοκρασία του μέσου ψύξης των τυλιγμάτων του κινητήρα, με την προϋπόθεση ότι η μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 40° C.
6. Αριθμός πλαισίου
Είναι ο αριθμός που καθορίζει τις διαστάσεις εγκατάστασης στήριξης του κινητήρα. Αυτές αφορούν μεταξύ άλλων το μήκος του άξονα, τη διάμετρο και το ύψος του καθώς και τη θέση των οπών στήριξης.
7. Συσκευασία-Κιβώτιο
Υποδηλώνει ότι ο κινητήρας είναι ολοκληρωτικά εσώκλειστος και ψύχεται μέσω ενός εξωτερικού ανεμιστήρα.
8. Κωδικό Γράμμα
Το κωδικό γράμμα κατευθύνει τον αναγνώστη σε έναν πίνακα kVA κλειδωμένου δρομέα ανά ιπποδύναμη από τον οποίο μπορεί να υπολογισθεί το στιγμιαίο ρεύμα

εκκίνησης. Παρέχει δηλαδή ένα μέσο υπολογισμού του αναμενόμενου ρεύματος εισροής στο στάτη κατά την εκκίνηση του κινητήρα με ονοματικές τιμές τάσης και συχνότητας.

1.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΩΝ ΑΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΤΡΙΦΑΣΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Όταν δίνουμε τριφασικό ρεύμα στα τρία τυλίγματα του στάτη δημιουργείται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που τέμνει τις σπείρες του δρομέα. Έτσι αναπτύσσονται επαγωγικά ρεύματα με αποτέλεσμα τη δημιουργία μαγνητικής δύναμης που περιστρέφει το δρομέα [3].

Η **σύγχρονη ταχύτητα** n_{sync} του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου είναι πάντοτε μεγαλύτερη από την **ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα** n_m (ασύγχρονη)[1].

$$n_{sync} = \frac{60f_e}{p} \text{ [rpm]} \quad (1)$$

f_e : συχνότητα συστήματος (στάτη) σε Hz

p : αριθμός των πόλων της μηχανής

Η **γωνιακή σύγχρονη ταχύτητα** δίνεται από τον τύπο:

$$\omega_{sync} = \frac{2\pi \cdot n_{sync}}{60} \text{ [rad/sec]} \quad (2)$$

Αρχή λειτουργίας

Αυτό που γίνεται δηλαδή είναι να τροφοδοτούμε με τριφασικό ρεύμα το τυλίγμα του στάτη ώστε να δημιουργείται σε αυτό στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο ταχύτητας n_{sync} . Οι ακίνητοι αρχικά αγωγοί του δρομέα τέμνονται από της μαγνητικές γραμμές του πεδίου όπου αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη ΗΕΔ με φορά σύμφωνη με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Επειδή το ηλεκτρικό ρεύμα κλείνει μέσα από τα στεφάνια βραχυκύκλωσης, οι αγωγοί αυτοί διαρρέονται και από επαγωγικά ρεύματα. Οι ρευματοφόροι πλέον αγωγοί του δρομέα μέσα στο μαγνητικό πεδίο αναπτύσσουν μαγνητικές δυνάμεις Laplace. Οι αντιδιαμετρικές αυτές δυνάμεις αποτελούν ζεύγη που δημιουργούν ροπή στρέψης και προκαλούν την περιστροφή του δρομέα με ταχύτητα n_m .

Η τάση που επάγεται στους αγωγούς του δρομέα εξαρτάται από τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία. Η **ταχύτητα ολίσθησης** n_{slip} ή **ολίσθηση** s είναι ένα μέγεθος που περιγράφει αυτή τη σχετική κίνηση και δίνει το σχετικό σφάλμα μεταξύ τους [1].

$$n_{slip} = n_{sync} - n_m \text{ [rpm]} \quad (3)$$

$$s = \frac{n_{slip}}{n_{sync}} \times 100\% = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \times 100\% \quad (4)$$

- Αν ο δρομέας περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα τότε $s = 0$.
- Αν ο δρομέας είναι ακίνητος τότε $s = 1$.

- Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση $0 < s < 1$.

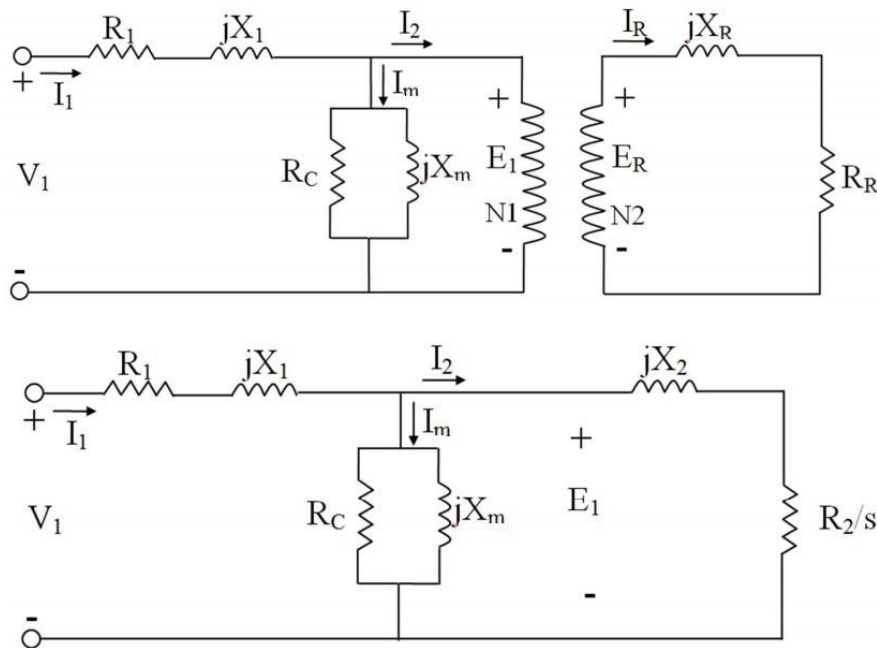
Η ολίσθηση δηλαδή δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με το φορτίο.

- Αν ο δρομέας της μηχανής είναι ακίνητος $n_m = 0 \text{ rpm}$ τότε $f_r = f_e$ [Hz], όπου f_r είναι η **συχνότητα του δρομέα**.
- Αν $n_{sync} = n_m$ τότε $f_r = 0 \text{ Hz}$.
- Για κάθε άλλη ενδιάμεση τιμή της n_m η f_r γίνεται

$$f_r = s \cdot f_e \quad (5)$$

Ισοδύναμο κύκλωμα

Στην εικόνα 11 παρουσιάζουμε το τελικό ανά φάση κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα.



Εικόνα 1.11. Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα.

Το πρώτο σχήμα αναφέρεται στο ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα που είναι το ίδιο με έναν μετασχηματιστή. Το πρωτεύον τύλιγμα είναι ο στάτης και έτσι στην είσοδο της μηχανής έχουμε:

$$R_1 = \text{αντίσταση στάτη} [\Omega]$$

$$X_1 = \text{επαγωγική αντίδραση στάτη} [\Omega]$$

Λόγω του σιδηρομαγνητικού πυρήνα στο εσωτερικό της μηχανής έχουμε τη δημιουργία μαγνητικής ροής, η οποία εξαρτάται από το ολοκλήρωμα της **εφαρμοζόμενης τάσης** E_1 . Έτσι έχουμε:

$$R_C = \text{αντίσταση λόγω απωλειών σιδήρου} [\Omega]$$

$$X_m = \text{επαγωγική αντίδραση μαγνήτισης} [\Omega]$$

Στο δρομέα της μηχανής έχουμε την **τάση δρομέα** E_R που δίνει ρεύμα στο βραχυκυκλωμένο κύκλωμα του δρομέα το οποίο αποτελεί το δευτερεύον τύλιγμα. Η τάση του στάτη και του δρομέα συνδέονται με τον τύπο:

$$E_R = \frac{N_2}{N_1} E_1 \quad [\text{V}] \quad (6)$$

όπου N είναι οι σπείρες του στάτη (1) και του δρομέα (2).

Εάν εφαρμόσουμε μία τάση E_1 στο στάτη τότε θα πάρουμε μία τάση εξ επαγωγής E_R στο δρομέα λόγω ΗΕΔ. Όσο μεγαλύτερη είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ των πεδίων του στάτη και του δρομέα τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση E_R του δρομέα. Τη μέγιστη δυνατή τάση την επιτυγχάνουμε όταν ο δρομέας είναι ακινητοποιημένος γιατί τότε έχουμε τη μέγιστη σχετική κίνηση των δύο πεδίων. Έτσι προκύπτει ο τύπος:

$$E_R = sE_{R0} \quad [\text{V}] \quad (7)$$

όπου E_{R0} = επαγόμενη τάση ακινητοποιημένου δρομέα και

$$X_R = sX_{R0} \quad (8)$$

Οπότε το **ρεύμα του δρομέα** και η **σύνθετη αντίσταση** θα είναι:

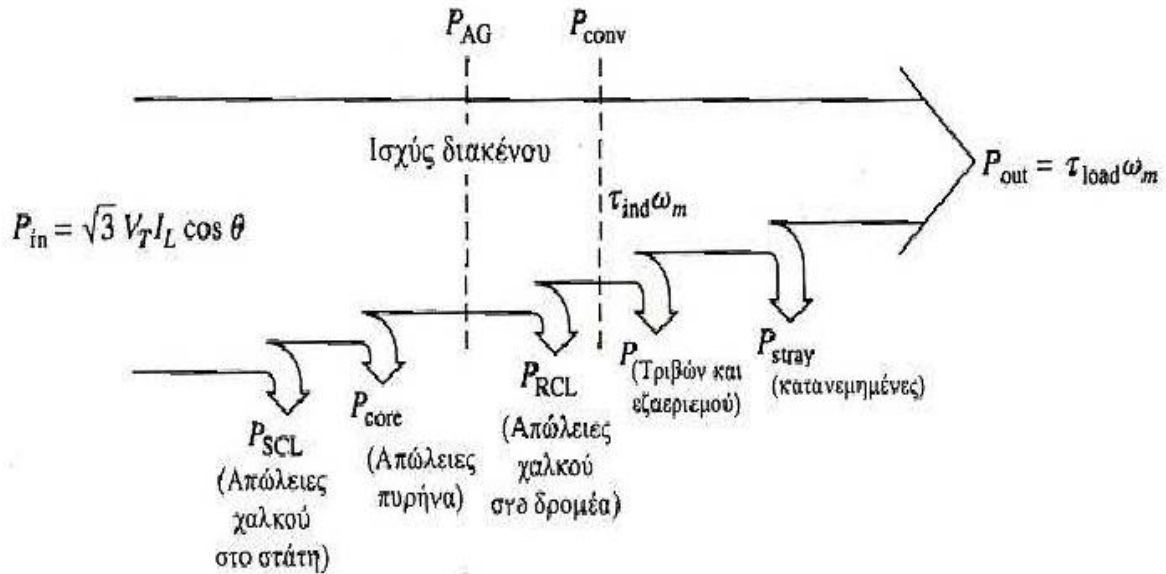
$$I_R = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}} \quad [\text{A}] \quad (9)$$

$$Z_R = \frac{R_R}{s} + jX_{R0} \quad (10)$$

Το δεύτερο σχήμα αναφέρεται στο τελικό ισοδύναμο κύκλωμα μετά τη σύνθεση των δύο στρεφόμενων μαγνητικών πεδίων σε ένα.

Απώλειες, Ισχύς και Ροπή

Ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί ως στρεφόμενος μετασχηματιστής. Το δευτερεύον τύλιγμα, που είναι ο δρομέας, είναι βραχυκυκλωμένο ώστε να μην εμφανίζεται ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της μηχανής αλλά μηχανική. Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα ροής ισχύος του επαγωγικού κινητήρα όπου φαίνεται η σύνδεση που έχουν η ηλεκτρική και η μηχανική ισχύς [1].



Εικόνα 1.12. Διάγραμμα ροής ισχύος επαγωγικού κινητήρα [5].

Στο διάγραμμα φαίνονται καθαρά όλες οι απώλειες και ισχύεις που εμφανίζονται στον κινητήρα με μονάδες [W]. Αναλυτικότερα έχουμε:

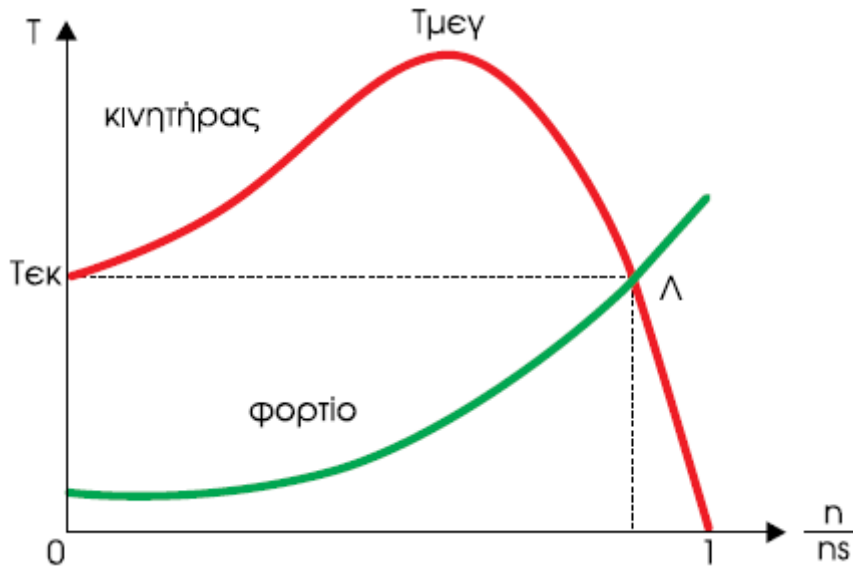
- P_{in} = ηλεκτρική ισχύς εισόδου στον κινητήρα (στο διάγραμμα δίνεται με τη μορφή τριφασικού συστήματος)
- P_{SCL} = απώλειες χαλκού ή ωμικές απώλειες στο τύλιγμα του στάτη = $3I_1^2 R_1$
- P_{core} = απώλειες πυρήνα του στάτη λόγω υστέρησης και δινορρευμάτων = $3E_1^2 G_C$
- P_{AG} = ισχύς διακένου, εναπομένουσα ισχύς που μεταφέρεται στο δρομέα = $P_{in} - P_{SCL} - P_{core}$
- P_{RCL} = απώλειες χαλκού στο τύλιγμα του δρομέα = $3I_R^2 R_R$
- P_{conv} = μετατρεπόμενη εναπομένουσα ηλεκτρική ισχύς σε μηχανική = $\tau_{ind} \omega_m = P_{AG} - P_{RCL}$, όπου τ_{ind} είναι η επαγόμενη ροπή ή αναπτυσσόμενη ροπή της μηχανής
- $P_{F\&W}$ = απώλειες τριβών και εξαερισμού
- P_{stray} = κατανεμημένες απώλειες
- P_{out} = μηχανική ισχύς εξόδου του κινητήρα = $\tau_{load} \omega_m$, όπου τ_{load} είναι η ροπή που ασκείται στον άξονα του δρομέα

Και τέλος το βαθμό απόδοσης ενός κινητήρα τον λαμβάνουμε από τον τύπο [1]:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (11)$$

Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας

Η ροπή είναι από τα σημαντικότερα στοιχεία του κινητήρα. Στην εικόνα 1.13 δίνουμε μία τυπική καμπύλη ροπής-ταχύτητας (κόκκινη καμπύλη) ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.



Εικόνα 1.13. Τυπική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα [3].

Παρατηρούμε πως στην εκκίνηση, που οι στροφές του κινητήρα είναι πρακτικά μηδέν, έχουμε την ονομαζόμενη **ροπή εκκίνησης** $T_{εκ}$. Με την αύξηση των στροφών (της ταχύτητας του κινητήρα) έχουμε ταυτόχρονη αύξηση και της ροπής μέχρι να φτάσουμε τη **μέγιστη ροπή** ή **ροπή ανατροπής** T_{max} . Τη λειτουργία του κινητήρα πριν τη T_{max} τη χαρακτηρίζουμε ασταθή και μετά τη T_{max} τη χαρακτηρίζουμε ευσταθή. Έπειτα παρατηρούμε πως η ροπή μειώνεται απότομα και όταν η ταχύτητα του κινητήρα γίνει ίση με τη σύγχρονη τότε η ροπή μηδενίζεται. Η πράσινη καμπύλη στην εικόνα 1.13 μας δίνει τη ροπή σε σχέση με τις στροφές του φορτίου. Η διαφορά μεταξύ των δύο καμπυλών είναι η **ροπή επιτάχυνσης**. Η τομή των δύο καμπυλών μας δίνει το σημείο λειτουργίας του κινητήρα. Σημειώνουμε εδώ πως η ροπή εκκίνησης του κινητήρα θα πρέπει να είναι πάντα μεγαλύτερη από τη ροπή εκκίνησης του φορτίου σε όλο το διάστημα επιτάχυνσης του κινητήρα έως το σημείο λειτουργίας του. Τέλος, επισημαίνουμε πως στην ευσταθή περιοχή ο κινητήρας έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται αυτόματα στις διακυμάνσεις του φορτίου [3].

1.4.1 Εκκίνηση Ασύγχρονων Τριφασικών Κινητήρων Κλωβού

Όταν συνδέσουμε άμεσα έναν κινητήρα κλωβού στο δίκτυο, η ένταση του ρεύματος εκκίνησης είναι 3-8 φορές μεγαλύτερη από της ονομαστικής έντασης κατά την κανονική του λειτουργία. Φυσικά αυτό προκαλεί έντονη πτώση τάσης στο δίκτυο. Σύμφωνα με τους κανονισμούς μπορούμε να έχουμε διακύμανση τάσης κατά την τροφοδοσία έως 5%. Δηλαδή οι τρεις περιπτώσεις που επιτρέπεται η άμεση σύνδεση στο δίκτυο χωρίς την έγκριση της ΔΕΗ είναι:

- Ο κινητήρας να απορροφά κατά τη εκκίνηση $I_{εκκ} < 30A$.
- Ο λόγος των εντάσεων των ρευμάτων να είναι

$$\frac{I_{εκκ}}{I_{ον}} < 2 \text{ για κινητήρες με ισχύ έως } 7,5\text{kW}$$

$$\frac{I_{εκκ}}{I_{ον}} < 1,6 \text{ για κινητήρες με ισχύ πάνω από } 7,5\text{kW}$$

- Η εγκατάσταση να διαθέτει μετασχηματιστή ιδιόκτητο ή της ΔΕΗ. Η ένταση του ρεύματος εξαρτάται από τη φαινόμενη ισχύ του μετασχηματιστή όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

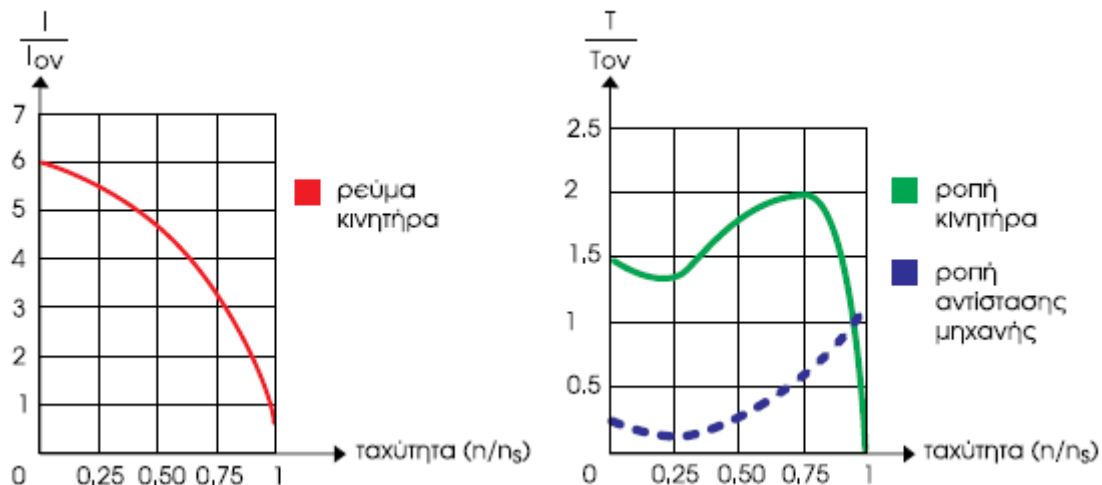
$I_{εκκ}$ [A]	30	42	85	125	175	250	300
$S_{M/Σ}$ [kVA]	15	25	50	75	100	150	250-500

Εικόνα 1.14. Πίνακας με τιμές ρεύματος εκκίνησης και φαινόμενης ισχύος μετασχηματιστή [3].

Οι μέθοδοι εκκίνησης που εφαρμόζονται αναλύονται παρακάτω.

▪ Απευθείας εκκίνηση

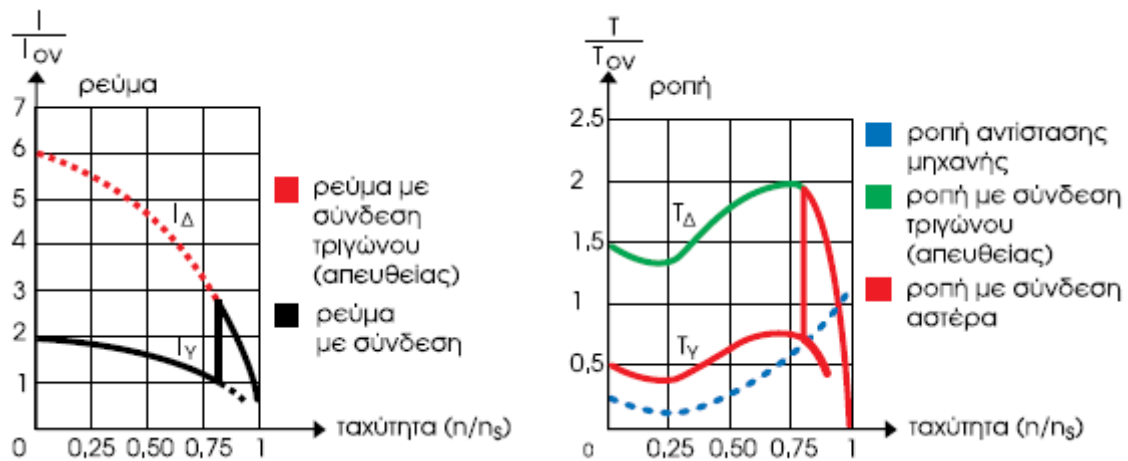
Τη μέθοδο αυτή την εφαρμόζουμε σε κινητήρες μικρής ισχύος. Με τριπολικό διακόπτη συνδέουμε τον κινητήρα στο δίκτυο όμως το μέγιστο ρεύμα εκκίνησης μας το προσδιορίζουν σχετικές οδηγίες από τη ΔΕΗ καθώς όπως αναφέρθηκε δημιουργείται πτώση τάσης. Με αυτή τη μέθοδο έχουμε μεγάλο ρεύμα εκκίνησης $I_{εκκ} = 6 \cdot I_{ον}$, μεγάλη ροπή εκκίνησης $T_{εκκ} = 1,5 \cdot T_{ον}$, απλό εξοπλισμό και αδυναμία ρύθμισης.



Εικόνα 1.15. Χαρακτηριστικές λειτουργίας με απευθείας εκκίνηση [3].

▪ Εκκίνηση με διακόπτη Υ-Δ (αστέρα-τριγώνου)

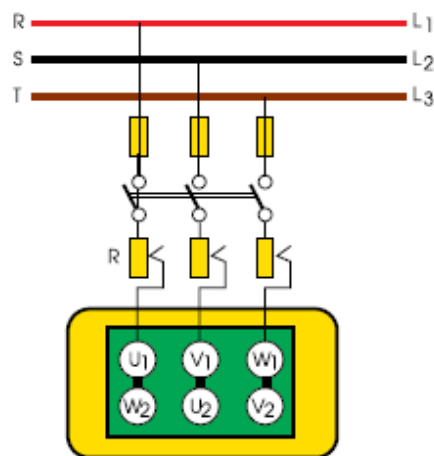
Η εκκίνηση γίνεται με χειροκίνητο διακόπτη Υ-Δ ή με αυτόματο. Στην εκκίνηση ο διακόπτης στρέφεται στη θέση αστέρα και οι επαφές του ενώνουν τους ακροδέκτες W_2, U_2, V_2 και συνδέουν το στάτη που τροφοδοτεί κάθε φάση του κινητήρα με 230V φάση δικτύου. Όταν πάρουμε έναν οριακό αριθμό στροφών τότε γυρίζουμε το διακόπτη σε τρίγωνο και οι επαφές του ενώνουν τους ακροδέκτες $U_1-W_2, V_1-U_2, W_1-V_2$ τροφοδοτώντας κάθε φάση του κινητήρα με πολική τάση 380V. Έτσι με τη συνδεσμολογία αστέρα στην εκκίνηση ο κινητήρας μειώνει τρεις φορές το ρεύμα εκκίνησης σε σχέση με τη συνδεσμολογία τριγώνου. Με αυτή τη μέθοδο έχουμε $I_{εκκ} = 2 \cdot I_{ον}$, $T_{εκκ} = 0,5 \cdot T_{ον}$ δηλαδή η εκκίνηση θα πρέπει να γίνει με μικρή ροπή φορτίου ή χωρίς φορτίο, παρατηρούμε ρεύματα και ροπές κατά την εναλλαγή Υ-Δ, σύνθετο εξοπλισμό και αδυναμία ρύθμισης.



Εικόνα 1.16. Χαρακτηριστικές λειτουργίας με διακόπτη Y-Δ [3].

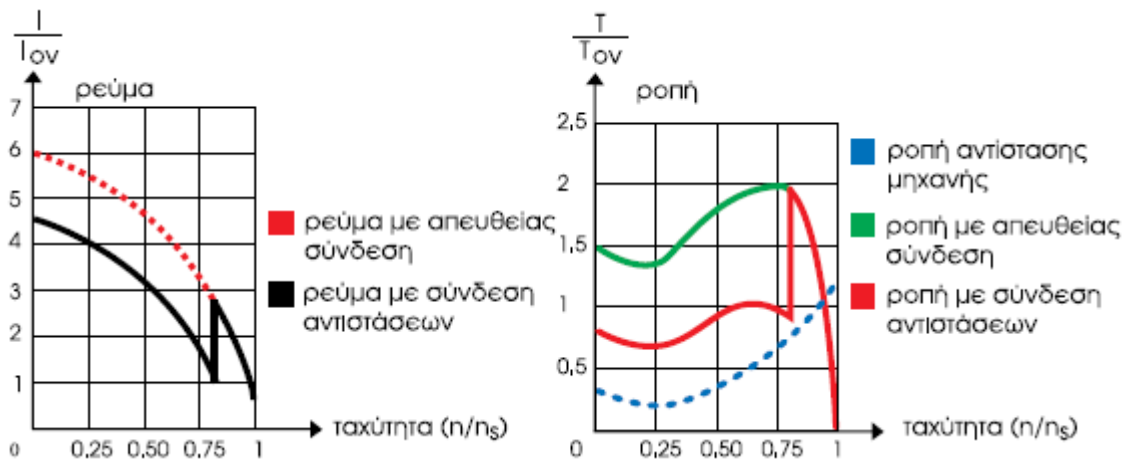
▪ Εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη

Η εκκίνηση εδώ γίνεται με μειωμένη τάση και ένταση ρεύματος. Αυτό το καταφέρνουμε παρεμβάλλοντας σε σειρά αντιστάσεις με το τύλιγμα του στάτη όπως φαίνεται στην εικόνα 1.17. Εναλλακτικά θα μπορούσαμε να βάλουμε και στραγγαλιστικά πηνία που δεν καταναλώνουν ισχύ αντί για αντιστάσεις.



Εικόνα 1.17. Παρεμβολή αντιστάσεων στο στάτη [3].

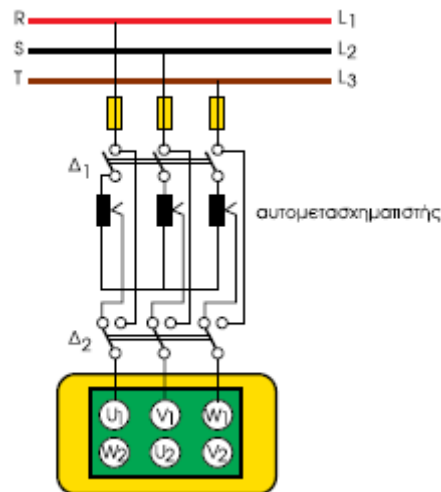
Αυτή η διάταξη είναι κάτι σαν εκκινητής. Μέχρι ο κινητήρας να αποκτήσει την ονομαστική του ταχύτητα ελαττώνουμε σιγά-σιγά την αντίσταση και όταν τη φτάσει τη μηδενίζουμε τελείως. Εδώ έχουμε $I_{εκκ} = 4,5 \cdot I_{ov}$, $T_{εκκ} = 0,75 \cdot T_{ov}$, σύνθετο εξοπλισμό και αδυναμία ρύθμισης.



Εικόνα 1.18. Χαρακτηριστικές λειτουργίας με αντιστάσεις στο στάτη [3].

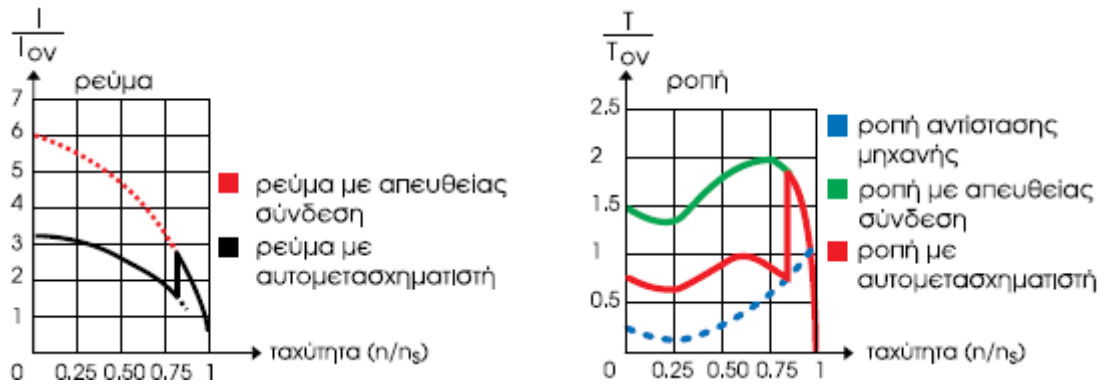
▪ Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή

Μία διάταξη με αυτομετασχηματιστή φαίνεται στην εικόνα 1.19. Κλείνοντας τον πρώτο διακόπτη Δ_1 τροφοδοτούμε τον κινητήρα μέσω του αυτομετασχηματιστή με μειωμένη τάση. Λίγο πριν την ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα κλείνουμε το διακόπτη Δ_2 και ο κινητήρας μπαίνει σε πλήρη τάση. Σε αυτό το σημείο ανοίγουμε και το διακόπτη Δ_1 ώστε να μπει ο αυτομετασχηματιστής εκτός δικτύου.



Εικόνα 1.19. Αυτομετασχηματιστής [3].

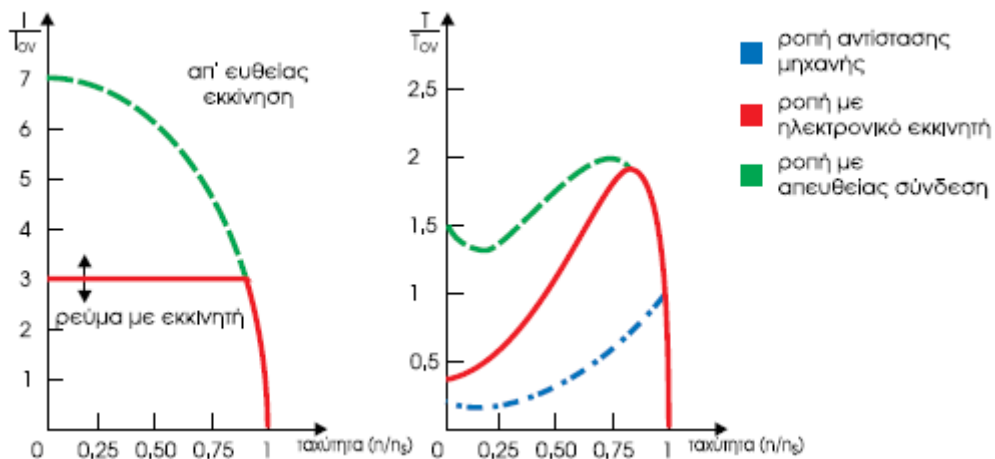
Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας αυτής της εκκίνησης είναι $I_{εκκ} = 3,5 \cdot I_{0N}$, $T_{εκκ} = 0,8 \cdot T_{0N}$, σύνθετος εξοπλισμός και αδυναμία ρύθμισης. Η ένταση του ρεύματος εκκίνησης είναι ανάλογη με την τάση τροφοδοσίας και η ροπή εκκίνησης με το τετράγωνο της τάσης τροφοδοσίας. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.20 πρέπει να ελέγχουμε την καμπύλη φορτίου και την καμπύλη του κινητήρα τροφοδοτώντας με μειωμένο ρεύμα εκκίνησης όταν πρόκειται να ξεκινήσουμε με φορτίο στον άξονα του κινητήρα.



Εικόνα 1.20. Χαρακτηριστικές λειτουργίας με αυτομετασχηματιστή [3].

▪ **Ηλεκτρική εκκίνηση**

Η ηλεκτρική εκκίνηση επιτυγχάνεται με έναν ηλεκτρονικό εκκινητή και μας επιτρέπει να ελέγχουμε τη διαδικασία εκκίνησης του κινητήρα. Μπορούμε δηλαδή να επιτύχουμε τη βέλτιστη εκκίνηση του κινητήρα και ως προς τη ροπή και ως προς την ένταση του ρεύματος. Αυτό οφείλεται σε έναν μικροεπεξεργαστή που ελέγχει και βελτιστοποιεί διαρκώς τις βασικές παραμέτρους του εκκινητή και του κινητήρα όπως είναι οι συνθήκες εκκίνησης και σταματήματος, η υπερθέρμανση του κινητήρα, η επιτήρηση του δικτύου τροφοδοσίας και η ρύθμιση του χρόνου εκκίνησης και σταματήματος του κινητήρα. εδώ έχουμε $I_{εκκ} = 2/5 \cdot I_{0v}$, $T_{εκκ} = 0,5 \cdot T_{0v}$ και δυνατότητα ρύθμισης με ράμπες επιτάχυνσης και επιβράδυνσης.



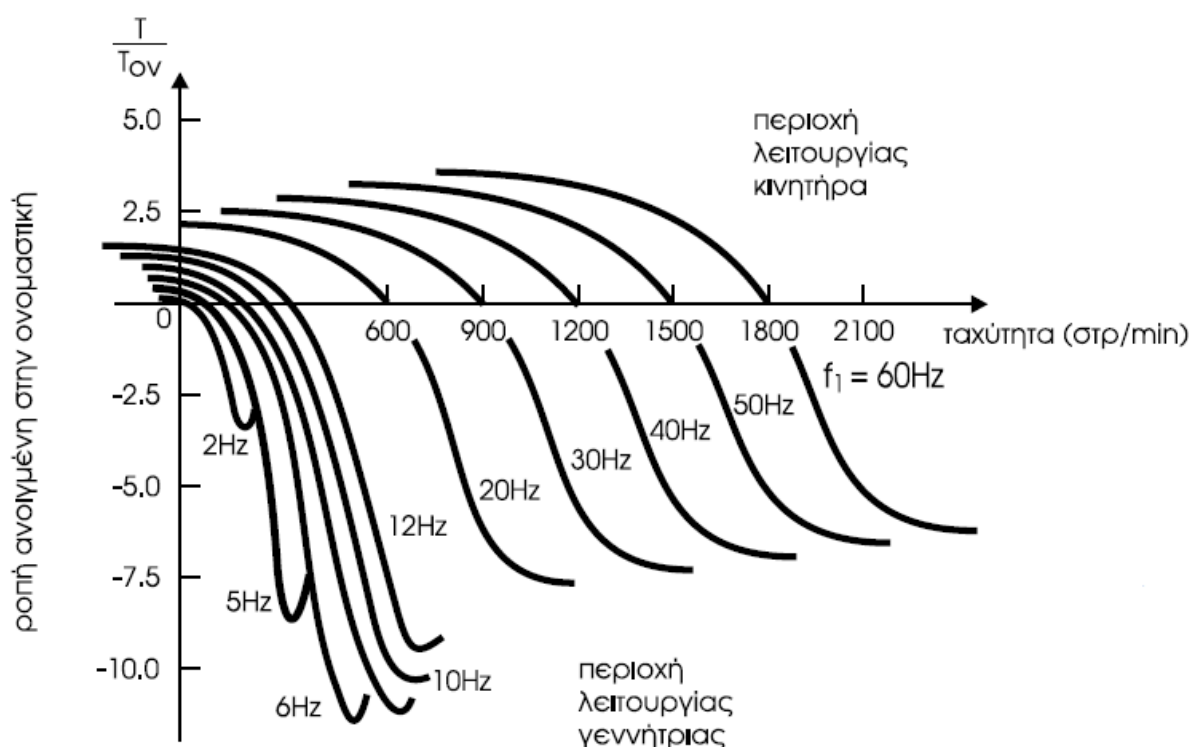
Εικόνα 1.21. Χαρακτηριστικές λειτουργίας ηλεκτρικής εκκίνησης [3].

1.4.2 Ρύθμιση Στροφών Ασύγχρονων Τριφασικών Κινητήρων Κλωβού

Σύμφωνα με τον τύπο της ταχύτητας του κινητήρα παρατηρούμε πως για να αλλάξει η ταχύτητα θα πρέπει να αλλάξει η συχνότητα ή το πλήθος των πόλων.

▪ Αλλαγή συχνότητας

Όταν τροφοδοτούμε τον κινητήρα με τάση μεταβλητής συχνότητας, δηλαδή αυξάνουμε σταδιακά τη συχνότητα, τότε μετατοπίζεται η καμπύλη ροπής-στροφών προς τα δεξιά (Εικόνα 1.22).



Εικόνα 1.22. Καμπύλη ροπής-στροφών με μεταβολή της συχνότητας [3].

Αυτό επιτυγχάνεται με ηλεκτρονικά ισχύος και ημιαγωγικούς διακόπτες (π.χ. SCR θυρίστορ, BJT διπολικό τρανζίστορ ισχύος, MOSFET τρανζίστορ, IGBT τρανζίστορ και GTO θυρίστορ).

▪ Αλλαγή πλήθους πόλων

Η αλλαγή των πόλων γίνεται με τρεις μεθόδους:

- διαδοχικούς πόλους (με αλλαγές στη συνδεσμολογία των πηνίων διέγερσης)
- πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη
- διαμόρφωση πλάτους του πόλου.

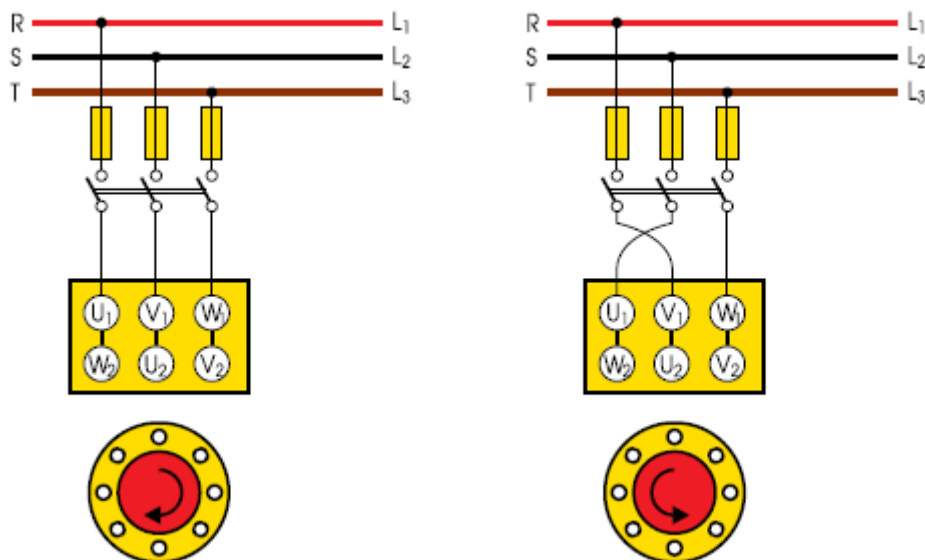
Στην εικόνα 1.23 φαίνεται ο πίνακας με το λόγο ζευγών πόλων και τις αντίστοιχες ταχύτητες που πιάνουν.

Λόγος ζευγών πόλων	Σύγχρονη ταχύτητα $n_{sync} = \frac{60 \cdot 50}{p} \text{ rpm}$
1:4	3000/750
2:3	1500/1000
2:5	1500/600
3:4	1000/750
3:5	1000/600
4:5	750/600
4:6	750/500
5:6	600/500

Εικόνα 1.23. Πίνακας ζευγών πόλων [3].

1.4.3 Αλλαγή Φοράς Περιστροφής Ασύγχρονων Τριφασικών Κινητήρων Κλωβού

Η αλλαγή φοράς περιστροφής γίνεται με την αλλαγή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου των τυλιγμάτων του στάτη. Όπως βλέπουμε και στην εικόνα 1.24, αυτό το πετυχαίνουμε όταν αλλάζουμε τη διαδοχή μεταξύ των δύο φάσεων τροφοδοσίας.



Εικόνα 1.24. Αλλαγή φάσεων τροφοδοσίας για την αλλαγή περιστροφής [3].

1.4.4 Πέδηση Ασύγχρονων Τριφασικών Κινητήρων Κλωβού

Οι τρόποι με τους οποίους πετυχαίνουμε το σταμάτημα του δρομέα ενός κινητήρα είναι:

- **Μηχανική πέδηση**

Με ειδικούς σιαγόνες που πιέζουν τον άξονα της μηχανής. Μεγάλος χρόνος σταματήματος και πολλές φθορές.

- **Ελεύθερη πέδηση**

Απλή διακοπή της τροφοδοσίας και ελεύθερο σταμάτημα μετά από πολύ χρόνο.

- **Ομαλή πέδηση**

Βαθμιαία διακοπή της τροφοδοσίας με χρήση ράμπας επιβράδυνσης. Εδώ καταφέρνουμε ομαλό και ελεγχόμενο σταμάτημα με ελάχιστα μηχανικά χτυπήματα.

- **Δυναμική πέδηση**

Αποσυνδέουμε τον κινητήρα από το τριφασικό δίκτυο και συνδέουμε τα άκρα του τυλίγματος σε πηγή συνεχούς ρεύματος. Αυτό προκαλεί και το γρήγορο φρενάρισμά του. Η διέλευση του ρεύματος στα τυλίγματα δημιουργεί ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο μέσα στο οποίο περιστρέφεται ο δρομέας λόγω αδράνειας. στους αγωγούς των τυλιγμάτων όμως δημιουργείται αντίθετη ροπή στρέψης η οποία ευθύνεται για το σταμάτημα.

- **Πέδηση με αντιστροφή της φοράς του μαγνητικού πεδίου**

Για να επιτύχουμε αυτό το σταμάτημα αλλάζουμε τις δύο φάσεις τροφοδότησης του στάτη. Δημιουργείται ηλεκτρομαγνητική πέδηση καθώς ο δρομέας τείνει να περιστραφεί αντίθετα και έτσι ισορροπείται η ροπή του φορτίου. Εδώ έχουμε όμως έντονη καταπόνηση της μηχανής.

1.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΒΛΑΒΕΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΤΡΙΦΑΣΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε τους απαραίτητους ελέγχους που πρέπει να γίνονται σε μία ηλεκτρική μηχανή, τις βλάβες που μπορεί να προκύψουν και κάποιες ενέργειες γύρω από τη συντήρηση. Το θεωρήσαμε απαραίτητο μιας και είναι ζήτημα ασφαλείας για κάποιον που θα ήθελε να ασχοληθεί με έναν ηλεκτρικό κινητήρα.

Έλεγχος κατά την παράδοση

Πρώτα απ' όλα, όταν παραλαμβάνουμε έναν κινητήρα ελέγχουμε τα διάφορα εξαρτήματα και την ονομαστική του ταμπέλα. Παρατηρούμε προσεκτικά τη συσκευασία για τυχόν χτυπήματα κατά τη μεταφορά του σε μας καθώς και τον ίδιο τον κινητήρα. Στην περίπτωση που υπάρχει

η όποια ζημιά θα πρέπει να λάβουμε σχετική αναφορά από τον εκπρόσωπο του κατασκευαστή [3].

Έλεγχος μεταφοράς και αποθήκευσης

Για να μεταφέρουμε έναν κινητήρα χρησιμοποιούμε γερανό και τον ανυψώνουμε από τις αναρτήσεις του κελύφους του ή από τα σημεία που υπάρχουν στη συσκευασία. Ο χώρος αποθήκευσης θα πρέπει να είναι κλειστός, καθαρός, στεγνός, αεριζόμενος και με θερμοκρασία όχι μικρότερη από 3°C (προστασία περιερίξεων από πάγο και υγρασία). Απαγορεύεται στο χώρο αποθήκευσης η χρήση ηλεκτρικά αγώγιμης σκόνης όπως σκόνη άνθρακα ή μεταλλική σκόνη. Ποτέ δεν πρέπει να τοποθετούμε τον έναν κινητήρα πάνω στον άλλο κατά την αποθήκευσή τους. Χρησιμοποιούμε γράσο στα έδρανα του κινητήρα και τους δακτυλίους για μη σκουριάσουν και συσκευάζουμε τις ψήκτρες αφού τις αφαιρέσουμε σε χαρτί παραφίνης καθώς και τους γρασαρισμένους δακτυλίους. Καλό είναι επίσης μία φορά το μήνα να περιστρέφονται κατά μισή στροφή τα περιστρεφόμενα μέρη του κινητήρα ώστε να μη σημαδευτεί το εσωτερικό του δακτυλίου του ρουλεμάν [3].

Έλεγχος προστασίας κινητήρων

Θα πρέπει να εξασφαλίσουμε την προστασία από υπερφόρτιση, βραχυκύκλωμα και πτώση τάσης [3].

Έλεγχος θεμελίωσης και σύνδεσης

Τον κινητήρα τον τοποθετούμε πάντα σε απόλυτα οριζόντια επιφάνεια και γερά στερεωμένο. Η θεμελίωση είναι σημαντική για την αποφυγή κραδασμών. Κατά την εγκατάσταση τα άκρα του άξονα τα καλύπτουμε με ένα πανί και μετά την εγκατάσταση καθαρίζουμε προσεκτικά τα μεταλλικά του μέρη με ένα πανί ποτισμένο στο πετρέλαιο. Δεν πρέπει να εισχωρήσει πετρέλαιο στα μονωμένα μέρη του κινητήρα. Είναι βασικό ο κινητήρας και ο εξοπλισμός του να γειώνονται σύμφωνα με τους κανόνες ασφαλείας και οι κύριες συνδέσεις σύμφωνα με τα στοιχεία του κινητήρα που βρίσκονται στην ονομαστική του ταμπέλα [3].

Έλεγχος υγρασίας

Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, θα πρέπει να ελέγξουμε τα τυλίγματα με ένα μέγερ στα 500V ώστε να πάρουμε μία μέτρηση της αντίστασης μόνωσης μέχρι και 40MΩ. Αυτό είναι και το αποδεκτό όριο λειτουργίας, διαφορετικά θα πρέπει να γίνει στέγνωμα του κινητήρα. Για το στέγνωμα τροφοδοτούμε το στάτη με ηλεκτρικό ρεύμα με τάση στο 10-15% της ονομαστικής ή τον αποσυναρμολογούμε και χρησιμοποιούμε κατάλληλο φούρνο. Συνιστάται πάντα η επικοινωνία πρώτα με το εργοστάσιο κατασκευής [3].

Έλεγχος μηχανικής ζεύξης

Ο κατασκευαστής συνήθως ορίζει τον τρόπο ζεύξης μιας μηχανής και γίνεται από ειδικευμένο προσωπικό. πρέπει να υπάρχει τέλεια ευθυγράμμιση μεταξύ του άξονα του κινητήρα και της οδηγούμενης μηχανής με απόκλιση που δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1/10mm, ώστε η μηχανή να μη φέρει κραδασμούς και αξονικές πιέσεις κατά την εκκίνηση [3].

Έλεγχος πριν την έναρξη λειτουργίας

Είναι σημαντικό πριν την έναρξη να ελέγχουμε [3]

- τα εξαρτήματα σύσφιγξης και στεγανοποίησης,
- την ύπαρξη ξένων σωμάτων στο εσωτερικό του κινητήρα,
- εάν υπάρχει έντυπο οδηγιών του κατασκευαστή,
- την περιστροφή του δρομέα του κινητήρα,
- εάν η εγκατάσταση είναι σύμφωνη με τους κανονισμούς Εργατικής Ασφάλειας και Πυροπροστασίας,
- τις αντιστάσεις μόνωσης των περιελίξεων και των καλωδίων με μέγγερ των 1000V,
- τα πλευρικά καλύμματα και το κάλυμμα του ανεμιστήρα,
- τους ακροδέκτες για τυχόν υπερθέρμανση,
- τη θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου όπου βρίσκεται ο κινητήρας,
- τη λίπανση των εδράνων μέσω των γρασσαδόρων (εάν δεν υπάρχουν γρασσαδόροι σημαίνει πως χρησιμοποιούνται αυτολιπανόμενα έδρανα) και εάν ο κινητήρας έχει πάνω από 6 μήνες να τεθεί σε λειτουργία θα πρέπει να αφαιρεθεί το κάλυμμα και να ελέγξουμε εάν το γράσσο είναι αλλοιωμένο,
- τις καλωδιώσεις όσον αφορά τον ηλεκτρικό πίνακα και τους διακόπτες καθώς και τη σύνδεση των τυλιγμάτων με τους αγωγούς.

Έλεγχος συνδεσμολογίας, φοράς περιστροφής, εκκίνησης, σταματήματος

Η συνδεσμολογία πρέπει να γίνεται από ειδικευμένο προσωπικό και σύμφωνα με το έντυπο οδηγιών του κατασκευαστή. Συνήθως οι ασύγχρονοι κινητήρες επιτρέπουν φορά περιστροφής και προς τις δύο κατευθύνσεις. Αν η γραμμή συνδέεται στους ακροδέκτες του στάτη U,V,W και η φασική ακολουθία της γραμμής είναι 1,2,3 ο κινητήρας θα στραφεί κατά την ωρολογιακή φορά. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες επιτρέπουν τη χρήση οποιασδήποτε μεθόδου εκκίνησης. Με έναν κινητήρα κλωβού μπορούμε να ξεκινήσουμε από την ψυχρή κατάσταση 2-3 φορές το πολύ μέσα σε διάστημα 8 ωρών. Το σταμάτημα γίνεται όταν διακόψουμε την τροφοδοσία ρεύματος και θα πρέπει να περιμένουμε να σταματήσει πλήρως η περιστροφή. Παρακάτω στην Εικόνα 1.25 δίνουμε κάποιες ενδεικτικές τιμές των ασφαλειών, των διακοπών και των αγωγών για τη σύνδεση κινητήρων [3].

Ισχύς (HP)	Ασφάλεια εκκίνηση απ' ευθείας (A)	Ασφάλεια Εκκίνηση Υ/Δ (A)	Διακόπτης Υ/Δ (A)	Γενικός Διακόπτης Υ/Δ (A)	Διατομή Αγωγού (mm ²)
0,25	2	-	-	16	2,5
0,33	2	-	-	16	2,5
0,50	2	-	-	16	2,5
0,75	4	-	-	16	2,5
1	4	-	-	16	2,5
1,5	6	-	-	16	2,5
2	10	6	16	16	2,5
3	10	10	16	16	2,5
4	16	10	16	16	2,5
5,5	20	16	16	16	2,5
7,5	25	16	16	16	2,5
10	25	25	25	25	4
12,5	35	25	25	25	6
15	35	25	40	40	6
20	50	35	40	40	10
25	63	50	63	40	16
30	80	63	63	60	25
35	80	63	63	60	25
40	80	63	63	60	35
50	100	80	160	100	35
60	160	100	160	100	50
75	160	125	160	100	70
100	200	160	160	200	95
125	225	200	340	200	120
150	300	250	340	200	120
180	400	300	340	400	150
220	430	300	340	400	185
270	500	430	550	400	300

Εικόνα 1.25. Ασφάλειες-Διακόπτες-Αγωγοί τάσεων 400V [3].

Έλεγχος κατά τη λειτουργία

Σε αυτό το σημείο ελέγχουμε την ταχύτητα των κραδασμών του κινητήρα. Οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας στο σύγχρονο αριθμό στροφών είναι 4,5mm/sec. Δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να τον υπερφορτώνουμε για μεγάλο χρονικό διάστημα με τιμές μεγαλύτερες από αυτές που δίνει ο κατασκευαστής. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στο κέλυφος είναι θεμιτό να μην το ακουμπάμε με γυμνά χέρια. Γενικά η θερμοκρασία είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες βλάβης ενός κινητήρα και γι αυτό το λόγω θα πρέπει να την ελέγχουμε ώστε να είμαστε μέσα στα επιτρεπόμενα όρια που ορίζεται από VDE 0530 για την κλάση μόνωσης του κάθε κινητήρα. Για παράδειγμα, εάν η επιτρεπόμενη θερμοκρασία των λιπαντικών είναι στους 100°C, τότε η θερμοκρασία των εδράνων δε θα πρέπει να ξεπερνά τους 70°C [3].

Βλάβες και επισκευές

Παραθέτουμε πίνακα με συγκεντρωμένα τα συμπτώματα βλαβών, τις αιτίες βλάβης και τις απαραίτητες επιδιορθώσεις.

Σύμπτωμα	Πιθανή αιτία	Επισκευή
1. Ο κινητήρας δεν ξεκινάει ούτε εν κενώ ούτε σε φορτίο.	Δεν υπάρχει τάση τροφοδοσίας στους ακροδέκτες.	Έλεγχος του αυτόματου διακόπτη ρευματος για πιθανή διακοπή ρεύματος. Έλεγχος των καλωδίων τροφοδοσίας. Εάν υπάρχει διακοπή η σύνδεση πρέπει να γίνει πάλι.
	Μία φάση του τυλίγματος του στάτη είναι κομμένη.	Το τύλιγμα του κινητήρα πρέπει να ελεγχθεί με megohmmeter και να διορθωθεί.
	Τροφοδοσία με τάση μικρότερη από την ονομαστική.	Οι κατάλληλες μετρήσεις πρέπει να γίνουν και να δοθεί τάση τροφοδοσίας ίση με την ονομαστική του κινητήρα.
	Η ροπή του φορτίου είναι μεγαλύτερη από τη ροπή εκκίνησης.	Η μηχανή που οδηγείται πρέπει να ελεγχθεί και να διορθωθεί.
2. Δύσκολη εκκίνηση ακολουθούμενη από μεγάλο βύθισμα ταχύτητας.	Οι μπάρες του δρομέα έχουν κοπεί ή έχουν αποσυγκολληθεί.	Έλεγχος αν οι μπάρες του κλωβού εφάπτονται του δακτυλίου βραχυκύκλωσης. Οποιοδήποτε σφάλμα πρέπει να διορθωθεί.
3. Δύσκολη εκκίνηση ακολουθούμενη από θόρυβο και υπερθέρμανση.	Τα έδρανα είναι φθαρμένα.	Τα κατεστραμμένα έδρανα πρέπει να αντικατασταθούν.
4. Κανονική εκκίνηση ακολουθούμενη από μεγάλη πτώση του αριθμού στροφών.	Πολύ χαμηλή τάση στους ακροδέκτες λόγω μεγάλης πτώσης τάσεως στα καλώδια τροφοδοσίας.	Τα καλώδια τροφοδοσίας πρέπει να αντικατασταθούν.
5. Ο κινητήρας υπερθερμαίνεται.	Η τάση είναι πολύ υψηλή και προκαλεί απώλειες σιδήρου. Η τάση είναι πολύ υψηλή και προκαλεί απώλειες χαλκού. Υπερφόρτωση του κινητήρα.	Η τάση πρέπει να αποκατασταθεί στην ονομαστική τιμή. Έλεγχος με βολτόμετρο και αμπερόμετρο. Έλεγχος φορτίου.
	Ιμάντας πολύ σφικτός.	Διόρθωση τάσης ιμάντα.
	Ασύμμετρη ηλεκτρική φόρτιση (καμμένη ασφάλεια, σφάλμα στη διάταξη ελέγχου, διακοπή μιας φάσης).	Αντικατάσταση ασφάλειας, έλεγχος, σύνδεση.

Σύμπτωμα	Πιθανή αιτία	Επισκευή
	Κακός αερισμός. Λανθασμένη συνδεσμολογία στο κιβώτιο ακροδεκτών.	Ελεγχος συνδεσμολογίας σωστή σύνδεση.
6. Ο στάτης υπερθερμαίνεται σε ορισμένα σημεία και η υπερθέρμανση συνοδεύεται από υπερφόρτιση, σε μία ή δύο φάσεις, και δυνατό θόρυβο.	Εσωτερικό βραχυκύκλωμα στην περιέλιξη του στάτη.	Αντικατάσταση της περιέλιξης.
7. Όταν λειτουργεί ο κινητήρας, ο δρομέας έρχεται σε επαφή με το στάτη και δημιουργεί θόρυβο και υπερθέρμανση.	Είναι πιθανόν ότι το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα δεν είναι πια ομοιόμορφο, λόγω ρωγμών στα έδρανα ή στα καπάκια τους ή λόγω κάποιας κλίσης του άξονα.	Τα καπάκια και τα φθαρμένα μέρη των εδράνων πρέπει να αντικατασταθούν.
8. Ο κινητήρας παρουσιάζει κραδασμούς κατά τη λειτουργία.	Λανθασμένη ευθυγράμμιση του άξονα λόγω κακής θεμελίωσης ή ανώμαλης επιφάνειας του εδάφους.	Η βάση πρέπει να στερεωθεί.
	Οι κραδασμοί μπορεί να μεταφέρονται από τη μηχανή που οδηγείται.	Πρέπει να γίνει αποσύζευξη από τη μηχανή ελέγχοντας τη λειτουργία εν κενώ του κινητήρα. Εάν η λειτουργία είναι χωρίς κραδασμούς, είναι βέβαιο ότι οι κραδασμοί μεταφέρονται από τη μηχανή που κινεί ο κινητήρας.
9. Τα έδρανα υπερθερμαίνονται.	Έχει εσχωρήσει σκόνη ή άλλα ξένα σώματα, ή το λιπαντικό είναι βρώμικο.	Το παλαιό λιπαντικό απομακρύνεται. Τα έδρανα πλένονται και λιπαίνονται με κατάλληλο λιπαντικό.
	Το υπερβολικό γράσο στο έδρανο αυξάνει τις απώλειες των τριβών.	Αφαιρείται το επιπλέον γράσο.
	Η βαλβίδα λιπαντικού δεν λειτουργεί κανονικά και το έδρανο έχει φθαρεί ή καταστραφεί.	Πρέπει να αντικατασταθεί.
	Ο μάντας που οδηγείται είναι πολύ σφιγμένος. Η μηχανή που οδηγείται δεν είναι καλά κεντραρισμένη.	Ο μάντας πρέπει να χαλαρώσει. Η έδραση των εδράνων και το κεντράρισμα της μηχανής πρέπει να ελεγχθούν.

Σύμπτωμα	Πιθανή αιτία	Επισκευή
10. Ασυήθης θόρυβος στο έδρανο συχνά συνοδευόμενος από αύξηση της θερμοκρασίας.	Τα έδρανα χρειάζονται καθαρισμό. Το έδρανο έχει καταστραφεί.	Αφαιρείται το παλιό λιπαντικό και αντικαθίσταται με νέο. Αντικατάσταση με καινούριο.
	Λανθασμένη ζεύξη ή κακή ευθυγράμμιση.	Έλεγχος συναρμολόγησης και διόρθωση. Έλεγχος ευθυγράμμισης.
11. Κινητήρας με δακτυλίδια στρέφεται με χαμηλή ταχύτητα ενώ έχουμε βραχυκυκλώσει την εξωτερική αντίσταση του εκκινήτη.	Πολύ μικρή διατομή καλωδίου στη διάταξη ρύθμισης.	Αντικατάσταση.
	Η διάταξη ρύθμισης της ταχύτητας είναι πολύ μακριά από τον κινητήρα.	Αλλαγή θέσης ρυθμιστή.
	Διακοπή στο κύκλωμα του δρομέα ή στο καλώδιο που συνδέει τον εκκινήτη.	Αντικατάσταση τυλίγματος.
	Ακαθαρσίες μεταξύ δακτυλιδιών και ψηκτρών.	Καθαρισμός με βούρτσες και αμμυδόπανο.
	Οι ψηκτρες είναι κολλημένες στις ψηκτροθήκες. Η πίεση των ελατηρίων των ψηκτρών δεν είναι κατάλληλη.	Αντικατάσταση ψηκτρών ψηκτροφορέα.
	Ανώμαλη η επιφάνεια των δακτυλιδιών.	Τρίψιμο με αμμυδόπανο ή αντικατάσταση.
	Δακτυλίδια έκκεντρα.	Αντικατάσταση.
	Υπερβολικές δονήσεις.	Έλεγχος στήριξης.
	Πυκνότητα ρεύματος ψηκτρών πολύ μεγάλη (υπερφόρτιση).	Έλεγχος φορτίου.
12. Προβλήματα στον ηλεκτρονικό ρυθμιστή στροφών:	Υπερβολικά υψηλή αδράνεια, μεγάλο φορτίο.	Ροοστάτης ρύθμισης πιο αργά. Μείωση φορτίου. Απαιτείται μεγαλύτερος ρυθμιστής.

Σύμπτωμα	Πιθανή αιτία	Επισκευή
α) Ενεργοποιείται το σύστημα προστασίας κατά την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση.	Βραχυκύκλωμα στην έξοδο.	Απομάκρυνση του βραχυκυκλώματος.
β) Ενεργοποιείται το σύστημα προστασίας κατά την ομαλή λειτουργία του ρυθμιστή.	Υπερβολικά υψηλό φορτίο.	Μείωση του φορτίου.
	Μακριά καλώδια εξόδου. Καταστροφή γέφυρας ή Θυρίστορ.	Μείωση του μήκους των καλωδίων. Ηλεκτρονικό εργαστήριο - Προμηθευτής.

Εικόνα 1.26. Πίνακας βλαβών και Επισκευών [3].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ COMSOL

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FINITE ELEMENT METHOD - FEM)

Ιστορικό της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM)

Οι βασικές ιδέες της FEM προήλθαν από τις εξελίξεις στη δομική ανάλυση αεροσκαφών. Το 1941, ο Χρένικοφ (Hrenikoff) παρουσίασε μία λύση των προβλημάτων ελαστικότητας με τη χρήση της «μεθόδου των δικτυωμάτων». Το 1943 δημοσιεύτηκε μία εργασία του Κουράντ (Courant), όπου χρησιμοποιούσε κατά τμήματα πολυωνυμική παρεμβολή σε τριγωνικές υποπεριοχές για να μοντελοποιήσει προβλήματα στρέψης. Ο Τέρνερ (Turner) και άλλοι, δημιούργησαν μητρώα ακαμψίας για δικτυώματα, δοκούς και άλλα στοιχεία και παρουσίασαν τα ευρήματά τους το 1956. Ο όρος πεπερασμένα στοιχεία πρωτοεμφανίστηκε και χρησιμοποιήθηκε από τον Κλου (Clough) το 1960 σε μία εργασία του [8].

Στις αρχές της δεκαετίας του 1960, οι μηχανικοί χρησιμοποίησαν τη μέθοδο για να δώσουν προσεγγιστικές λύσεις σε προβλήματα ανάλυσης τάσεων, ροής ρευστών, μεταφοράς θερμότητας και άλλων τομέων. Ο Αργύρης, το 1955, σε ένα βιβλίο για θεωρήματα ενέργειας και μητρωϊκές μεθόδους, έθεσε τα θέματα για μελλοντική ανάπτυξη στις μελέτες των πεπερασμένων στοιχείων. Το πρώτο βιβλίο για πεπερασμένα στοιχεία των Ζίνκιβιτς (Zienkiewicz) και Τσουνγκ (Chung) κυκλοφόρησε το 1967. Στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και στις αρχές του 1970, η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόστηκε σε μη γραμμικά προβλήματα και μεγάλες παραμορφώσεις. Το βιβλίο του Όντεν (Oden) για τα συνεχή μη γραμμικά εμφανίστηκε το 1972 [8].

Οι μαθηματικές βάσεις τέθηκαν τη δεκαετία του 1970 και περιλαμβάνουν την ανάπτυξη νέων στοιχείων, μελέτες σύγκλισης και άλλους σχετικούς τομείς. Σήμερα, οι εξελίξεις στους μεγάλους Η/Υ και η διαθεσιμότητα ισχυρών μικροϋπολογιστών έχουν φέρει τη μέθοδο αυτή στη διάθεση φοιτητών και μηχανικών [8].

FEM

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων μηχανικού. Οι εφαρμογές εκτείνονται από την παραμόρφωση και ανάλυση τάσεων σε αεροπλάνα, αυτοκίνητα, κτίρια και γέφυρες, μέχρι την ανάλυση πεδίων ροής θερμότητας, ροής υγρών, μαγνητικής ροής και άλλων προβλημάτων ροής [6].

Με τις εξελίξεις στην τεχνολογία των Η/Υ και των συστημάτων CAD (Computer Aided Design) μπορούν να μοντελοποιηθούν πολύ εύκολα ακόμα και σύνθετα προβλήματα. Διάφορες εναλλακτικές συνθέσεις μπορούν να δοκιμαστούν σε έναν Η/Υ πριν κατασκευαστεί το πρώτο πρωτότυπό τους. Όλα αυτά υποδεικνύουν την ανάγκη να διατηρήσουμε την επαφή μας με αυτές τις εξελίξεις, κατανοώντας τη βασική θεωρία, τις τεχνικές μοντελοποίησης και τις υπολογιστικές έννοιες της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων [6].

Σε αυτή τη μέθοδο ανάλυσης, μία περίπλοκη περιοχή, η οποία ορίζει ένα συνεχές, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Οι ιδιότητες των υλικών και οι διέπουσες σχέσεις θεωρούνται πάνω σε αυτά τα στοιχεία και εκφράζονται σε όρους των άγνωστων τιμών στις γωνίες των στοιχείων. Μία διαδικασία σύνθεσης, η οποία θεωρεί κατάλληλα τα φορτία και τους περιορισμούς, έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο εξισώσεων. Η λύση αυτών των εξισώσεων δίνει την κατά προσέγγιση συμπεριφορά του συνεχούς [6].

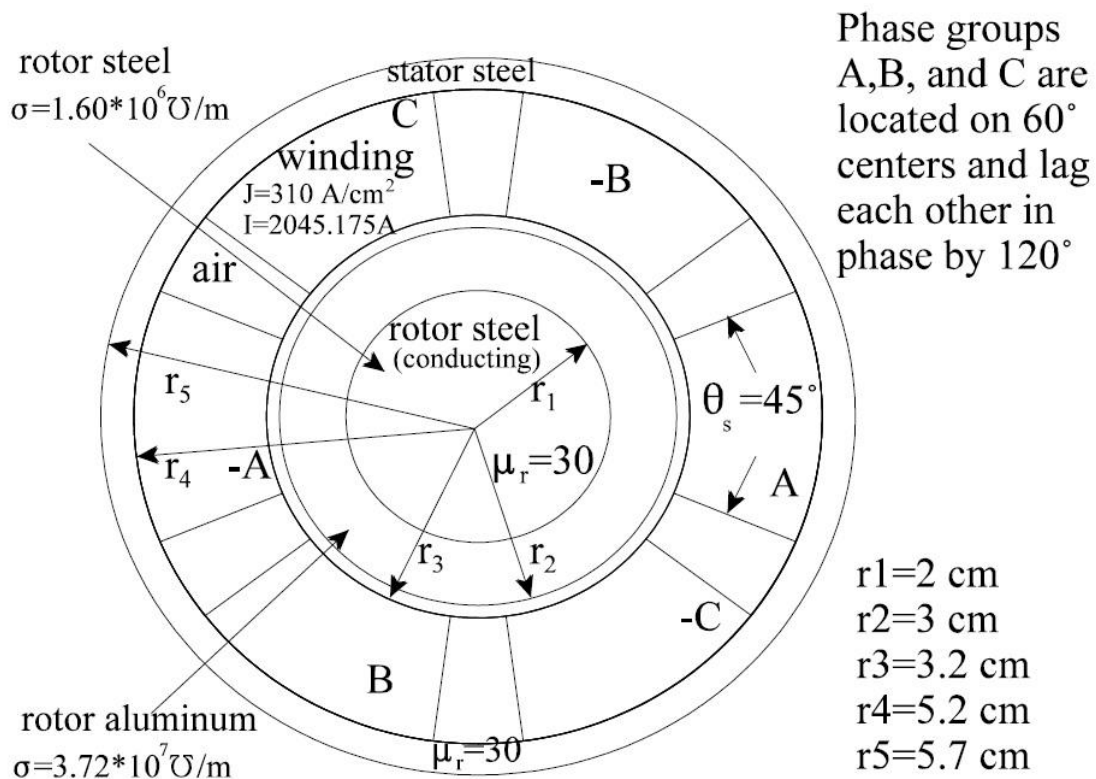
2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το πρόβλημα που θα προσομοιώσουμε μέσω του Comsol είναι το No.30 TEAM (Testing Electromagnetic Analysis Methods) Workshop, το οποίο αποτελείται από έναν τριφασικό κινητήρα επαγωγής στον οποίο τα δινορρεύματα στο δρομέα επάγονται από αρμονικό ρεύμα στις περιελίξεις του στάτη και από την περιστροφή του δρομέα. Είναι ένα γραμμικό πρόβλημα δινορρευμάτων. Παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω. Τα αποτελέσματά μας θα τα συγκρίνουμε έπειτα με τα αποτελέσματα άλλων δύο προσπαθειών επίλυσης του ίδιου προβλήματος ώστε να ελέγξουμε την ορθότητα του μοντέλου προσομοίωσης στο υπολογιστικό πρόγραμμα με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Η αναλυτική λύση δίνεται από τον Davey [12,13] και ανάλογη προσπάθεια προσομοίωσης έχει γίνει από τον Marcsa [9] που χρησιμοποιεί ένα δισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης στο Comsol.

Ένας από τους στόχους των προβλημάτων του εργαστηρίου TEAM Workshop είναι να δοκιμάσει μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του υπολογιστικού προγράμματος και τις εφαρμογές του. Παρά το γεγονός ότι στόχος είναι η δοκιμή των μεθόδων ανάλυσης μέσω της σύγκρισης αποτελεσμάτων, μπορούν επίσης να επαληθεύουν και την ορθότητα του λογισμικού. Το πιο σημαντικό όμως είναι η ακρίβεια του προγράμματος. Ο άλλος στόχος είναι να ανιχνεύσει τις τυποποιήσεις και τα χαρακτηριστικά της διαδικασίας, η οποία θα πρέπει να τροποποιηθεί και να βελτιωθεί. Συχνά, αυτά τα χαρακτηριστικά δεν είναι απαραίτητα αλλά έχουν σφάλματα (όπως αργή σύγκλιση, αναποτελεσματικοί αλγόριθμοι ή μέθοδοι παρουσίασης). Οι περαιτέρω στόχοι των προβλημάτων του εργαστηρίου TEAM είναι να ενθαρρύνει αμερόληπτες δοκιμές με πολλαπλά μοντέλα και λειτουργίες από όσο το δυνατόν περισσότερες διαφορετικές εφαρμογές και να μοιραστεί έτσι η εμπειρία που αποκτήθηκε κατά την επίλυση των διαφόρων προβλημάτων ή τη ανάπτυξη των προγραμμάτων ώστε να χρησιμοποιηθεί τελικά αυτή η εμπειρία από τους προγραμματιστές για νέα προγράμματα, επεκτάσεις και τροποποιήσεις των υφιστάμενων προγραμμάτων.

Το άρθρο [12] του Davey περιγράφει ένα πρόβλημα επαγωγικού κινητήρα στο οποίο τα δινορρεύματα στο δρομέα προκαλούνται τόσο από χρονικά αρμονικά ρεύματα στο στάτη όσο και από την περιστροφή του δρομέα. Το πρόβλημα αυτό έχει υπολογιστεί με μία αναλυτική μέθοδο που παρουσιάζεται στο άρθρο [13].

Παρόλο που το πρόβλημα είναι δισδιάστατο, παρουσιάζει μερικές ενδιαφέρουσες προκλήσεις που μέχρι τώρα δεν έχουν αντιμετωπιστεί στα υπάρχοντα προβλήματα. Μεταξύ αυτών είναι η ύπαρξη του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου και οι υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής οι παραδοσιακές προσεγγίσεις αμφισβητούνται, συμπεριλαμβανομένων και των τεχνικών περιέλιξης. Με οριακές στοιχειώδεις συναρτήσεις μπορεί να τροποποιηθεί η συνάρτηση του Green ώστε να ενσωματώνει απόλυτα τα δινορρεύματα. Με περιστροφή, δεν υπάρχει ακόμη καμία γνωστή τεχνική για την ενσωμάτωση της περιστροφής στη συνάρτηση του Green. Στα μαθηματικά, η συνάρτηση είναι η παλμική απόκριση μιας ανομοιογενούς διαφορικής εξίσωσης που ορίζεται σε ένα χώρο, ο οποίος καθορίζεται με αρχικές συνθήκες ή συνοριακές συνθήκες. Μέσω της αρχής της επαλληλίας, η συνέλιξη της συνάρτησης Green με μια αυθαίρετη συνάρτηση $f(x)$ στον ίδιο χώρο είναι η λύση για την ανομοιογενή διαφορική εξίσωση στο $f(x)$. Οι συναρτήσεις αυτές πήραν το όνομα του Βρετανού μαθηματικού George Green ο οποίος ανέπτυξε και αυτήν την ιδέα.



Εικόνα 2.1. Πρόβλημα τριφασικού επαγωγικού κινητήρα με 45° άνοιγμα περιελίξεων ανά φάση, με σταθερά $J=310 \text{ A/cm}^2$.

Παρακάτω θα αναλύσουμε το πρόβλημα όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1. Πρόκειται για έναν τριφασικό κινητήρα με εκτεθειμένες τις περιελίξεις του. Το ζητούμενο είναι να γίνει **πρόβλεψη της ροπής και των απωλειών δρομέα με εύρος ταχύτητας από 0 έως 1200rpm** (περίπου 3 φορές ταχύτερη από την σύγχρονη ταχύτητα 377rpm). Η συχνότητα των τριφασικών περιελίξεων είναι στα 60Hz. Ο χάλυβας του δρομέα και του στάτη έχει σχετική διαπερατότητα $\mu_r = 30$. Ο χάλυβας του στάτη είναι με δυναμοελάσματα και έχει αγωγιμότητα $\sigma = 0$ ενώ ο χάλυβας του δρομέα έχει $\sigma = 1,6 \times 10^6 \text{ S/m}$. Το αλουμίνιο του δρομέα έχει αγωγιμότητα $\sigma = 3.72 \times 10^7 \text{ S/m}$. Εκτός από τη ροπή και τις απώλειες δρομέα θα

προσδιοριστούν το μαγνητικό πεδίο B και το αζιμουθιακό πεδίο H κατά μήκος του άξονα των x ανάμεσα στην $r3$ και την $r4$ ($r3 \leq x \leq r4$).

Κάθε μία από τις τιμές αυτές υπολογίστηκαν θεωρητικά και οι κύριες τιμές όπως ροπή, τάση και απώλειες εμφανίζονται στην Εικόνα 2.2. Η τέταρτη στήλη αντιπροσωπεύει τις συνολικές απώλειες δρομέα δηλαδή λόγω του αλουμινίου και του χάλυβα στο δρομέα. Όλες οι τιμές υπολογίζονται ανά μονάδα βάρους ($1m$). Η τελευταία στήλη αντιπροσωπεύει μόνο τις απώλειες του χάλυβα λόγω διάχυσης. Η επαγόμενη τάση στην πρώτη φάση υπολογίζεται με την προϋπόθεση ότι η περιέλιξη του στάτη αποτελείται από μία περιέλιξη.

speed Ω_r (rad/s)	Torque (N/m)	Voltage /turn (V/m/turn)	Rotor Loss (W/m)	Steel Loss (W/m)
0	3.825857	0.637157	1455.644	17.40541
200	6.505013	0.845368	1179.541	16.98615
400	-3.89264	1.477981	120.0092	1.383889
600	-5.75939	0.76176	1314.613	17.87566
800	-3.59076	0.617891	1548.24	16.88702
1000	-2.70051	0.575699	1710.686	14.32059
1200	-2.24996	0.556196	1878.926	12.01166

Εικόνα 2.2. Πίνακας με τις προβλέψεις ροπής, τάσης και απωλειών για τον τριφασικό κινητήρα.

Έχουν γίνει επίσης προβλέψεις για το μαγνητικό πεδίο B και το αζιμουθιακό πεδίο H στις 200 rpm στον άξονα των x ανάμεσα στις $r3$ και $r4$. Η Εικόνα 2.3 δείχνει τα αποτελέσματα.

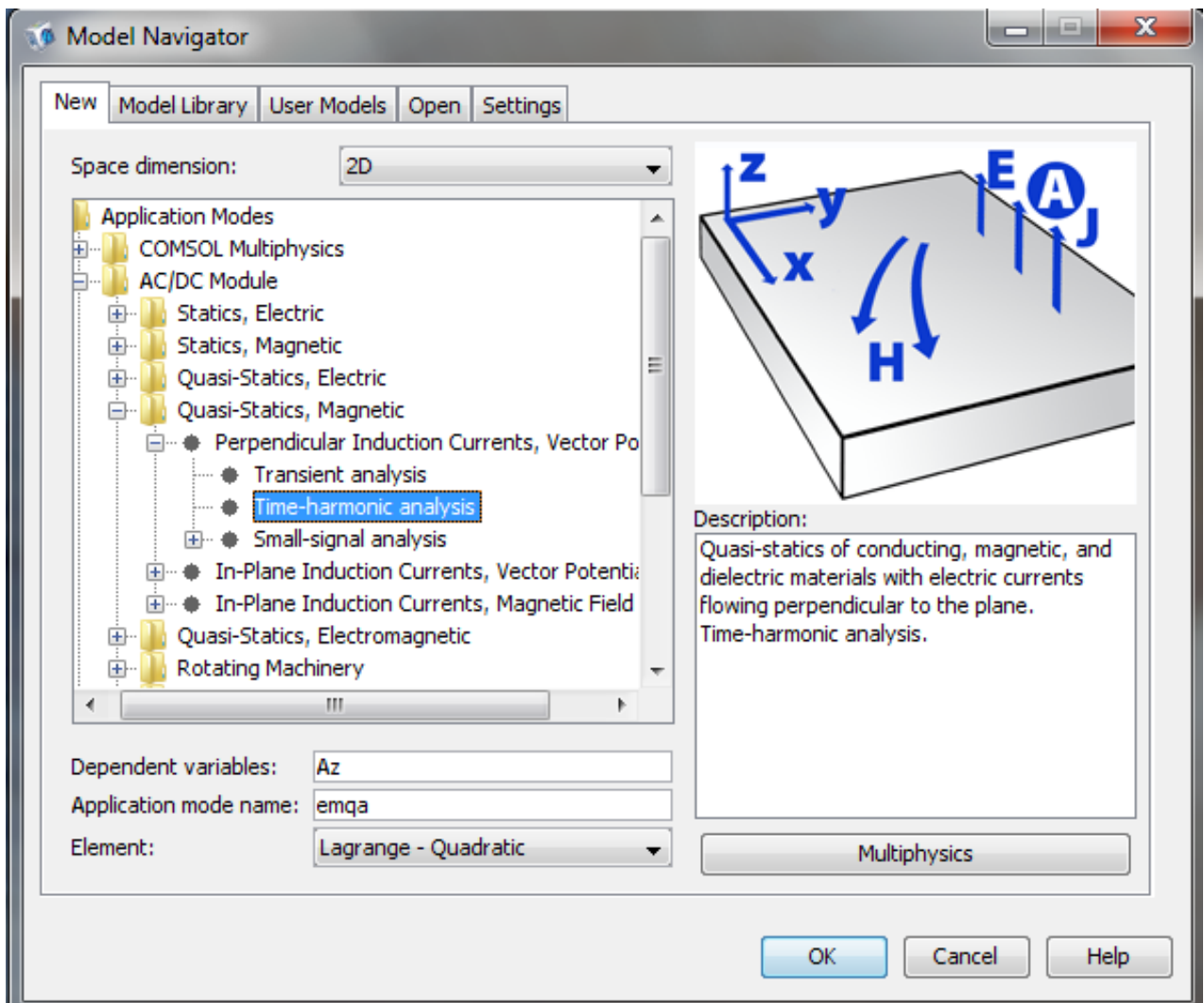
X (m)	Real(B_r) T	Imag(B_r) T	Real(H_θ) A/m	Imag(H_θ) A/m
0.032	0.018854	0.016392	-46504.9	-10757.6
0.034222	0.017122	0.017079	-39165.7	-8939.18
0.036444	0.015643	0.017412	-32564.6	-7462.55
0.038667	0.014375	0.017455	-26499.5	-6253.55
0.040889	0.013284	0.017266	-20817.4	-5250.13
0.043111	0.012341	0.016895	-15405.7	-4406.77
0.045333	0.011522	0.016385	-10181.6	-3690.02
0.047556	0.010807	0.015772	-5084.64	-3074.86
0.049778	0.010179	0.015085	-71.2009	-2542.22
0.052	0.009625	0.014347	4888.668	-2077.37

Εικόνα 2.3. Πίνακας με μαγνητικό πεδίο B και αζιμουθιακό πεδίο H για τον τριφασικό κινητήρα στις 200 rpm.

Στην προσομοίωση του παραπάνω προβλήματος από τον Marcса [9] τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα παραπάνω αναλυτικά. Η διαφορά μεταξύ των τιμών των δύο μεθόδων ήταν μικρότερη του 10%.

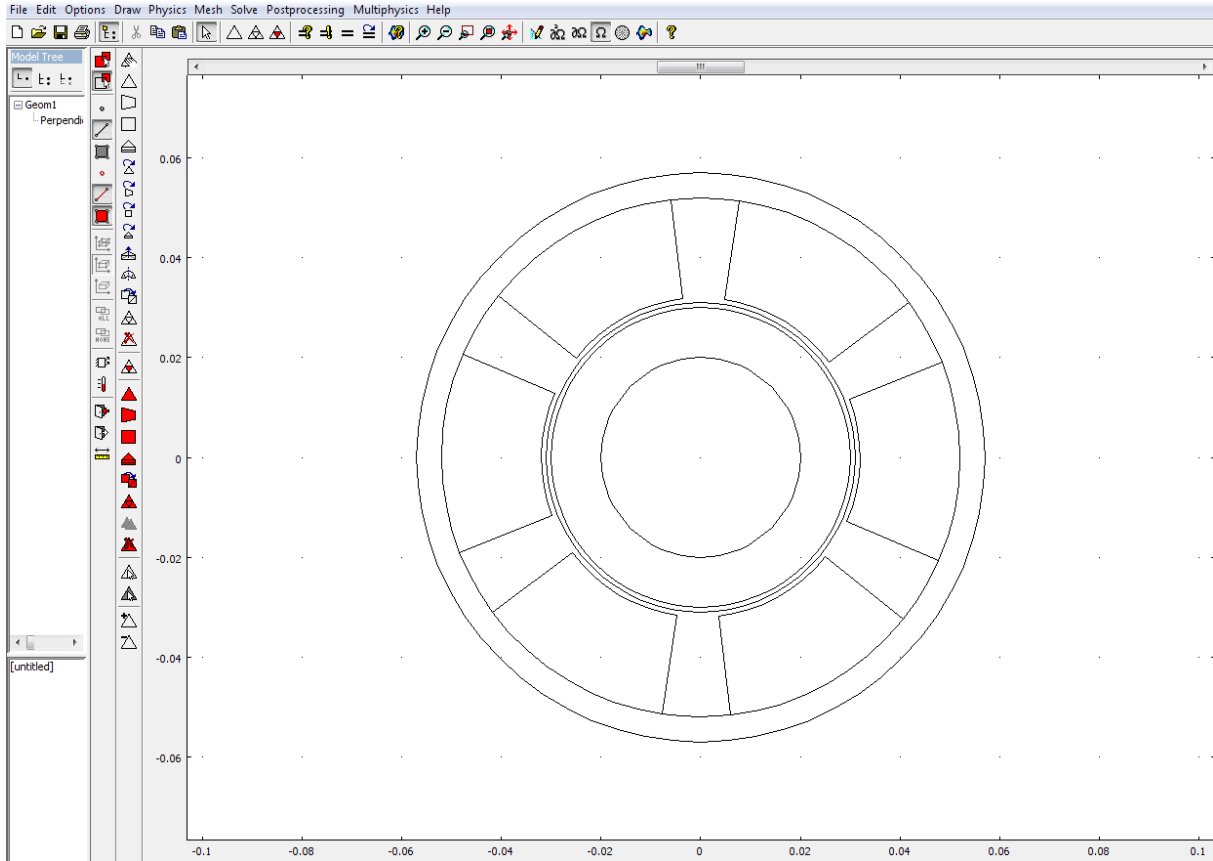
2.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ COMSOL

Σε αυτήν την ενότητα θα δείξουμε τη διαδικασία που ακολουθήσαμε για να προσομοιώσουμε το πρόβλημα στο Comsol. Αρχικά επιλέξαμε το είδος του προβλήματος όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.4.



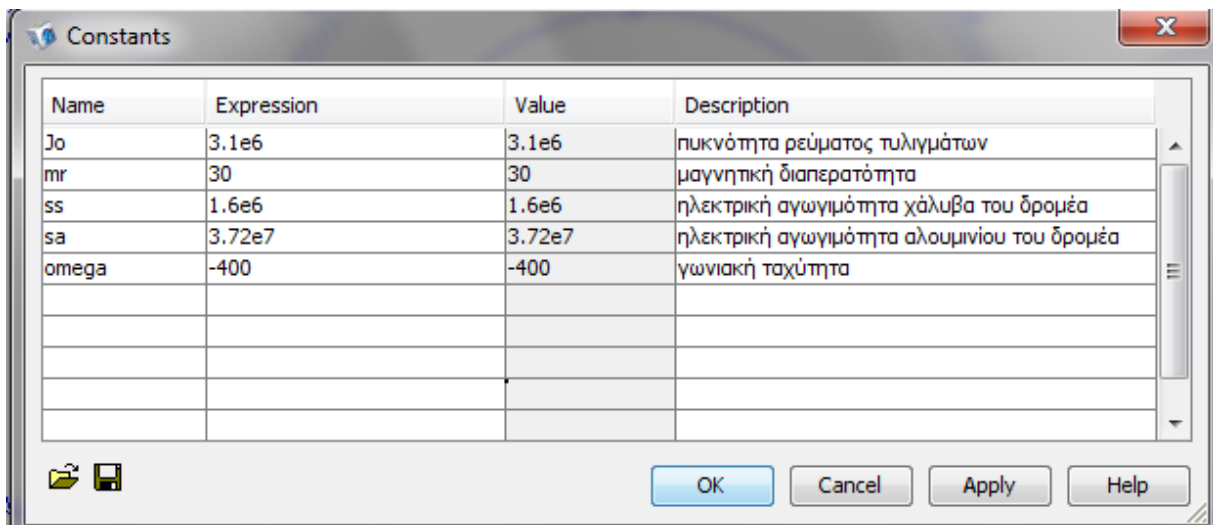
Εικόνα 2.4. Επιλογή προβλήματος.

Τη γεωμετρία του προβλήματος τη σχεδιάσαμε με ένα εργαλείο λογισμικού CAD που περιέχεται στο περιβάλλον του Comsol σε δισδιάστατη μορφή για υπολογιστική ευκολία του προγράμματος. Έπειτα δώσαμε τις τιμές των διαφόρων παραμέτρων, όπως τις ιδιότητες των υλικών δηλαδή η σχετική διαπερατότητα, το σήμα διέγερσης και τη γωνιακή ταχύτητα. Τη γεωμετρία την απλοποιήσαμε σύμφωνα με τις αξονικές συμμετρίες (Εικόνα 2.5).



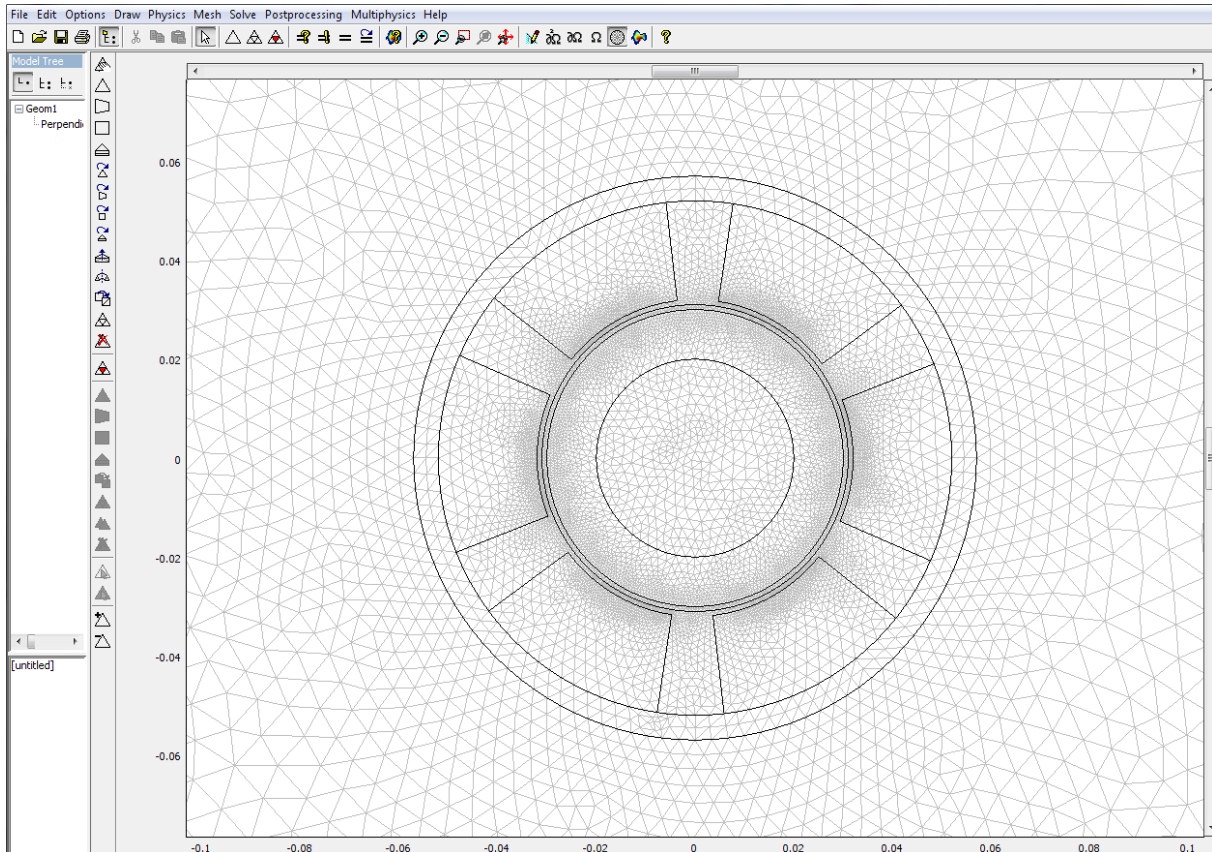
Εικόνα 2.5. Σχεδιασμός 2D του τριφασικού κινητήρα.

Παρακάτω φαίνονται οι σταθερές που εισάγαμε στο πρόγραμμα σύμφωνα με τα δεδομένα του προβλήματος.



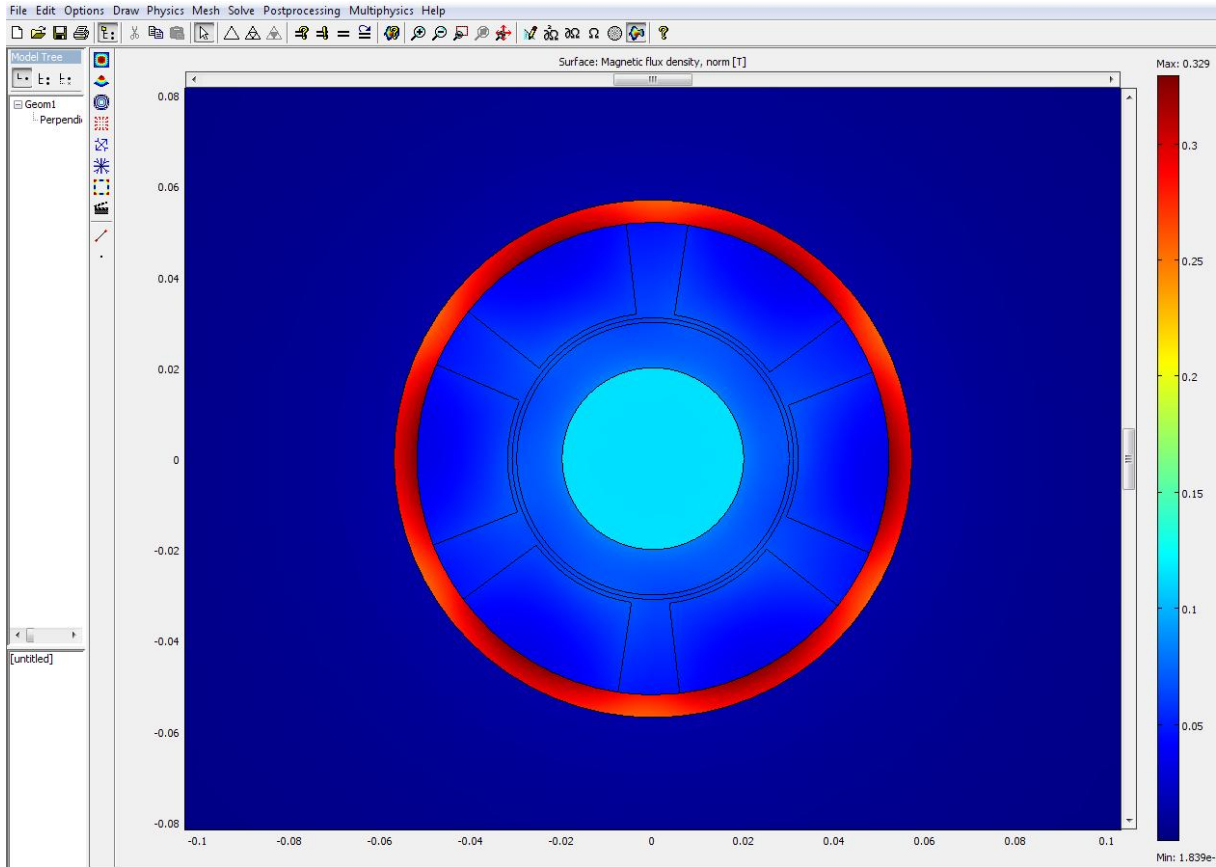
Εικόνα 2.6. Σταθερές προβλήματος.

Έπειτα η γεωμετρία του προβλήματος πρέπει να διακριτοποιηθεί με χρήση του «πλέγματος». Η βασική ιδέα των FEM είναι να διαιρέσουν την περιοχή του προβλήματος που πρέπει να αναλυθεί σε μικρότερα πεπερασμένα στοιχεία με συγκεκριμένο σχήμα. Το «πλέγμα» είναι ουσιαστικά η μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία. Διακριτοποιεί τη διαδιάστατη περιοχή σε τρίγωνα και σχηματίζονται με αυτόν τον τρόπο κόμβοι (σημεία συνάντησης των ακμών του τριγώνου). Τα τρίγωνα που σχηματίζονται από τρεις κόμβους αποτελούν τα στοιχεία. Ακάλυπτες περιοχές που ίσως προκύψουν, δίνεται η δυνατότητα να ελαχιστοποιηθούν χρησιμοποιώντας μικρότερο «πλέγμα». Για αυτόν το λόγο τα πεπερασμένα αποτελούν μία προσεγγιστική μέθοδο.



Εικόνα 2.7. Πλέγμα.

Η ακρίβεια της τελικής λύσης που λαμβάνουμε με FEM μπορεί να αυξηθεί με τρεις τρόπους. Η πρώτη ονομάζεται h-FEM, είναι η αύξηση του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή μικραίνουμε πολύ τα στοιχεία του πλέγματος κάτι που απαιτεί μεγάλη υπολογιστική δύναμη του H/Y που εργαζόμαστε. Το τελικό βήμα στην προσομοίωση είναι η επίλυση του προβλήματος. Παρακάτω παρατηρούμε την απεικόνιση της λύσης από το πρόγραμμα.



Εικόνα 2.8. Επίλυση του προβλήματος.

2.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιάσουμε τα σφάλματα επί τοις εκατό των αποτελεσμάτων του Davey [12,13] και Marcsa [9] καθώς και του Davey [12,13] με τα δικά μας της προσομοίωσης και τέλος θα παρουσιάσουμε τα διαγράμματα που διεξήγαμε από το Matlab με τις τιμές που λάβαμε από την προσομοίωση και θα τις συγκρίνουμε στα ίδια διαγράμματα με τα αποτελέσματα των Marcsa [9] και Davey [12,13].

Σφάλματα επί τοις εκατό με Marcsa [9]

Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των σφαλμάτων είναι:

$$\left[\frac{(\Pi\Delta - \text{O}\Delta)}{\Pi\Delta} \right] \times 100\%$$

Όπου: $\Pi\Delta$: δεδομένα του Davey

$\text{O}\Delta$: δεδομένα του Marcsa

X (m)	Imag Br (%)	Imag H ₀ (%)	Real H ₀ (%)	Real Br (%)
0.032	2.63	3.19	3.10	5.90
0.034	3.15	4.00	4.20	5.85
0.036	4.37	5.14	4.80	6.47
0.038	3.98	6.50	5.70	6.71
0.041	4.14	8.13	7.00	7.25
0.043	4.64	10.07	9.30	7.38
0.045	6.80	12.42	13.7	5.48
0.047	5.65	15.31	26.9	7.74
0.049	6.13	18.95	1886	8.53
0.052	6.46	23.65	27.1	8.98

Εικόνα 2.9. Σφάλματα επί τοις εκατό με Marcsa για μεταβλητό X και σταθερή $\omega=200 \text{ rad/sec}$.

Ταχύτητα ω (rad/sec)	Torque (%)	Rotor loss (%)
0	6.12	6.10
200	7.45	7.26
400	12.7	9.51
600	2.07	6.59
800	5.90	5.78
1000	5.67	5.55
1200	5.55	5.46

Εικόνα 2.10. Σφάλματα επί τοις εκατό με Marcsa για μεταβλητή ταχύτητα ω .

Σφάλματα επί τοις εκατό με την προσομοίωσή μας στο Comsol

Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των σφαλμάτων είναι:

$$\left[\frac{(\Pi\Delta - \Upsilon\Delta)}{\Pi\Delta} \right] \times 100\%$$

Όπου: $\Pi\Delta$: δεδομένα του Davey

$\Upsilon\Delta$: δεδομένα από την προσομοίωσή μας στο Comsol

X (m)	Imag Br (%)	Imag H θ (%)	Real H θ (%)	Real Br (%)
0.032	0.12	0.27	0.12	0.05
0.034	0.12	0.19	0.06	0.02
0.036	0.06	0.24	0.02	0.11
0.038	0.08	0.35	0.01	0.23
0.041	0.09	0.5	0.04	0.42
0.043	0.20	0.15	0.25	0.82
0.045	0.21	0.12	0.27	0.02
0.047	0.26	0.10	0.22	1.30
0.049	0.36	0.25	0.14	0.80
0.052	0.05	0.36	1.90	0.40

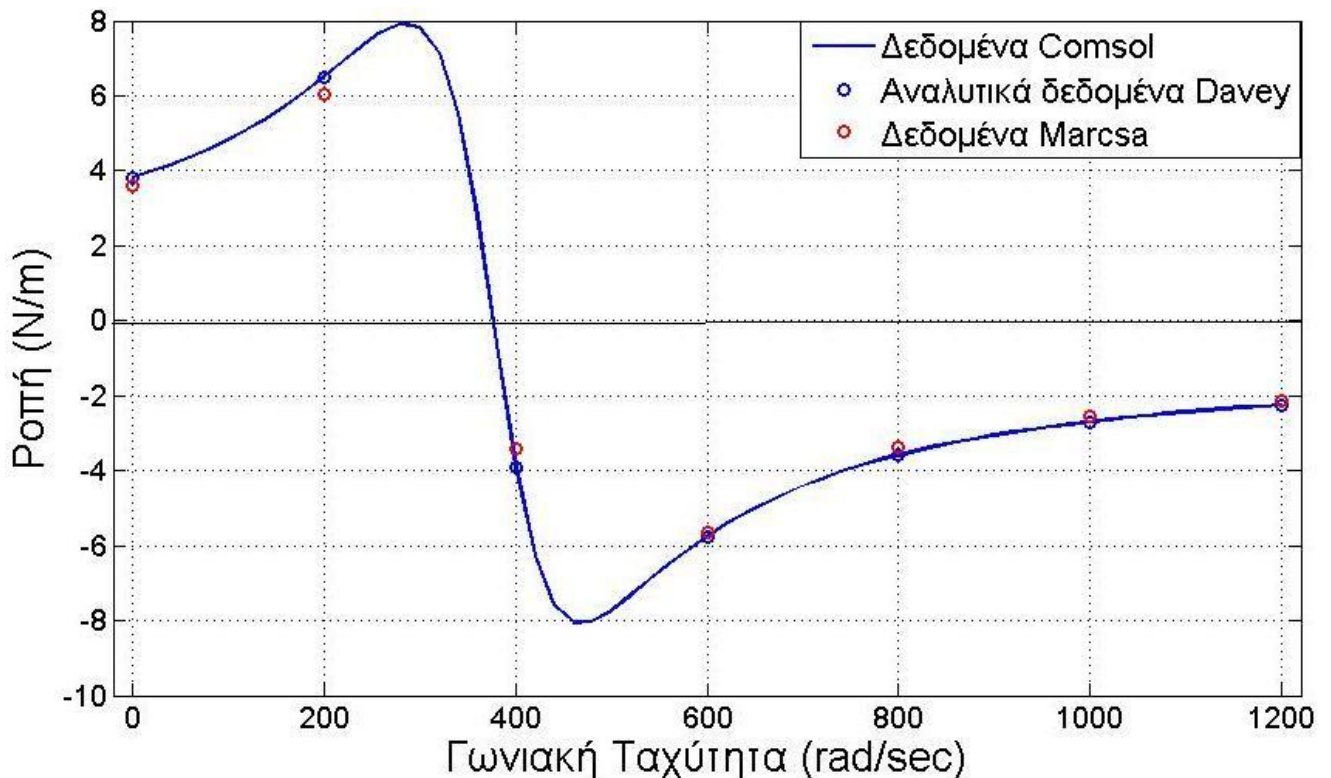
Εικόνα 2.11. Σφάλματα επί τοις εκατό με την προσομοίωσή μας στο Comsol για μεταβλητό X και σταθερή $\Omega=200 \text{ rad/sec}$.

Ταχύτητα Ω (rad/sec)	Torque (%)	Torque with type (%)	Rotor loss (%)
0	0.007	0.47	0.10
200	0.12	2.32	0.11
400	0.22	20.2	0.15
600	0.11	1.99	0.10
800	0.10	1.01	0.09
1000	0.09	0.66	0.08
1200	0.09	0.47	0.08

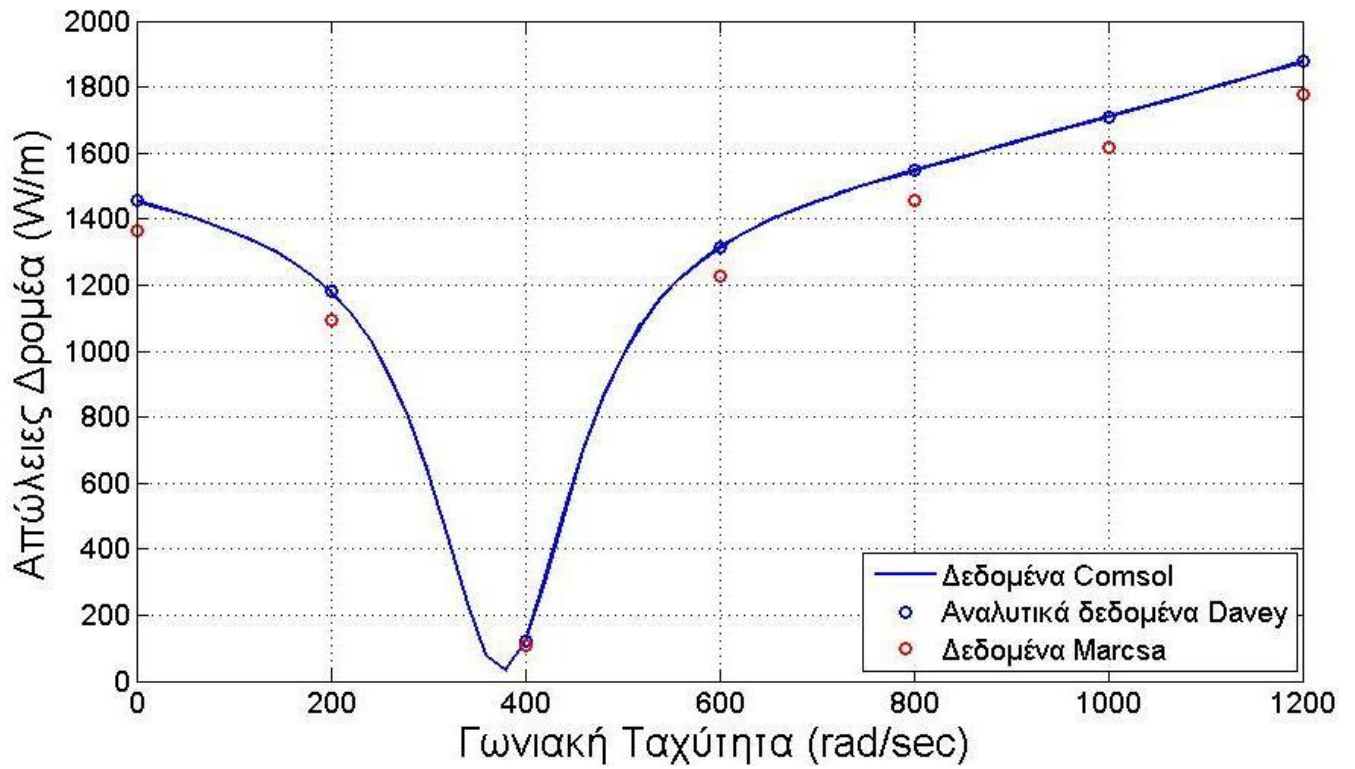
Εικόνα 2.12. Σφάλματα επί τοις εκατό με την προσομοίωσή μας στο Comsol για μεταβλητή ταχύτητα ω .

Παρατηρούμε πως η προσομοίωση που κάναμε στο Comsol ήταν πολύ πιο ακριβής σε σχέση με αυτήν του Marcса καθώς πετύχαμε σφάλματα πολύ μικρά ενώ του Marcса είναι στο 10% κάτι που παρατηρούμε και παραπάνω στους πίνακες και φαίνεται και παρακάτω στα διαγράμματα.

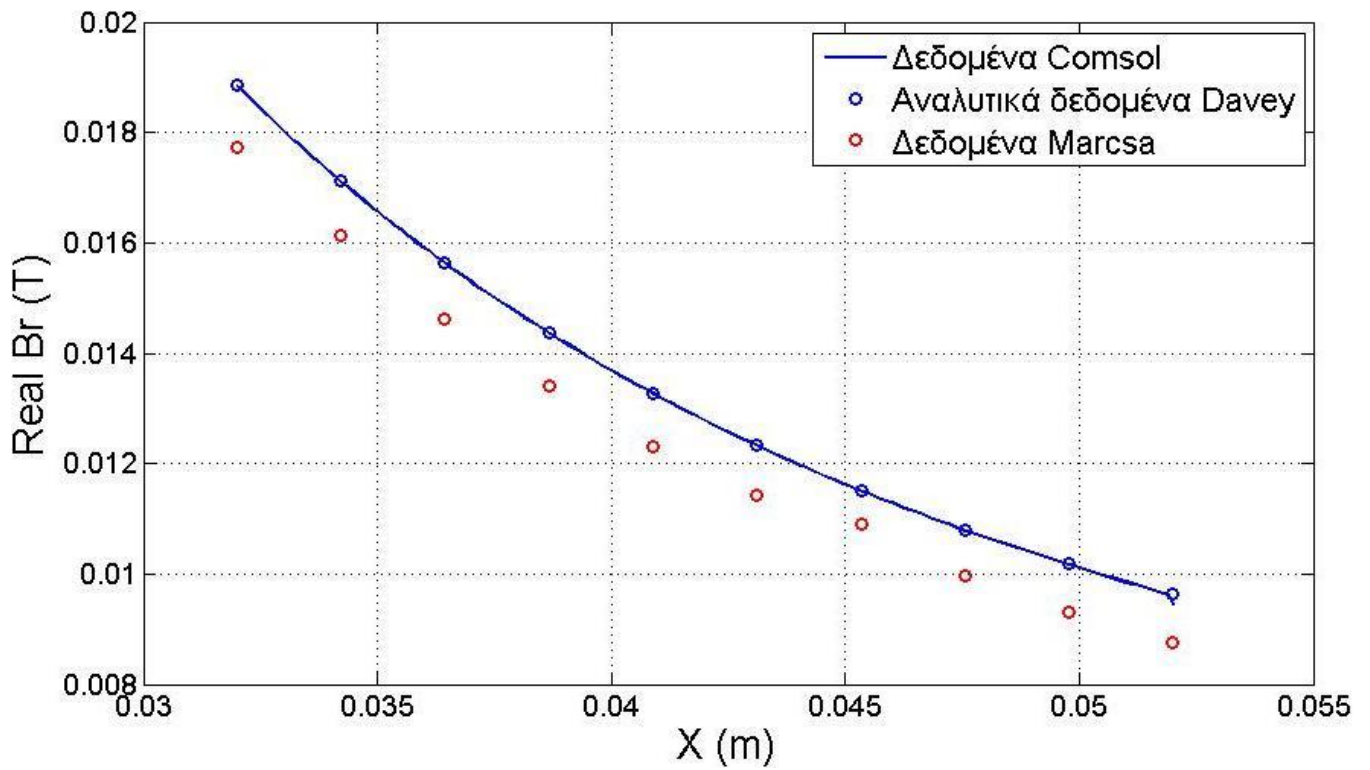
Συγκριτικά Διαγράμματα



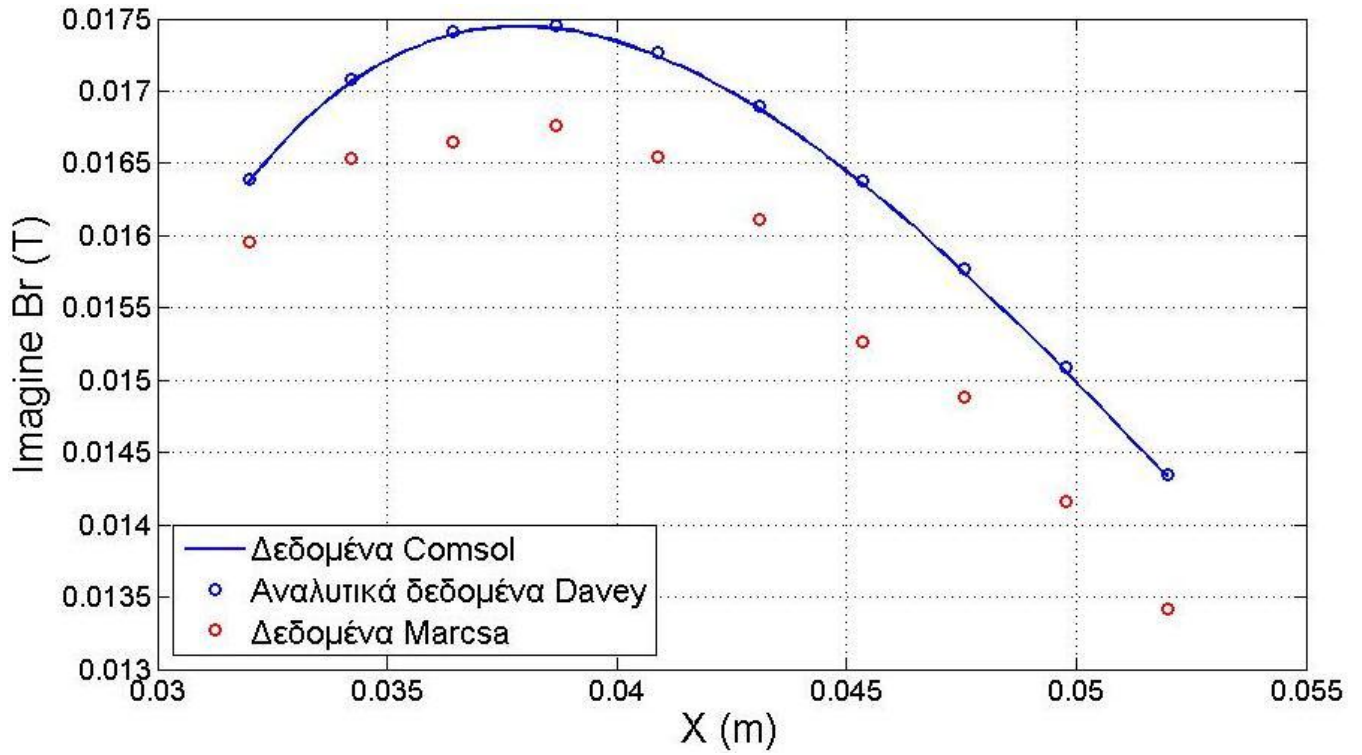
Εικόνα 2.13. Συγκριτικό διάγραμμα ροπής-ταχύτητας.



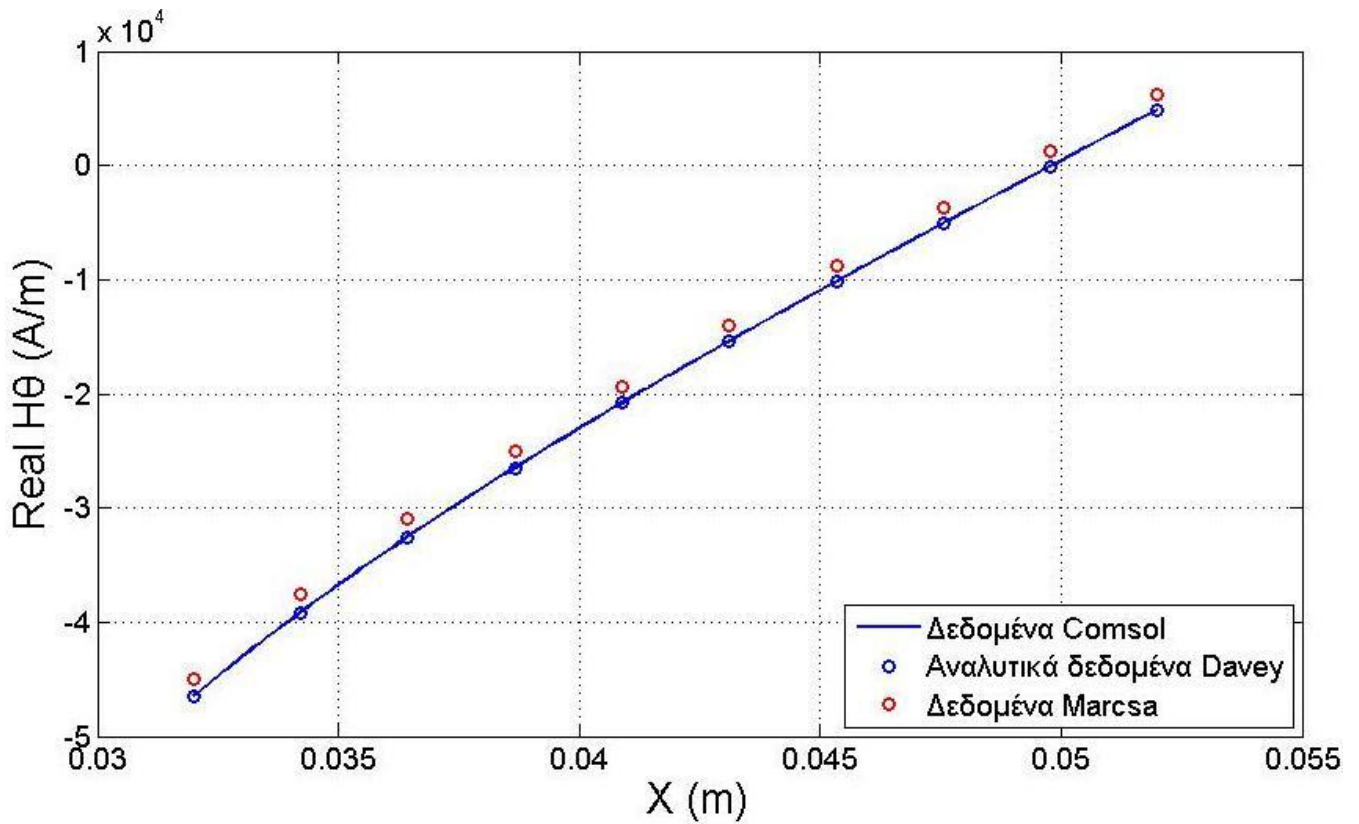
Εικόνα 2.14. Συγκριτικό διάγραμμα απωλειών δρομέα-ταχύτητας.



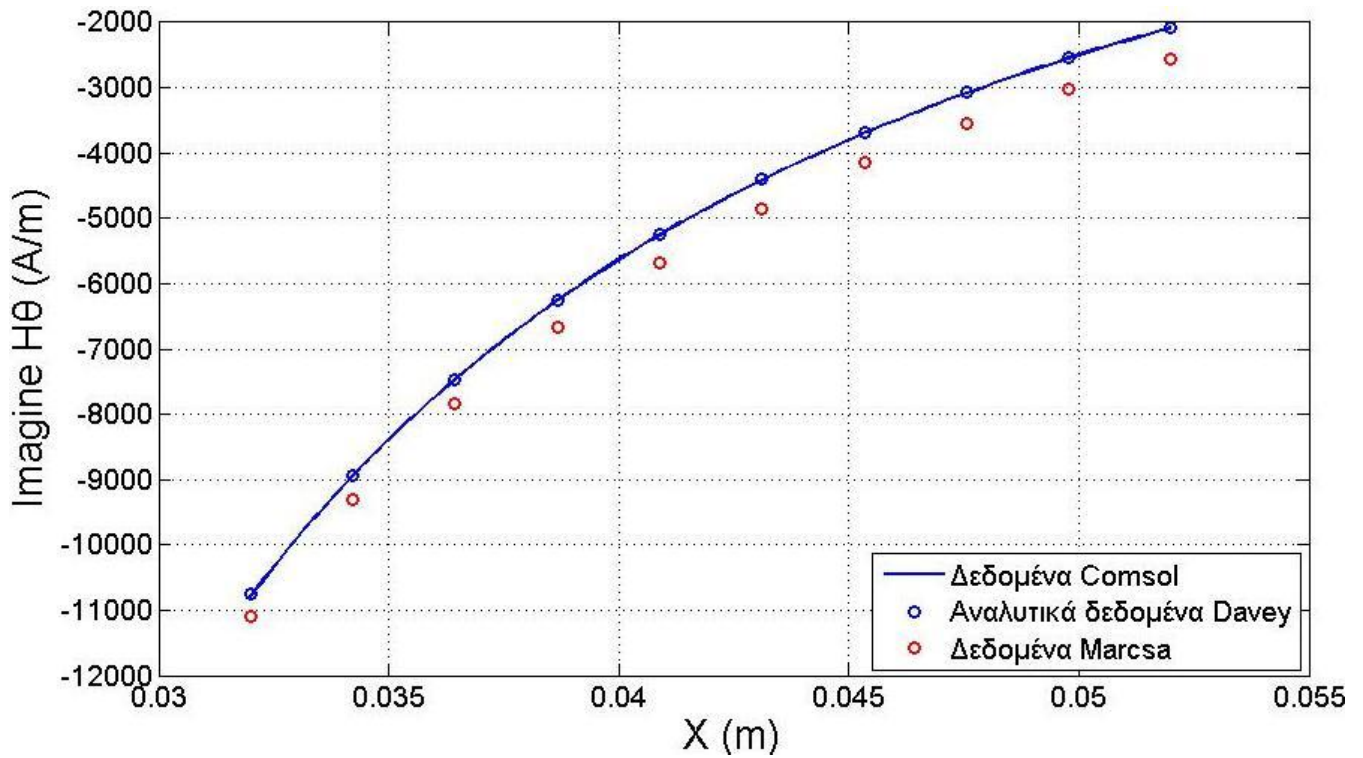
Εικόνα 2.15. Συγκριτικό διάγραμμα (πραγματικό μέρος) μαγνητικού πεδίου-απόστασης.



Εικόνα 2.16. Συγκριτικό διάγραμμα (φανταστικό μέρος) μαγνητικού πεδίου-απόστασης.



Εικόνα 2.17. Συγκριτικό διάγραμμα (πραγματικό μέρος) αζιμουθιακού πεδίου-απόστασης.



Εικόνα 2.18. Συγκριτικό διάγραμμα (φανταστικό μέρος) αξιμουθιακού πεδίου-απόστασης.

Και τέλος παρουσιάζουμε το διάγραμμα ροπής με τιμές που υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον τύπο:

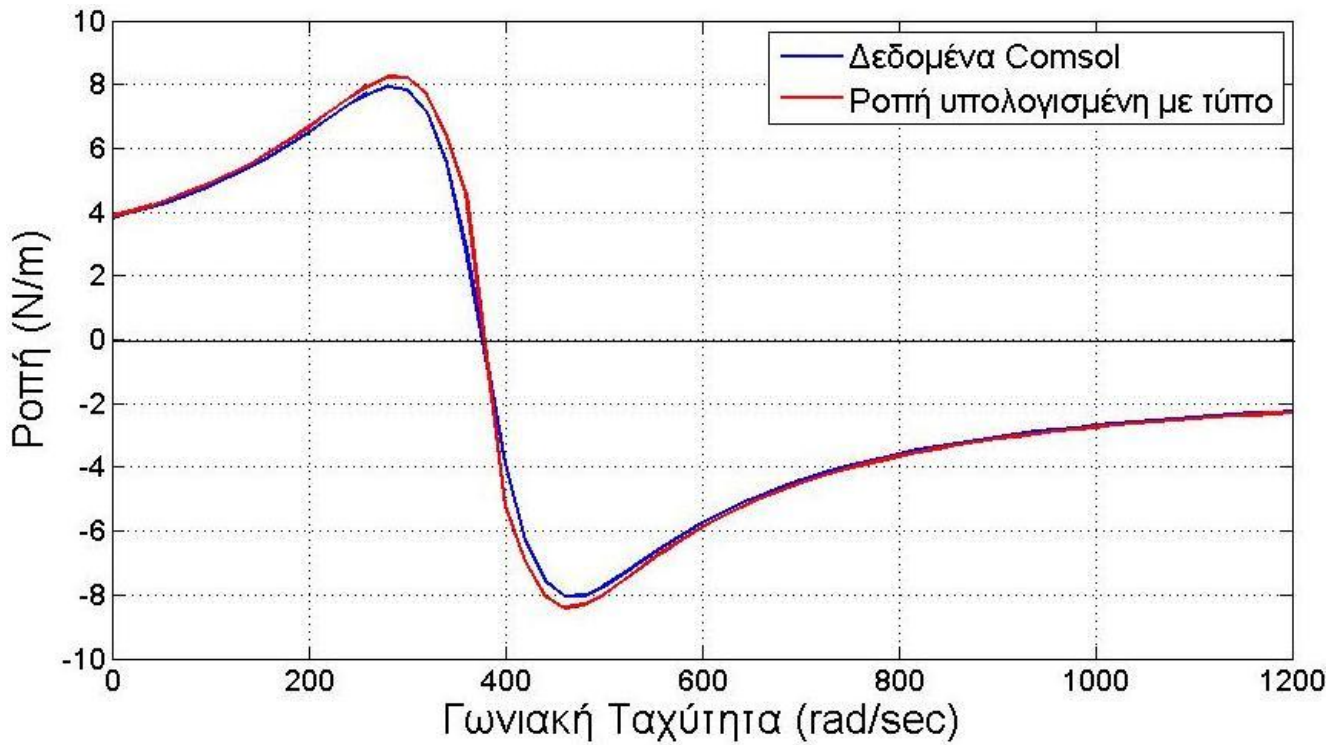
$$T = \frac{W}{\omega_s - \omega_m}$$

όπου

$$\omega_s = n_s \cdot \frac{2\pi}{60} = 3600 \cdot \frac{2\pi}{60} = 377 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_m = 0 - 1200 \text{ rad/sec}$$

$$W = \text{απώλειες δρομέα}$$



Εικόνα 2.19. Συγκριτικό διάγραμμα ροπής-ταχύτητας (τιμές αναλυτικά με τον τύπο).

Συμπεράσματα

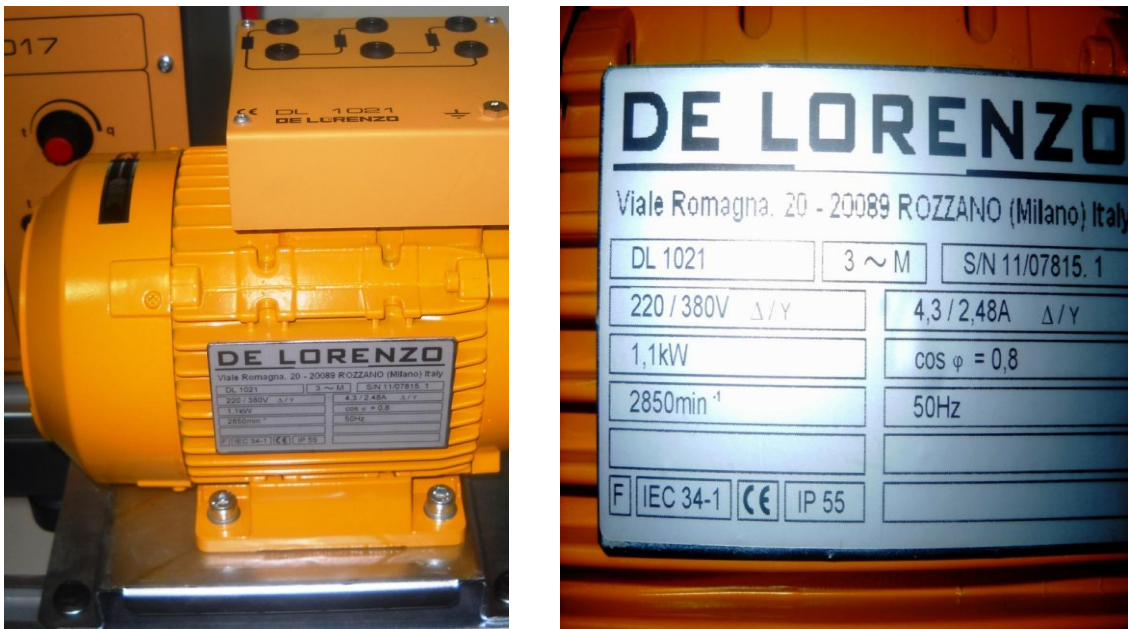
Η προσομοίωση που κάναμε, του προβλήματος No.30 από την TEAM ολοκληρώθηκε όπως παρατηρήθηκε με επιτυχία. Φτάσαμε σχεδόν απόλυτα τις θεωρητικές τιμές με μέγιστη απόκλιση της τάξης του 2% περίπου. Ο χρόνος επίλυσης ήταν πολύ μικρός, γεγονός που κάνει το Comsol ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, με την προϋπόθεση πάντα τη σωστή επιλογή του προβλήματος και τον ορισμό των απαραίτητων σταθερών του προβλήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

3.1 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Προτού πραγματοποιηθούν τα πειράματα θα ήταν συνετό να γνωρίσουμε τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του τριφασικού κινητήρα DL 1021. Αυτά τα δεδομένα αναγράφονται στην ονομαστική πινακίδα επάνω στο μοτέρ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1 και είναι ουσιαστικά η ταυτότητα του κατασκευαστή πάνω στη μηχανή προκειμένου να τα λαμβάνει υπόψη τον όποιος κάνει χρήση του προϊόντος. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι πανομοιότυπα για κάθε συσκευή αυτού του τύπου και διαφέρουν ελάχιστα από συσκευή σε συσκευή εξαιτίας των μικρών κατασκευαστικών ατελειών.



Εικόνα 3.1. Ονομαστική Πινακίδα Κινητήρα Εργαστηρίου.

Η ένδειξη DL 1021 δείχνει τον τύπο του κινητήρα. Οι ενδείξεις 220/380 V και 4.3/2.4 A είναι η ονομαστική τάση και το ονομαστικό ρεύμα σε διάταξη τριγώνου και αστέρα αντίστοιχα. Η ονομαστική ισχύς είναι 1,1 kW, ενώ ο συντελεστής ισχύος είναι $\cos\phi=0.8$. Η συχνότητα

λειτουργίας είναι στα 50 Hz και η ταχύτητα στα 2850 rpm. Αξίζει να σημειώσουμε επίσης την ένδειξη στο κάτω μέρος της ταμπέλας με το κωδικό γράμμα F. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία το γράμμα F αντιστοιχεί σε συντελεστή 5.6 kVA/hp [1]. Άρα συμπεραίνουμε τα παρακάτω:

- Σε σύνδεση σε τρίγωνο έχουμε :

$$\text{Ονομαστική τάση : } V_T = 220 \text{ V}$$

Φαινόμενη ισχύς εκκίνησης :

$$S_{start} = (\text{ονομαστική ιπποδύναμη}) \times (\text{συντελεστή κωδικού γράμματος}) = 5.6 \times 1.36 \times 1.1 = 8.3776 \text{ kVA}$$

$$\text{Ρεύμα εκκίνησης : } I_L = \frac{S_{start}}{\sqrt{3} V_T} = 21.98 \text{ A}$$

- Σε σύνδεση σε αστέρα έχουμε :

$$\text{Ονομαστική τάση : } V_T = 380 \text{ V}$$

Φαινόμενη ισχύς εκκίνησης :

$$S_{start} = (\text{ονομαστική ιπποδύναμη}) \times (\text{συντελεστή κωδικού γράμματος}) = 5.6 \times 1.36 \times 1.1 = 8.3776 \text{ kVA}$$

$$\text{Ρεύμα εκκίνησης : } I_L = \frac{S_{start}}{\sqrt{3} V_T} = 12.73 \text{ A}$$

Σε έναν πραγματικό επαγωγικό κινητήρα χρειάζεται να προσδιορίσουμε τις τιμές των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος γιατί αυτό αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τον μετέπειτα προσδιορισμό της απόκρισης του κινητήρα στις αλλαγές του φορτίου του. Για να εξάγουμε αυτές τις τιμές πρέπει να υποβάλλουμε τον κινητήρα σε μία σειρά από πειράματα, τα οποία είναι:

- πείραμα χωρίς φορτίο ή εν κενώ,
- πείραμα συνεχούς ρεύματος για τον υπολογισμό της αντίστασης του στάτη,
- πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα.

Αυτά τα πειράματα θα πρέπει να πραγματοποιηθούν κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες γιατί οι αντιστάσεις μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία και ειδικά η αντίσταση του δρομέα μεταβάλλεται με τη συχνότητά του. οι ακριβής λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο πραγματοποίησης δίνονται από την τυποποίηση 112 της IEEE ώστε να πάρουμε τα ακριβή αποτελέσματα των τιμών αυτών.

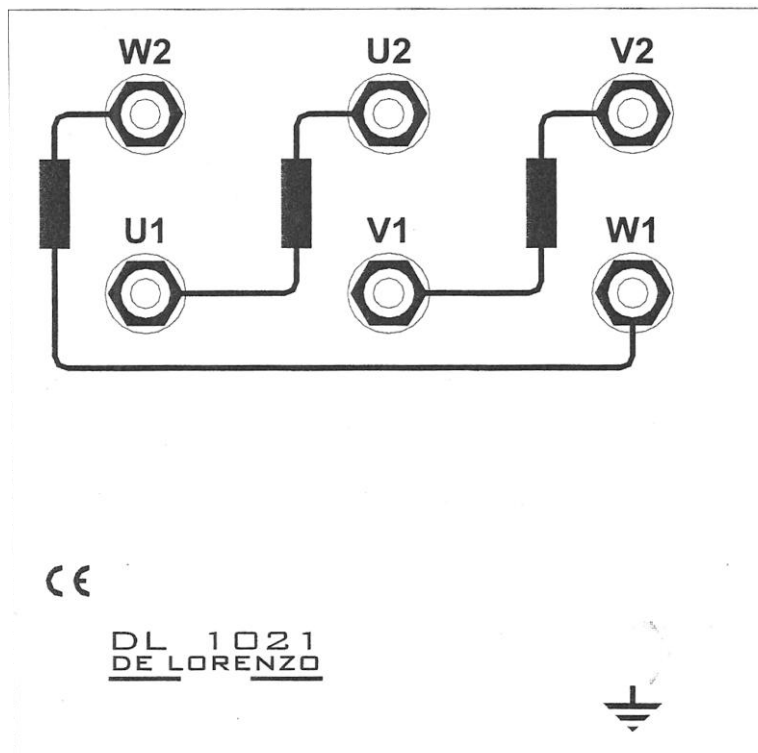
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑ ΠΡΩΤΟ

Μέτρηση Ωμικής Αντίστασης των Τυλιγμάτων του Στάτη

Η τιμή της αντίστασης τυλιγμάτων του στάτη ενός ασύγχρονου κινητήρα είναι χρήσιμη για τον καθορισμό :

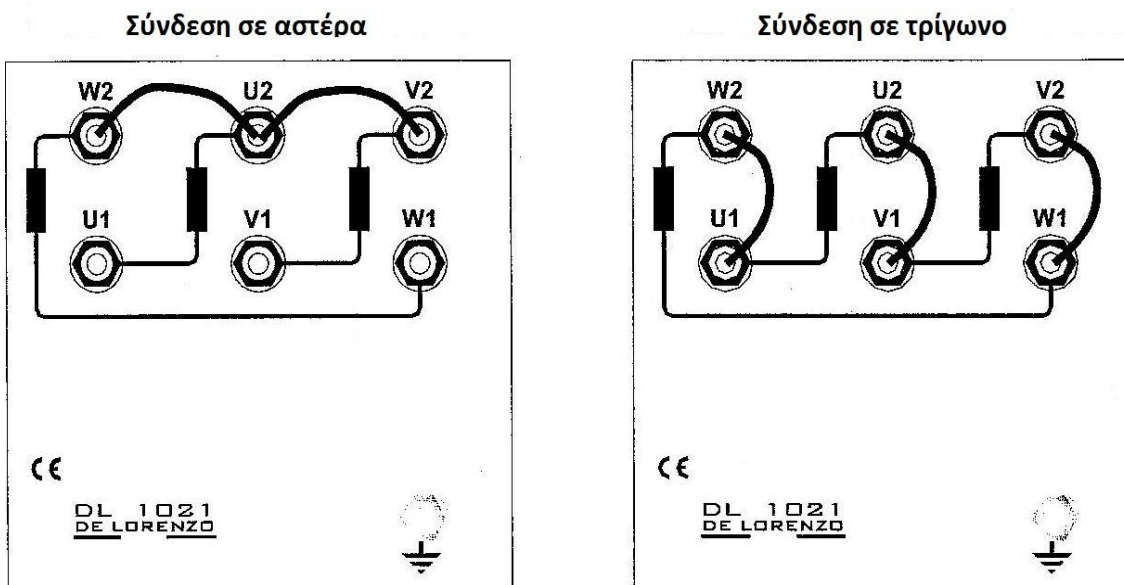
- της απόδοσης (η)
- των ροπών (T) και της ολίσθησης (s) υπό φορτίο.

Αρχικά ο τύπος του κινητήρα είναι DL 1021 όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2. Τα τυλίγματα του στάτη έχουν φτιαχτεί για τρεις διαφορετικές φάσεις οι οποίες έχουν αποτυπωθεί πάνω στον κινητήρα.



Εικόνα 3.2. Τύπος και φάσεις κινητήρα.

Ο κινητήρας μπορεί να συνδεθεί σε αστέρα ή τρίγωνο όπως παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 3.3. Συνδεσμολογία αστέρα και τριγώνου.

Σε ό,τι αφορά την αντίσταση της κάθε φάσης του κινητήρα, αυτές θα πρέπει να είναι ίσες και όσο το δυνατόν μικρότερες. Προκειμένου να μετρηθούν χρησιμοποιήσαμε πολύμετρο (για μέτρηση Ohm) το οποίο συνδέσαμε στα άκρα κάθε φάσης ξεχωριστά. Για παράδειγμα, για τη

μέτρηση της φάσης W στο W1 και W2 αντίστοιχα κ.ο.κ. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι χρησιμοποιήσαμε κατάλληλα καλώδια σύνδεσης με το πολύμετρο ώστε να αποφευχθεί απώλεια αντίστασης στις επαφές. Το πολύμετρο είναι τύπου Agilent U1241A και τα τεχνικά του χαρακτηριστικά αναγράφονται επάνω στη συσκευή όπως απεικονίζεται :



Εικόνα 3.4. Πολύμετρο Agilent U1241A.

Αρχικά περιστρέψαμε τον κυκλικό διακόπτη στην ένδειξη Ω ώστε να μετρήσουμε ωμική αντίσταση. Στη συνέχεια συνδέσαμε τους δύο ακροδέκτες από την μία πλευρά στο πολύμετρο στις κατάλληλες υποδοχές και από την άλλη στα άκρα κάθε φάσης όπως αναλύθηκε παραπάνω. Οι τιμές των αντιστάσεων όπως μετρήθηκαν στο φωτεινό πίνακα του οργάνου είναι :

$$R_W = R_U = R_V = 1,1 [\Omega]$$

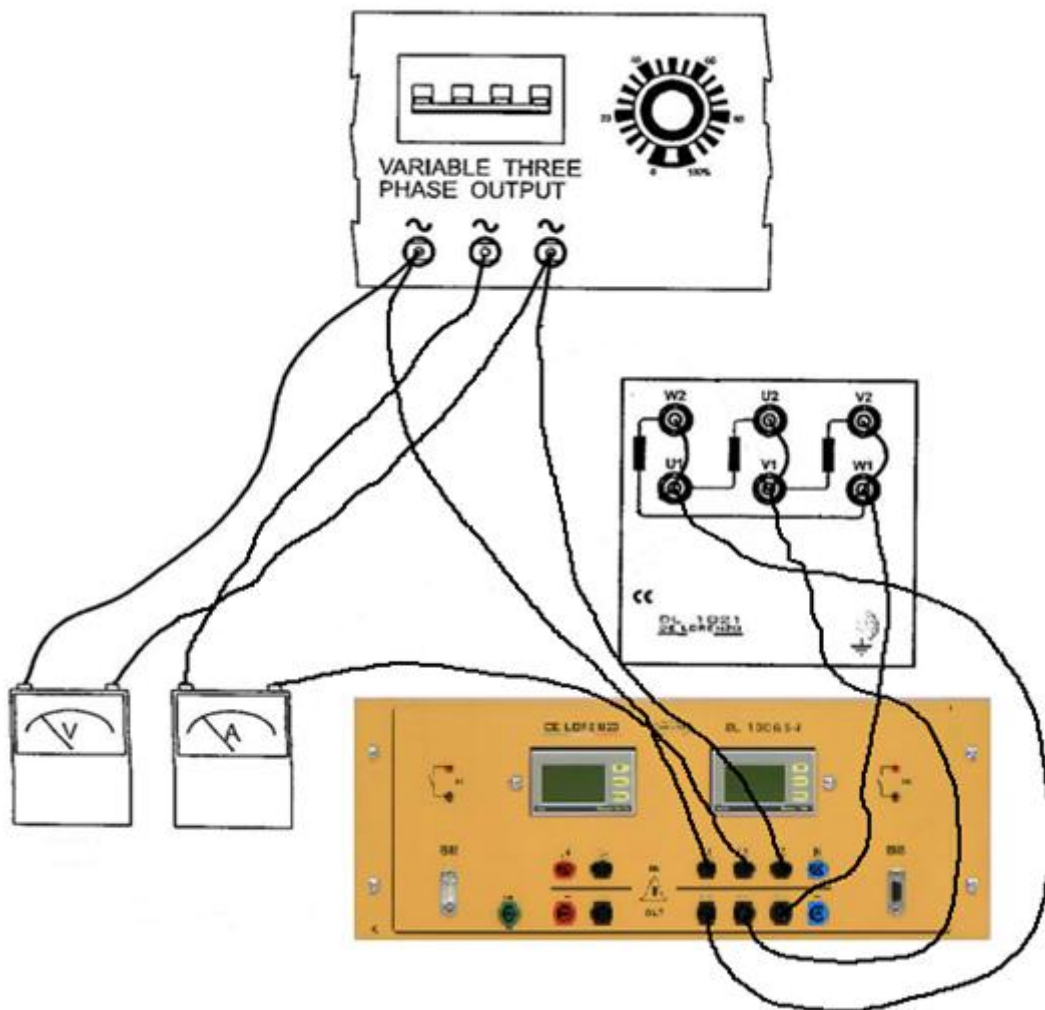
Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η μέτρηση των αντιστάσεων έγινε αφότου ο κινητήρας έπιασε θερμοκρασία λειτουργίας προκειμένου να μην υπάρξουν ατέλειες για μια σωστή μέτρηση.

3.3 ΠΕΙΡΑΜΑ ΔΕΥΤΕΡΟ

Λειτουργία εν Κενώ

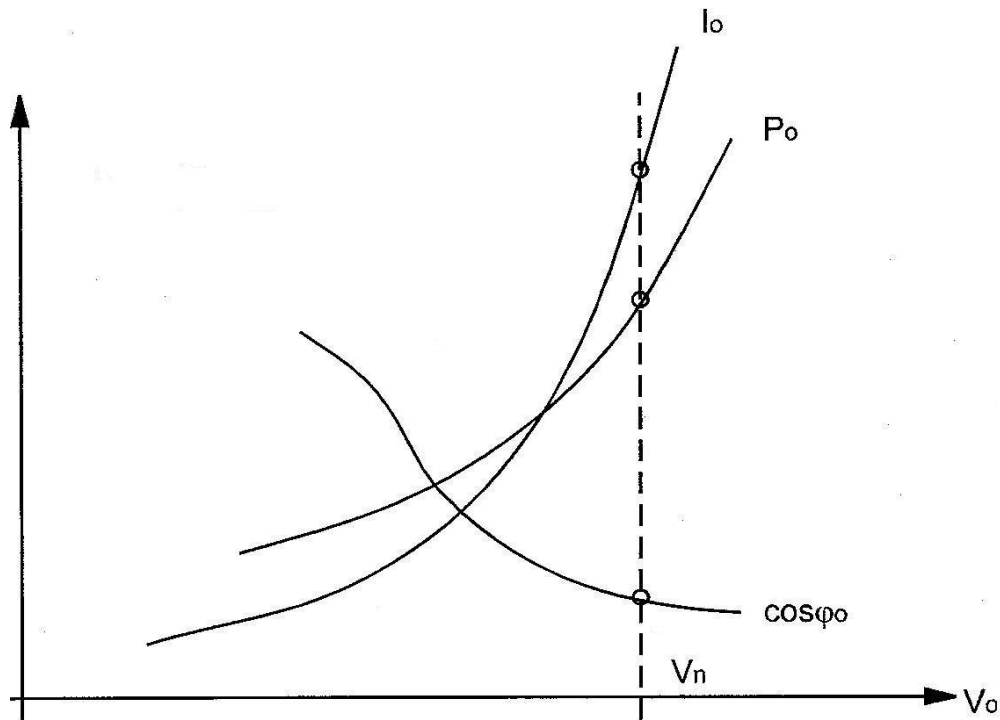
Σε αυτό το πείραμα θα τροφοδοτήσουμε τον κινητήρα DL 1021 με τριφασικό ρεύμα διαφόρων τιμών και θα λειτουργήσει εν κενώ δηλαδή χωρίς φορτίο. Επομένως η ενέργεια που προσδίδεται σε αυτόν θα μετατρέπεται αποκλειστικά σε κίνηση στον άξονά του και σε απώλειες που περιγράφονται παρακάτω. Επίσης, θα παρουσιάσουμε τις λειτουργικές συνθήκες του μαγνητικού πεδίου του κινητήρα και είναι σημαντικό καθώς θα εξάγουμε συμπεράσματα για το ρεύμα (πολικό), την τάση, την ισχύ και τις απώλειες του δρομέα. Εν συνεχεία θα σχεδιάσουμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας, τάσης συναρτήσεως ρεύματος και απωλειών.

Το πείραμα θα πραγματοποιηθεί για διάφορες τιμές της τάσης (V) προσέχοντας πάντα να μην παραβιάσουμε την ονομαστική τάση που αναγράφεται στην πινακίδα της μηχανής. Με αυτόν τον τρόπο το όφελος είναι διπλό, καθώς αποφεύγουμε τυχαία λάθη ανάγνωσης και είναι εφικτό να απεικονίσουμε τα αποτελέσματα σε χρήσιμα διαγράμματα. Η συνδεσμολογία του ηλεκτρικού κυκλώματος θα έχει ως εξής :



Εικόνα 3.5. Διάταξη Συνδεσμολογίας 2^ο Πειράματος.

Δεδομένου των τεχνικών χαρακτηριστικών του κινητήρα θα ήταν προτιμότερο να κάνουμε μία σύνδεση σε τρίγωνο των τυλιγμάτων του στάτη. Ακόμη, θα τοποθετήσουμε το αμπερόμετρο σε σειρά με τη μηχανή ώστε να μετρήσουμε το πολικό ρεύμα. Το βολτόμετρο θα τοποθετηθεί παράλληλα με τη μηχανή ώστε να μετρήσουμε την τάση στα άκρα. Και τα δύο όργανα πρέπει να είναι ρυθμισμένα ώστε να έχουν τριφασική ένδειξη. Η συχνότητα που μετρήσαμε αγγίζει τα 50Hz. Είναι απαραίτητο να σημειώσουμε ότι κατά τη διεξαγωγή του πειράματος αυτού, όπως και των παρακάτω, ο κινητήρας είναι προσαρμοσμένος και καλιμπραρισμένος πάνω σε ειδικά διαμορφωμένες ράμπες για την ασφάλεια του πειράματος. Θεωρητικά σε ένα κοινό διάγραμμα το ρεύμα (I_0), η ισχύς (P_0) και ο συντελεστής ισχύος ($\cos\phi_0$) συναρτήσει της τάσης (V_0) θα παρουσιάζεται κάπως έτσι :



Εικόνα 3.6. Διάγραμμα ρεύματος (I_0), ισχύος (P_0) και συντελεστή ισχύος ($\cos\phi_0$) συναρτήσει της τάσης (V_0).

Κατά μήκος της διακεκομμένης γραμμής εκεί όπου συναντάται με τις καμπύλες είναι οι ονομαστικές τιμές λειτουργίας του κινητήρα.

ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Οι απώλειες της μηχανής είναι :

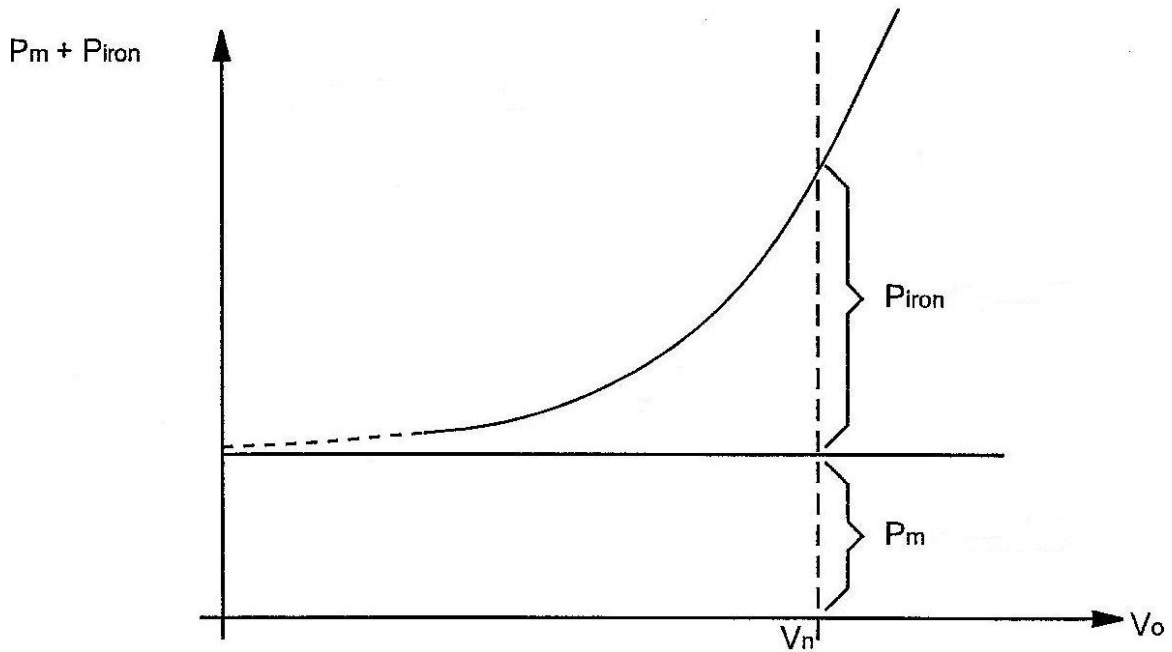
- απώλειες χαλκού

$$P_{iron} \begin{cases} \text{απώλειες στα τυλίγματα του στάτη} \\ \text{απώλειες στο πλαίσιο του στάτη} \end{cases}$$

- μηχανικές απώλειες

$$P_m \begin{cases} \text{απώλειες τριβής} \\ \text{απώλειες πτερωτής ψύξης} \end{cases}$$

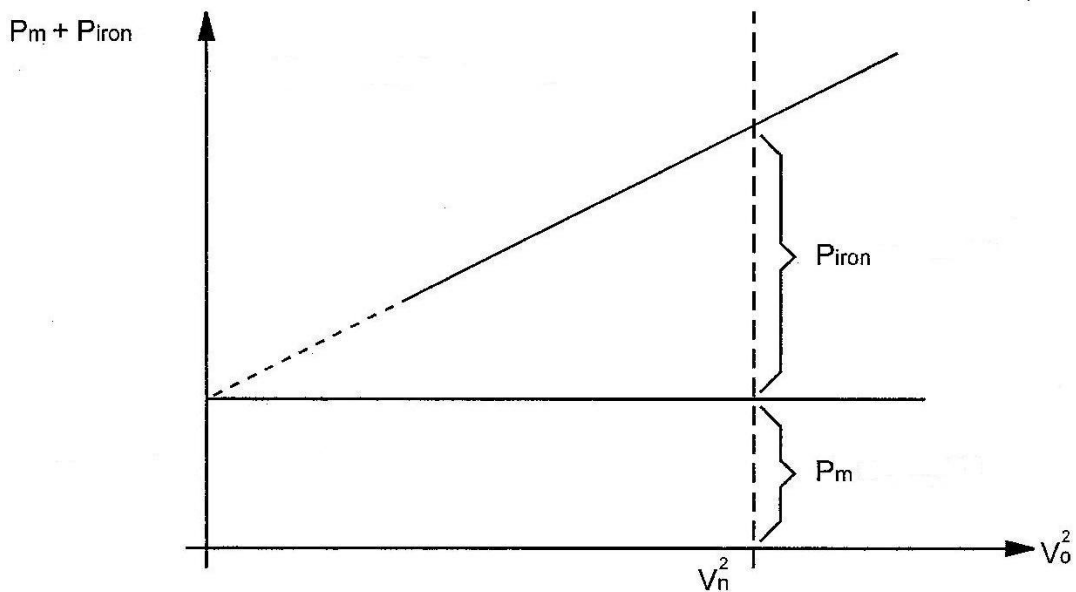
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται θεωρητικά οι απώλειες συναρτήσει της τάσης.



Εικόνα 3.7. Διάγραμμα θεωρητικών απωλειών-τάσης.

Η καμπύλη αυτή είναι σχεδόν παραβολή. Κατά τις διάφορες τιμές της τάσης V ουσιαστικά οι μηχανικές απώλειες δεν αλλάζουν. Αυτό οφείλεται στο ότι εξαρτώνται από την ταχύτητα της μηχανής η οποία μένει ουσιαστικά σταθερή κατά τη διάρκεια του πειράματος ($n_{sync} = 3000rpm$). Από την άλλη πλευρά οι απώλειες χαλκού αλλάζουν διότι καθώς η τάση παίρνει διαφορετικές τιμές, αλλάζει η μαγνητική ροή που παράγεται. Έτσι, συμπεραίνουμε πως οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες χαλκού θα είναι όπως το γράφημα παραπάνω.

Προκειμένου να εντοπίσουμε με ακρίβεια το σημείο όπου η παραβολή τέμνει τον άξονα y θα γίνει η εξής διεργασία :



Εικόνα 3.8. Διεργασία εντοπισμού του σημείου που τέμνει τον άξονα y .

Σε αυτό το σημείο έχουμε εξισώσει τις απώλειες συναρτήσει της V^2 . Έτσι λοιπόν η καμπύλη έχει γίνει ευθεία και πλέον είναι ευκολότερο να εντοπιστεί το σημείο τομής της με τον άξονα y . Άρα έχουμε προσδιορίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια η τιμή της P_m και P_{iron} .

Οι τιμές που λάβαμε από τη διεξαγωγή του πειράματος παρουσιάζονται στον πίνακα παρακάτω (Εικόνα 3.9). Για τον υπολογισμό χρειάστηκαν οι παρακάτω σχέσεις:

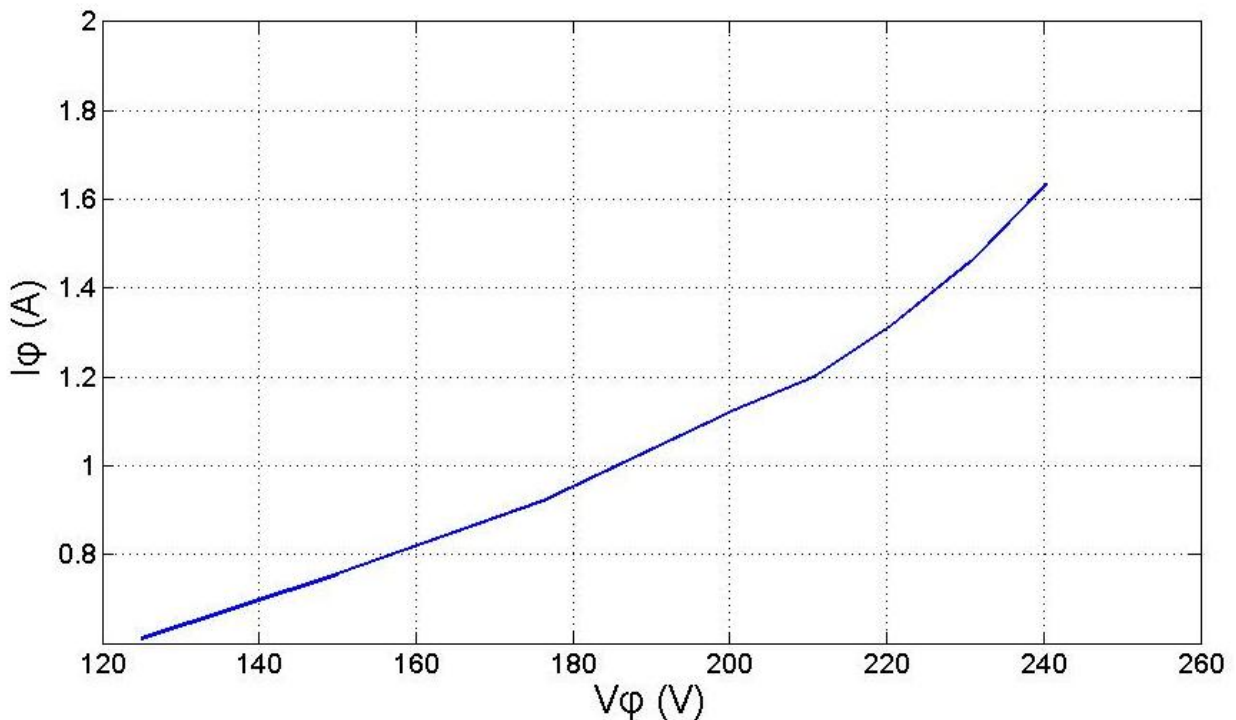
$$V_\phi = V_\pi$$

$$I_\phi = \frac{I_\pi}{\sqrt{3}}$$

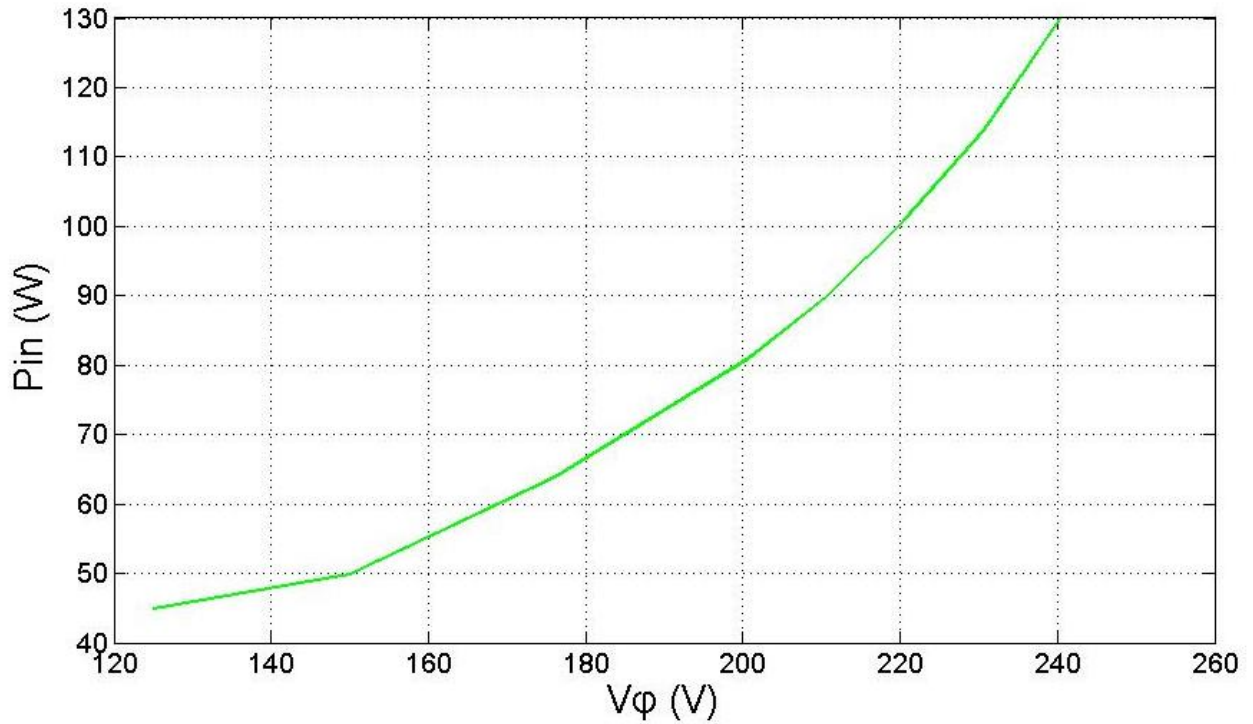
V_π (V)	I_π (A)	P_{in} (W)	$\cos\phi$	Q (Var)	S (VA)	I_ϕ (A)	V_ϕ (V)
240,3	2,83	130	0,11	1160	1170	1,634	240,3
230,6	2,53	114	0,11	1000	1008	1,46	230,6
220,5	2,28	101	0,11	875	876	1,316	220,5
210,6	2,08	90	0,11	760	760	1,2	210,6
200,6	1,954	81	0,12	667	674	1,128	200,6
176,1	1,593	64	0,13	483	486	0,92	176,1
150	1,31	50	0,14	336	340	0,756	150
125,1	1,06	45	0,19	227	231	0,612	125,1

Εικόνα 3.9. Πίνακας τιμών του 2^{ου} Πειράματος.

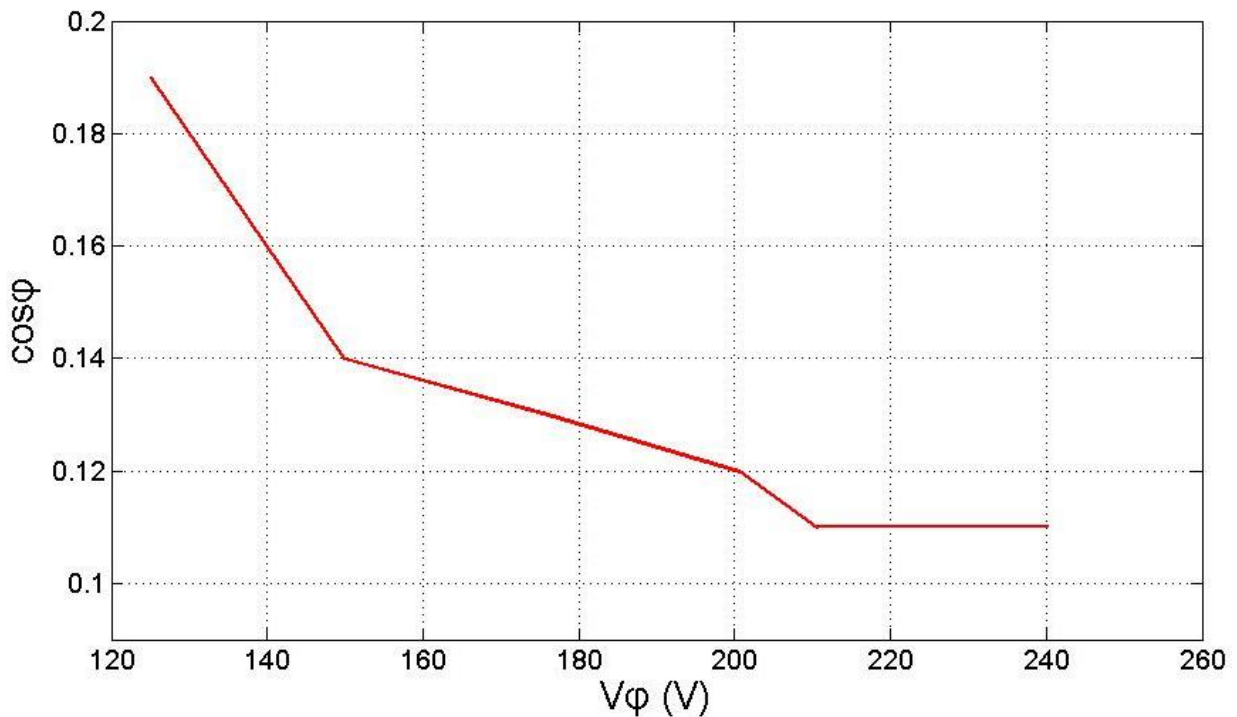
Τις παραπάνω τιμές τις επεξεργαστήκαμε στο Matlab για να αναπαράγουμε τα θεωρητικά διαγράμματα (εικόνα 3.6) τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 3.10. Διάγραμμα 2^{ου} Πειράματος ρεύματος-τάσης.



Εικόνα 3.11. Διάγραμμα 2^ο Πειράματος ισχύς εισόδου-τάσης.



Εικόνα 3.12. Διάγραμμα 2^ο Πειράματος συντελεστή ισχύος-τάσης.

Στα διαγράμματα βλέπουμε τη γραμμικότητα μεταξύ των μεγεθών και παρατηρούμε πως ήρθαν σε πολύ καλή αντιστοιχία με το θεωρητικό διάγραμμα της εικόνας 3.6 γεγονός που φέρνει σε επιτυχία το πείραμά μας. Στους επαγωγικούς κινητήρες η τάση προηγείται του ρεύματος, που σημαίνει πως καταναλώνουν άεργο ισχύ. Την άεργο ισχύ τη χρειάζονται για την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ώστε να λειτουργήσουν.

3.4 ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΡΙΤΟ

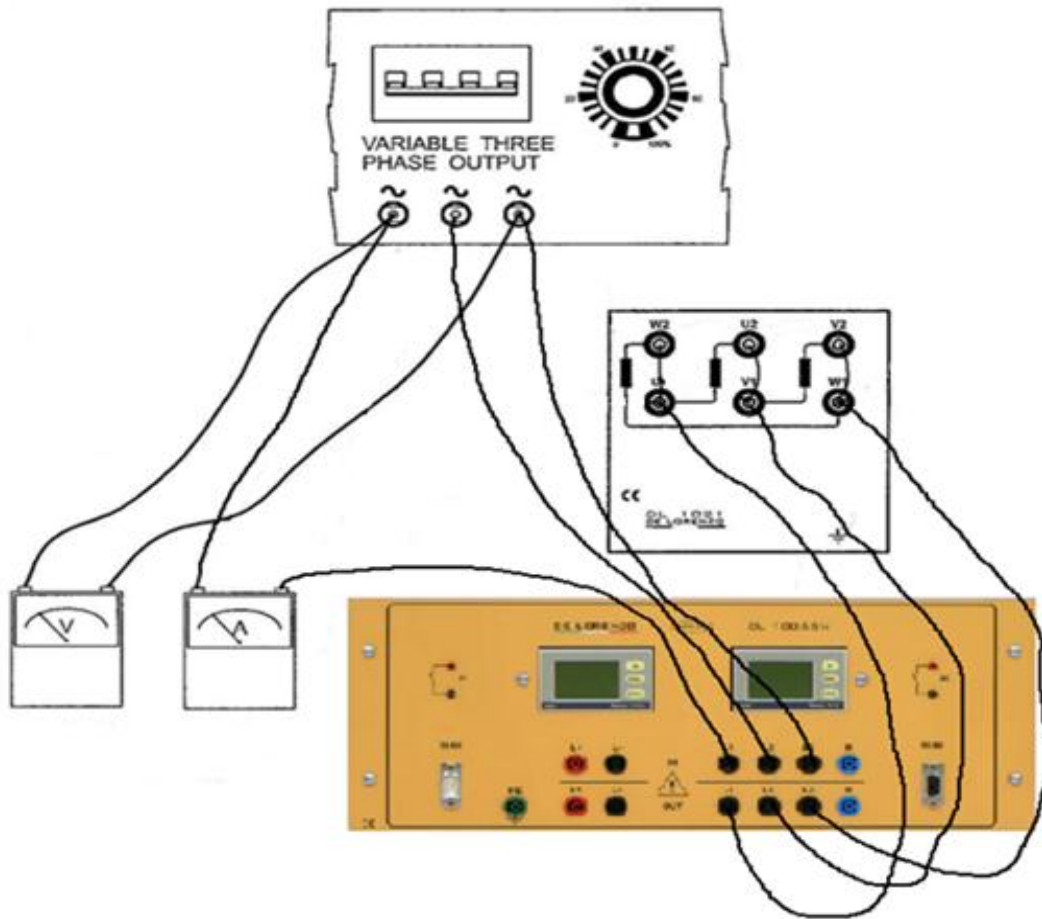
Το Πείραμα του Ακίνητοποιημένου Δρομέα

Το τρίτο πείραμα που πραγματοποιήσαμε στον επαγωγικό κινητήρα DL 1021, με σκοπό τον προσδιορισμό των παραμέτρων του κυκλώματός του, ονομάζεται πείραμα ακίνητοποιημένου δρομέα. Το πείραμα αυτό αντιστοιχεί στο πείραμα βραχυκύκλωσης που πραγματοποιείται σε έναν μετασχηματιστή. Εδώ, ο δρομέας ακίνητοποιείται ώστε να μη μπορεί να κινηθεί, εφαρμόζουμε διάφορες τιμές ρεύματος μικρότερες της ονομαστικής και κατόπιν μετράμε την τάση, το ρεύμα και την ισχύ καθώς και άλλες παραμέτρους του κινητήρα.

Ο δρομέας κρατείται ακίνητος με ειδικά προσαρμοσμένο φρένο. Θα μπορούσε να κρατηθεί και με το χέρι (χειροκίνητα) όμως για λόγους ασφαλείας χρησιμοποιήθηκε το φρένο το οποίο είναι καλιμπραρισμένο και προσαρμοσμένο πάνω στις ειδικές ράμπες. Κατά τη διάρκεια που η μηχανή δουλεύει με κλειδωμένο το δρομέα θεωρείται ότι είναι βραχυκυκλωμένη, διότι οι περιελίξεις του στάτη και του δρομέα είναι σε τέλεια ηλεκτρική αναλογία με τις πρωτεύουσες και δευτερεύουσες περιελίξεις ενός στατικού μετασχηματιστή ο οποίος δουλεύει σε βραχυκυκλωμένες συνθήκες. Το πείραμα αυτό επομένως, μοιάζει με εκείνο ενός μετασχηματιστή ο οποίος δίνει ισχύ σε ένα ωμικό φορτίο.

Πρέπει ακόμη να σημειώσουμε ότι σε αυτό το πείραμα η ενέργεια που προσδίδουμε στον κινητήρα απορροφάται μόνο από τις αντιστάσεις τυλιγμάτων του δρομέα και από τις ελάχιστες αντιστάσεις διαρροής. Αυτό σημαίνει ότι θα οδηγηθούμε σε θέρμανση των τυλιγμάτων και είναι απαραίτητο να δώσουμε προσοχή προκειμένου να αποφευχθεί η υπερθέρμανση αυτών. Η υπερθέρμανση των τυλιγμάτων θα είχε καταστροφικές συνέπειες για τον κινητήρα αλλά και για την ασφάλεια του πειράματος. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, αρχικά όταν ο κινητήρας είναι σε θερμοκρασία δωματίου θα προσδώσουμε το μέγιστο φορτίο (ονομαστικό) και παίρνοντας τις μετρήσεις με γοργό ρυθμό θα μειώνουμε σταδιακά το φορτίο εισόδου. Με αυτόν τον τρόπο όταν η μηχανή έχει ήδη θερμανθεί το ρεύμα που θα προσδίδουμε θα είναι χαμηλό. Αυτή είναι η σωστή μεθοδολογία για την αποφυγή καταστροφικής βλάβης της μηχανής.

Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η συνδεσμολογία της ηλεκτρικής μηχανής με την τροφοδοσία είναι όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3.13. Διάταξη Συνδεσμολογίας 3^{ου} Πειράματος.

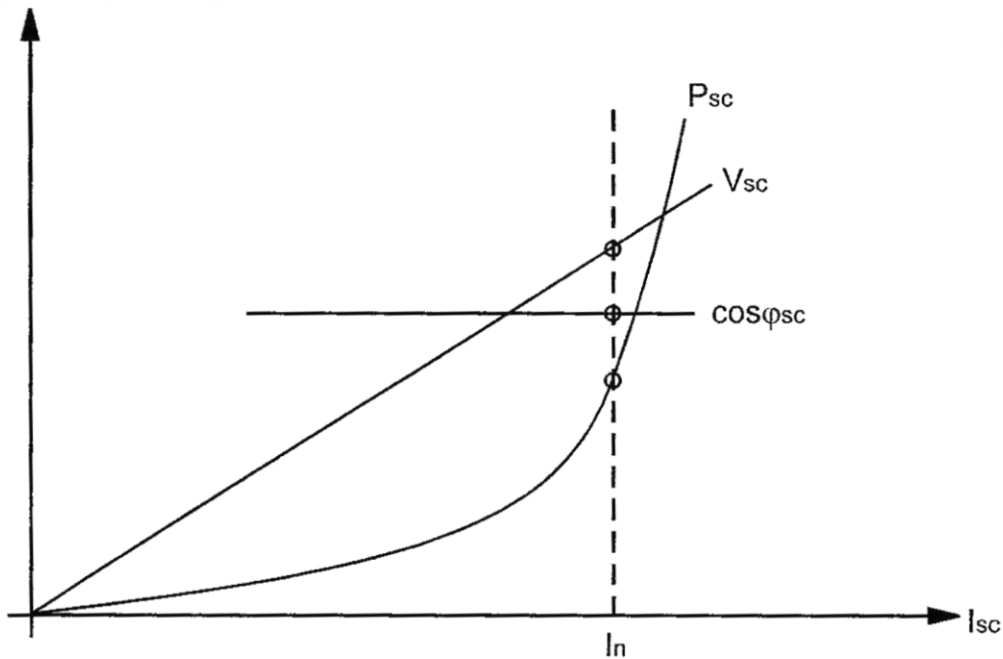
Ο τριφασικός κινητήρας έχει συνδεθεί σε τρίγωνο, το βολτόμετρο έχει συνδεθεί παράλληλα με το κύκλωμα και το αμπερόμετρο σε σειρά. Και τα δύο όργανα πρέπει να είναι ρυθμισμένα ώστε να έχουν τριφασική ένδειξη. Η συχνότητα του δικτύου μετρήθηκε στα 50Hz.

Σε αυτό το πείραμα η ισχύς μετατρέπεται σε :

- απώλειες ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη.
- απώλειες στα τυλίγματα του δρομέα.
- επιπρόσθετες απώλειες στο χαλκό του δρομέα.

Οι επιπρόσθετες απώλειες χαλκού οφείλονται στην υψηλή συχνότητα η οποία παράγει δινορρεύματα στο δρομέα. Επομένως η απώλειες ισχύος αυξάνονται σε σύγκριση με τις τιμές που πήραμε κατά τη φυσιολογική λειτουργία (Πείραμα 2), όπου υπάρχουν πολύ μικρές συχνότητες δρομέα.

Θεωρητικά σε ένα κοινό διάγραμμα, η ισχύς (P_{SC}), ο συντελεστής ισχύος ($\cos\phi_{SC}$) και η τάση (V_{SC}) συναρτήσεσι του ρεύματος (I_{SC}) θα παρουσιάζονται κάπως έτσι :



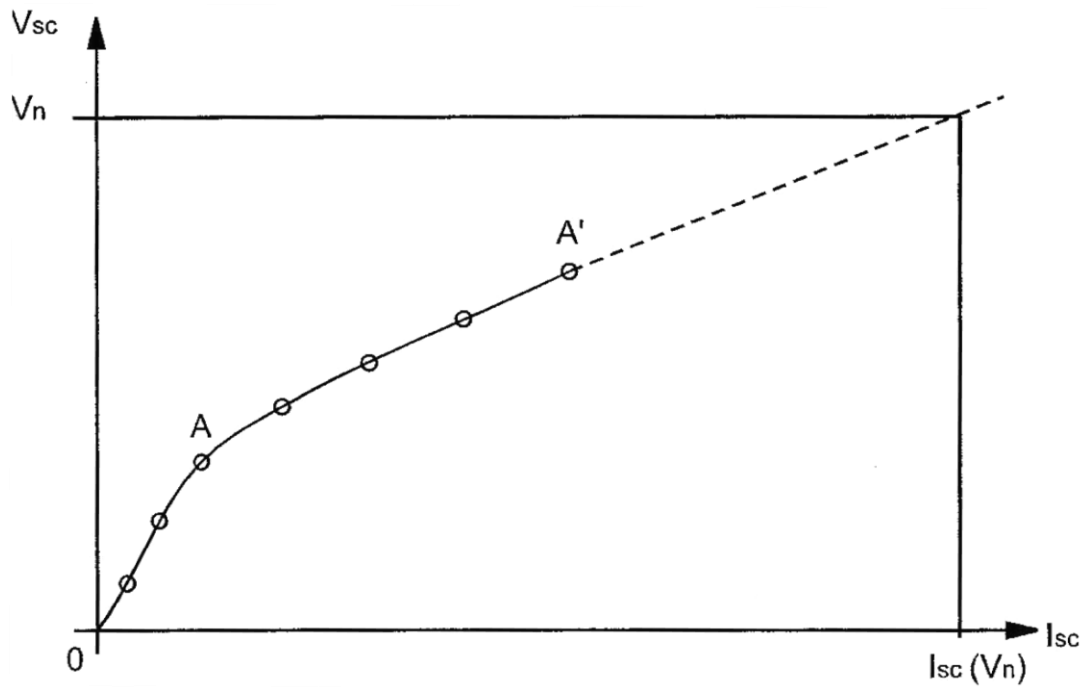
Εικόνα 3.14. Θεωρητικό διάγραμμα ισχύος (P_{sc}), συντελεστή ισχύος ($\cos\phi_{sc}$) και τάσης (V_{sc}) συναρτήσει του ρεύματος (I_{sc}).

Κατά μήκος της διακεκομμένης γραμμής εκεί όπου συναντάται με τις καμπύλες είναι οι ονομαστικές τιμές λειτουργίας του κινητήρα. Υπό φυσιολογικές συνθήκες η καμπύλη τάσης (V_{sc}) είναι γραμμική, η καμπύλη του συντελεστή ισχύος ($\cos\phi_{sc}$) είναι σταθερή και η καμπύλη ισχύος (P_{sc}) είναι παραβολική.

Οι μεταβλητές αυτές εκδηλώνονται όταν αλλάζουμε το ρεύμα και η ισοδύναμη αντίσταση και η αντίσταση διαρροής των περιελίξεων δεν μεταβάλλονται. Αυτή είναι η πιο γενική περίπτωση, επειδή η ισοδύναμη αντίσταση δεν επηρεάζεται από μια λογική διακύμανση της θερμοκρασίας και η αντίσταση διαρροής σχετίζεται με ροές που έχουν ως επί το πλείστον πορεία στον αέρα.

Σε ορισμένες μηχανές όμως είναι πιθανό μερικές ροϊκές γραμμές της αντίστασης διαρροής να έχουν πορεία διαμέσω του σιδήρου. Σε αυτές τις περιπτώσεις η αντίσταση διαρροής μειώνεται όσο το ρεύμα αυξάνεται. Συνεπώς, οι καμπύλες της τάσης (V_{sc}) και του συντελεστή ισχύος ($\cos\phi_{sc}$) μεταβάλλονται.

Μεμονωμένα η καμπύλη τάσης-ρεύματος μεταβάλλεται εμπειρικά ως εξής:



Εικόνα 3.15. Εμπειρικό διάγραμμα καμπύλης τάσης-ρεύματος.

Το τμήμα OA δείχνει τη μεταβολή της αντίστασης διαρροής (X_e) για τους λόγους που εξηγήσαμε παραπάνω, ενώ στο τμήμα AA' η αντίσταση διαρροής έχει πάρει την τελική της τιμή και παραμένει σταθερή κατά τη λειτουργία.

Οι τιμές που λάβαμε από τη διεξαγωγή του πειράματος παρουσιάζονται στον πίνακα παρακάτω (Εικόνα 3.16). Για τον υπολογισμό χρειάστηκαν οι παρακάτω σχέσεις:

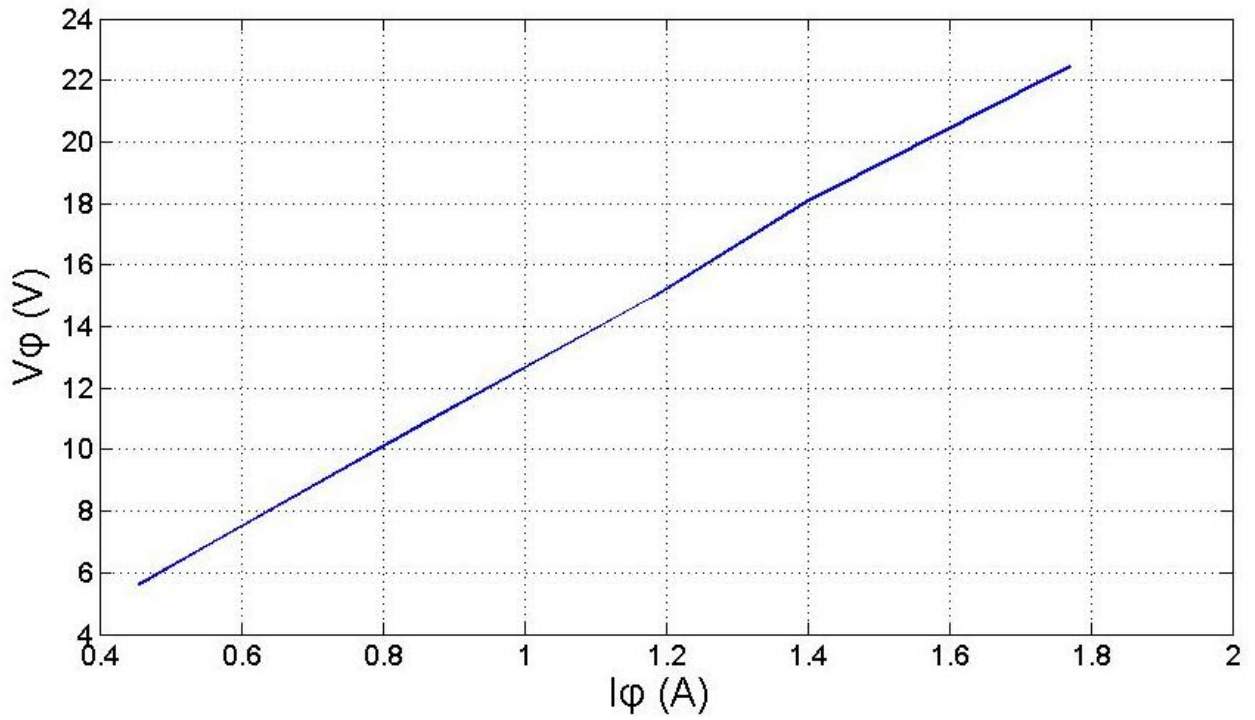
$$V_\varphi = V_\pi$$

$$I_\varphi = \frac{I_\pi}{\sqrt{3}}$$

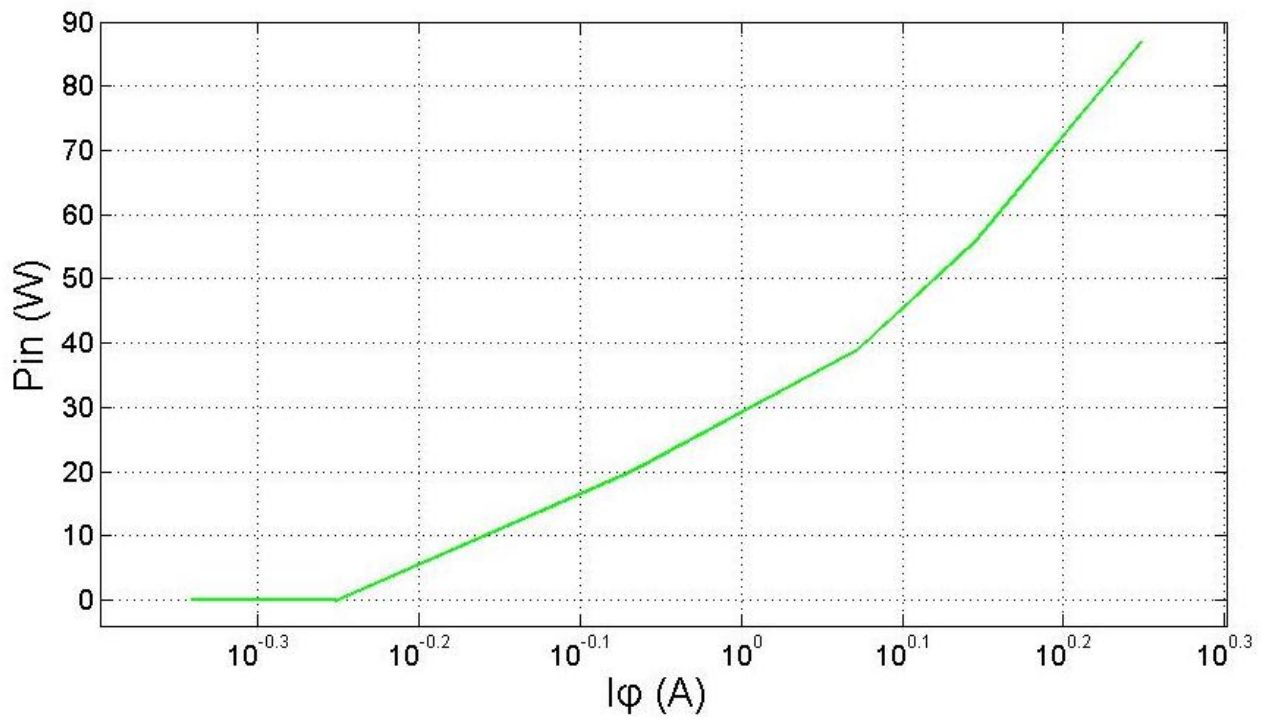
V_π (V)	I_π (A)	P_{in} (W)	$\cos\varphi$	I_φ (A)	V_φ (V)
22,46	3,07	87	0,73	1,77	22,46
18,06	2,42	56	0,74	1,397	18,06
14,96	2,04	39	0,74	1,18	14,96
10,8	1,48	20	0,74	0,854	10,8
7	0,97	0	1	0,56	7
5,63	0,79	0	1	0,456	5,63

Εικόνα 3.16. Πίνακας τιμών του 3^{ου} Πειράματος.

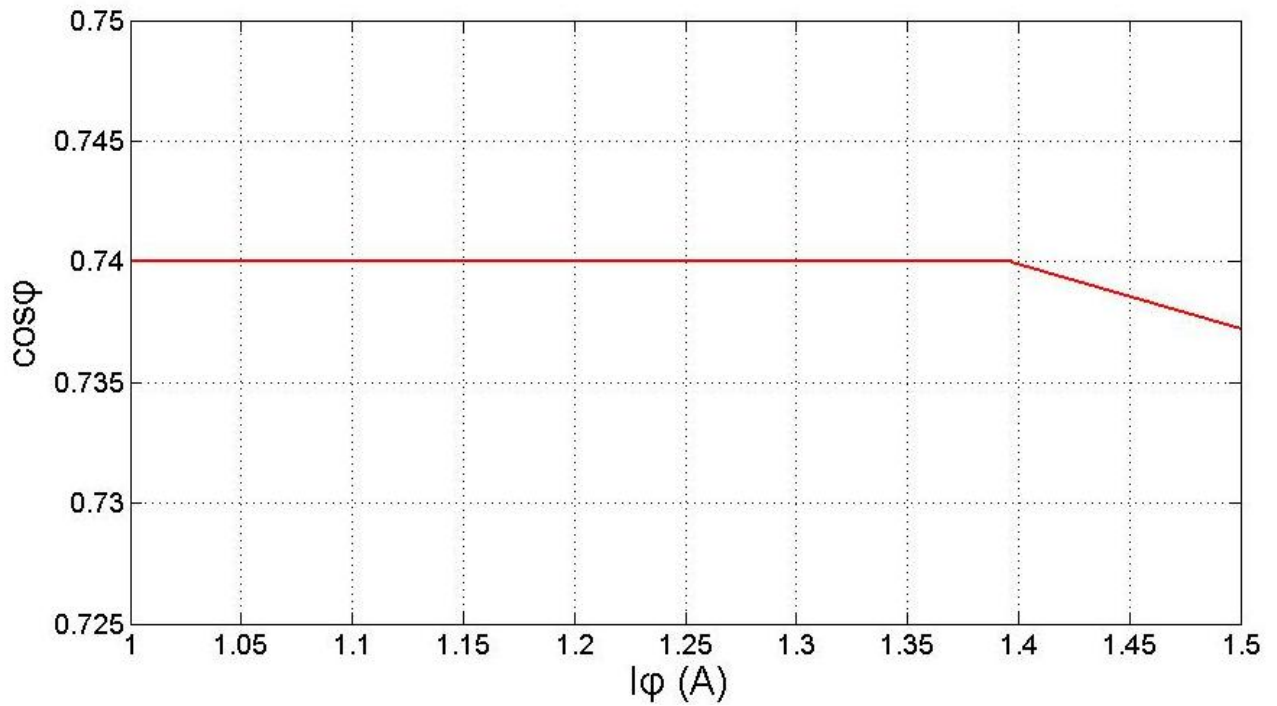
Τις παραπάνω τιμές τις επεξεργαστήκαμε στο Matlab για να αναπαράγουμε τα θεωρητικά διαγράμματα τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.



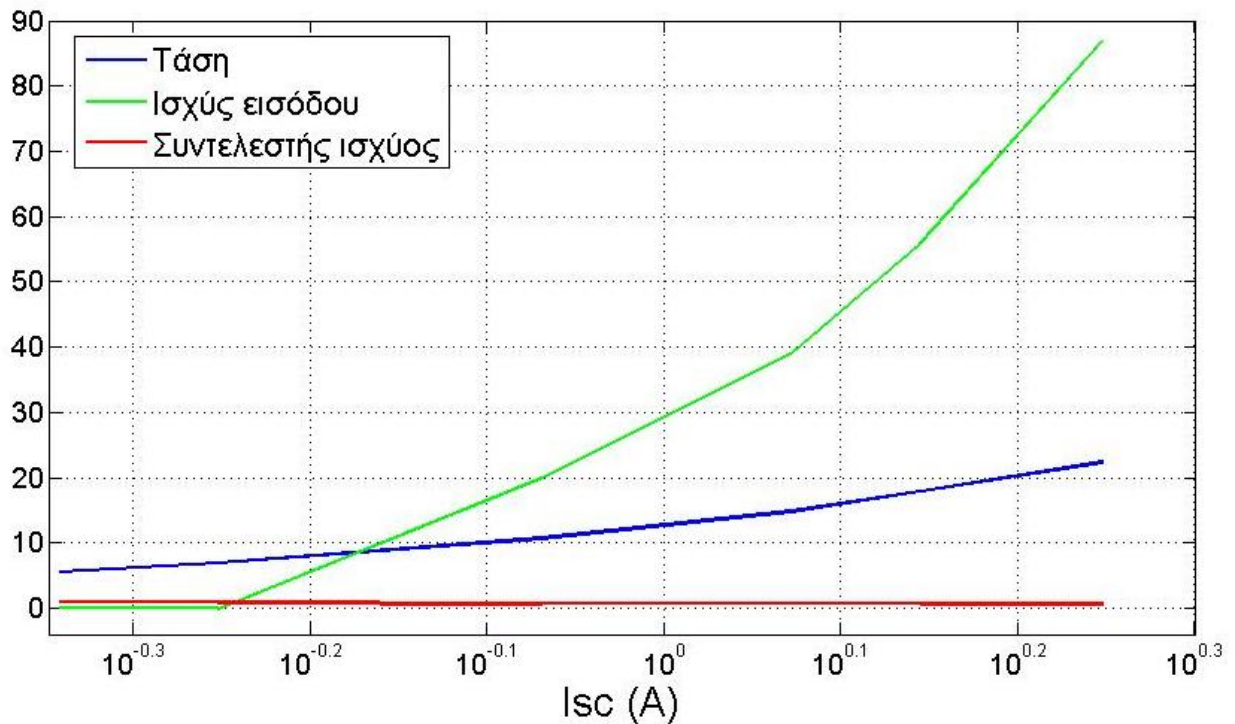
Εικόνα 3.17. Διάγραμμα 3^ο Πειράματος τάσης-ρεύματος.



Εικόνα 3.18. Διάγραμμα 3^ο Πειράματος ισχύς εισόδου-ρεύματος.



Εικόνα 3.19. Διάγραμμα 3^{ου} Πειράματος συντελεστή ισχύος-ρεύματος.



Εικόνα 3.20. Διάγραμμα ισχύος (P_{sc}), συντελεστή ισχύος ($\cos\phi_{sc}$) και τάσης (V_{sc}) συναρτήσεως του ρεύματος (I_{sc}) από τιμές 3^{ου} Πειράματος.

Τα παραπάνω διαγράμματα είναι πολύ κοντά με το θεωρητικό της εικόνας 3.14. Όπως όμως παρατηρούμε και στον πίνακα της εικόνας 3.16, ο συντελεστής ισχύος δεν είχε μία σταθερή τιμή καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων αλλά είχε αποκλίσεις της τάξης του δεύτερου δεκαδικού ψηφίου και έπειτα μία απότομη άνοδο στη μονάδα. Θεωρήσαμε σωστό λοιπόν να κρατήσουμε τις πρώτες τέσσερις τιμές με τη μικρότερη απόκλιση ώστε να πετύχουμε μία καλή αντιστοίχιση με το θεωρητικό διάγραμμα.

3.5 ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΕΤΑΡΤΟ

Ηλεκτρομαγνητικό φρένο

Το τέταρτο πείραμα είναι το πλέον πολύπλοκο και αυτό αποτελεί αιτία να δοθεί περισσότερη προσοχή κατά τη διάρκεια της εκτέλεσής του. Εδώ αξίζει να αναφέρουμε πως για την πραγματοποίηση της εργαστηριακής άσκησης χρησιμοποιήσαμε τον τριφασικό κινητήρα DL 1021 και το ηλεκτρομαγνητικό φρένο DL1019M. Παρακάτω παρουσιάζονται (Εικόνα 3.21-22) φωτογραφίες του φρένου και επεξηγηματική ανάλυση της λειτουργίας του.



Εικόνα 3.21 Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας κλωβού DL1021.



Εικόνα 3.22 Ηλεκτρομαγνητικό φρένο DL1019M.

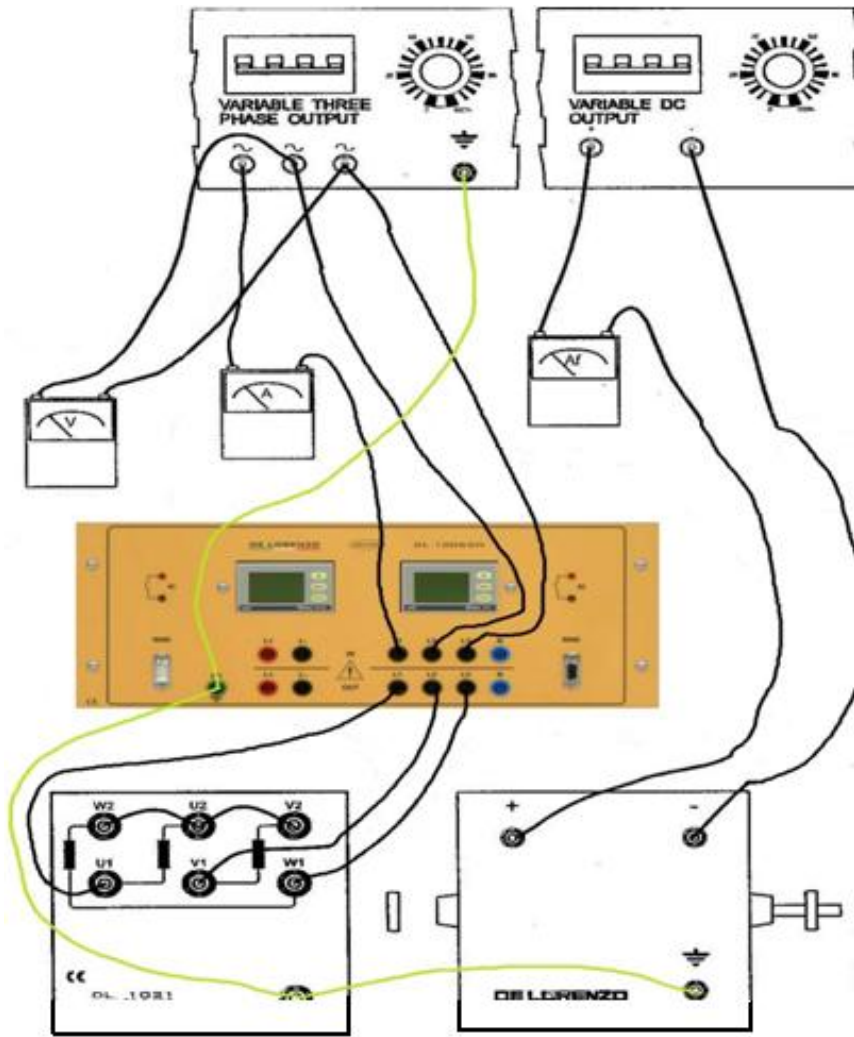
Το φυσικό φαινόμενο στο οποίο είναι βασισμένη η λειτουργία του φρένου είναι το εξής. Ένας δίσκος φτιαγμένος από αγώγιμο υλικό είναι τοποθετημένος στον άξονα του κινητήρα, ο οποίος κατά τη λειτουργία παίζει σημαντικό ρόλο, διότι όταν ο ηλεκτρομαγνήτης διεγείρεται και ο κινητήρας γυρνάει, αυτός τέμνει τις ροϊκές γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας του άξονα ανάλογα με τη διέγερση του δίσκου.

Σε ό,τι αφορά τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του φρένου αναφέρουμε τα εξής :

- Μέγιστη ισχύς $1,4 \text{ kW}$ συνεχούς ρεύματος
- 10 λεπτά λειτουργίας / 20 λεπτά παύσης
- Μέγιστη ταχύτητα 3600 rpm
- Μέγιστη τάση 250 V (dc)
- Κλάσης F

Διαδικασία Εκτέλεσης πειράματος

Η συνδεσμολογία των μηχανών πραγματοποιήθηκε όπως φαίνεται στην εικόνα 3.23.



Εικόνα 3.23. Διάταξη 4^{ου} Πειράματος.

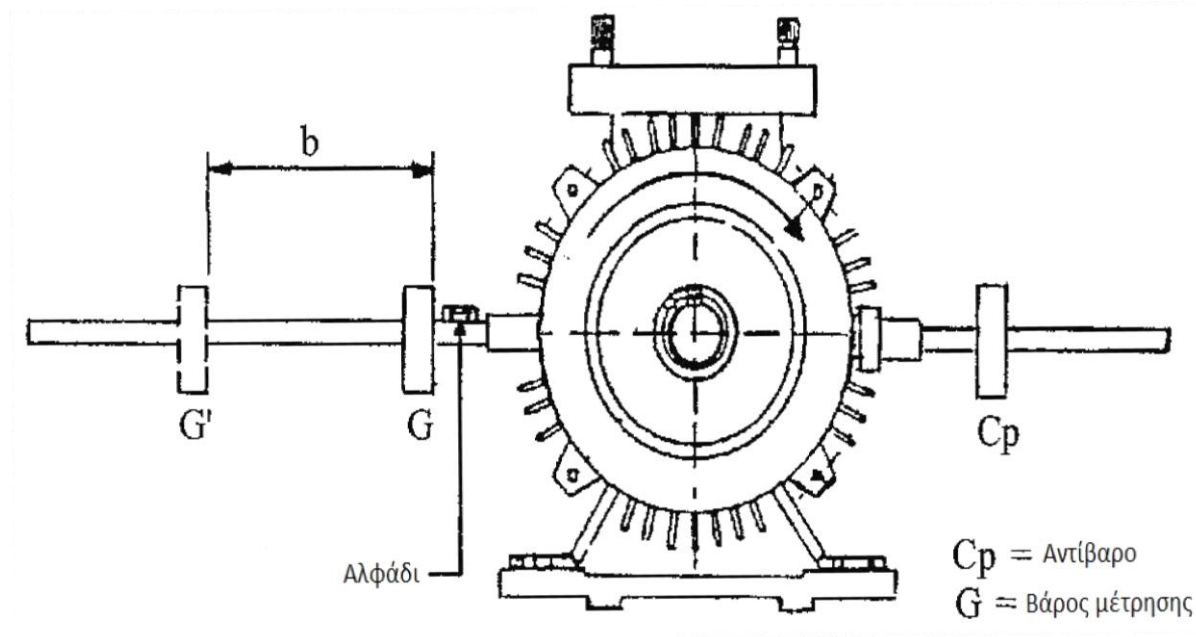
Παρατηρούμε ότι η σύνδεση του τριφασικού κινητήρα έγινε σε αστέρα, ενώ το ηλεκτρομαγνητικό φρένο έχει συνδεθεί σε πηγή συνεχούς ρεύματος με δυνατότητα ρύθμισης της τάσης. Ακόμη, έχουμε ενώσει τη μηχανή και το φρένο στους άξονές τους, ώστε να κινούνται όμοια και αρμονικά και όλα μαζί πάνω σε ειδικά διαμορφωμένες ράμπες.

Για την εκκίνηση του πειράματος ο κινητήρας DL 1021 ρυθμίστηκε με το ποτενσιόμετρο ώστε να λειτουργεί ακριβώς στα ονομαστικά του μεγέθη δηλαδή τάση $V=380\text{ V}$ για σύνδεση σε αστέρα και στη συνέχεια μεταβάλαμε την τάση του συνεχούς ρεύματος στο φρένο. Με αυτόν τον τρόπο, κατά την αύξηση της τάσης (DC), καταγράψαμε τις διαφορετικές τιμές του εναλλασσόμενου ρεύματος, της ισχύς εισόδου P_{in} του κινητήρα, του συντελεστή ισχύος $\cos\phi$ και της ταχύτητας n του κοινού άξονα.

Σημειώνουμε ότι οι μετρήσεις έγιναν από την υψηλότερη προς τη χαμηλότερη τάση συνεχούς ρεύματος για να αποφύγουμε υπερθέρμανση των δύο συσκευών. Δόθηκε μεγάλη προσοχή κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων ώστε να μην ξεπεράσουμε τις ονομαστικές τιμές κάτι που θα δημιουργούσε καταστροφικές συνέπειες στις συσκευές.

Για τη μέτρηση της ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε ταχύμετρο, το οποίο με ακτίνες laser κατέγραψε την ταχύτητα του άξονα με απευθείας εφαρμογή του οργάνου απέναντι από την κίνηση.

Σε αυτό το σημείο θα ήταν ορθό να περιγράψουμε τη διαδικασία μέτρησης της ροπής ώστε να γίνει καλύτερα κατανοητή η λειτουργία του ηλεκτρομαγνητικού φρένου. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε το φρένο (σε αριστερή πλάγια όψη) στο οποίο έχουν προσαρμοστεί δύο βραχίονες. Ο δεξιός βραχίονας χρησιμεύει για αντίβαρο και ο αριστερός, που έχει προσαρμοσμένο (πάνω του) ένα αλφάδι, για να μας δείχνει πότε βρίσκεται σε απόλυτη ισορροπία.



Εικόνα 3.24. Λειτουργία ηλεκτρομαγνητικού φρένου.

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα και ενώ οι δύο συσκευές είναι συνδεδεμένες σε κοινό άξονα, όταν αυξάνουμε τη συνεχή τάση στο φρένο, αυτό τείνει να φρενάρει τον άξονα περιστροφής σύμφωνα με τη φορά του βέλους στην Εικόνα 3.24. Για την επίτευξη αυτού του πειράματος θα πρέπει πρώτα όμως να ρυθμίσουμε τη διάταξη. Αρχικά λοιπόν δίνουμε στον κινητήρα ονομαστική τάση και αφού προηγουμένως έχουμε συνδέσει σε κοινό άξονα τον DL 1021 και το DL 1019M. Έπειτα βάζουμε το βάρος μέτρησης στο σημείο μηδέν (*cm*) και το αντίβαρο σε αντίστοιχο σημείο ώστε να ισορροπεί το σύστημα. Στη συνέχεια αυξάνοντας την τάση συνεχούς ρεύματος μετακινούμε το βάρος μέτρησης σε αντίστοιχο σημείο ώστε να ισορροπεί και πάλι το σύστημα. Τέλος αυτή η ένδειξη (σε *cm*) καταγράφεται και έτσι παίρνουμε τα αποτελέσματα της ροπής. Σημειώνουμε ότι για το αντίβαρο έχουμε:

$$C_p = G = 20N$$

Οι τιμές που λάβαμε από τη διεξαγωγή του πειράματος παρουσιάζονται στον πίνακα παρακάτω (Εικόνα 3.25). Για τον υπολογισμό χρειάστηκαν οι παρακάτω σχέσεις:

$$I_\varphi = I_\pi$$

$$\text{ροπή } C : C = G \cdot b \text{ (Nm)} \tag{12}$$

$$V_{\varphi} = \frac{P_{in}}{3 \cdot I_{\varphi} \cos\varphi}$$

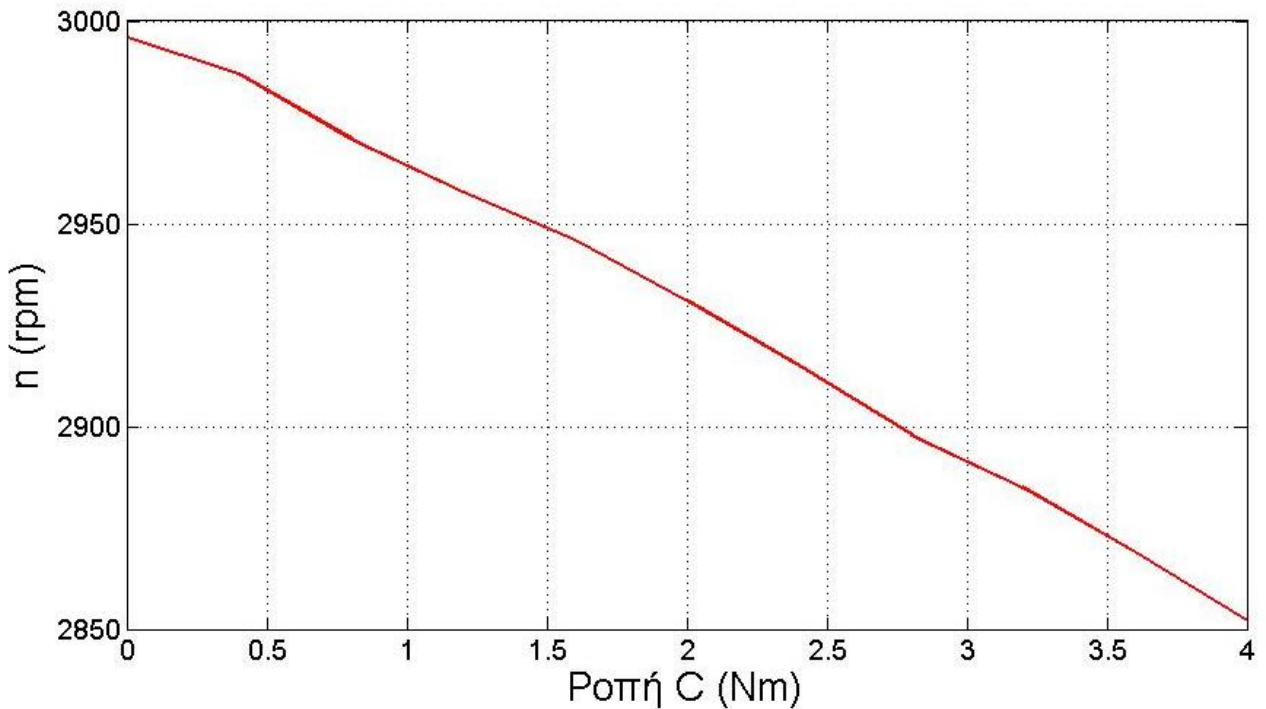
$$P_{out} = \tau_{load} \cdot \omega_m = C \cdot \frac{2\pi n}{60}$$

$$e = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$V_{DC} (V)$	$P_{out} (W)$	$P_{in} (W)$	$\cos\varphi$	$I_{\varphi} (A)$	$V_{\varphi} (V)$	$n(rpm)$	$e (\%)$	$b(cm)$	$C(Nm)$
0	0	124	0,14	1,3	227,1	2996	0	0	0
48,5	125,1	253	0,28	1,33	226,46	2987	49,45	2	0,4
71,2	248,9	399	0,42	1,4	226,19	2971	62,38	4	0,8
87,6	371,7	506	0,51	1,48	223,46	2958	73,46	6	1,2
103	493,6	637	0,59	1,59	226,34	2946	77,49	8	1,6
116,2	613,9	773	0,66	1,73	225,67	2931	79,41	10	2
128	732,6	904	0,71	1,88	225,75	2915	81,04	12	2,4
139,2	849,7	1041	0,75	2,05	225,69	2898	81,63	14	2,8
149,8	966,8	1182	0,79	2,23	223,65	2885	81,79	16	3,2
162	1081,6	1314	0,81	2,4	225,3	2869	82,31	18	3,6
174,1	1194,6	1452	0,83	2,6	224,28	2852	82,28	20	4

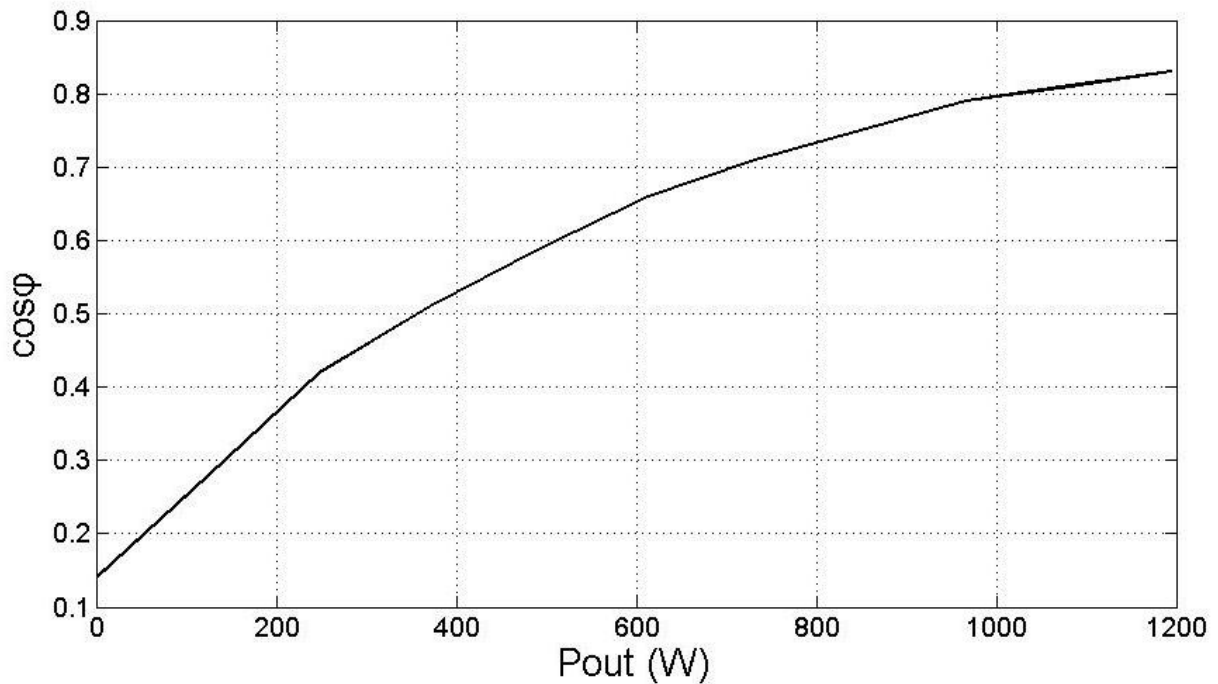
Εικόνα 3.25. Πίνακας τιμών του 4^{ου} Πειράματος.

Τις παραπάνω τιμές τις επεξεργαστήκαμε στο Matlab για να αναπαράγουμε τα θεωρητικά διαγράμματα τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.



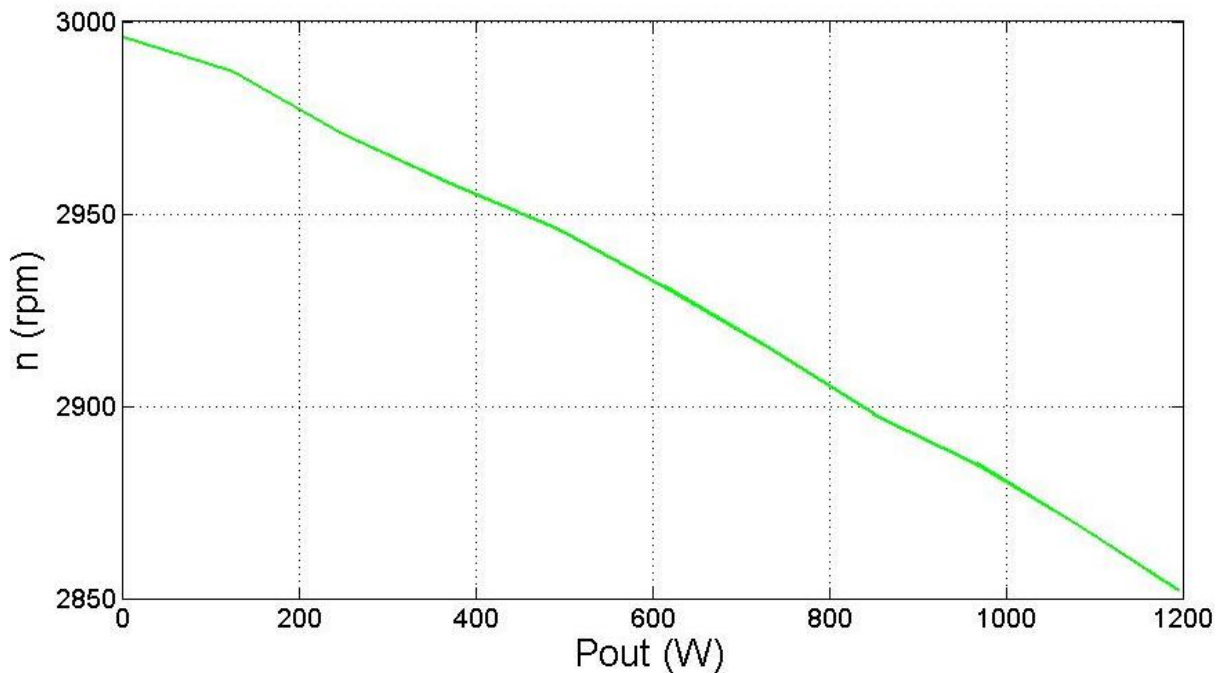
Εικόνα 3.26. Διάγραμμα 4^{ου} Πειράματος ταχύτητας-ροπής.

Στην εικόνα 3.26 παρατηρούμε τη γραμμική σχέση ανάμεσα στη ροπή και την ταχύτητα. Σημειώνουμε εδώ πως λόγω της πέδησης εξαιτίας του ηλεκτρομαγνητικού φρένου οι στροφές μειώνονται με την αύξηση της ροπής.



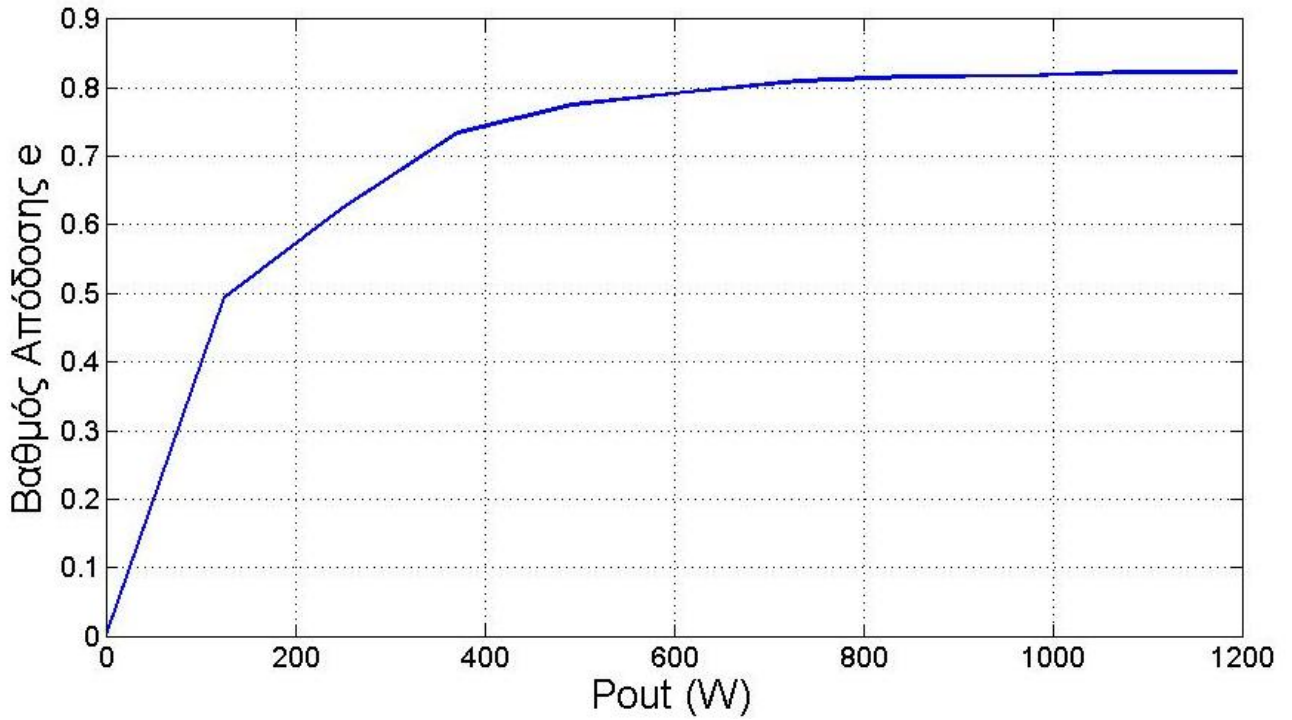
Εικόνα 3.27. Διάγραμμα 4^ο Πειράματος συντελεστή ισχύος-ισχύος εξόδου.

Στην εικόνα 3.27 παρατηρούμε την αύξηση του συντελεστή ισχύος γραμμικά σχεδόν με την αύξηση της ισχύος εξόδου του κινητήρα.



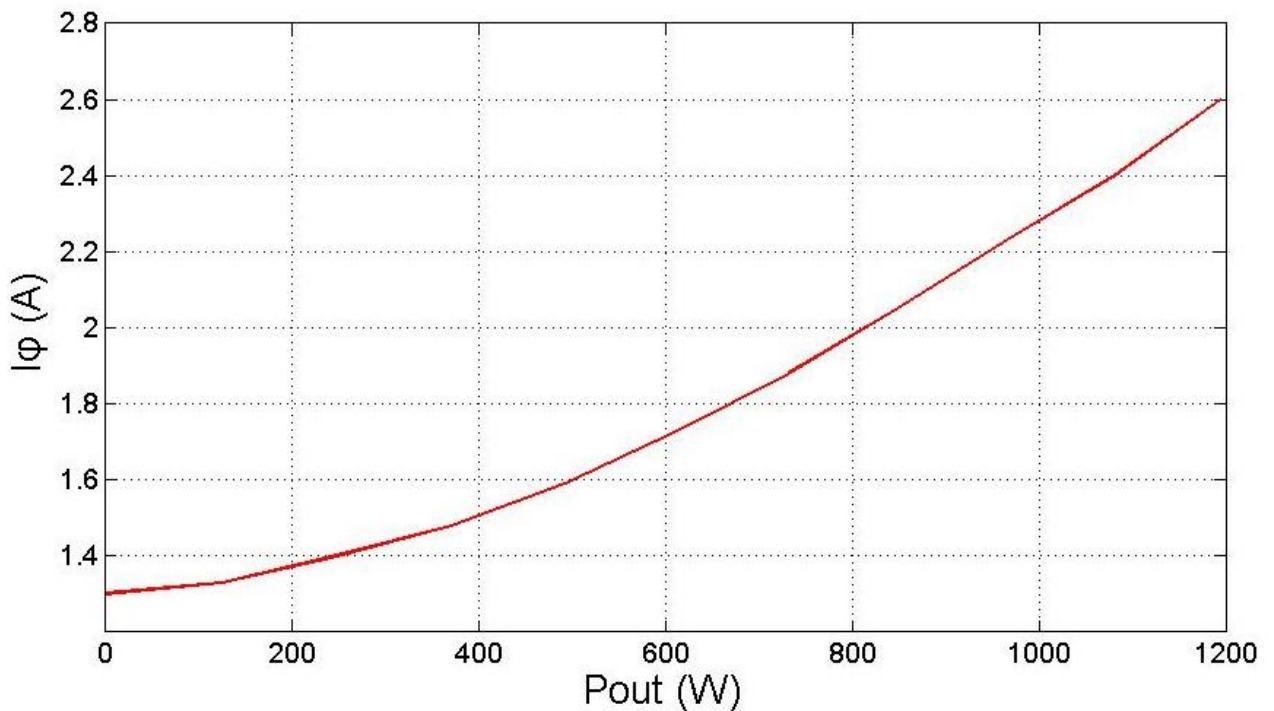
Εικόνα 3.28. Διάγραμμα 4^ο Πειράματος ταχύτητας-ισχύος εξόδου.

Παραπάνω βλέπουμε τη γραμμική σχέση μεταξύ της ισχύος εξόδου και των στροφών του κινητήρα.



Εικόνα 3.29. Διάγραμμα 4^ο Πειράματος βαθμού απόδοσης-ισχύος εξόδου.

Στην εικόνα 3.29 παρατηρούμε την εκθετική αύξηση του βαθμού απόδοσης συναρτήσει της ισχύος εξόδου.



Εικόνα 3.30. Διάγραμμα 4^ο Πειράματος φασικού ρεύματος-ισχύος εξόδου.

Τέλος στην εικόνα 3.30 παρατηρούμε μία γραμμικότητα που συνδέει το ρεύμα με την ισχύ του κινητήρα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Stephen J. Chapman, Ηλεκτρικές Μηχανές, 3^η Έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα, σελ.15-78, 257-298, 421-659, 737-800.
- [2] Charles I. Hubert, Ηλεκτρικές Μηχανές Θεωρία Λειτουργία Εφαρμογές Ρυθμίσεις και Έλεγχος, 1^η Έκδοση, Εκδόσεις ΙΩΝ, σελ.183-331.
- [3] Σ. Γαντζούδης, Μ. Λαγουδάκος, Αθ. Μπινιάρης, Ηλεκτρικές Μηχανές, Ο.Ε.Δ.Β.- Αθήνα, σελ. 18-20, 209-320.
- [4] Ν. Μαστρομηνά, Ηλεκτρικά Μηχαναί, Τόμος Β', Πειραιάς 1975, σελ.11-135.
- [5] Α. Παπαγιαννοπούλου, Μελέτη Συμπεριφοράς Ασύγχρονης Μηχανής με Κλωβό υπό κλίση σε περιπτώσεις σφαλμάτων δρομέα με χρήση της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010.
- [6] Tirupathi R. Chandrupalta, Ashok D. Belegundu, Εισαγωγή στα Πεπερασμένα Στοιχεία για Μηχανικούς, Εκδόσεις Κλειδάριθμος (2005).
- [7] Edminister, Joseph A., Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία, ΕΣΠΙ Εκδοτική (1998).
- [8] Δ. Κόρογλου, Θεωρητική και Πειραματική Διερεύνηση Μη-Καταστροφικού Ελέγχου με χρήση δινορρευμάτων, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Κοζάνη, 2013.
- [9] Daniel Marcsa, Induction Motors Simulation by Finite Element Method and Different Potential Formulations with Motion Voltage Term, Department of Automation Laboratory of Electromagnetic Fields Szechenyi Istvan University, Győr, 2008.
- [10] <http://el.wikipedia.org>
- [11] Lokesh Varshney, Vikas Varshney, Albert Newwel and R. K. Saket, Squirrel Cage Rotor Design for Safety and Reliability Improvement of a Three Phase Induction Machine, Electrical Engineering Department, Institute of Technology, Banaras Hindu University, India.
- [12] Kent Davey, Introduction Motor Analyses, International TEAM Workshop Problem 30.
- [13] Kent Davey, Analytic Analysis of Single and Three Phase Induction Motors, American Electromechanics, 1998.
- [14] www.manolas.gr (εικόνα στο εξώφυλλο)