



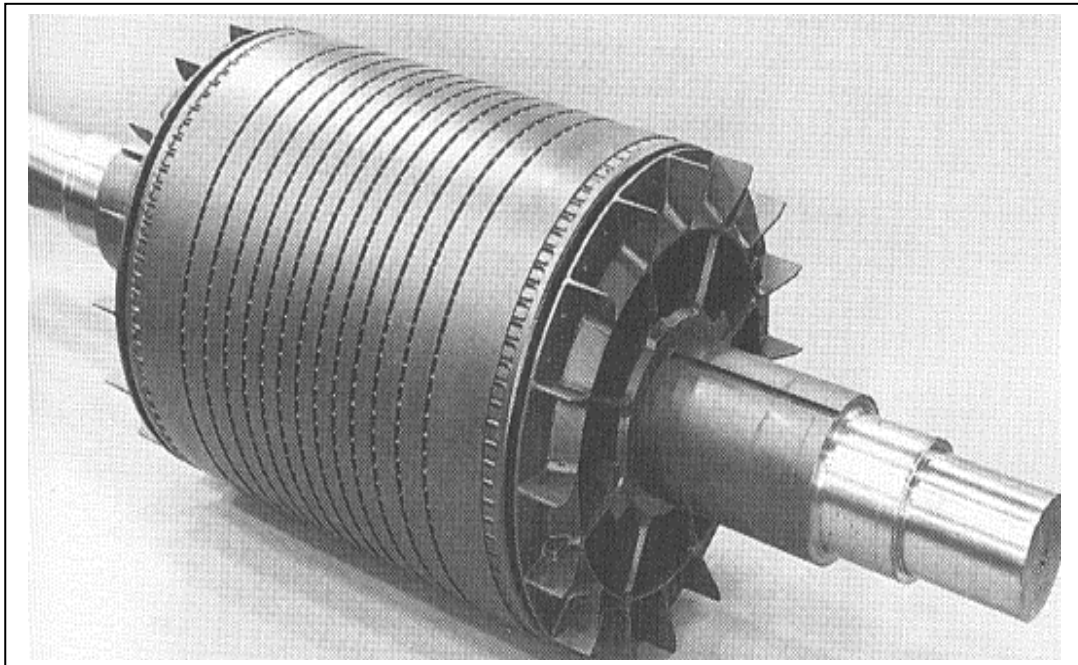
**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

## **Διπλωματική Εργασία**

**Προσομοίωση της λειτουργίας τριφασικού κινητήρα επαγωγής**



**Φοιτητής: Βασίλειος Κληρονόμος**

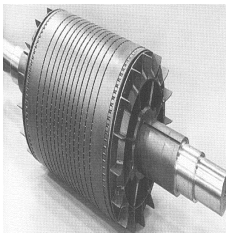
**ΑΜ: 46501**

**Επιβλέπουσα Καθηγήτρια**

**Ολυμπιάδα Συγγερίδου**

**Λέκτορας**

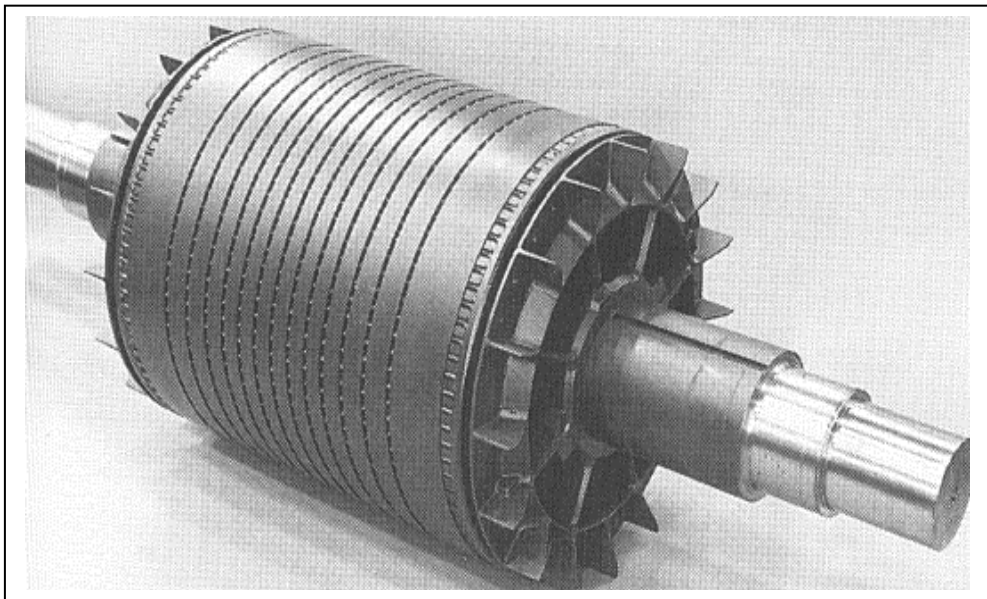
**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Μάρτιος 2024**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
FACULTY OF ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

## **Diploma Thesis**

### **Simulation of three-phase induction motor operation**



**Student: Basilios Klironomos**

**Registration Number: 46501**

**Supervisor**

**Olympiada Syggeridou**

**Lecturer**

**ATHENS-EGALEO, March 2024**

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Συγγερίδου Ολυμπιάδα Λέκτορας	Καραϊσάς Πέτρος Αναπληρωτής Καθηγητής	Καλκάνης Κωνσταντίνος Επίκουρος Καθηγητής

## Copyright © Βασίλειος Κληρονόμος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

### ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Βασίλειος Κληρονόμος του Σπυρίδων , με αριθμό μητρώου 46501 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

#### **δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση της επιβλέπουσας καθηγήτριας.»

Ο Δηλών

Βασίλειος Κληρονόμος

(Υπογραφή φοιτητή)

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Ολυμπιάδα Συγγερίδου, Λέκτορα ΠΑΔΑ, για τις πολύτιμες συμβουλές και την επιστημονική καθοδήγηση που υπέδειξε στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου που με στήριξε σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το αντικείμενο μελέτης είναι ο τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας ή αλλιώς τριφασικός επαγωγικός κινητήρας. Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση στην ιστορία των ηλεκτρικών μηχανών, τα στάδια τα οποία χρειάστηκαν για να συμβάλουν στην εφεύρεση και την εξέλιξη τους. Στη συνέχεια αναλύεται η κατασκευή του τριφασικού κινητήρα επαγωγής, τα μέρη από τα οποία απαρτίζεται, το ισοδύναμο κύκλωμα και οι βασικές αρχές λειτουργίας του, επίσης η ρύθμιση των στροφών και τα συστήματα εκκίνησης του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζεται η πειραματική μελέτη του κινητήρα επαγωγής και συγκεκριμένα η δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος (κενού φορτίου) και ακινητοποιημένου δρομέα. Έγινε ο υπολογισμός των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος του κινητήρα και η σχεδίαση της καμπύλης ροπής-στροφών του.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η προσομοίωση των δύο πειραμάτων με το λογισμικό Matlab Simulink, παρατίθενται οι κυματομορφές και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα αποτελέσματα του πειραματικού μέρους.

Στο τέλος της εργασίας αναφέρονται τα συμπεράσματα.

## Λέξεις – κλειδιά

Επαγωγικός κινητήρας, ηλεκτρικές μηχανές, ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας, βραχυκυκλωμένου δρομέα, κενό φορτίο, μαγνητικό πεδίο, Matlab Simulink, πείραμα .

## **Abstract**

In the present thesis, the subject of study is the three-phase asynchronous motor, also known as the three-phase induction motor. Initially, in the first chapter, a brief overview of the history of electric machines is provided, outlining the stages that contributed to their invention and evolution. Subsequently, the construction of the three-phase induction motor is analyzed, including its constituent parts, the equivalent circuit, and the basic operating principles, additionally, the speed regulation and starting systems are discussed.

The second chapter examines the experimental study of the induction motor, specifically the open-circuit (no-load) test and the blocked-rotor test. The parameters of the motor's equivalent circuit were calculated, and the torque-speed curve was designed.

The third chapter involves simulating the two experiments using Matlab Simulink software, the waveforms are presented and comparing the simulation results with those obtained experimentally.

Finally, conclusions are drawn at the end of the thesis.

## **Keywords**

Induction motor, electric machines, asynchronous three-phase motor, short-circuited rotor, no load, magnetic field, Matlab Simulink, experiment.

## Περιεχόμενα

<b>Κατάλογος Πινάκων.....</b>	<b>9</b>
<b>Κατάλογος Εικόνων .....</b>	<b>9</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>10</b>
<b>1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Βασικές αρχές .....</b>	<b>11</b>
1.1 Ιστορία των ηλεκτρικών μηχανών .....	11
1.2 Αρχές λειτουργίας ηλεκτρικών μηχανών .....	12
1.3 Μέρη από τα οποία αποτελούνται οι ασύγχρονοι 3Φ κινητήρες.....	13
1.4 Ισοδύναμο κύκλωμα ασύγχρονου τριφασικού .....	15
1.4.1 Χαρακτηριστική στρωφών ροπής .....	16
1.5 Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.....	17
1.5.1 Περιστροφή και συχνότητα .....	18
1.5.2 Περιστροφή υπό την επίδραση περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.....	18
1.6 Αρχές λειτουργίας ασύγχρονου 3 Φασικού κινητήρα .....	20
1.6.1 Πηνίο μέσα σε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο .....	20
1.6.2 Περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο 3Φ επαγωγικού κινητήρα σταθερού πλάτους και σταθερής γωνιακής ταχύτητας περιστροφής .....	21
1.7 Τρόποι συνδέσεις επαγωγικού κινητήρα .....	26
1.7.1 Συνδεσμολογίες.....	27
1.8 Τρόποι εκκίνησης τριφασικών επαγωγικών κινητήρων .....	29
1.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	30
<b>2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Πειραματική μελέτη του τριφασικού κινητήρα.....</b>	<b>31</b>
2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του τριφασικού κινητήρα από τον κατασκευαστή .....	31
2.1.1 Θεωρητικό μέρος.....	32
2.1.2 Πειραματικό μέρος.....	32
2.2 Πείραμα με δοκιμή κενού φορτίου .....	34
2.2.1 Θεωρία.....	34
2.2.2 Πείραμα .....	34
2.2.3 Υπολογισμοί.....	36
2.3 Πείραμα με δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα .....	37
2.3.1 Θεωρία.....	37
2.3.2 Πείραμα .....	38
2.3.3 Υπολογισμοί.....	39
2.3.4 Συμπέρασμα .....	41
<b>3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Προσομοίωση τριφασικού ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα με την χρήση του MATLAB SIMULINK .....</b>	<b>42</b>
3.1 Διαδικασία δημιουργίας τριφασικού κινητήρα κενού φορτίου.....	42
3.2 Διαδικασία δημιουργίας μοντέλου τριφασικού κινητήρα ακινητοποιημένου δρομέα.....	45
3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	48
<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές .....</b>	<b>49</b>



## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Τιμές μετρήσεων επαγωγικού κινητήρα στην δοκιμή κενού φορτίου .....[35]

Πίνακας 2.2 Τιμές μετρήσεων επαγωγικού κινητήρα στην δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα....[38]

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 : λειτουργία στα 4 τεταρτημόρια..... [12]

Εικόνα 1.2: τομή στάτη τυλίγματα 3 φάσεων ανά  $120^\circ$  .....[13]

Εικόνα 1.3: α) βραχυκυκλωμένος δρομέας β) κλωβός βραχυκυκλωμένου δρομέα.....[14]

Εικόνα 1.4 : Βασικά μέρη ενός ασύγχρονου ηλεκτρικού κινητήρα .....[15]

Εικόνα 1.5 α) Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης β) κλωβός βραχυκυκλωμένου δρομέα .....[16]

Εικόνα 1.6 Εικόνα Χαρακτηριστική ροπής-στροφών/ολίσθησης ασύγχρονης 3Φασικής μηχανής .....[16]

Εικόνα 1.7 Διερεύνηση των περιοχών ευσταθούς και ασταθούς λειτουργίας της χαρακτηριστικής - ολίσθησης ροπής.....[17]

Εικόνα 1.8 Δύναμη που ασκείται από το σταθερό περιστρεφόμενο πεδίο σε κάθε αγωγό ενός κλειστού βρόχου .....[20]

Εικόνα 1.9 Τομή στάτη .....[21]

Εικόνα 1.10 Κυματομορφή ρεύματος στα τυλίγματα του στατη ενός 3φ επαγωγικού κινητήρα.....[22]

Εικόνα 1.11 Περιστρεφόμενο πεδίο 2 πόλων σε τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα, 3 χρονικών στιγμών (a) $\omega t=0$ , (b) $\omega t=60$ , (c) $\omega t=120$ .....[23]

Εικόνα 1.12 Συνδεσμολογία αστέρα.....[27]

Εικόνα 1.13 Συνδεσμολογία τριγώνου.....[28]

Εικόνα 2.1 Στοιχεία ταμπέλας κινητήρα πειράματος.....[31]

Εικόνα 2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα της μίας φάσης του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.....[33]

Εικόνα 2.3 Συνδεσμολογία αστέρα κυκλωματικά και στις επαφές του κινητήρα.....[33]

Εικόνα 2.4 Σύνδεση κινητήρα με ομόμετρο.....[34]

Εικόνα 2.5 Κύκλωμα μίας φάσης.....[40]

Εικόνα 2.6 Χαρακτηριστική στροφών ροπής.....[41]

Εικόνα 3.1 Κύκλωμα τριφασικού κινητήρα στο matlab Simulink.....[43]

Εικόνα 3.2 Κυματομορφή ολίσθησης.....[44]

Εικόνα 3.3 Χαρακτηριστική στροφών ροπής.....[44]

Εικόνα 3.4 Κυματομορφή Στροφών και ροπής ξεχωριστά.....[45]

Εικόνα 3.5 Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου στάτη και δρομέα.....[45]

Εικόνα 3.6 Κύκλωμα τριφασικού κινητήρα ακινητοποιημένου δρομέα στο Matlab Simulink.....[46]

Εικόνα 3.7 Κυματομορφή Στροφών και ροπής ξεχωριστά.....[46]

Εικόνα 3.8 Κυματομορφές ρεύματος του στάτη και του δρομέα.....[47]

Εικόνα 3.9 κυματομορφή ολίσθησης.....[47]

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα θεμελιώδη στοιχεία πού φέρουν καθοριστικό ρόλο στην τεχνολογική ανάπτυξη πολλών κλάδων της βιομηχανίας αλλά και σε πολλούς άλλους τομείς στην καθημερινότητα των ανθρώπων είναι οι ηλεκτρικές μηχανές.

Με αφετηρία την Αμερική και τη Γερμανία, η βιομηχανική επανάσταση που πυροδοτήθηκε εκείνη την εποχή είχε βαθύτατο αντίκτυπο στον τρόπο ζωής των ανθρώπων σε ολόκληρο τον κόσμο. Η ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών και εφαρμογών όπως οι ηλεκτρικοί κινητήρες, οι ηλεκτρικές γεννήτριες, ο τηλεγράφος, το τηλέφωνο και οι ηλεκτρικοί λαμπτήρες γίνονται δυνατά χάρη στην εφεύρεση του ηλεκτρισμού. Μια νέα εποχή ξεκίνησε με την ανακάλυψη του πετρελαίου και την ανάπτυξη του κινητήρα εσωτερικής καύσης, τα οποία ακόμα και σήμερα τελούν την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος με εφικτό και σύμφороο τρόπο.

Η εισαγωγή των μηχανών εσωτερικής καύσης στην παγκόσμια σκηνή αποσφράγισε τις δυσκολίες που υπήρχαν και δημιούργησε προοπτικές για την μαζική παραγωγή. Το 1903, ο Χένρι Φορντ εφηύρε την πρώτη κινητή γραμμή συναρμολόγησης με βλέψη την μαζική παραγωγή, η οποία είχε ως απόρροια την επιτάχυνση την παραγωγή αυτοκινήτων και άνοιξε το δρόμο για τη σύγχρονη βιομηχανία. Οι συνέπειες αυτής της επανάστασης εξακολουθούν να είναι αισθητές μέχρι σήμερα, αποτελώντας τη βάση για τη σύγχρονη κοινωνία και οικονομία.

## 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Βασικές αρχές

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μία ιστορική αναδρομή των ηλεκτρικών μηχανών καθώς μέσω αυτής αναλύεται η εξέλιξη τους, η πληθώρα των ατόμων που συνέβαλλαν για να δημιουργηθούν και τα χρόνια που χρειάστηκαν για να εφευρεθούν και συνεπώς γίνεται αντιληπτό το πόσο σημαντική είναι η ανακάλυψη τους. Στην συνέχεια παρατίθενται οι κανόνες που τις διέπουν, οι βασικές αρχές λειτουργίας τους και τα μέρη από τα οποία αποτελούνται. Αυτή η ανάλυση είναι σημαντική καθώς γίνεται κατανοητή σε βάθος η διαδικασία λειτουργίας μιας ηλεκτρικής μηχανής και το πώς αλληλεξαρτάται το κάθε μέρος του κινητήρα με το άλλο. Εν συνεχεία παρουσιάζεται διεξοδικά η ανάλυση του τρόπου σύνδεσης ενός επαγωγικού τριφασικού κινητήρα και οι μέθοδοι εκκίνησης τους.

### 1.1 Ιστορία των ηλεκτρικών μηχανών

Η ιστορία των ηλεκτρικών κινητήρων άρχισε χάρις σε μια σειρά εφευρέσεων που πρωταρχική βάση ήταν η εφεύρεση της μπαταρίας από τον Αλεσάντρο Βόλτα το 1800, έπειτα η παραγωγή μαγνητικού πεδίου από ηλεκτρικό ρεύμα (Χανς Κρίστιαν Έρστεντ, 1820) και του ηλεκτρομαγνήτη (Ουίλιαμ Στέρτζεν, 1825) που έγινε η βάση για την κατασκευή ηλεκτρικών κινητήρων.

Αρχικά, ο πρώτος περιστρεφόμενος μηχανισμός που κινούνταν με ηλεκτρομαγνητισμό κατασκευάστηκε από τον Άγγλο Πίτερ Μπάρλοου το 1822 (Ρόδα του Μπάρλοου). Ωστόσο ο Πρώσος Μόριτς Γιακόμπι, ήταν εκείνος που τον Μάιο του 1834, δημιούργησε τον πρώτο περιστρεφόμενο ηλεκτρικό κινητήρα που μπορούσε να παράξει μια αξιοθαύμαστη ποσότητα ισχύς εξόδου. Ο κινητήρας του έθεσε ένα παγκόσμιο ρεκόρ, που βελτιώθηκε τέσσερα χρόνια αργότερα, τον Σεπτέμβριο του 1838, από τον ίδιο τον Γιακόμπι. Ο δεύτερος του κινητήρας ήταν αρκετά ισχυρός για να κινήσει ένα καράβι με 14 άτομα διασχίζοντας έναν ποταμό.

Το 1835, πραγματοποιήθηκε η πρώτη εφαρμογή ηλεκτρικού κινητήρα πάνω σε ένα μικρό αμάξι από δύο Ολλανδούς, τον Σίμπραντους Στράτινχ και τον Κρίστοφερ Μπέκερ, ήταν η πρώτη καταγεγραμμένη εφαρμογή ηλεκτρικού κινητήρα. Τον Φεβρουάριο του 1837, χορηγήθηκε το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για έναν ηλεκτρικό κινητήρα στον Αμερικανό Τόμας Ντάβενπορτ.

Οι θεμέλιοι λίθοι τέθηκαν από τους Γουίλιαμ Ρίτσι και Ιππολύτη Πίξι, το 1832, με την εφεύρεση του διακόπτη συμμόρφωσης. Όμως την πιο σημαντική συνεισφορά την έκανε ο Βέρνερ Ζίμενς, το 1856, με τον διπλό-Τ-άξονα και ο Φρήντριχ Χέφνερ-Άλτενεκ, το 1872, με το σπλισμό του τυμπάνου.

Τα έτη 1885 έως 1889 έφεραν την εφεύρεση του τριφασικού ηλεκτρικού συστήματος ισχύος, το οποίο είναι η βάση για τη σύγχρονη μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας και στους προηγμένους ηλεκτρικούς κινητήρες. Η εφεύρεσή του τριφασικού συστήματος ισχύος δεν οφείλεται σε έναν μόνο εφευρέτη αλλά σε ένα σύνολο, καθώς υπάρχουν αρκετά γνωστά ονόματα που ήταν όλα βαθιά εμπλεκόμενα ο καθένας με τις εφευρέσεις του (Μπράντλεϊ, Ντολίβο-Ντομπρόβσκι, Φεράρις, Χάσελβαντερ, Τέσλα και Βένστρεμ).

## 1.2 Αρχές λειτουργίας ηλεκτρικών μηχανών

Οι ηλεκτρικές μηχανές αποτελούν πολύπλευρα εργαλεία στον τομέα της μηχανολογίας, καθώς εκτελούν λειτουργίες ως κινητήρες, γεννήτριες και πέδες. Με την κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών μηχανών επιτρέπεται η κατανόηση της ποικιλομορφίας τους, καθιστώντας δυνατή την ανάλυση των διάφορων τύπων και των ρολών που διαδραματίζουν στη μηχανολογική επιστήμη.

Καταρχάς, οι ηλεκτρικές μηχανές διακρίνονται σε γεννήτριες, κινητήρες συνεχούς ρεύματος και μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος. Με αυτή κατηγοριοποίηση περιλαμβάνονται τόσο οι σύγχρονες όσο και οι ασύγχρονες γεννήτριες και κινητήρες, παρουσιάζοντας ένα εύρος τεχνολογικών εξελίξεων. Παρότι αυτά τα δύο διαθέτουν αντίστοιχη δομή, λειτουργούν με αντίθετο τρόπο. Κατατάσσονται σε κατηγορίες συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος, με τη λειτουργία τους να βασίζεται στη μαγνητική επαγωγή. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει επιτρέψει τη δημιουργία προηγμένων συστημάτων, εξασφαλίζοντας υψηλή απόδοση και αποτελεσματικότητα.

Στην περίπτωση των γεννητριών συνεχούς ρεύματος, η σύνθεση τους ως ζωτικό κομμάτι των ηλεκτρικών συστημάτων αναδεικνύεται μέσω της μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος αποτελεί σημαντικό στάδιο της μετατροπής ενέργειας, καθιστώντας τις γεννήτριες κρίσιμες για τη λειτουργία των ηλεκτρικών συστημάτων.

Τέλος, οι πέδες αποτελούν σημαντικό στοιχείο των ηλεκτρικών μηχανών, τροφοδοτούμενες τόσο με ηλεκτρική όσο και με μηχανική ενέργεια. Η απώλεια της ενέργειας μέσα στη μηχανή υπό τη μορφή απωλειών οδηγεί σε φρενάρισμα της ηλεκτρικής μηχανής. Για την κατανόηση αυτών των φαινομένων απαιτείται εμβάθυνση στη μηχανική και ηλεκτρική θεωρία, ενισχύοντας έτσι την επιστημονική κατανόηση των ηλεκτρικών μηχανών και των διαδικασιών που διέπουν τη λειτουργία τους.

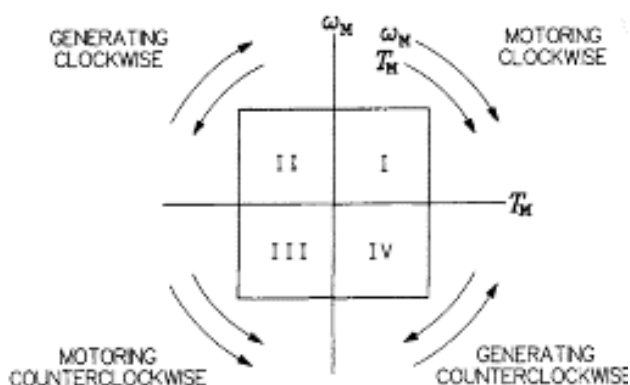
Η λειτουργία στα 4 τεταρτημόρια περιγράφεται στην παρακάτω εικόνα:

I : Γεννήτρια / πέδη με αντίθετη φορά περιστροφής.

II: Κινητήρας με δεξιόστροφη φορά περιστροφής.

III: Γεννήτρια / πέδη με δεξιόστροφη φορά περιστροφής.

IV: Κινητήρας με αντίθετη φορά περιστροφής.



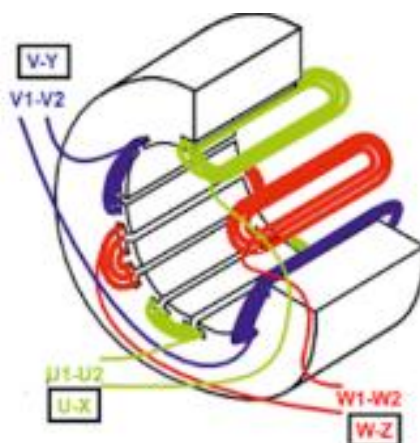
Εικόνα 1.1: λειτουργία στα 4 τεταρτημόρια

### 1.3 Μέρη από τα οποία αποτελούνται οι ασύγχρονοι 3Φ κινητήρες

Σε μία διεξοδική ανάλυση είναι σημαντικό να γίνει μια επιπρόσθετη αναφορά στα επιμέρους τμήματα από τα οποία αποτελούνται οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες, τον τρόπο με τον οποίο αλληλοεπιδρούν για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και τη δημιουργία περιστροφικής κίνησης. Κάθε στοιχείο που συμβάλλει στη εύρυθμή λειτουργία του κινητήρα απαιτεί ουσιώδη κατανόηση προκειμένου να προσδιορίζουμε τις συνθήκες μέγιστης απόδοσης. Παρακάτω απορρυθμίζονται τα μέρη του κινητήρα:

#### 1. Στάτης (Stator):

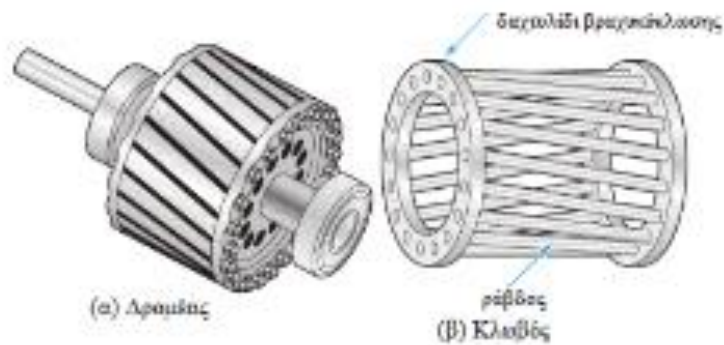
Ο στάτης αντιπροσωπεύει το ακίνητο μέρος του κινητήρα το οποίο απαρτίζεται από ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού (σιδηρούχα κράματα), σχηματίζοντας κυκλικούς δίσκους οι οποίοι διαθέτουν αυλακές που αξιοποιούνται για την στήριξη των επαγωγικών περιελίξεων. Η χοροθέτηση των επαγωγικών περιελίξεων είναι καίρια καθώς απαρτίζουν το τριφασικό τύλιγμα το οποίο είναι υπεύθυνο για την δημιουργία ενός χρονικά μεταβαλλόμενου και περιστροφικού μαγνητικού πεδίου. Η εκάστοτε δομή του τριφασικού τυλίγματος μπορεί να διαφέρει, όχι όμως ως προς την ηλεκτρική γεωμετρία του.



Εικόνα 1.2: Τομή στάτη τυλίγματα 3 φάσεων ανά 120°

#### 2. Δρομέας ή ρότορας:

Ο δρομέας ορίζεται ως το περιστρεφόμενο μέρος του κινητήρα που βρίσκεται τοποθετημένο μέσα στον στάτη, είναι το επαγωγικό κύκλωμα με αρμοδιότητα την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική καθώς και για τη μεταφορά μηχανικής ενέργειας από τον κινητήρα σε έναν μηχανικό φορέα. Απαρτίζετε από μεταλλικές ράβδους (σύνηθες υλικό είναι ο χαλκός ή το αλουμίνιο), οι οποίες είναι τοποθετημένες ομοαξονικά πάνω στον περιστροφικό άξονα του δρομέα, στον οποίο επάγεται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη, με συνέπεια να δημιουργείται εξ επαγωγής ηλεκτρικό ρεύμα.



**Εικόνα 1.3:** α) βραχυκυκλωμένος δρομέας β) κλωβός βραχυκυκλωμένου δρομέα

### 3. Ρουλεμάν:

Τα ρουλεμάν υποστηρίζουν τον άξονα του ρότορα εξασφαλίζοντας ομαλή περιστροφική κίνηση. Η ποικιλία των ρουλεμάν εξαρτάται από τον σχεδιασμό και την εφαρμογή του κινητήρα, ενισχύοντας την αξιοπιστία και την απόδοση.

### 4. Άξονας:

Ο άξονας συνδέει τον ρότορα με το εξωτερικό φορτίο, μεταφέροντας την περιστροφική κίνηση. Η ανθεκτικότητα και σταθερότητα του άξονα είναι ουσιώδης για την αντοχή σε μηχανικές πιέσεις.

### 5. Καπάκια άκρων:

Κατασκευασμένα από σίδηρο ή αλουμίνιο, τα καπάκια άκρων προστατεύουν και στηρίζουν τον στάτη και τον ρότορα. Αποτελούν επίσης σημείο στήριξης για τον κινητήρα.

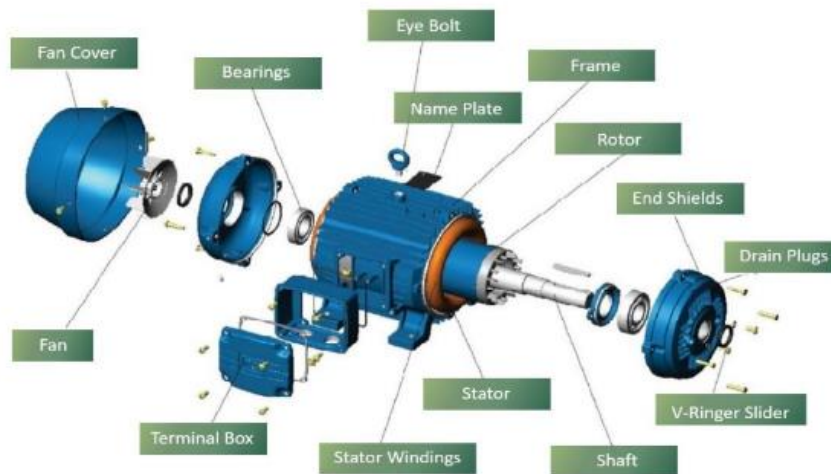
### 6. Ανεμιστήρας και σύστημα ψύξης:

Ο ανεμιστήρας παρέχει ψύξη με την κυκλοφορία αέρα, ενώ ορισμένοι κινητήρες μπορεί να χρησιμοποιούν επιπλέον συστήματα ψύξης για την αποτελεσματική απαγωγή της θερμότητας.

### 7. Κιβώτιο σύνδεσης:

Στο κιβώτιο σύνδεσης περιέχονται οι ηλεκτρικές συνδέσεις του κινητήρα, περιλαμβάνοντας καλώδια τροφοδοσίας και καλωδίωση ελέγχου. Αποτελεί σημαντικό στοιχείο για την ομαλή λειτουργία και σύνδεση του κινητήρα στο εξωτερικό σύστημα.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες αναδεικνύονται ως σύνθετα μηχανολογικά συστήματα μόνο μέσα από λεπτομερείς γνώσεις μπορεί να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία και αξιοποίηση αυτών των συστατικών για ευρύ φάσμα μηχανολογικών εφαρμογών.



Εικόνα 1.4 : Βασικά μέρη ενός ασύγχρονου ηλεκτρικού κινητήρα

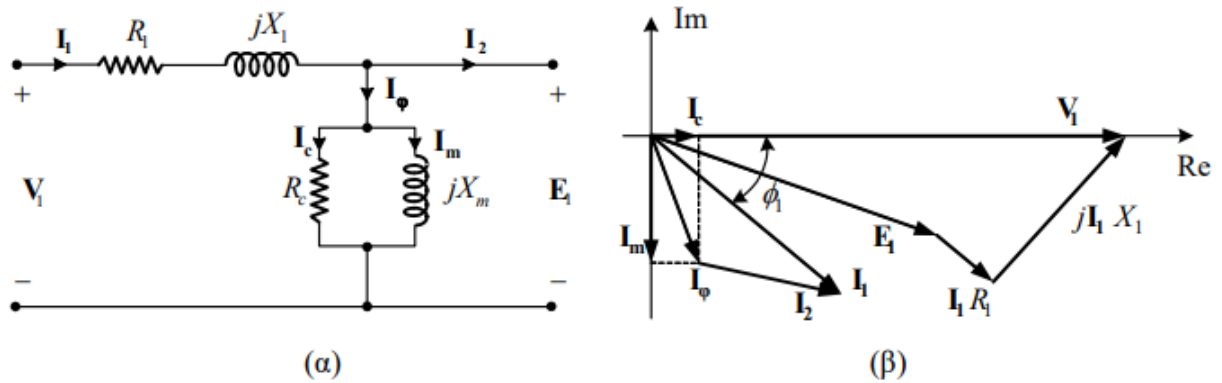
#### 1.4 Ισοδύναμο κύκλωμα ασύγχρονου τριφασικού

Παρακάτω αναλύεται το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα μίας μόνο φάσης του κινητήρα και όχι των τριών φάσεων. Δεδομένου ότι ο τρόπος που συμπεριφέρονται οι τρεις φάσεις στο ηλεκτρικό σύστημα αποκλίνουν μόνο ως προς τον χρόνο που η κάθε μια φάση χρειάζεται ώστε να επιτύχει την επιθυμητή θέση της στον κύκλο τροφοδοσίας, πράγμα που σημαίνει ότι παρόλο την διαφορετική χρονική στιγμή έναυσης, όλες οι φάσεις είναι συμμετρικές και ίδιες. Στην ανάλυση που γίνεται, θεωρείται πως οι συνθήκες είναι ιδανικές, τα ρεύματα και οι τάσεις είναι καθαρά ημιτονοειδές (δηλαδή έχει μία μοναδική συχνότητα), και πως η  $V_1$  είναι η ενεργός τιμή της πρώτης φάσης του δικτύου. Αρχικά το περιστρεφόμενο κύμα ροής που ασκείται στο διάκενο και στρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα επάγεται πάνω στο τριφασικό τύλιγμα του στάτη δημιουργώντας ένα συμμετρικό σύστημα Α.Η.Ε.Δ η οποία έχει συχνότητα ίσης τιμής με της τάσης τροφοδοσίας.

$$V_1 = I_1(R_1 + jX_1) + E_1$$

Με  $E_1$  να είναι η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη η οποία δημιουργείται λόγω της συνισταμένης στο διάκενο, το ρεύμα του στάτη το οποίο είναι το  $I_1$ ,  $R_1$  η ωμική αντίσταση του τυλίγματος του στάτη,  $X_1$  η αντίδραση σκέδασης του στάτη. Η θετική φορά της έντασης του ρεύματος φαίνεται από το παρακάτω σχήμα (Εικόνα 1.5). Το ρεύμα που διέπει το τύλιγμα του στάτη σε αναλογία με έναν μετασχηματιστή αναλύεται σε δύο επιμέρους τμήματα, δύο στυνιστώσες, την συνιστώσα φορτίου και την συνιστώσα διέγερσης. Η συνιστώσα φορτίου  $I_2$  η οποία δημιουργεί μια ΜΕΔ με την οποία καταφέρνει να αντισταθμίσει πλήρως την ΗΕΔ που δημιουργείται εξαιτίας του ρεύματος του δροομέα. Η  $I_\phi$  είναι η συνιστώσα διέγερσης ή αλλιώς το ρεύμα διέγερσης που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για να δημιουργηθεί συνισταμένη ροή διακένου, είναι δηλαδή σταθερό και ανεξάρτητο από τις συνθήκες που επηρεάζουν την φόρτιση του κινητήρα. Επιπλέον το  $I_m$  είναι η συνιστώσα απωλειών της μαγνητικής υστέρησης και των δινορρευμάτων, τέλος, το  $I_c$  είναι η συνιστώσα ρεύματος μαγνήτισης.

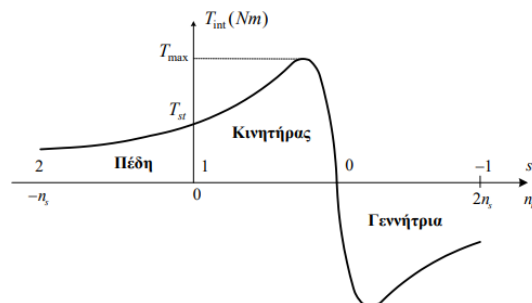
$$I_1 = I_\phi + I_2$$



Εικόνα 1.5: (α) Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης. (β) Διανυσματικό διάγραμμα

### 1.4.1 Χαρακτηριστική στροφών ροπής

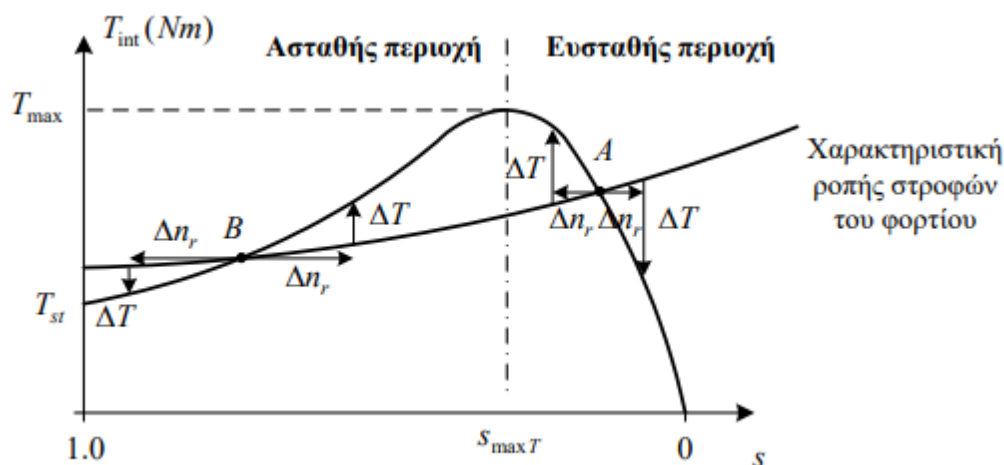
Σύμφωνα με την παρακάτω Εικόνα 1.6 επιτυγχάνεται η οριοθέτηση των περιοχών λειτουργίας μίας ασύγχρονης μηχανής με αναφορά σε κάθε περιοχή λειτουργίας. Από  $0 < n_r < n_s$ ,  $1 > s > 0$  η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας. Στην περίπτωση που εξαιτίας μιας εξωτερικής παρεμβολής (ενός κινητήρα) επιτευχθεί αύξηση των στροφών του άξονα πάνω από τις σύγχρονες ( $n_r > n_s$ ) τότε η λειτουργία της μηχανής αλλάζει και μετατρέπεται σε γεννήτρια (υπερσύγχρονος αριθμός στροφών  $s < 0$ ) πράγμα που σημαίνει πως αποδίδει ισχύ στο εκάστοτε δίκτυο. Ακόμα και σε αυτή την λειτουργία συνεχίζεται η απορρόφηση της άεργου ισχύς. Στην περίπτωση που η μηχανή εκτελεί λειτουργία κινητήρα και αλλαχθεί ακαριαία η διαδοχή των φάσεων, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να γίνει αντιστροφή της φοράς του μαγνητικού πεδίου του στάτη. Αυτή η αλλαγή θα έχει ως συνέπεια, η ηλεκτρική ροπή που παράγεται να αποκτά αντίθετο πρόσημο, αντίθετη ροπή και συνεπώς γίνεται η πέδηση του κινητήρα. Αν ο κινητήρας παραμείνει υπό τάση δεν θα παύσει η λειτουργία του μετά την μείωση των στροφών αλλά θα μετατεθεί σε άλλο τεταρτημόριο με αντίθετης περιστροφής.



Εικόνα 1.6 Εικόνα Χαρακτηριστική ροπής-στροφών/ολίσθησης ασύγχρονης 3Φασικής μηχανής

Η ευσταθής λειτουργία βρίσκεται στην περιοχή  $S_{maxT} > S > 0$ , είναι η περιοχή που λειτουργεί πιο αποδοτικά και σταθερά ο κινητήρας. Ενώ, η  $1 > S > S_{maxT}$ , είναι η ασταθής περιοχή λειτουργίας.





**Εικόνα 1.7** Διερεύνηση των περιοχών ευσταθούς και ασταθούς λειτουργίας της χαρακτηριστικής - ολίσθησης ροπής

Όταν υπάρχει μέγιστη τιμή ολίσθησης ( $S = S_{\max T}$ ) υπάρχει αντίστοιχα μέγιστη ροπή ( $T_{\max}$ ).

Μέγιστη τιμή ολίσθησης:

$$S_{\max T} = \pm \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}}$$

Μέγιστη ροπή :

$$T_{\max} = \frac{3}{2\omega_s} \frac{V_{TH}^2}{R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}}$$

Ροπή εκκίνησης :

$$T_{st} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{TH}^2}{(R_{TH} + R_2) + (X_{TH} + X_2)^2}$$

## 1.5 Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

Εντός του στάτη του τριφασικού κινητήρα υφίσταται ένα τριφασικό τύλιγμα, το οποίο απαρτίζεται από τρία μονοφασικά τυλίγματα με ομοιόμορφη τοποθέτηση γύρω από το εσωτερικό περίβλημα του κινητήρα, με 120 ηλεκτρικές μοίρες διαφορά το ένα από το άλλο. Αυτά τα στατικά τριφασικά τυλίγματα τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα (AC). Η περιοδική φύση αυτού του ρεύματος προκαλεί τη δημιουργία ενός μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου γύρω από τα πηνία. Το

περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο προκύπτει από τη σύνδεση και τη διάταξη τους. Ειδικότερα, τα πηνία τροφοδοτούνται με τις τρεις φάσεις με στόχο να έχουν διαφορετική περίοδο μεταξύ τους, καθιστώντας το μαγνητικό πεδίο του κάθε πηνίου να αναπτύσσεται σε διαφορετικό χρόνο. Αυτή η διαφορά φάσης δημιουργεί ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο γύρω από τον στάτη. Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο από τον στάτη ενεργοποιεί τον δρομέα του κινητήρα, προκαλώντας ένα επαγόμενο μαγνητικό πεδίο στο δρομέα. Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στα μαγνητικά πεδία προκαλεί τη δημιουργία ροπής, δηλαδή της κίνησης του ροτόρα και την περιστροφή αυτού. Συνεπώς, το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο στάτη αποτελεί αναγκαίο στοιχείο για την κανονική λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα, καθώς επιτρέπει τη δημιουργία της απαραίτητης ροπής για την περιστροφή. Για να επιτευχθεί αυτή η διαδικασία με μέγιστη απόδοση, το δημιουργούμενο μαγνητικό πεδίο πρέπει να έχει επαρκή ισχύς, ενώ οι αγωγοί πρέπει να μεταφέρουν αρκετά υψηλό ρεύμα. Παρόλο που το μαγνητικό πεδίο στον ασύγχρονο κινητήρα λειτουργεί ως εναρκτήριο δύναμη, όλη η μηχανική ισχύς εξόδου παρέχεται από την ηλεκτρική παροχή στους αγωγούς από τους οποίους προέρχεται η δύναμη.

### 1.5.1 Περιστροφή και συχνότητα

Στον κόσμο των ηλεκτρικών κινητήρων, η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου αποτελεί καίρια παράμετρο για την λειτουργία των κινητήρων. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζεται ο χρόνος που απαιτείται για μια πλήρη περιστροφή της μαγνητικής ροής κατά μήκος της περιφέρειας του διάκενου σε σχέση με την περίοδο  $T$  της κυματομορφής εισόδου.

Σε έναν 2-πόλο κινητήρα, ο χρόνος περιστροφής είναι ακριβώς η περίοδος  $T$ , όπου  $T$  αναφέρεται στην αντιστροφή της συχνότητας εισόδου ( $T = 1 / f$ ). Για έναν 4-πόλο κινητήρα, η περιστροφή αντιστοιχεί σε  $720^\circ$  ηλεκτρικά, επομένως, ο χρόνος περιστροφής του μαγνητικού πεδίου είναι  $2T$ . Αντίστοιχα, σε έναν 6-πόλο κινητήρα, ο χρόνος αυτός είναι  $3T$ .

Ο χρόνο περιστροφής  $T_s$  εκφράζεται ως  $T_s = P / 2 * T$ , όπου  $P$  είναι ο αριθμός των πόλων. Η συγχρονική ταχύτητα  $n_s$ , που αναφέρεται στις περιστροφές ανά δευτερόλεπτο, υπολογίζεται ως  $n_s = 1 / T_s = 2f / P$ .

Επιπλέον, εκφράζεται η συγχρονική ταχύτητα σε περιστροφές ανά λεπτό ( $N_s$ ) ή σε ακτίνια ανά δευτερόλεπτο ( $\omega_s$ ) ως  $N_s = 120f / P$  και  $\omega_s = 4\pi f / P = 2 / P * \omega$ .

Αναλύοντας την παραπάνω εξίσωση, παρατηρείται ότι για σταθερή πηγή συχνότητας, η σύγχρονη ταχύτητα παραμένει σταθερή. Η κατανόηση αυτών των παραμέτρων είναι ουσιώδης για τον σχεδιασμό και την απόδοση ηλεκτρικών κινητήρων, καθώς μέσω αυτών επηρεάζεται η κανονική λειτουργία των συσκευών.

### 1.5.2 Περιστροφή υπό την επίδραση περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου

Η περιστροφή του δρομέα σε έναν επαγωγικό κινητήρα, υπό την επίδραση ενός περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, αποτελεί αντικείμενο υψίστης σημασίας. Οι

Ηλεκτρομαγνητικές Δυνάμεις (Η.Ε.Δ.), προκύπτουν από τον κλειστό κύκλο που σχηματίζονται τα πηνία του στάτη, τα οποία οδηγούν μέσω των μαγνητικών ροών σε επαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος στον δρομέα.

Εξαιτίας αυτών των ρευμάτων δημιουργείται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στον δρομέα, το οποίο περιστρέφεται με την ίδια φορά περιστροφής με το αντίστοιχο πεδίο του στάτη. Μέσω της αλληλεπίδραση αυτών των μαγνητικών πεδίων προκαλείται ροπή, με κίνηση προς την φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη, πράγμα το οποίο μοιάζει με την απωθητική αλληλεπίδραση δύο όμοιων πόλων μαγνητών.

Καθώς το πεδίο περιστρέφεται, το πηνίο υφίσταται ηλεκτρεγερτική τάση. Δεδομένου ότι το πηνίο δημιουργεί έναν κλειστό βρόχο, η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική τάση προκαλεί ροή ρεύματος μέσω του βρόχου.

Στη συνέχεια, ένας ρευματοφόρος αγωγός εισέρχεται σε ένα μαγνητικό πεδίο ο οποίος υπόκειται σε δύναμη που τον ωθεί να κινηθεί (ο δρομέας). Σε αυτή την περίπτωση, ο δρομέας κινείται προς την κατεύθυνση του περιστρεφόμενου πεδίου, καθώς οι δυνάμεις δρουν στους αγωγούς του βρόχου.

Ο δρομέας φτάνει σε μια ταχύτητα ελαφρώς χαμηλότερη από τη  $N_s$ , ενώ δεν υπάρχει φορτίο συνδεδεμένο στον άξονά του. Αποτρέπεται η περιστροφή με σύγχρονη ταχύτητα, καθώς αυτό θα οδηγούσε σε απουσία επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής τάσης λόγω της σταθερής ροής στον κλειστό βρόχο.

Οι απώλειες περιστροφής επιβραδύνουν τον δρομέα. Όταν συμβαίνει αυτό, παρατηρείται αλλαγή στη ροή, προκαλώντας ηλεκτρομαγνητική δύναμη και συνεπώς ρεύμα στον κλειστό βρόχο. Από το ρεύμα δημιουργείται μία δύναμη που αυξάνει την ταχύτητα του δρομέα.

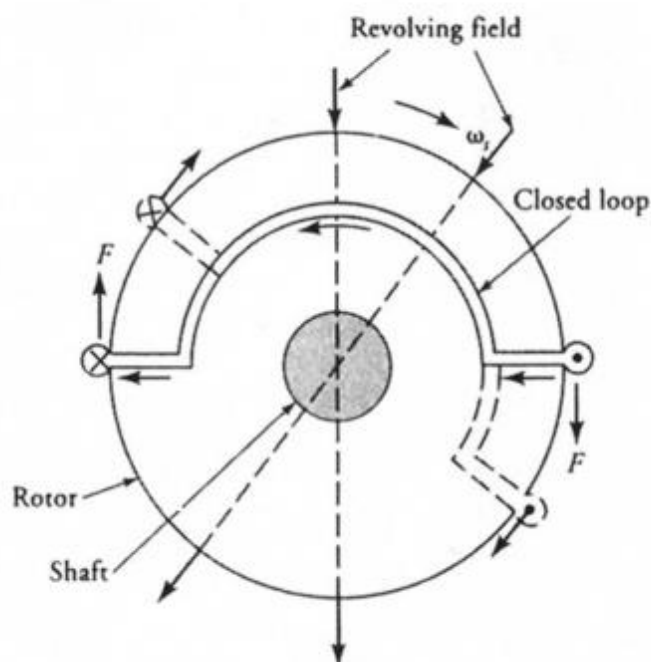
Καθώς αυξάνεται το φορτίο, η ταχύτητα του δρομέα μειώνεται περαιτέρω. Έτσι, η ταχύτητα του επαγωγικού κινητήρα εξαρτάται από το φορτίο. Η διαφορά μεταξύ σύγχρονης ταχύτητας και ταχύτητας δρομέα ονομάζεται ταχύτητα ολίσθησης.

Αν συμβολίσουμε την ταχύτητα του δρομέα ως  $N_m(\omega_m)$ , τότε η ταχύτητα ολίσθησης ορίζεται ως:

$$S = \frac{N_s - N_m}{N_s} \quad (21)$$

όπου  $N_s$  είναι η σύγχρονη ταχύτητα.

Η ολίσθηση εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό της σύγχρονης ταχύτητας. Η εξέταση της κίνησης του δρομέα σε περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο αποτελεί σημαντικό πεδίο έρευνας στον τομέα των ηλεκτρομαγνητικών μηχανισμών.



**Εικόνα 1.8** Δύναμη που ασκείται από το σταθερό περιστρεφόμενο πεδίο σε κάθε αγωγό ενός κλειστού βρόχου

## 1.6 Αρχές λειτουργίας ασύγχρονου 3 Φασικού κινητήρα

Η βασική αρχή είναι ο μαγνητισμός και η επαγωγή που δημιουργούνται στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα, συνεπώς αναπτύσσεται και αναλύεται η δημιουργία του μαγνητικού πεδίου στον στάτη, και ο τρόπος με τον οποίο αυτό οδηγεί στην περιστροφή του δρομέα και στην παραγωγή ροπής.

Η αρχή της επαγωγής είναι ουσιαστική για τη λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα. Όταν στον δρομέα εφαρμόζεται μια τριφασική εναλλασσόμενη τάση, δημιουργείται ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο.

### 1.6.1 Πηνίο μέσα σε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο

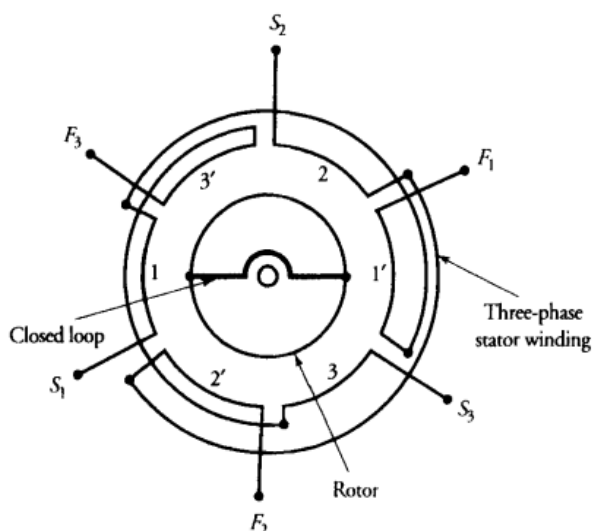
Παρακάτω, γίνεται ανάλυση του εναλλασσόμενου ρεύματος και του ημιτονοειδούς μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου στο πλαίσιο των ασύγχρονων μηχανών. Αρχικά, οι ασύγχρονες μηχανές αποτελούνται από το τύλιγμα διέγερσης, το οποίο είναι τοποθετημένο στον στάτη (ή, εναλλακτικά, το τριφασικό τύλιγμα που τροφοδοτείται με εξωτερική ενέργεια), με τους μαγνητικούς άξονες των τριών φάσεων του τυλίγματος διέγερσης να είναι τοποθετημένοι στο χώρο με την κατάλληλη γεωμετρία. Επιπλέον, αποτελείται από το τύλιγμα του δρομέα ή επαγωγικό τύλιγμα, το οποίο είναι βραχυκυκλωμένο και τροφοδοτείται έμμεσα από τον στάτη μέσω εναλλασσόμενου ρεύματος. Η επαγωγή, όπως στα δεύτερα τυλίγματα των μετασχηματιστών, αποτελεί θεμέλιο χαρακτηριστικό του ασύγχρονου κινητήρα, προσδίδοντάς του τον όρο "επαγωγικός κινητήρας". Στη

συνέχεια, ο δρομέας μετατρέπει την ενέργεια αυτή σε μηχανική, η οποία είναι απαραίτητη για τη λειτουργία της μηχανής.

Ο τριφασικός κινητήρας χρησιμοποιείται ευρέως, ενώ ο διφασικός εφαρμόζεται σπάνια λόγω της δυσκολίας πρόσβασης στο διφασικό ρεύμα. Αντίθετα, ο μονοφασικός επαγωγικός κινητήρας έχει σχεδιαστεί για να μιμείται τη συμπεριφορά ενός διφασικού κινητήρα.

### 1.6.2 Περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο 3Φ επαγωγικού κινητήρα σταθερού πλάτους και σταθερής γωνιακής ταχύτητας περιστροφής

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.8, στην οποία απεικονίζεται η τομή του στάτη ενός τριφασικού διπολικού ασύγχρονου κινητήρα, τα πηνία 1, 2 και 3 είναι του ενός πόλου και τα 1', 2' και 3' είναι του δεύτερου πόλου και κάθε ένα τυλίγμα αντιστοιχεί σε κάθε μια από τις 3 φάσεις.



Εικόνα 1.9 Τομή στάτη

Όταν τα τυλίγματα συνδέονται με μια ισορροπημένη τριφασική πηγή, αναμένεται τα ρεύματα σε όλα τα τυλίγματα να έχουν ίδιο μέγεθος αλλά και να είναι απομακρυσμένα ανά φάση κατά 120 μοίρες. Ο σχεδιασμός κάθε φάσης τυλίγματος έχει γίνει έτσι ώστε η χωρική κατανομή της ροής στο κενό αέρος λόγω του συγκεκριμένου τυλίγματος φάσης να είναι σχεδόν ημιτονοειδής. Θεωρείται ως ρεύμα αναφοράς αυτό της φάσης 1, ενώ τα ρεύματα στις υπόλοιπες τρεις φάσεις θα είναι όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.10 για μια θετική ακολουθία φάσης. Αναλυτικά:

$$i_1 = I_m \sin \omega t \quad (3)$$

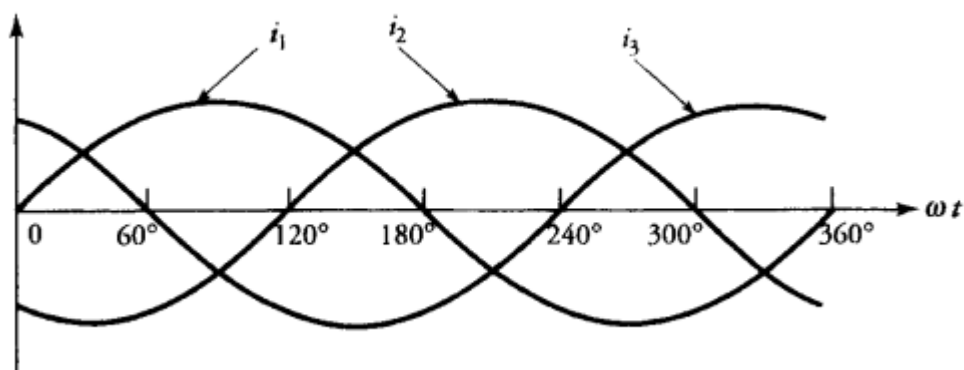
$$i_2 = I_m \sin(\omega t - 120) \quad (4)$$

$$i_3 = I_m \sin(\omega t + 120) \quad (5)$$

Όπου:

$I_m$  : το πλάτος ρεύματος κάθε φάσης

$\omega$ : η γωνιακή ταχύτητα της πηγής, η οποία ισούται με  $\omega=2\pi f$



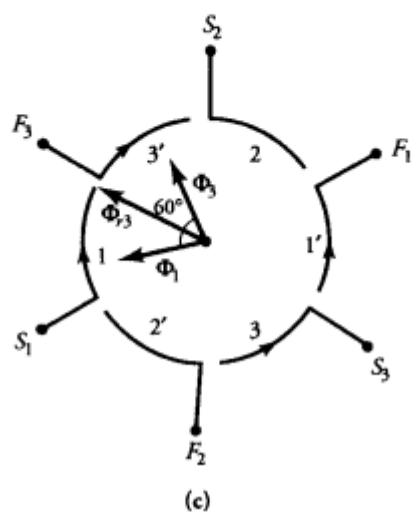
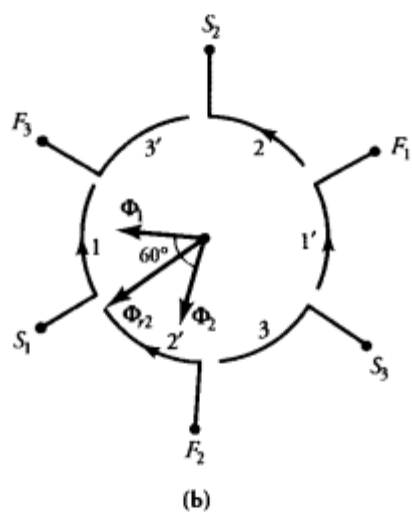
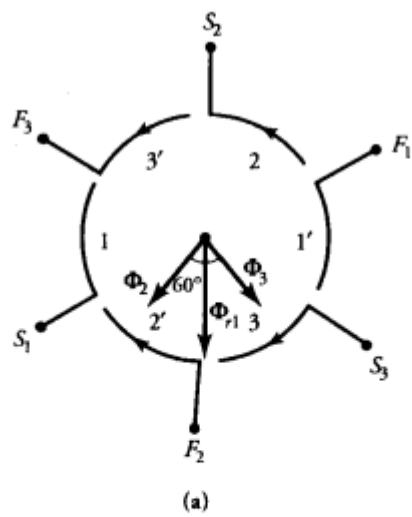
**Εικόνα 1.10** Κυματομορφή ρεύματος στα τυλίγματα του στατη ενός 3φ επαγωγικού κινητήρα.

Υπό γραμμικές συνθήκες, η μαγνητική ροή που παράγεται από την κάθε μία από τις φάσεις διαφοροποιείται ημιτονικά καθώς έχουν διαφορά 120 ηλεκτρικών μοιρών, συνεπώς η κυματομορφή ονομάζεται ως κυματομορφή μαγνητικής ροής.

Σύμφωνα με την παραπάνω Εικόνα 1.9, γίνεται η υπόθεση ότι το ρεύμα κατά την θετική ημιπερίοδο ρέει από το σημείο S που είναι η αρχή στο σημείο F που είναι το τέλος. Δηλαδή, η πορεία του ρεύματος είναι δεξιόστροφη, από τον κανόνα του δεξιού χεριού αφού το ρεύμα έχει φορά προς τα δεξιά καταλαβαίνουμε ότι παράγεται από ένα μαγνητικό πεδίο που θα έχει φορά προς τα μέσα και η περιστροφή του θα είναι προς τα αριστερά.

Χρησιμοποιούνται τρία στιγμιότυπα του χρόνου για ναδειχθεί ότι το πεδίο που προκύπτει είναι σταθερό σε μέγεθος και περιστρέφεται γύρω από την περιφέρεια του ρότορα με σταθερή ταχύτητα που καθορίζεται από τη συχνότητα της εφαρμοσμένης πηγής.

Το αποτέλεσμα είναι η μαγνητική ροή μέσα στον κινητήρα, να ασκείται κάθετη με κατεύθυνση προς τα κάτω, αυτό γίνεται επειδή την συγκεκριμένη χρονική στιγμή 0 ( $t=0$ ) το ρεύμα της μίας φάσης είναι 0 ενώ οι άλλες 2 έχουν ίδιο πλάτος. Επομένως, τα πηνία που έχουν φάση 3, 2' δρουν ως ένα, σχηματίζοντας ένα βόρειο πόλο, ενώ τα τυλίγματα των πηνίων 3', 2 σχηματίζουν τον νότιο πόλο ενός μαγνήτη. Κατά αυτό τον τρόπο, ο μαγνητικός άξονας είναι κάθετος.



**Εικόνα 1.11** Περιστρεφόμενο πεδίο 2 πόλων σε τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα, 3 χρονικών στιγμών (a)  $\omega t = 0$ , (b)  $\omega t = 60$ , (c)  $\omega t = 120$

Οι χρονικές στιγμές της Εικόνας 1.11 αναλύονται :

Την χρονική στιγμή I όπου ( $\omega t=0$ ): το ρεύμα εξόδου θα είναι:

$$i_1 = 0 \quad (6)$$

$$i_2 = -0.866I_m \quad (6)$$

$$i_3 = 0.866I_m \quad (7)$$

Η θετική κατεύθυνση των ρευμάτων στα πηνία εμφανίζεται στο Σχήμα 1.11, σχέδιο a. Αν το  $\Phi$  είναι το πλάτος της μαγνητικής ροής που παράγεται από το  $I_m$ , τότε οι αντίστοιχες εξισώσεις θα γίνουν:

$$\Phi_1 = 0 \quad (9)$$

$$\Phi_2 = 0.86\Phi_m \quad (10)$$

$$\Phi_3 = 0.866\Phi_m \quad (11)$$

και οι κατεύθυνση τους θα είναι σαν αυτών της εικόνα 1.6.2 και οι 2 με την  $\Phi_3$  θα έχουν γωνία 60 μοιρών με παραγόμενο  $\Phi_{r1}$

$$\Phi_{r1} = \sqrt{\Phi_2^2 + \Phi_3^2 + 2\Phi_2\Phi_3 \cos(60)} = 1.5\Phi_m \quad (12)$$

Για την χρονική στιγμή II όπου ( $\omega t=60$ ): το ρεύμα εξόδου των πόλων που λειτουργούν θα είναι οι πόλοι 2,1 ' / 1,2' αντίστοιχα.

$$i_1 = 0.866L_m \quad (13)$$

$$i_2 = -0.866I_m \quad (14)$$

$$i_3 = 0 \quad (15)$$

με πλάτος ρεύματος για  $i_1, i_2$  να είναι  $\Phi = 0.866\Phi_m$  (Οι θετικές κατευθύνσεις φαίνονται στο σχήμα της εικόνας 1.11, σχέδιο b). Υπάρχουν, 2 μαγνητικές ροές η κάθε μια με πλάτος  $0.866\Phi_m$  και με 60 μοίρες διαφορά:

$$\Phi_{r2} = 1.5\Phi_m \quad (16)$$

Συνεπώς φαίνεται ότι το  $\Phi_{r2}$  είναι ίσο με το  $\Phi_{r1}$  άλλα με διαφορά φάσης 60 μοιρών, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι το  $\Phi_{r2}$  προηγείται στην φάση ρεύματος κατά 60 μοίρες στον ηλεκτρικό χώρο. Αυτή η διαφορά μπορεί να παρομοιαστεί με 2 πόλους μιας μηχανής που έχουν μετατοπιστεί 60 μοίρες με δεξιόστροφη περιστροφή, όπου θα συνέβαινε ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα.

Για την χρονική στιγμή III όπου ( $\omega t=120$ ): το ρεύμα εξόδου των πόλων που λειτουργούν θα είναι οι πόλοι 3,1 ' / 1,3' αντίστοιχα.



$$i_1 = 0.866I_m \quad (17)$$

$$i_2 = 0 \quad (18)$$

$$i_3 = -0.866I_m \quad (19)$$

Το πλάτος ρεύματος για  $i_1, i_3$  είναι  $\Phi = 0.866\Phi_m$  (Οι θετικές κατευθύνσεις φαίνονται στο σχήμα της εικόνας 1.11, σχέδιο c). Υπάρχουν, 2 μαγνητικές ροές η κάθε μια με πλάτος  $0.866\Phi_m$  και με 60 μοίρες διαφορά, συνεπώς και εδώ προκύπτει:

$$\Phi_{r_3} = 1.5\Phi_m \quad (20)$$

Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι το  $\Phi_{r_3}$  είναι ίσο με το  $\Phi_{r_1}$  αλλά με διαφορά φάσης 120 μοιρών, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι το  $\Phi_{r_3}$  προηγείται στην φάση ρεύματος κατά 120 μοίρες στον ηλεκτρικό χώρο.

Μετά από επιπλέον 60 μοίρες, φαίνεται ότι τα πηνία 2' και 3' λειτουργούν σαν τον βόρειο πόλο ενώ τα πηνία 2 και 3' λειτουργούν σαν τον νότιο πόλο ενός μαγνήτη. Οι θέσεις αυτών των πόλων έχουν αντιστραφεί, με άλλα λόγια το μαγνητικό πεδίο που έχει δημιουργηθεί με πλάτος  $1.5\Phi_m$  περιστρέφεται κατά 180 μοίρες, όταν κάθε μια από τις 3 φάσεις έχει συμπληρώσει ένα ημικύκλιο. Κατά συνέπεια το μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται 360 ηλεκτρικές μοίρες κατά μήκος της περιφέρειας του διακένου (του κενού χώρου, του αέρα που υπάρχει μέσα στον στάτη), όταν τα ρεύματα συμπληρώνουν έναν πλήρη κύκλο.

## 1.7 Τρόποι συνδέσεις επαγωγικού κινητήρα

Η σύνδεση του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα αντιπροσωπεύει μια σημαντική πτυχή στον χώρο της μηχανικής, καθώς επηρεάζει τη λειτουργία και την απόδοση της συσκευής. Οι διάφοροι τρόποι σύνδεσης, είτε με διάταξη αστέρα είτε με διάταξη τριγώνου, προσφέρουν ευελιξία και προσαρμοστικότητα στις ανάγκες του συστήματος και του εφαρμοζόμενου φορτίου.

Κατά την κατασκευή του κινητήρα, ο εσωτερικός σχεδιασμός και οι συνδέσεις του πηνίου καθορίζουν την απόδοση του. Ο τρόπος σύνδεσης επηρεάζει τη μαγνητική ροή στο διάκενο της μηχανής, επιδρώντας στην απαιτούμενη διέγερση και στη συνολική απόδοση. Ιδιαίτερα, στον ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα, η απαιτούμενη μαγνητική ροή είναι υψηλή λόγω της μεγάλης μαγνητικής αντίστασης στο σιδηρομαγνητικό κύκλωμα, η οποία προέρχεται από το διάκενο.

Η σύνδεση σε διάταξη αστέρα ή τριγώνου επηρεάζει τη διανομή της τάσης και του ρεύματος στα τυλίγματα. Στην περίπτωση της σύνδεσης αστέρα, τα τυλίγματα συνδέονται σειριακά στη υψηλή τάση, ενώ παράλληλα στη χαμηλή τάση. Αυτό οδηγεί σε ομοιόμορφη κατανομή της τάσης και του ρεύματος σε κάθε τύλιγμα, αλλά απαιτεί διπλάσια ποσότητα ρεύματος στη σύνδεση χαμηλής τάσης. Αντίθετα, η σύνδεση τριγώνου επιτρέπει την τροφοδοσία μέσω των σημείων σύνδεσης, με την τάση σε κάθε φάση να είναι μεγαλύτερη από την τάση της γραμμής.

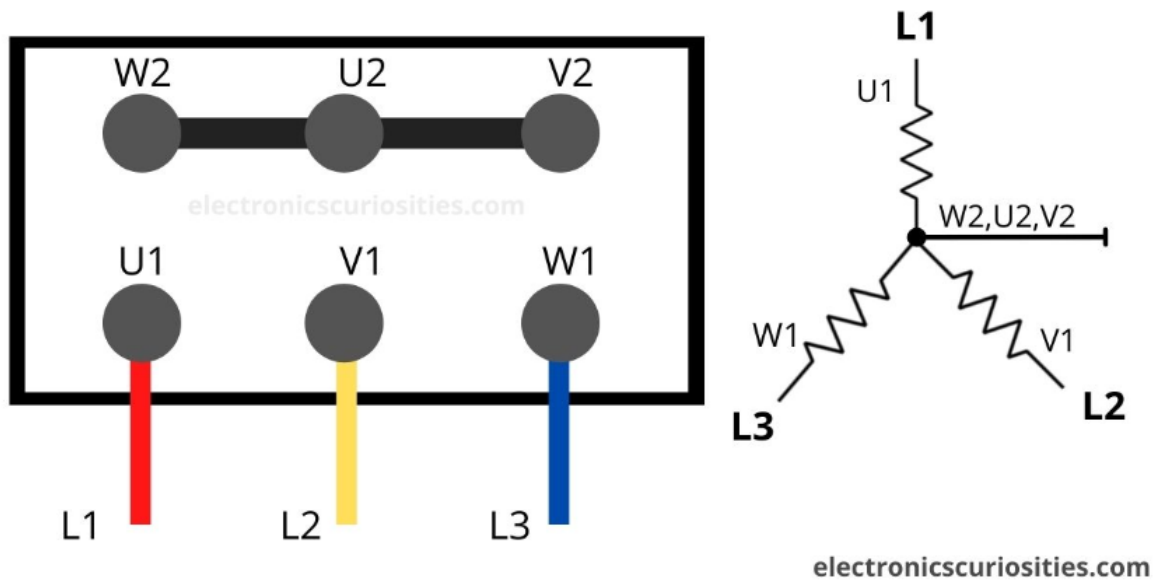
Συνοπτικά, ο τρόπος σύνδεσης του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα αποτελεί σημαντικό στοιχείο στην επιστημονική προσέγγιση επιτρέποντας την βελτιστοποίηση της απόδοσης του και την προσαρμογή στις συγκεκριμένες απαιτήσεις του συστήματος.

### 1.7.1 Συνδεσμολογίες

#### Συνδεσμολογία Αστέρα

Προκειμένου να δημιουργηθεί μια συνδεσμολογία αστέρα χρειάζεται να συνδεθούν οι απολήξεις των τυλιγμάτων  $W2, U2, V2$ , όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

#### Star Connection in Motor

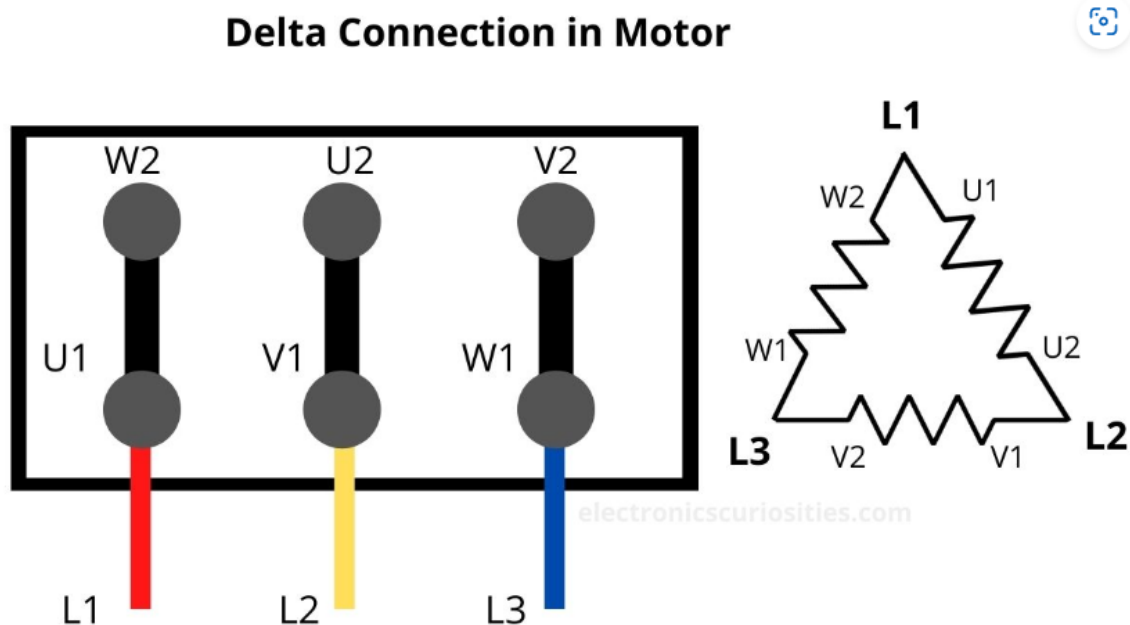


Εικόνα 1.12: Συνδεσμολογία αστέρα

Σε κάθε ένα από τα τυλίγματα  $U1, V1, W1$ , θα είναι συνδεδεμένες οι γραμμές  $L1, L2, L3$  της τριφασικής πηγής όπως φαίνεται στην εικόνα 1.12.

### Συνδεσμολογία τριγώνου

Για να επιτευχθεί η συνδεσμολογία τριγώνου συνδέεται το τέλος των πηνίων U1 με το τέλος του W1, V2 με U2 και τέλος το W1 με το V2, όπως στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 1.13:** Συνδεσμολογία τριγώνου

Ανάλογα με την τάση εισόδου που διατίθεται, γίνεται η σύνδεση των ηλεκτροκινητήρων σε διάταξη αστέρα ή τρίγωνου. Ο κινητήρας μπορεί επίσης να ξεκινήσει σε διαμόρφωση αστέρα-τριγώνου. Για να επιτευχθεί αυτό, η ονομαστική τάση του κινητήρα που βρίσκεται σε συνδεσμολογία τριγώνου πρέπει να ταιριάζει με την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα. Για παράδειγμα, εάν η τάση τροφοδοσίας είναι 400 V, μπορεί να γίνει σύνδεση αστέρα-τριγώνου σε έναν ηλεκτροκινητήρα του οποίου η πινακίδα τύπου δείχνει 690/400 V. Ενώ η τάση τροφοδοσίας πρέπει να είναι 230V για έναν κινητήρα 400/230 V. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η μείωση της αρχική κατανάλωση ενέργειας και τελικά η μετάβαση από σύνδεση αστέρα σε σύνδεση τριγώνου, αυξάνοντας την απόδοση του κινητήρα. Η τεχνική αυτή πραγματοποιείται συχνά σε κινητήρες, ανάλογα με τη δύναμη ή τη ροπή που έχει ο κινητήρας στο σημείο εκκίνησης, με ισχύ μεγαλύτερη από 7kW.

## 1.8 Τρόποι εκκίνησης τριφασικών επαγωγικών κινητήρων

Οι μέθοδοι εκκίνησης τριφασικών επαγωγικών κινητήρων ποικίλλουν, καθώς επηρεάζουν την απόδοση και την αποτελεσματικότητα των κινητήρων. Αναλύονται οι εξής τρόποι εκκίνησης:

### 1. Απ' ευθείας εκκίνηση:

Αυτή η μέθοδος είναι εφικτή εάν πληρούνται όλες οι προϋποθέσεις σύμφωνα με τους κανονισμούς της ΔΕΗ. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκκίνηση μικρής ισχύος κινητήρων, συνήθως κυμαίνονται από 1.5 έως 2 kW.

### 2. Εκκίνηση με αντιστάσεις στον στάτη:

Απαιτεί την παρουσία τριών αντιστάσεων στο κύκλωμα τροφοδοσίας του στάτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης και του ρεύματος τροφοδοσίας. Κατά τη διάρκεια της εκκίνησης, ο εκκινητής αποσυνδέεται όταν ο κινητήρας φτάσει στις κανονικές στροφές.

### 3. Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή:

Χρησιμοποιείται για την εκκίνηση μεγάλων ασύγχρονων κινητήρων. Ο αυτομετασχηματιστής παρέχει μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης σε σύγκριση με άλλες μεθόδους. Επιπλέον, η τάση του αυτομετασχηματιστή είναι ρυθμιζόμενη.

### 4. Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα-τριγώνου:

Κατάλληλη για μικρούς και μεσαίους κινητήρες που λειτουργούν με τάση τριγώνου. Η εκκίνηση γίνεται με έναν διακόπτη δύο θέσεων, ο οποίος συνδέει το κύκλωμα του στάτη και, κατόπιν, συνδέει τον κινητήρα στο τρίγωνο όταν φτάσει στις ονομαστικές στροφές.

5. Εκκίνηση με αντιστάσεις στον δρομέα : Σε αυτή τη μέθοδο εκκίνησης συνδέονται οι εξωτερικές ωμικές αντιστάσεις ( $R_e$ ) στο τύλιγμα του δρομέα. Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη μόνο για κινητήρες με δακτυλιοφόρους δρομής και είναι κατάλληλη για φορτία που έχουν υψηλή στατική ροπή ή μεγάλη αδράνεια.

6. Εκκίνηση με συσκευές στερεάς καύσης : Η εκκίνηση με αυτή την μέθοδο μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρήσης ειδικών συστημάτων εκκίνησης, όπως η ανάφλεξη ανακλαστήρων, η χρήση αντισταθμιστικών αντιστάσεων ή η εφαρμογή αρχών ελέγχου τάσης για την αρχική εκκίνηση του κινητήρα.

### 7. Εκκίνηση με ρύθμιση του λόγου $V/f$ :

Αυτή η μέθοδος εκκίνησης επιτρέπει τη ρύθμιση του λόγου τάσης προς συχνότητα ( $V/f$ ) για επιτυχημένη εκκίνηση. Η ρύθμιση αυτή βοηθά στη βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα κατά τη διάρκεια της εκκίνησης.

Η επιστημονική προσέγγιση αυτών των μεθόδων εκκίνησης επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των αρχών λειτουργίας και την εφαρμογή προηγμένων τεχνικών για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης.

## 1.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από το παραπάνω κεφάλαιο, συμπεραίνεται η πολυπλοκότητα ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, ο οποίος αποτελείται από πληθώρα μέρη. Αυτά, έχουν δημιουργηθεί και τοποθετηθεί στον κινητήρα με μια λογική αλληλουχία προκειμένου οι βασικές αρχές του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού να δημιουργήσουν την περιστροφή και την ροπή που απαιτείται. Με αυτό τον τρόπο, καταφέρνει να λειτουργεί ένας κινητήρας. Ακόμα αναφέρονται οι διάφορες επιλογές των συνδέσεων και των τρόπων εκκίνησης του.

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Πειραματική μελέτη του τριφασικού κινητήρα

Ο προσδιορισμός των τιμών των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος ενός κινητήρα είναι μια απαραίτητη διαδικασία, καθώς είναι κρίσιμο εργαλείο για την εκτίμηση της απόκρισής του σε διαφορετικές συνθήκες. Για την απόκτηση αυτών των τιμών, απαιτείται η υποβολή του κινητήρα σε μία σειρά πειραμάτων, και μετρήσεων τα οποία περιλαμβάνουν:

1. Την μέτρηση ωμικής αντίστασης των τυλιγμάτων του στάτη:

Το πρώτο βήμα που διεξάγεται στην πειραματική διαδικασία είναι να παρθούν οι μετρήσεις των τιμών των αντιστάσεων και των τυλιγμάτων του στάτη

2. Εν κενώ λειτουργία :

Η εν κενώ λειτουργία εξυπηρετεί στο να προσδιοριστούν οι χαρακτηριστικές παράμετροι του κινητήρα όταν δεν υπάρχει φορτίο.

3. Ακίνητοποιημένου δρομέα:

Σε αυτή την δοκιμή φαίνεται η συμπεριφορά του κινητήρα υπό συνθήκες ακίνητοποιημένου δρομέα, προκειμένου να προσδιοριστούν άλλες σημαντικές παράμετροι.

Είναι πολύ σημαντικό αυτά τα πειράματα να πραγματοποιούνται υπό αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες, καθώς οι αντιστάσεις εκτιμώνται να είναι ευαίσθητες στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Ιδιαίτερα, η αντίσταση του δρομέα εξαρτάται από τη συχνότητά του, καθιστώντας αναγκαία την εκτέλεση των πειραμάτων σε ποικίλες συχνότητες.

### 2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του τριφασικού κινητήρα από τον κατασκευαστή

Θεμελιακή αρχή προκειμένου να επιτευχθεί όσο πιο ορθά γίνεται η πειραματική και η μετρητική διαδικασία με τον κινητήρα είναι η επίγνωση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του. Τα χαρακτηριστικά αυτά αναγράφονται στην πλάκα πάνω στον κινητήρα ( Εικόνα 2.1). Κάθε κινητήρας ίδια γραμμής παραγωγής, ίδιου μοντέλου και ίδιας εταιρία έχει κοινά χαρακτηριστικά τα οποία έχουν ελάχιστες αποκλίσεις εξαιτίας κατασκευαστικών ατελειών.

LEYBOLD-DIDACTIC GMBH		
Typ 733 03		
3 ~ MOTOR		Nr. 200 65 009
Δ/Y	220/380 V	4.32/2.5 A
1.0 KW	S 1	COSϕ 0.82
1385	min <sup>-1</sup>	50 Hz
ROTOR	100 V	6.4 A
I.KL. B	IP 44	
VDE 0530		

Εικόνα 2.1 Στοιχεία ταμπέλας κινητήρα πειράματος

Τα στοιχεία στον κινητήρα είναι:

Ονομαστική τάση τροφοδοσίας Δ/Υ: 220/380 V

Ονομαστικό ρεύμα Δ/Υ: 4.32/2.5 A

Ονομαστική ισχύς: 1.0 kW

Συχνότητα: 50 Hz

Ταχύτητα: 1385 rpm

Συντελεστής ισχύος:  $\cos\phi$  0.82

Βαθμός προστασίας: IP 44

### 2.1.1 Θεωρητικό μέρος

Η ολίσθηση είναι το στοιχείο που ασκεί άμεσο έλεγχο στην ταχύτητα για την οποία έχουμε μέγιστη ροπή. Ολίσθηση του δρομέα είναι η σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία που περιγράφεται από δύο μεγέθη. Την ταχύτητα ολίσθησης και την ολίσθηση.

Η ολίσθηση είναι η σχετική ταχύτητα εκφρασμένη σε εκατοστιαία ή σε ανά μονάδα βάση. Άμα αυξηθεί η ολίσθηση που αντιστοιχεί στην μέγιστη ροπή τότε αυξάνεται και η ροπή και κατά συνέπεια φεύγει από την ευσταθή περιοχή και μειώνονται οι στροφές του κινητήρα. Η ταχύτητα ολίσθησης από την άλλη εκφράζει το πόσο μεγάλο ή το πόσο μικρό είναι το φορτίο που φέρει ο δρομέας .

### 2.1.2 Πειραματικό μέρος

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε κατά το πειραματικό μέρος είναι ο ακόλουθος και είναι ο ίδιος και για τα 2 πειράματα:

- Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα με τα ακόλουθα στοιχεία:

Ονομαστική τάση τροφοδοσίας Δ/Υ : 220/380 V

Ονομαστικό ρεύμα Δ/Υ : 4.32/2.5 A

Ονομαστική ισχύς : 1.0 kW

Συχνότητα: 50 Hz

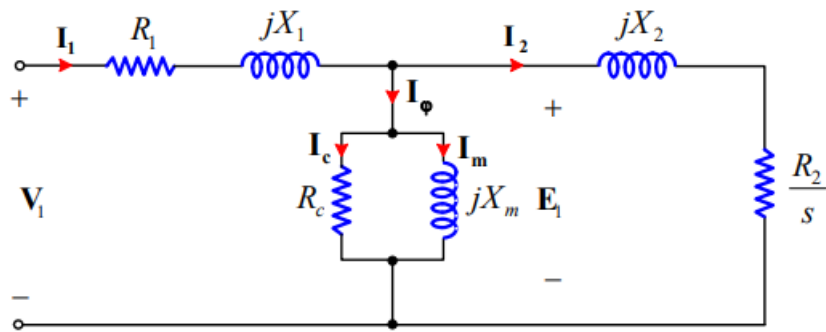
Ταχύτητα : 1385 rpm

Συντελεστής ισχύος :  $\cos\phi$  0.82

Βαθμός προστασίας : IP 44

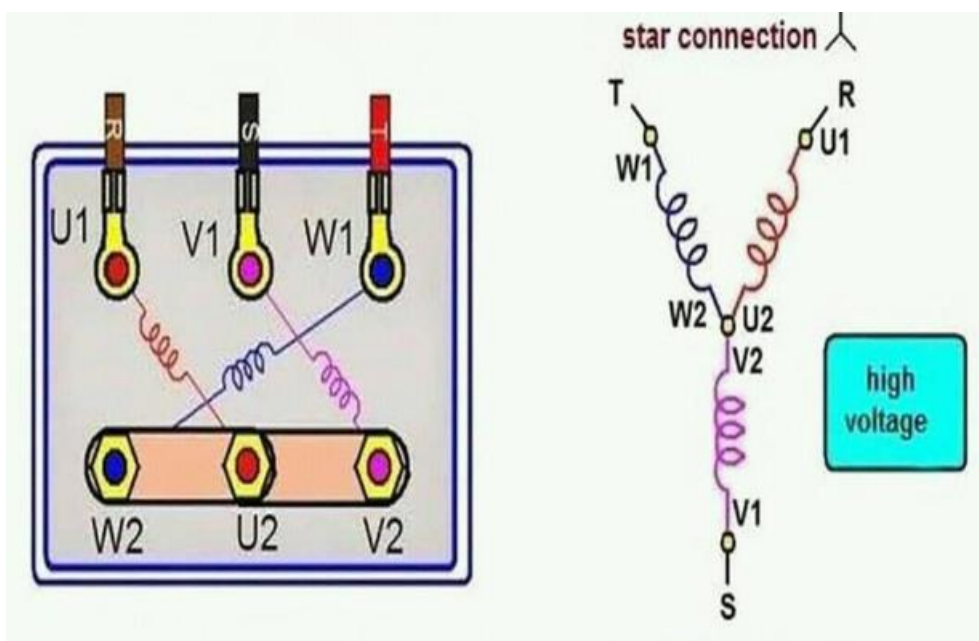
- Αμπερόμετρο
- Βολτόμετρο
- 2 βατόμετρα
- Τριφασική πηγή τάσης





**Εικόνα 2.2** Ισοδύναμο κύκλωμα της μίας φάσης του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα

Και για τα δύο πειράματα, ο κινητήρας μας ήταν συνδεδεμένος με συνδεσμολογία αστέρα.

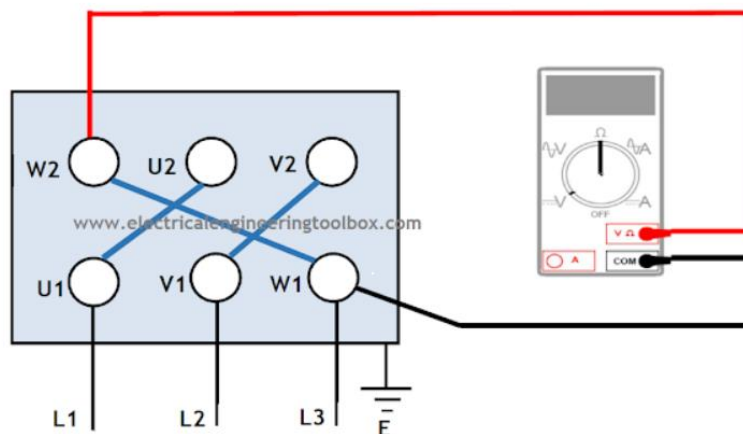


**Εικόνα 2.3** Συνδεσμολογία αστέρα κυκλωματικά και στις επαφές του κινητήρα

Ο υπολογισμός των αντιστάσεων πραγματοποιείται μέσω ομομέτρου.

Οι μετρήσεις είναι οι εξής :

- Για  $R_1$  Συνδέουμε : W2 κόκκινο καλώδιο – W1 Μαύρο καλώδιο  $R_1 = 8,7 \text{ ohm}$
  - Για  $R_2$  Συνδέουμε : V2 κόκκινο καλώδιο – V1 Μαύρο καλώδιο  $R_2 = 8,7 \text{ ohm}$
  - Για  $R_3$  Συνδέουμε : U2 κόκκινο καλώδιο – U1 Μαύρο καλώδιο  $R_3 = 8,7 \text{ ohm}$
- Όπως βλέπουμε και στην Εικόνα 2.4 από κάτω



Εικόνα 2.4 Σύνδεση κινητήρα με ομόμετρο

## 2.2 Πείραμα με δοκιμή κενού φορτίου

### 2.2.1 Θεωρία

Στη δοκιμή κενού φορτίου ο κινητήρας ο οποίος λειτουργεί χωρίς φορτίο τροφοδοτείται με τριφασικό ρεύμα στα 380V και καταγράφονται οι τις τιμές του πίνακα 2.1. Η δοκιμή χωρίς φορτίο προσεγγίζει το κύκλωμα στάτη ( $R1$  και  $X1$ ) και τις παραμέτρους του κλάδου μαγνήτισης ( $JXm$ ) μιας επαγωγικής μηχανής. Η μηχανή οδηγείται στην ονομαστική της ταχύτητα με την εφαρμογή ονομαστικής τριφασικής τάσης στον στάτη ( $V_{nl}$ ). Το αντίστοιχο ρεύμα χωρίς φορτίο ( $I_{nl}$ ) και η πραγματική ισχύς χωρίς φορτίο ( $P_{nl}$ ) καταγράφονται.

Όταν η μηχανή δεν κινείται με μηχανικό φορτίο, η ολίσθηση ( $s$ ) έχει πολύ μικρή τιμή ενώ η ποσότητα αντίστασης του κυκλώματος του δρομέα,  $R_c$  έχει μεγάλη τιμή. Η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος του δρομέα είναι συνεπώς πολύ υψηλότερη σε σύγκριση με την αντίσταση του κλάδου μαγνήτισης.

### 2.2.2 Πείραμα

Στο πείραμα τα στοιχεία, είναι αντίστοιχα με τα παραπάνω, δηλαδή :

- Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα με τα ακόλουθα στοιχεία:

Ονομαστική τάση τροφοδοσίας  $\Delta/Y$  : 220/380 V

Ονομαστικό ρεύμα  $\Delta/Y$  : 4.32/2.5 A

Ονομαστική ισχύς : 1.0 kW

Συχνότητα: 50 Hz

Ταχύτητα : 1385 rpm

Συντελεστής ισχύος :  $\cos\phi$  0.82

Βαθμός προστασίας : IP 44

- Αμπερόμετρο

- Βολτόμετρο
- 2 βατόμετρα
- Τριφασική πηγή τάσης

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν όλες τις συνδέσεις μεταξύ της τριφασικής πηγής, του κινητήρα, των βατομέτρων, αμπερόμετρου και βολτομέτρου. Στην συνέχεια με το ομόμετρο μετρήθηκαν οι αντιστάσεις όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 2.1.2 και έπειτα δώθηκε τάση από την πηγή στον κινητήρα μέχρι να φτάσει στα 380V. Στην συνέχεια μετρήθηκαν με ένα στροφόμετρο οι στροφές του δρομέα του κινητήρα και πάρθηκαν οι τιμές των οργάνων.

<b>Πίνακας 1</b>			
<b>Δοκιμή κενού φορτίου</b>			
<b>V<sub>nl</sub> (V)</b>	<b>I<sub>nl</sub> (A)</b>	<b>P<sub>nl</sub> (W)</b>	<b>n (rpm)</b>
380	0,75	292,5	1481

Οπού  $P_{nl} = (19,5+39) * 5$  με  $W_1=19.5$   $W_2=39$  και 5 είναι η κλίμακα των βατόμετρων

**Πίνακας 2.1** Τιμές μετρήσεων επαγωγικού κινητήρα στην δοκιμή κενού φορτίου

### 2.2.3 Υπολογισμοί

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{3I_{nl}^2} \quad (22)$$

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{\sqrt{3}I_n} \quad (23)$$

$$X_{nl} = \sqrt{(Z_{nl}^2 - R_{nl}^2)} \quad (24)$$

$$R_{nl} = \frac{292,5}{3 * 0.75^2} = 173.3\Omega \quad (25)$$

$$Z_{nl} = \frac{380}{\sqrt{3} * 0.75} = 292.52 \Omega \quad (26)$$

$$X_{nl} = \sqrt{292.52^2 - 173.3^2} = 235.66\Omega \quad (27)$$

## 2.3 Πείραμα με δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα

### 2.3.1 Θεωρία

Η δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα εκτελείται για την εκτίμηση παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση της μηχανής υπό φορτίο, όπως η σύνθετη αντίσταση διαρροή. Οπού είναι παρόμοια με τη δοκιμή βραχυκυκλώματος που γίνεται για έναν μετασχηματιστή. Στη δοκιμή μπλοκαρισμένου ρότορα, ο άξονας της μηχανής κλειδώνεται ή εμποδίζεται από το να περιστραφεί από εξωτερικά μέσα. Το μπλοκάρισμα του άξονα ισοδυναμεί ουσιαστικά με το να γίνει η ολίσθηση ίση με τη μονάδα ( $n_r = 0$ ).

Στο κύκλωμα του δρομέα, έχουμε:

$$S_{maxT} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (28)$$

Με το ονομαστικό ρεύμα ( $I_{br}$ ) που ρέει στον στάτη, σημειώνεται η εφαρμοζόμενη τάση του στάτη ( $V_{br}$ ) και η εισερχόμενη ισχύς ( $P_{br}$ ). Πρέπει να σημειωθεί ότι η θέση του δρομέα σε κατάσταση φραγής επηρεάζει την τάση του στάτη ( $V_{br}$ ) που απαιτείται για τη ρύθμιση του  $I_{br}$ . Ως εκ τούτου, ένας μέσος όρος που υπολογίζεται για διάφορες θέσεις του δρομέα μπορεί ληφθεί.

$$R_{br} = \frac{P_{br}}{3I_{br}^2} \quad (29)$$

$$Z_{br} = \frac{V_{br}}{\sqrt{3}I_{br}} \quad (30)$$

$$X_{br} = \sqrt{Z_{br}^2 - R_{br}^2} \quad (31)$$

Είναι η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση  $Z_{br}$  που προσφέρει η μηχανή με μπλοκαρισμένο δρομέα. Καθώς η πραγματική ισχύς που καταναλώνεται κατά τη δοκιμή με μπλοκαρισμένο ρότορα είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου η πραγματική απώλεια ισχύος στη μηχανή, η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ισοδύναμης αντίστασης της μηχανής.

### 2.3.2 Πείραμα

Στην δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα ο κινητήρα τροφοδοτείται με τριφασικό ρεύμα μέχρι να φτάσει η τιμή του ρεύματος στην ονομαστική τιμή, ο οποίος λειτουργεί χωρίς φορτίο, οι τιμές του καταγράφονται στο πίνακα 2.2. Σε αυτή την δοκιμή όλη η διάταξη και τα στοιχεία είναι ίδια με τη δοκιμή κενού φορτίου, ακολουθείται η ίδια διαδικασία, με μόνη διαφορά ότι σε αυτή την δοκιμή μπλοκάρεται ο δρομέα ώστε να μην μπορεί να πραγματοποιηθεί περιστροφή.

Στο πείραμα τα στοιχεία είναι αυτά που έχουν αναφερθεί και πιο πάνω δηλαδή :

- Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα με τα ακόλουθα στοιχεία:

Ονομαστική τάση τροφοδοσίας Δ/Υ : 220/380 V

Ονομαστικό ρεύμα Δ/Υ : 4.32/2.5 A

Ονομαστική ισχύς : 1.0 kW

Συχνότητα: 50 Hz

Ταχύτητα :1385 rpm

Συντελεστής ισχύος :  $\cos\phi$  0.82

Βαθμός προστασίας : IP 44

- Αμπερόμετρο
- Βολτόμετρο
- 2 βατόμετρα
- Τριφασική πηγή τάσης

<b>Πίνακας 2</b>		
<b>Δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα</b>		
<b>V<sub>br</sub> (V)</b>	<b>I<sub>br</sub> (A)</b>	<b>P<sub>br</sub> (W)</b>
125	2,5	325

Οπού  $P_{nl} = (1+61) * 5$  με  $W_1=1$   $W_2=61$  και 5 είναι η κλίμακα των βατομετρων

**Πίνακας 2.2** Τιμές μετρήσεων επαγωγικού κινητήρα στην δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα

### 2.3.3 Υπολογισμοί

$$R_{br} = \frac{P_{br}}{3I_{br}^2} \quad (29)$$

$$Z_{br} = \frac{V_{br}}{\sqrt{3}I_{br}} \quad (30)$$

$$X_{br} = \sqrt{Z_{br}^2 - R_{br}^2} \quad (31)$$

$$R_{br} = \frac{325}{3 * 2.5^2} = 17.33\Omega \quad (32)$$

$$Z_{br} = \frac{125}{\sqrt{3} * 2.5} = 28.86\Omega \quad (33)$$

$$X_{br} = \sqrt{28.86^2 - 17.33^2} = 23.07\Omega \quad (34)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{br}}{2} = 23.07 = 11.54\Omega \quad (35)$$

$$X_m = X_{nl} - X_1 = 235.66 - 11.54 = 224.12\Omega \quad (36)$$

$$R_2 = R_{br} - R_1 = 17.33 - 8.7 = 8.63\Omega \quad (37)$$

Εφόσον επιτεύχθηκε ο υπολογισμός της  $R_2$  είναι εφικτό πλέον να υπολογίσουμε τα υπόλοιπα απαραίτητα μεγέθη.

Σύγχρονη γωνιακή Ταχύτητα περιστροφής :

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} \quad (38)$$

$$n_s = 1500 \quad (39)$$

$$\omega_s = \frac{2 * 3.14 * 1500}{60} = \frac{157rad}{s} \quad (40)$$

Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin :

$$V_{TH} = V_1 \frac{jX_m}{(R_1 + jX_1) + jX_m} \quad (41)$$

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} \quad (42)$$

$$X_{11} = X_m + X_1 = 235.66\Omega \quad (43)$$

$$V_{TH} = \frac{380}{\sqrt{3}} \angle 0 * \frac{224.12}{8.7 + 235.66} = 201.22 \angle 1.5 V \quad (44)$$

$$R_{TH} = \frac{X_m^2 R_1}{R_1^2 + X_{11}^2} = \frac{50229.7 * 8.7}{75.69 + 55535.63} = 7.85\Omega \quad (45)$$

$$X_{TH} = \frac{X_m(R_1^2 + X_1 X_{11})}{R_1^2 + X_{11}^2} = \frac{224.12(75.69 + 11.54 * 235.66)}{75.69 + 55535.63} = 11.26\Omega \quad (46)$$

Η μέγιστη ροπή είναι :

$$T_{\max} = \frac{3}{2\omega_s} \frac{V_{TH}^2}{R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (47)$$

$$T_{\max} = \frac{3}{314} \frac{40489.48}{7.85 + \sqrt{61.6 + (11.26 + 11.54)^2}} = 12.10 Nm \quad (48)$$

Ροπή εκκίνησης :

$$T_{st} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{TH}^2 R_2}{(R_{TH} + R_2)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (49)$$

$$T_{st} = \frac{3}{157} \frac{40489.48 * 8.63}{(7.85 + 8.63)^2 + (11.26 + 11.54)^2} = 8.436 Nm \quad (50)$$

Η ολίσθηση που αντιστοιχεί στην μέγιστη ροπή :

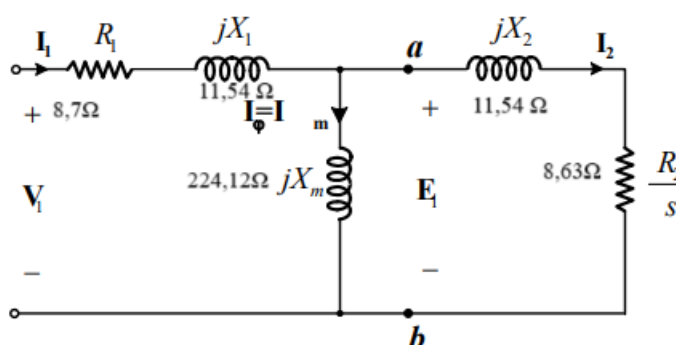
$$S_{\max T} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (51)$$

$$S_{\max T} = \frac{8.63}{\sqrt{61.6 + 259.95}} = 0.481 \quad (52)$$

Η ολίσθηση που αντιστοιχεί στις ονομαστικές στροφές :

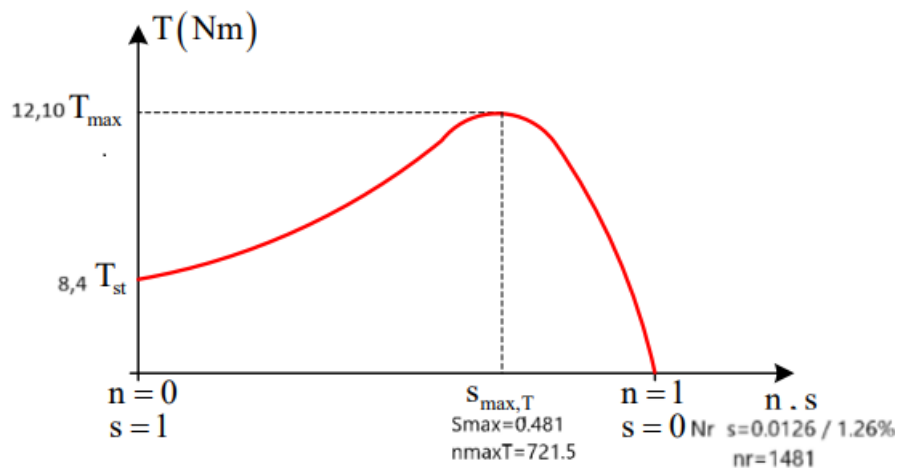
$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

$$s = \frac{1500 - 1481}{1500} = 0.01266 \text{ ή } 1.26\% \quad (53)$$



Εικόνα 2.5 Κύκλωμα μίας φάσης





Εικόνα 2.6 Χαρακτηριστική στροφών ροπής

### 2.3.4 Συμπέρασμα

Καθώς η ροπή της τριφασικής επαγωγής εξαρτάται από την ταχύτητά της, η σχέση μεταξύ τους δεν μπορεί να εκφραστεί με μια απλή εξίσωση. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται η καμπύλη ροπής-ταχύτητας για να εκφραστεί η μεταξύ τους σχέση.

Η χαρακτηριστική στροφών ροπής αποκαλύπτει από το σχήμα της, την αύξηση της ολίσθησης στον τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα, πέραν της τιμής  $s_{max,T}=0,481$ . Η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής  $T_{max}=12,10$  Nm, πράγμα που οδηγεί σε μείωση της παραγόμενης ροπής καθώς και των στροφών. Σε αυτό το εύρος, της χαρακτηριστικής, ο κινητήρας δεν είναι σε θέση να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις του φορτίου. Με αποτέλεσμα, η αύξηση της ολίσθησης οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ροπής έως μια μέγιστη τιμή, καθορίζοντας τα όρια της ευσταθούς και ασταθούς περιοχής λειτουργίας του κινητήρα.

Ακόμα, βλέπουμε πως η ολίσθηση του κινητήρα είναι χαμηλή,  $s=0,0126$ , υποδεικνύοντας υψηλές στροφές λειτουργίας που πλησιάζουν τις συχνότητες συγχρονισμού, με εξαιρετική απόδοση. Επιπλέον, κατά τη δοκιμή κενού φορτίου, η ταχύτητα περιστροφής  $n_r$  είναι σχεδόν ίδια με την ταχύτητα συγχρονισμού  $n_s$ , επιτρέποντας την αμελητέα ανάλυση του ισοδύναμου ανοιγμένου κλάδου του τυλίγματος του δρομέα.

### **3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Προσομοίωση τριφασικού ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα με την χρήση του MATLAB SIMULINK**

Μετά την επίτευξη των πειραματικών διαδικασιών, δημιουργούνται τα ισοδύναμα κύκλωμα με μορφή προσομοίωσης στο λογισμικό Matlab Simulink με σκοπό την επαλήθευση της διαδικασίας.

Το Matlab Simulink είναι ένα ισχυρό εργαλείο για τη μοντελοποίηση κινητήρων και τον σχεδιασμό συστημάτων ελέγχου που επικεντρώνονται στην κίνηση και τη δυναμική. Η χρήση του για τη μοντελοποίηση κινητήρων προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στον χώρο των μηχανικών που χρειάζονται μια επαλήθευση ή υλοποίηση ενός μοντέλου. Το εργαλείο αυτό, παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον, στο οποίο μπορεί να σχεδιαστεί ένα μοντέλο κινητήρα χρησιμοποιώντας μπλοκ που αντιπροσωπεύουν διάφορα υποσυστήματα. Ακόμα υπάρχουν ειδικές βιβλιοθήκες που περιλαμβάνουν μπλοκ για τη μοντελοποίηση διάφορων τύπων κινητήρων, όπως DC, AC, βηματικούς, συνεχείας και άλλους. Είναι εφικτό να εκτελεστούν προσομοιώσεις με τις οποίες αξιολογείται η συμπεριφορά του κινητήρα σε διάφορες συνθήκες και εισόδους. Επιπροσθέτως το Simulink παρέχει εργαλεία για την ανάλυση της απόκρισης του κινητήρα σε διάφορα σήματα εισόδου, όπως βηματική είσοδος ή παλμική είσοδος καθώς και για την σχεδίαση ελεγκτών, οι οποίοι μπορούν να ενσωματωθούν στο μοντέλο για τον έλεγχο της κίνησης του κινητήρα.

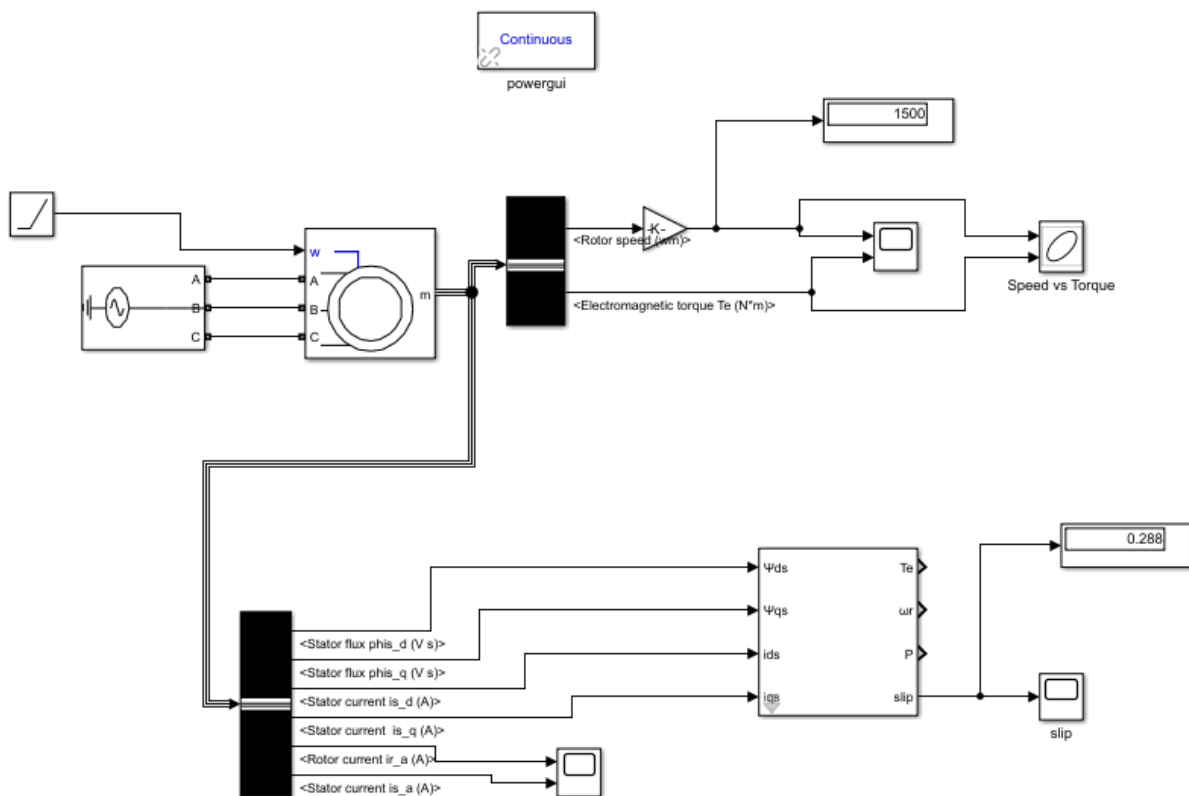
Με τη χρήση του Matlab Simulink για τη μοντελοποίηση κινητήρων, δύναται να εξερευνηθεί η συμπεριφορά τους, να βελτιστοποιηθεί ο έλεγχος και να προσομοιαστούν οι διάφορες συνθήκες λειτουργίας προτού προχωρήσουμε στην υλοποίησή τους σε πραγματικό περιβάλλον.

#### **3.1 Διαδικασία δημιουργίας τριφασικού κινητήρα κενού φορτίου**

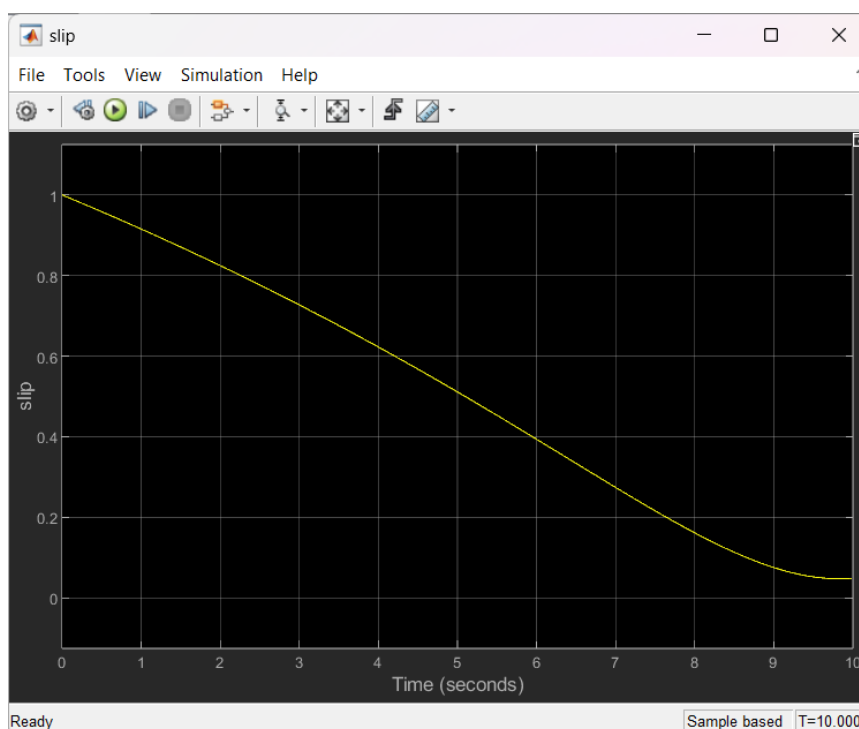
Στο Matlab Simulink υλοποιούνται τα πειραματικά μοντέλα της πειραματικής διαδικασίας του τριφασικού ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα σε συνδεσμολογία αστέρα.

Αρχικά για την προσομοίωση κενού φορτίου χρησιμοποιείται μια τριφασική πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος 380V και συχνότητα 50 hz από την οποία φεύγουν οι ακροδέκτες των 3 φάσεων (A,B,C) . Οι οποίοι, πάνε στον στάτη του μπλοκ κινητήρα και από την είσοδο w (που είναι η είσοδος των στροφών μας) τοποθετείται ένα βήμα (step). Από την έξοδο m ( measurements ) παίρνονται οι μετρήσεις του πειράματος που πηγαίνουν σε 2 μπλοκ selector, τα οποία χρησιμεύουν στο να εξάγουν τα δεδομένα/μετρήσεις που χρειάζονται. Ο πρώτος selector συνδέεται με τον κόμβο του κέρδους ενίσχυσης, το οποίο έχει τύπο  $50/(2*\pi)n$  προκειμένου να γίνει rpm από rad/s, δίνοντας την ταχύτητα περιστροφής και μετριοούνται οι στρόφες του κινητήρα μας. Η άλλη έξοδος του selector δίνει την ροπή η οποία συνδέεται με το scope, όπου σε συνάρτηση με την ταχύτητα, παρέχουν την γραφική παράσταση στροφών ροπής της από το μπλοκ του παλμογράφου.

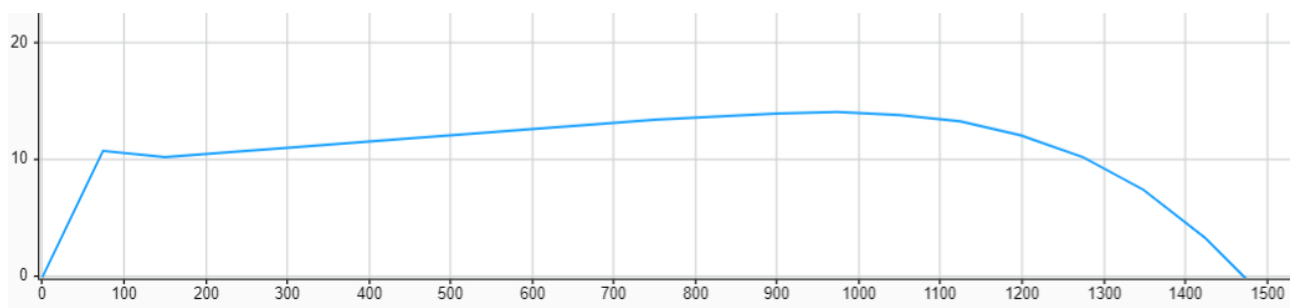
Το δεύτερο selector μπλοκ δίνει τις τιμές των ρευμάτων τυμπάνου του στάτη και του δρομέα από τις οποίες οδηγείται σε ένα scope. Ακόμα δίνονται οι έξοδοι των ρευμάτων των αξόνων d, q αλλά και οι μαγνητικές ροές των αξόνων d, q του στάτη οι οποίες οδηγούνται σε ένα υποσύστημα που υπολογίζει την ολίσθηση η οποία φαίνεται στο όργανο μέτρησης και είναι συνδεδεμένα με ένα scope (με την ονομασία slip) ώστε να παρατηρηθεί η κυματομορφή .



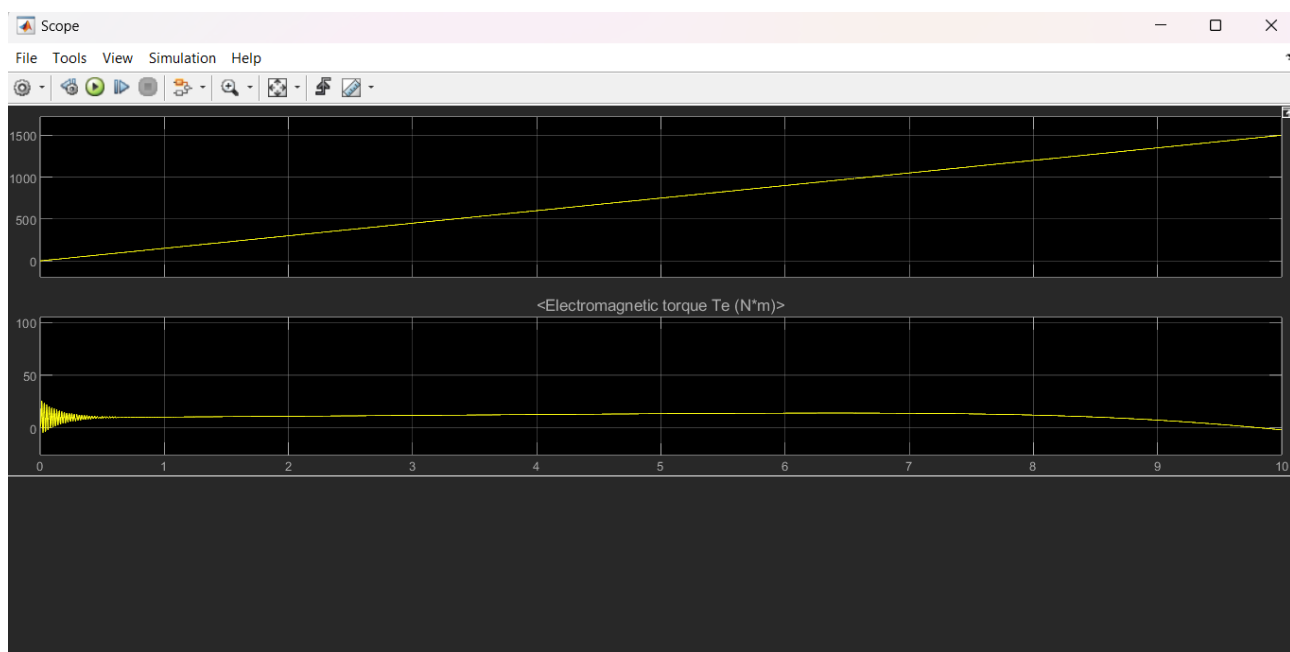
Εικόνα 3.1 Κύκλωμα τριφασικού κινητήρα στο Matlab Simulink



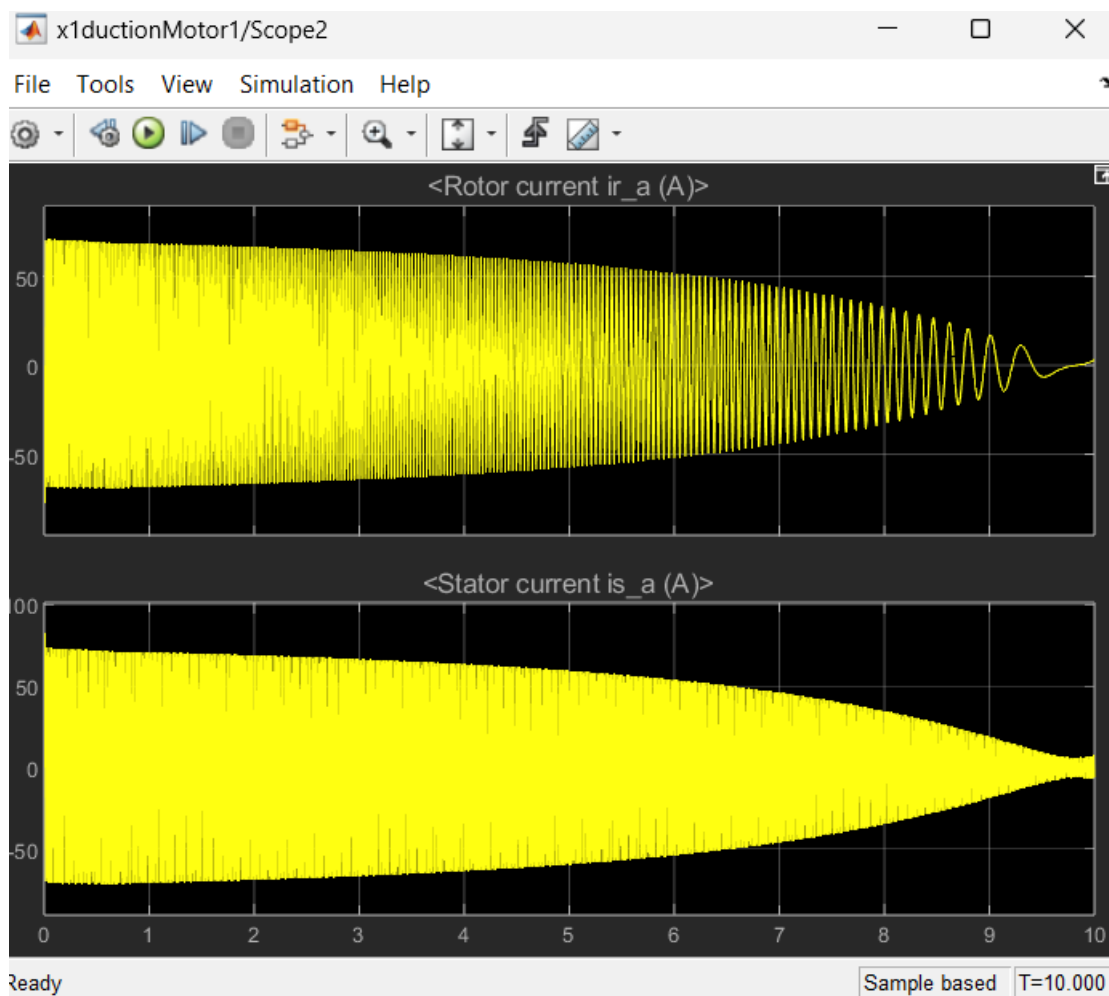
Εικόνα 3.2 Κυματομορφή ολίσθησης



Εικόνα 3.3 Χαρακτηριστική στροφών ροπής



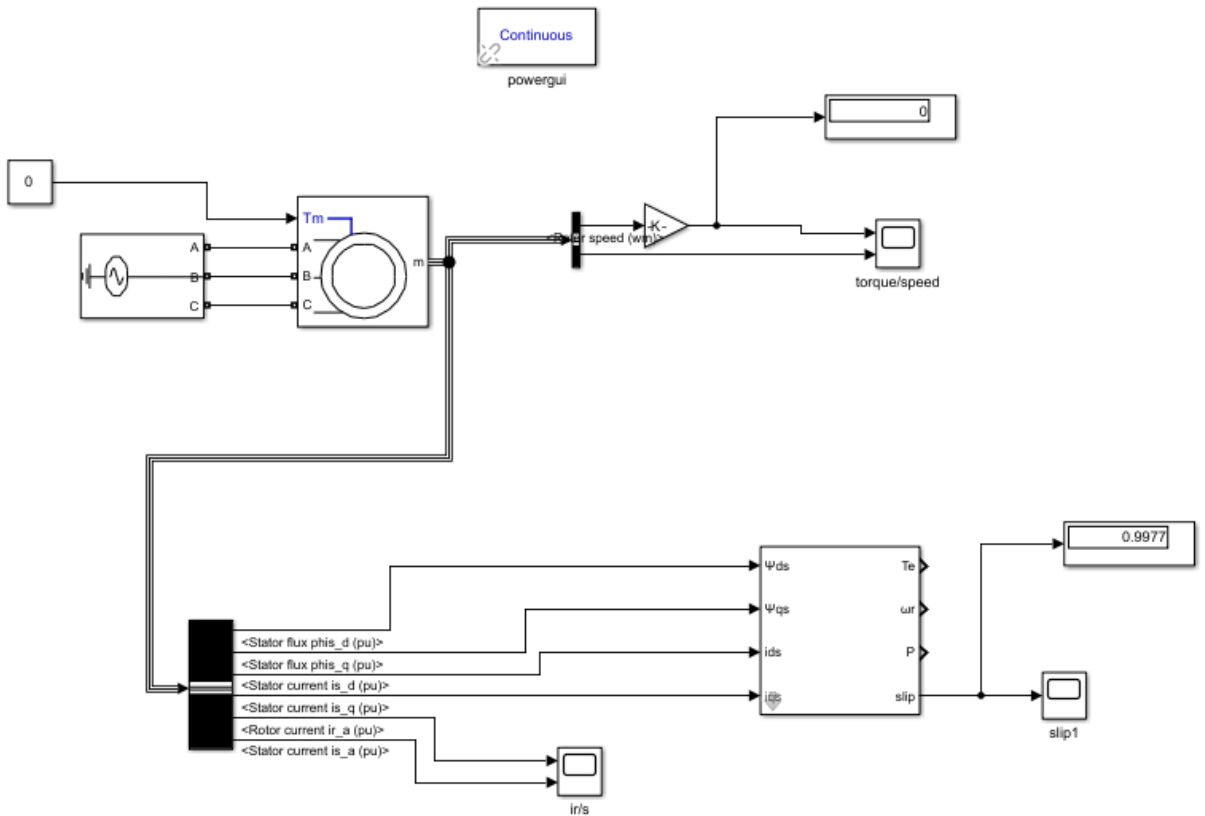
Εικόνα 3.4 Κυματομορφή στροφών και ροπής ξεχωριστά



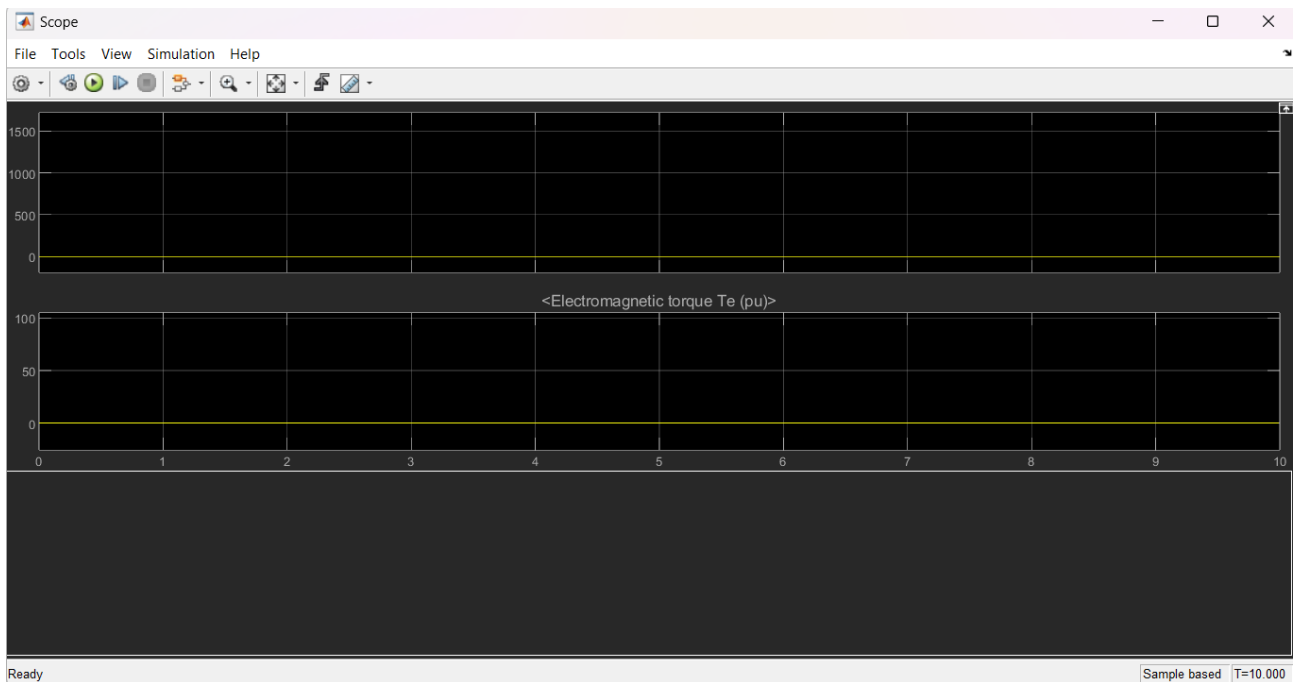
Εικόνα 3.5 Κυματομορφές ρεύματος του στάτη και του δρομέα

### 3.2 Διαδικασία δημιουργίας μοντέλου τριφασικού κινητήρα ακινητοποιημένου δρομέα

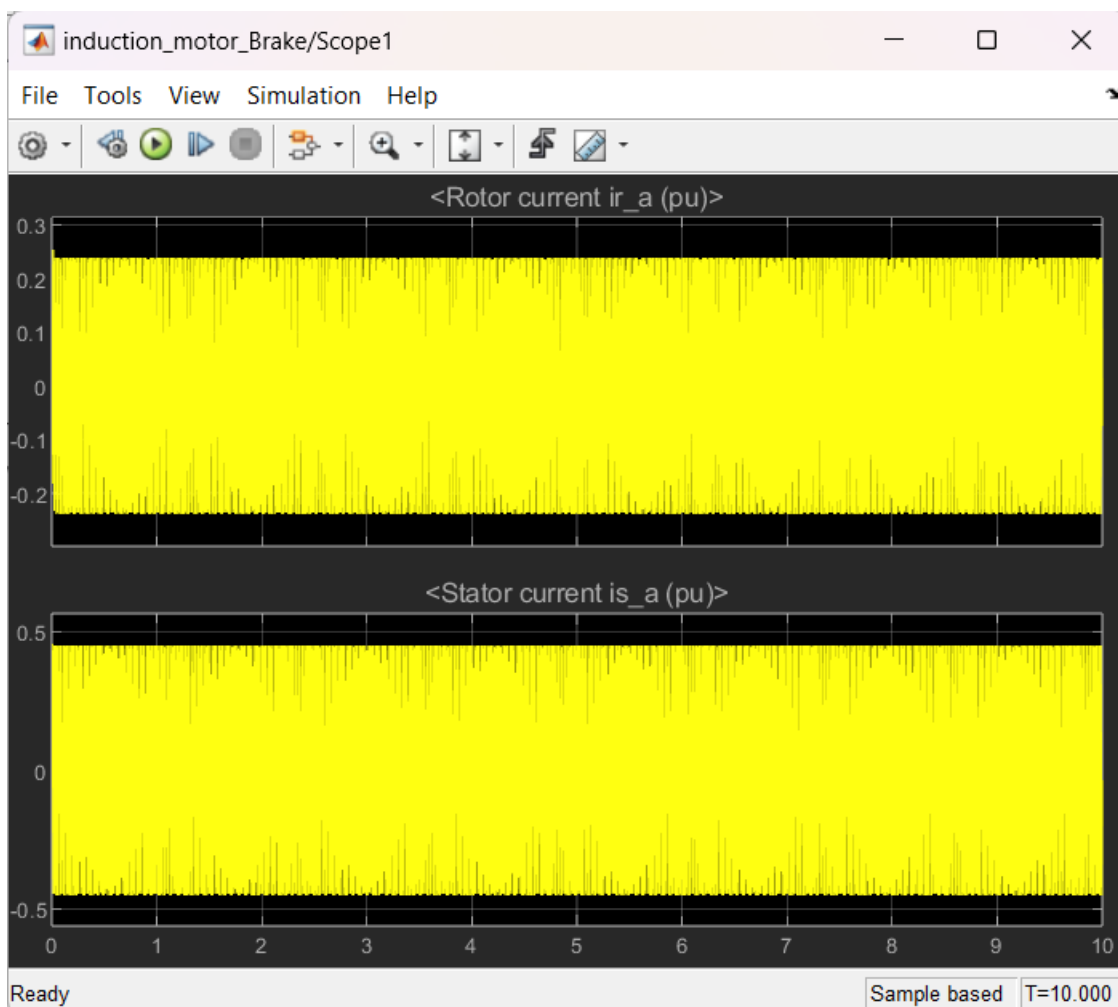
Για την δοκιμή του ακινητοποιημένου δρομέα χρησιμοποιείται η ίδια συνδεσμολογία με μικρές διαφορές. Αλλάζεται το block του κινητήρα από ώστε να δέχεται σαν είσοδο του ροπή και στην συνέχεια αντικαθιστούνται τα bus selectors ώστε να είναι συμβατά με το block του κινητήρα



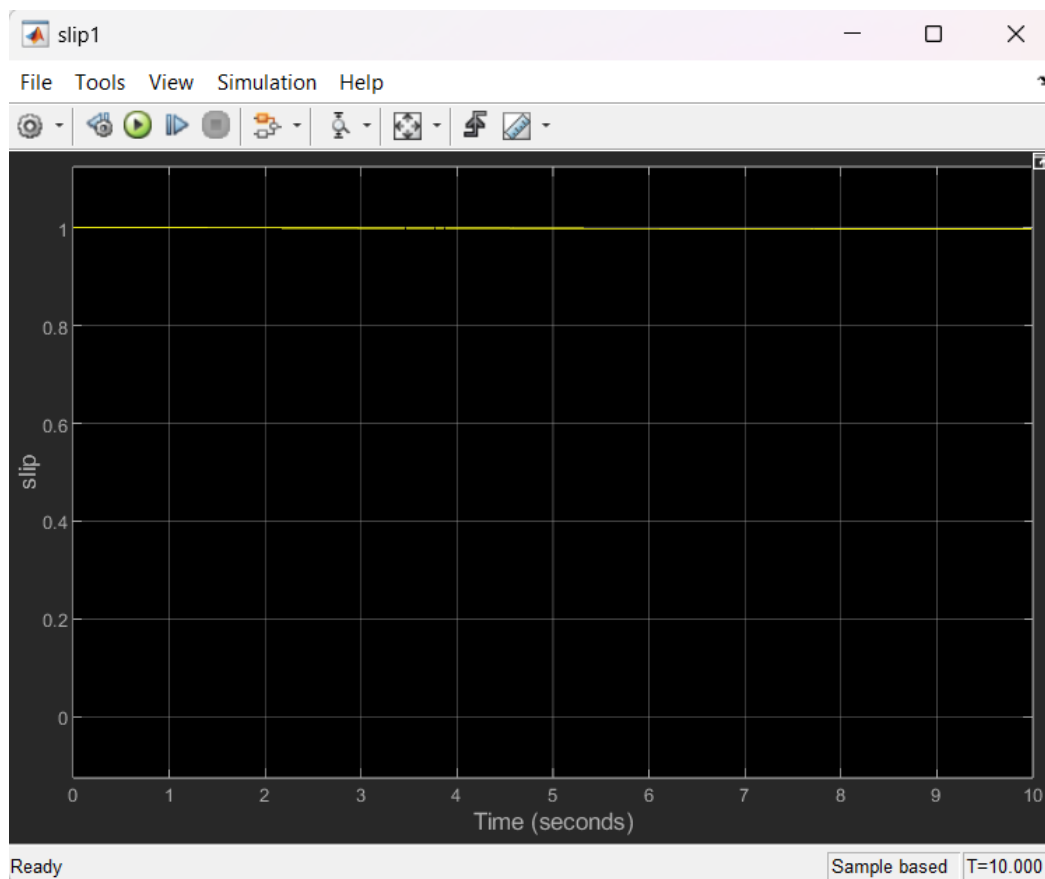
Εικόνα 3.6 Κύκλωμα τριφασικού κινητήρα ακινητοποιημένου δρομέα στο Matlab Simulink



Εικόνα 3.7 Κυματομορφή Στροφών και ροπής ξεχωριστά



Εικόνα 3.8 Κυματομορφές ρεύματος του στάτη και του δρομέα



Εικόνα 3.9 Κυματομορφή ολίσθησης

### 3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την προσομοίωση που υλοποιήθηκε παρατηρείται πως για το πείραμα της δοκιμής κενού φορτίου η κυματομορφή στροφών, ροπής ξεχωριστά και η κυματομορφή της ολίσθησης έχουν μια ορθή και αναμενόμενη μορφή. Επίσης οι Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου και δρομέα έχουν ικανοποιητική μορφή ωστόσο υπάρχει μια μικρή διόγκωση λόγω της παλμικής φύσης της τάσης τροφοδοσίας. Η κυματομορφή της στροφής – ροπών έχει απόκλιση από την πειραματική και την θεωρητική μορφή καθώς ξεκινάει από το 0 ενώ θα έπρεπε να ξεκινάει από την τιμή του Tst αλλά η υπόλοιπη καμπύλη έχει καλή μορφή αλλά με μικρότερη καμπυλότητα. Ακόμα οι τιμές είναι λίγο μεγαλύτερες από τις θεωρητικές.

Εν συνεχεία για την δοκιμή του ακινητοποιημένου δρομέα παρατηρούμε πως όλες οι τιμές και οι κυματομορφές είναι άριστες και αντιπροσωπεύουν πλήρως τις τιμές και τις μορφές του πειραματικού μέρους.

Εν κατακλείδι η προσομοίωση του Matlab Simulink ήταν επιτυχημένη καθώς οι τιμές της προσομοίωσης με τις πειραματικές τιμές ήταν ίδιες με μικρές αποκλίσεις. Επιπροσθέτως η «μύτη» που παρουσιάζει η κυματομορφή στροφών- ροπής προέρχεται από την απότομη αρχική αυξομείωση της τάσης και την απότομη κυμάτωση της ροπής η οποία φαίνεται και από την στροφών ροπής.

Αυτές οι απώλειες και οι διαφοροποιήσεις οφείλονται σε απώλειες των οργάνων, της τάσης τροφοδοσίας, της πηγής του πειράματος που δεν μπορεί να είναι 380V επακριβώς, καθώς ακόμα λόγω της χρόνιας χρήσης του εξοπλισμού αλλά και από την αντίσταση των καλωδίων που μπορεί να συμβάλουν στις απώλειες. Από τα παραπάνω φανερώνεται η βαρύτητα και η εγκυρότητα του Matlab Simulink, εφόσον χρησιμοποιηθεί ορθά, ο θεμελιώδης ρόλος που μπορεί να έχει για την ανάλυση και την πρόβλεψη στην μηχανολογική επιστήμη, είναι αδιαπραγμάτευτος.



## Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

1. “Basic Principles of AC Induction Motors | FläktGroup.” Accessed May 31, 2023. <https://www.flaktgroup.com/en/news/news-archive/2020/july/basic-principles-of-ac-induction-motors/>.
2. “Electric Motor.” In *Wikipedia*, May 12, 2023. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electric\\_motor&oldid=1154456928#Bibliography](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electric_motor&oldid=1154456928#Bibliography).
3. “History - The Invention of the Electric Motor 1800-1854.” Accessed May 26, 2023. <http://www.sze.hu/~szenasy/VILLVONT/vill%20vont%20bevezhez/History%20-%20The%20invention%20of%20the%20electric%20motor%201800-1854.html>.
4. “Implement Single-Phase Induction Motor Drive - Simulink.” Accessed December 4, 2023. <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/singlephaseinductionmotordrive.html>.
5. “MAS.865 2018 How to Make Something That Makes (Almost) Anything.” Accessed May 27, 2023. <http://fab.cba.mit.edu/classes/865.18/motion/brushless/index.html>.
6. “Motors.” Accessed May 27, 2023. <http://www.sparkmuseum.com/MOTORS.HTM>.
7. sdv4299. “How to Connect a 3-Phase Motor in Star and Delta?” *Electrical Volt* (blog), October 4, 2022. <https://www.electricalvolt.com/2022/10/3-phase-motor-star-and-delta-connection/>.
8. “Three-Phase Induction Motor - Simulink.” Accessed June 16, 2023. <https://www.mathworks.com/help/autoblks/ref/inductionmotor.html>.
9. “Ηλεκτρομαγνητισμός.” Accessed June 1, 2023. [http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/2011/Fysika\\_ST-Dimotikou\\_html-empl/index\\_9.html](http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/2011/Fysika_ST-Dimotikou_html-empl/index_9.html).
10. “Μαγνητικό πεδίο.” In *Βικιπαίδεια*, September 13, 2022. [https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%9C%CE%B1%CE%B3%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8C\\_%CF%80%CE%B5%CE%B4%CE%AF%CE%B F&oldid=9665592](https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%9C%CE%B1%CE%B3%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CF%80%CE%B5%CE%B4%CE%AF%CE%B F&oldid=9665592).
11. “Μαγνητισμός.” In *Βικιπαίδεια*, January 18, 2022. <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%9C%CE%B1%CE%B3%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82&oldid=9261893>.
12. Μετάδοση Ισχύος. “Αρχές λειτουργίας των ηλεκτρικών κινητήρων.” Accessed May 29, 2023. <https://www.metadosi-ischios.gr/arches-leitoyrgias-ton-ilektrikon-kinitiron/>.
13. Σημειώσεις εργαστηρίου ηλεκτρικών μηχανών II (2022-203) Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής