



Μοντελοποίηση, Προσομοίωση και Έλεγχος Λειτουργίας
Μονοφασικών και Τριφασικών Επαγωγικών Ηλεκτρικών
Κινητήρων Εναλλασσόμενου Ρεύματος στη Μόνιμη και
Μεταβατική-Δυναμική Κατάσταση Λειτουργίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΑΪΤΣΙΔΗΣ

Επιβλέποντες Καθηγητές:

**Ελευθέριος Τσουκαλάς
Καθηγητής Π.Θ.**

**Παναγιώτα Τσομπανοπούλου
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Π.Θ.**



Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΒΟΛΟΣ 2017



Modeling, Simulation and Operation Control of Single-phase
and Three-phase induction electric motors (AC) in Steady
State and Transient-Dynamic State

DIPLOMA THESIS

IOANNIS AITSIDIS

Supervisors:

Eleftherios Tsoukalas
Professor UTH

Panayota Tsobanopoulou
Assosiate Professor UTH



Department of Electrical and Computer Engineering

University of Thessaly

VOLOS 2017

Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους, Ελευθέριο Τσουκαλά και Γεώργιο Περαντζάκη για την ευκαιρία που μου δόθηκε ώστε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο, όπως και την κ. Παναγιώτα Τσομπανοπούλου που συμμετείχε στην επίβλεψη της εργασίας μου.

Ξεχωριστά θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους γονείς μου για την υπομονή και κατανόηση που μου έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της μοντελοποίησης, της προσομοίωσης και του ελέγχου λειτουργίας των Μονοφασικών και Τριφασικών Επαγωγικών Ηλεκτρικών Κινητήρων Εναλλασσόμενου Ρεύματος στη Μόνιμη και Μεταβατική-Δυναμική Κατάσταση Λειτουργίας.

Αποτυπώνεται η κατασκευαστική διαμόρφωση μονοφασικών και τριφασικών επαγωγικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα και κινητήρων με τυλιγμένο δρομέα (κινητήρες με δακτυλίδια). Γίνεται ανάλυση της λειτουργίας μηχανών με και χωρίς φορτίο σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση, όπως επίσης γενικευμένη ανάλυση ασύγχρονων μηχανών και ανάπτυξη των γενικών εξισώσεων για τη διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς των μηχανών. Χρησιμοποιούνται οι μετασχηματισμοί Clarke και Park για τη μετάβαση από το τριφασικό a-b-c σύστημα αναφοράς στο διφασικό $qd0$ και α - β πλαίσιο αναφοράς. Περιγράφονται και απεικονίζονται τα ισοδύναμα κυκλώματα στη μόνιμη και μεταβατική κατάσταση και αναλύονται οι γενικευμένες εξισώσεις στο σταθερό πλαίσιο αναφοράς $qd0$ και στο πλαίσιο αναφοράς στρεφόμενο με τη σύγχρονη ταχύτητα $qd0$, ενώ ακόμη γίνεται λόγος για την γραμμικοποίηση των πραγματικών μοντέλων των μηχανών στο επίπεδο αναφοράς $qd0$.

Επιπρόσθετα γίνεται διαμόρφωση των projects προσομοίωσης των μηχανών για τη διερεύνηση και μελέτη της μεταβατικής-δυναμικής συμπεριφοράς των μηχανών (εκκίνηση, απόρριψη ή απότομη μεταβολή του φορτίου, προβλήματα ευστάθειας κ.λ.π.) με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού Matlab/Simulink.

Θα αναλυθεί ο έλεγχος λειτουργίας των μηχανών και στα τέσσερα τεταρτημόρια, όπως έλεγχος στροφών, ροπής, δυναμικής πέδησης κ.λπ., με τη χρήση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος (αντιστροφείς κ.λπ.), και τέλος θα γίνει ανάπτυξη και παρουσίαση των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου λειτουργίας τριφασικού επαγωγικού κινητήρα με τις μεθόδους «Έλεγχος λειτουργίας με σταθερό U/f » και «Έλεγχος με προσανατολισμένο πεδίο».

Abstract

The purpose of the present diploma thesis is the analysis of modeling, simulation and operation control of Single phase and Three phase induction electric motors (AC) in Steady State and Transient-Dynamic state.

The Structural Design of Single phase and Three phase motors Squirrel cage rotor and Slip ring rotor (or wound rotor) is imprinted. The operation of the electric motors with or without load is analyzed. There is also a generalized analysis of induction motors and deployment of generalized equations to investigate the transient behavior of the motors. The transformations of Clarke and Park are used for the transition from the three phase a-b-c reference frame to the two phase qd0 and α - β reference frame. The equivalent circuits of steady state and transient state are described and depicted as well. Subsequently the generalized equations in stationery reference frame qd0 and in rotating reference frame with the synchronous speed qd0 are analyzed, and additionally the Linearization of the actual motor models of qd0 reference frame is referred.

In the next stage there are project simulations of the motors to investigate and research the transient-dynamic behavior of the motors (start, sudden load variations, stability issues, etc), using Matlab/Simulink software.

Also there is an operation analysis of the motors in all four quadrants, concerning rpm control, torque control, dynamic braking using power electronics such as inverters. The last part will be the deployment and presentation of automatic operation control of an AC induction motor using the methods of "Operation Control with stationary U/f" and "Operation Control with Oriented Field".

Πρόλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εξεταστούν οι πτυχές της λειτουργίας των τριφασικών και μονοφασικών επαγωγικών ασύγχρονων κινητήρων. Βασικός πυλώνας πληροφοριών και υλικού της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε το σύγγραμμα "Dynamic Simulation of Electric Machinery, using Matlab/Simuling", του Chee-Mun Ong. Γίνεται ιδιαίτερη μνεία στο βιβλίο αυτό για να τονιστεί η πολύ σημαντική συμβολή του στη διεκπεραίωση της διπλωματικής εργασίας.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στους ασύγχρονους επαγωγικούς κινητήρες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο οι μονοφασικοί και τριφασικοί κινητήρες εξετάζονται κατασκευαστικά ώστε να υπάρχει μια πιο απτή εικόνα βλέποντας το εσωτερικό τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσονται κάποιες βασικές έννοιες για τη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών όπως επίσης και οι μετασχηματισμοί που είναι απαραίτητοι για την ανάλυση των κινητήρων.

Το τέταρτο κεφάλαιο αποτελεί τον πυρήνα της εργασίας αυτής, καθώς γίνεται μια εκτενής ανάλυση και μοντελοποίηση των μηχανών στη μόνιμη και μεταβατική κατάσταση όπως επίσης γίνεται και ανάλυση των εκτελέσεων προσομοίωσης μέσω του ειδικού λογισμικού Matlab/Simulink.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζεται ο έλεγχος του κινητήρα και αναλύονται κάποιες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της λειτουργίας.

Preamble

The present diploma thesis is examining the operation aspects of single phase and three phase induction electric motors. The main source of information to write the diploma thesis was the book "Dynamic Simulation of Electric Machinery, using Matlab/Simuling", of Chee-Mun Ong. There is a special mention in that book, so its great contribution is underlined.

In the first chapter there is a sort introduction in asynchronous induction motors.

In the second chapter it is explained how the electric motor is manufactured and its parts are distinguished, so the reader can understand their interior.

In the third chapter the basic concepts for the operation of the electric motors are deployed, and also it shown which transformations are necessary for the mathematical analysis of the motors.

The forth chapter constitutes the marrow of this diploma thesis, as there is an extensive analysis on the motors modeling in steady state and transient state, and additionally the Matlab/Simulink simulations' results are shown and are discussed.

In the fifth and last chapter non-automatic and automatic methods of operation control are analyzed also.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 :	10
Εισαγωγή στους ασύγχρονους επαγωγικούς κινητήρες	10
Κεφάλαιο 2:	11
Κατασκευαστική διαμόρφωση και Αρχή λειτουργίας μονοφασικών και τριφασικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου και τυλιγμένου δρομέα.	
2.1 Εισαγωγή.....	11
2.2 Κατασκευή τριφασικού επαγωγικού κινητήρα.....	12
2.2.1 Κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα.....	13
2.2.2 Κινητήρες τυλιγμένου δρομέα (με δαχτυλίδια).....	15
2.3 Κατασκευή Μονοφασικού κινητήρα.....	16
2.4 Αρχή λειτουργίας Τριφασικών κινητήρων	19
Κεφάλαιο 3:	21
Βασικές έννοιες και μετασχηματισμοί.	
3.1 Εισαγωγή.....	21
3.2 Λειτουργία στα τέσσερα τεταρτημόρια.....	22
3.3 Ηλεκτρικά ακτίνια και σύγχρονη ταχύτητα.....	23
3.4 Μαγνητική ροή ανά πόλο και επαγόμενη τάση.....	24
3.4.1 Τιμή RMS της επαγόμενης τάσης.....	26
3.4.2 Συντελεστής Κατανομής.....	27
3.4.3 Συντελεστής βήματος (Pitch factor).....	27
3.4.4 Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.....	28
3.5 Επαγωγιμότητες τυλιγμάτων.....	29
3.6 Ανάπτυξη ροπής.....	30
3.7 Απόδοση και απώλειες.....	31
3.8 Τριφασικοί μετασχηματισμοί.....	33
3.8.1 Μετασχηματισμός του Clarke.....	33
3.8.2 Μετασχηματισμός του Park.....	34
Κεφάλαιο 4 Τριφασικοί Ασύγχρονοι Επαγωγικοί Κινητήρες	38
4.1 Μοντελοποίηση και Ισοδύναμα κυκλώματα για την μόνιμη κατάσταση.....	38
4.2 Λειτουργία εν κενώ.....	39
4.2.1 Δρομέας εν στάση.....	39
4.2.2 Περιστροφή δρομέα με $I_s = 0$	41
4.3 Λειτουργία υπό φορτίο.....	42

4.4 Κυκλωματικό μοντέλο τριφασικού κινητήρα.....	45
4.4.1 Εξισώσεις Τάσης.....	45
4.5 Μοντελοποίηση κινητήρα στο αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς dq0...48	
4.5.1 Εξισώσεις τάσης dq0.....	50
4.5.2 Σχέση πεπλεγμένης μαγνητικής ροής.....	51
4.5.3 Εξίσωση ροπής dq0.....	54
4.6 Σταθερό και σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.....	56
4.7 Μοντέλο μόνιμης κατάστασης.....	58
4.8 Μοντέλο μεταβατικής κατάστασης.....	67
4.9 Γραμμικοποίηση στο dq0 πλαίσιο.....	72
4.9.1 Εξισώσεις προς γραμμικοποίηση.....	72
4.9.2 Γραμμικοποίηση εξισώσεων.....	73
4.10 Λειτουργία Ασύγχρονου Μονοφασικού Κινητήρα.....	77
4.10.1 Εξαγωγή ισοδύναμου κυκλώματος στο dq0 σταθερό πλάσιο αναφοράς.....	77
4.10.2 Ανάλυση μόνιμης κατάστασης.....	83
4.10.3 Μέση ροπή στην μόνιμη κατάσταση.....	87
4.11 Projects Προσομοίωσης.....	88
4.11.1 Προσομοίωση τριφασικού επαγωγικού κινητήρα.....	88
4.11.2 Προσομοίωση μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα.....	91
Κεφάλαιο 5 Έλεγχος λειτουργίας ασύγχρονων κινητήρων.....	108
5.1 Ρύθμιση στροφών ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.....	108
5.1.1 Μεταβολή της συχνότητας ρεύματος τροφοδότησης του δικτύου.....	108
5.1.2 Μεταβολή του αριθμού των πόλων.....	109
5.1.3 Μεταβολή της ολίσθησης.....	109
5.2 Μέθοδοι πέδησης ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων.....	109
5.2.1 Δυναμική πέδηση.....	109
5.2.2 Δυναμική πέδηση με συνεχές ρεύμα.....	110
5.2.3 Πέδηση με αλλαγή του αριθμού των πόλων.....	112
5.3 Τεχνικές Αυτομάτου Ελέγχου Επαγωγικού Κινητήρα.....	113
5.3.1 Έλεγχος λειτουργίας με σταθερό V/f.....	113
5.3.2 Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμένο πεδίο.....	115
5.3.3 Σύγκριση Τεχνικών Αυτομάτου Ελέγχου.....	116
Βιβλιογραφικές Αναφορές και Παραθέσεις.....	119

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή στους ασύγχρονους επαγωγικούς κινητήρες

Ο ηλεκτρικός κινητήρας αποτελεί μια διάταξη που χρησιμοποιεί ως είσοδο ηλεκτρική ενέργεια και την μετατρέπει σε μηχανική για την παραγωγή ωφέλιμου έργου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με τους ασύγχρονους κινητήρες. Οι ασύγχρονοι ή επαγωγικοί κινητήρες είναι κινητήρες που η τροφοδοσία τους είναι εναλλασσόμενου ρεύματος και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους τριφασικούς και τους μονοφασικούς.

Η ιδέα των ασύγχρονων ή επαγωγικών κινητήρων διατυπώθηκε από τον Νικόλα Τέσλα στα τέλη του 19ου αιώνα. Με τη πάροδο του χρόνου οι επαγωγικοί κινητήρες βελτιώθηκαν ως προς τη ποιότητα των υλικών τους, την συναρμολόγηση τους, ως προς το μέγεθος τους, καθώς καταλαμβάνουν πολύ μικρότερο χώρο, αλλά και ως προς το κόστος κατασκευής τους. Η ουσιαστική βελτίωση της απόδοσης τους επήλθε μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973, όταν και οι κατασκευαστές αποφάσισαν να φτιάξουν κινητήρες υψηλής απόδοσης εκμεταλλευόμενοι το χαμηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κινητήρες υψηλής απόδοσης αν και ακριβότεροι από τους συμβατικούς επαγωγικούς κινητήρες απέκτησαν μεγάλο μερίδιο της αγοράς.

Η ονομασία της κατηγορίας “ασύγχρονοι” προέρχεται από το γεγονός πως λειτουργούν πάνω η κάτω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Η ονομασία “επαγωγικοί” προέρχεται από το γεγονός πως η τάση που ουσιαστικά θέτει σε κίνηση τον κινητήρα προέρχεται από επαγωγή. Βεβαίως όλα αυτά θα αναλυθούν παρακάτω στις επόμενες ενότητες.

Ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας είναι από τις διασημότερες ηλεκτρικές μηχανές αφού χρησιμοποιούνται εκτενώς σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Η αιτία της τόσο διαδεδομένης χρήσης του είναι η απλότητα της κατασκευής του, το χαμηλό κόστος κατασκευής και το χαμηλό κόστος συντήρησης. Ενδεικτικά αξίζει να σημειωθεί πως ένα πολύ μεγάλο ποσοστό της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας απορροφάται από αυτούς. Το ποσοστό αυτό κυμαίνεται περίπου στο 60%. Ο μονοφασικός επαγωγικός κινητήρας από την άλλη, είναι διαδεδομένος κυρίως σε συσκευές οικιακής χρήσης καθώς δεν υπάρχει δυνατότητα χρήσης τριφασικής ισχύος. Μπορεί να υστερούν σε σχέση με τους τριφασικούς γιατί έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης, παράγουν περισσότερο θόρυβο, κ.α, αλλά παρόλα αυτά χρησιμοποιούνται σε συσκευές μικρής ισχύος, καθώς αν και έχουν μία φάση, αν τεθούν σε λειτουργία, θα συνεχίσουν τα περιστρέφονται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Κατασκευαστική διαμόρφωση και Αρχή λειτουργίας μονοφασικών και τριφασικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου και τυλιγμένου δρομέα

2.1 Εισαγωγή

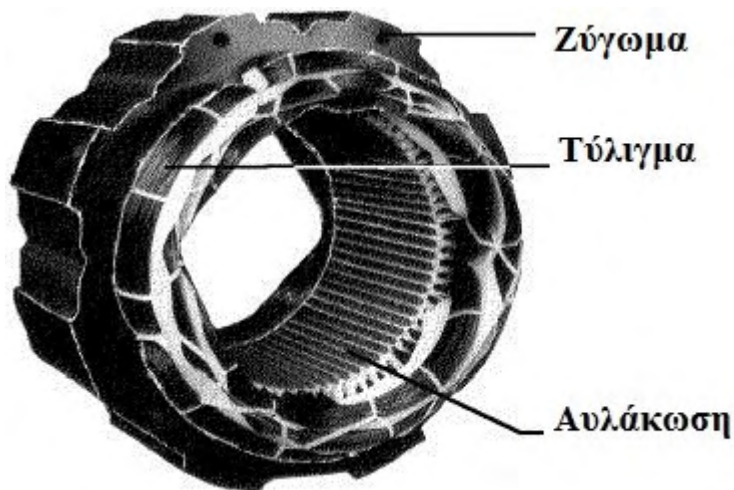
Οι ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές ταχύτητας διακρίνονται στους επαγωγικούς κινητήρες, όταν λειτουργούν κάτω από τη σύγχρονη ταχύτητα και στις επαγωγικές γεννήτριες όταν λειτουργούν πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Ονομάστηκαν και ασύγχρονοι ακριβώς επειδή δεν αναπτύσσουν ροπή, με τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής. Είναι λιγότερο ακριβοί από τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) και τους σύγχρονους κινητήρες και αποτελούν την κινητήριο δύναμη των βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Σαν κινητήρες είναι αρκετά στιβαροί και χρειάζονται λίγη συντήρηση. Παρόλα αυτά η ταχύτητα τους δεν ελέγχεται το ίδιο εύκολα με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Χρειάζονται αρκετό ρεύμα εκκίνησης, περίπου 6-8 φορές την τιμή του ονομαστικού ρεύματος, και λειτουργούν με πολύ μικρό συντελεστή ισχύος όταν έχουν μικρό φορτίο. Ο επαγωγικός τριφασικός κινητήρας αποτελείται από δύο τυλίγματα εναλλασσόμενου ρεύματος, το τύλιγμα του στάτη ή τυμπάνου και το τύλιγμα του δρομέα. Το τύλιγμα του στάτη αποτελείται από τρία όμοια κατανεμημένα μονοφασικά τυλίγματα, τα οποία απέχουν χωρικά 120 ηλεκτρικές μοίρες το ένα από το άλλο. Ο αριθμός των πόλων των τυλιγμάτων για δεδομένη συχνότητα τροφοδοσίας καθορίζει και τις ονομαστικές στροφές του κινητήρα, και αναλόγως με τη τάση τροφοδοσίας και τον τύπο του κινητήρα το τύλιγμα του στάτη συνδέεται σε συνδεσμολογία αστέρα ή τριγώνου. Οι μονοφασικοί κινητήρες διαθέτουν μονοφασικό τύλιγμα στο επαγωγικό τύμπανο του στάτη και τροφοδοτούνται από το μονοφασικό δίκτυο της ΔΕΗ.

Μπορεί να υστερούν σημαντικά σε απόδοση, αλλά αποτελούν την πιο φθηνή λύση όταν η απόδοση δεν είναι το παν. Κατασκευαστικά έχουν αρκετές ομοιότητες με τους τριφασικούς κινητήρες, αλλά σημαντικές διαφορές οι οποίες θα αποτυπωθούν στη συνέχεια.

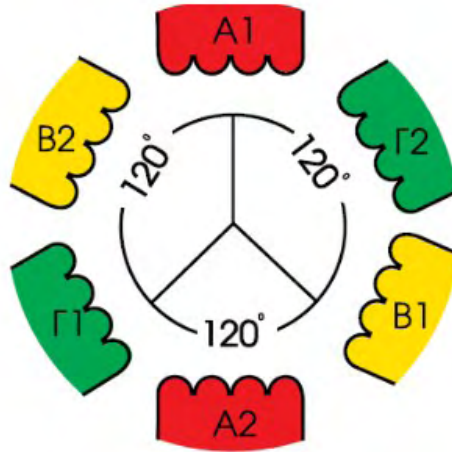
2.2 Κατασκευή τριφασικού επαγωγικού κινητήρα

Οι επαγωγικοί κινητήρες αποτελούνται από το σταθερό μέρος, τον στάτη και το κινητό που ονομάζεται δρομέας. Ο στάτης έχει μαγνητικό πυρήνα σε μορφή κυλινδρικού δακτυλίου ο οποίος βρίσκεται σε μεταλλικό πλαίσιο το οποίο ονομάζεται και ζύγωμα. Πάνω σε αυτό εδράζονται η βάση στήριξης του κινητήρα το εμπρός και πίσω καπάκι και το κιβώτιο ακροδεκτών. Στο κέντρο από το εμπρός και το πίσω καπάκι έχουν τοποθετηθεί ρουλεμάν για την υποστήριξη του άξονα του δρομέα. Για το σχηματισμό του μαγνητικού πυρήνα το εσωτερικό του στάτη υπάρχουν ομοίου μεγέθους αυλακώσεις από χάλυβα όπου τοποθετούνται τα τρία κατανεμημένα τυλίγματα του στάτη. Τα τυλίγματα του στάτη δημιουργούνται από συνδεόμενα πηνία των οποίων οι αγωγοί είναι από χαλκό ή αλουμίνιο.

Ο δρομέας αποτελείται και αυτός από περιφερειακές αυλακώσεις ομοίου μεγέθους που φιλοξενούν τα τυλίγματα του δρομέα. Υπάρχουν δύο τύποι τυλιγμάτων για τον δρομέα που σχηματίζουν δύο κατηγορίες τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα. Έτσι έχουμε τους κινητήρες τυλιγμένου δρομέα (wound rotor) και τους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα ή τύπου κλωβού (squirrel-cage rotor).



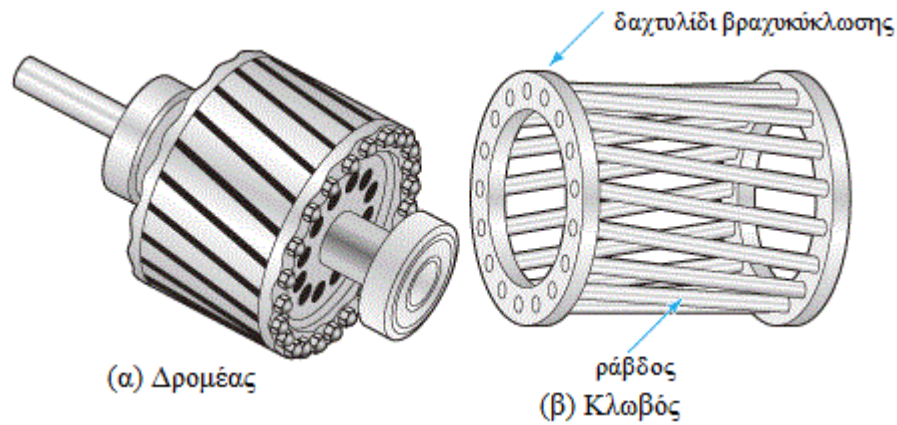
Σχήμα 2.1 Στάτης επαγωγικού κινητήρα



Σχήμα 2.2 Τριφασικό τύλιγμα στάτη

2.2.1 Κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα

Ο κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα (Σχήμα 2.2) αποτελείται από τα μέρη του στάτη και του δρομέα. Τα μέρη τα οποία απαρτίζουν το στάτη είναι το ζύγωμα, το επαγωγικό τύμπανο που περιλαμβάνει τον πυρήνα και το τριφασικό τύλιγμα, τα καπάκια και το κιβώτιο ακροδεκτών. Ο δρομέας απαρτίζεται από τον άξονα, το επαγωγικό του τύλιγμα που περιλαμβάνει τον πυρήνα και το τύλιγμα του κλωβού, και τον ανεμιστήρα. Ο πυρήνας που βρίσκεται στο επαγωγικό τύμπανο του δρομέα φτιάχνεται από ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού ώστε να αποφεύγονται τα ρεύματα Φουκώ που μπορεί να οδηγήσουν σε υπερθέρμανση των υλικών. Η μορφή των οδοντώσεων του πυρήνα ποικίλει, επηρεάζοντας παράλληλα την λειτουργία του κινητήρα ανάλογα με τον τύπο που χρησιμοποιείται. Το τύλιγμα του κλωβού αποτελείται από τις ράβδους πάνω στις οποίες λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της επαγωγής και τα δαχτυλίδια βραχυκύκλωσης που ενώνουν τις ράβδους σχηματίζοντας το κλωβό. Οι ράβδοι είναι διαφορετικού αριθμού από τις οδοντώσεις του πυρήνα του στάτη και παρουσιάζουν μια ελαφρά κλίση σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Το υλικό με το οποίο κατασκευάζεται το τύλιγμα του κλωβού είναι χαλκός, μπρούτζος και αλουμίνιο. Στο Σχήμα 2.3 διακρίνεται ο κλωβός και ολόκληρος ο δρομέας των κινητήρων αυτού του τύπου.

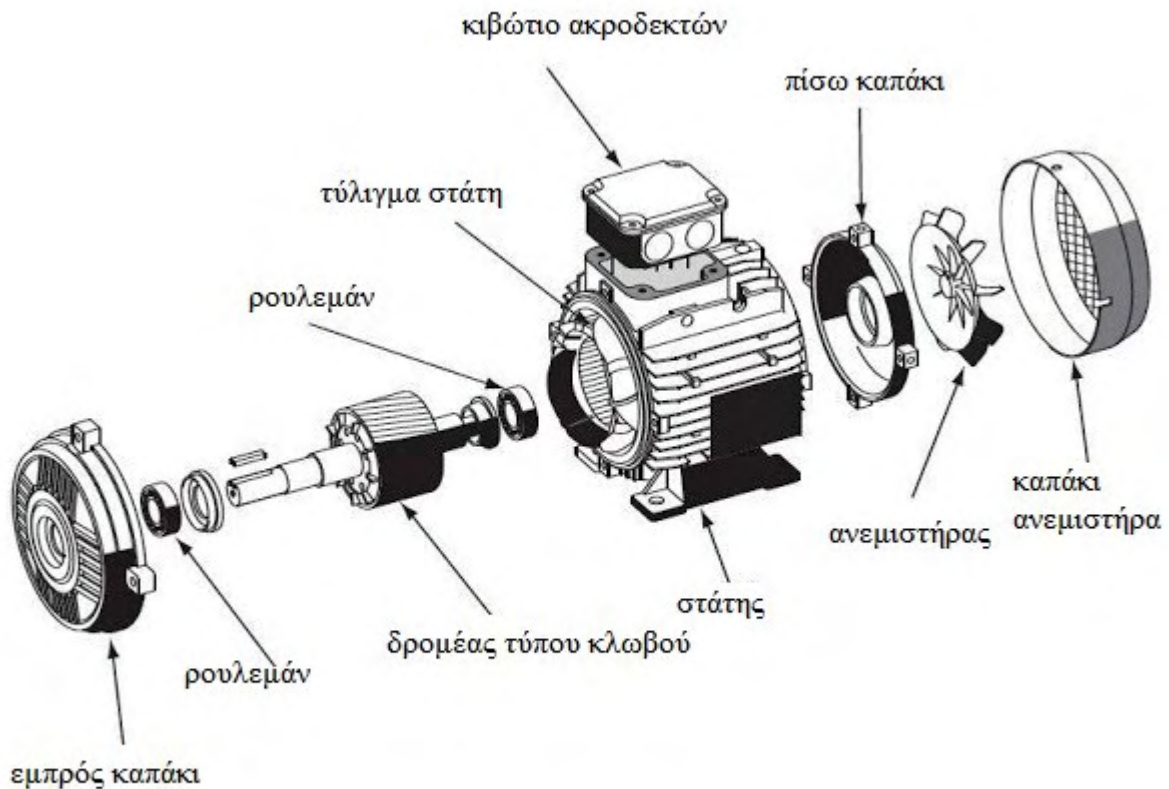


Σχήμα 2.3 α) Βραχυκυκλωμένος δρομέας β) Κλωβός βραχυκυκλωμένου δρομέα

Για να επιτύχουμε μεγάλη ροπή εκκίνησης αλλά και καλή απόδοση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κινητήρες διπλού κλωβού. Ο εξωτερικός κλωβός έχει μικρότερη άεργη αντίσταση ή επαγωγική αντίσταση (reactance) λόγω της θέσης του. Το υλικό που χρησιμοποιείται για τη κατασκευή του είναι υψηλότερης ηλεκτρικής αντίστασης, όπως ο μπρούτζος ή ο ορείχαλκος, με στόχο την μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης. Ο εσωτερικός κλωβός έχει υψηλότερη επαγωγική αντίσταση, καθώς κατασκευάζεται από υλικά μικρότερης αντίστασης, όπως ο χαλκός για να επιτυγχάνεται αποδοτικότητα έχοντας λιγότερες θερμικές απώλειες σε χαμηλή ολίσθηση. Όσον αφορά την ολίσθηση είναι ένας όρος που θα χρησιμοποιηθεί και στην συνέχεια της ανάλυσης των μηχανών. Η ολίσθηση είναι η διαφορά της σύγχρονης ταχύτητας με την ταχύτητα του δρομέα ως προς την σύγχρονη ταχύτητα. Δείχνει κατά ένα τρόπο το ποσοστό κατά το οποίο η ταχύτητα του δρομέα υπολείπεται της σύγχρονης ταχύτητας.

Όσο μικρότερο είναι το διάκενο, τόσο καλύτερη είναι η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα. Ωστόσο το μέγεθος του διακένου καθορίζεται από κατασκευαστικούς παράγοντες και κόστη, αλλά και από τις επιτρεπόμενες απώλειες πυρήνα από τα σημεία υψηλού κορεσμού γύρω από τις αυλακώσεις. Τυπικά το διάκενο για έναν κινητήρα ισχύος μέχρι 10kW κυμαίνεται από 0.35-0.5mm.

Ένα πλεονέκτημα αυτού του τύπου κινητήρα είναι πως ο ίδιος δρομέας είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί και σε κινητήρα με μονοφασικό τύλιγμα στάτη, αφού ο αριθμός των επαγομένων πόλων καθορίζεται από το τύλιγμα του στάτη.



Κινητήρας βραχυκλωμένου δρομέα

Σχήμα 2.4 Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα

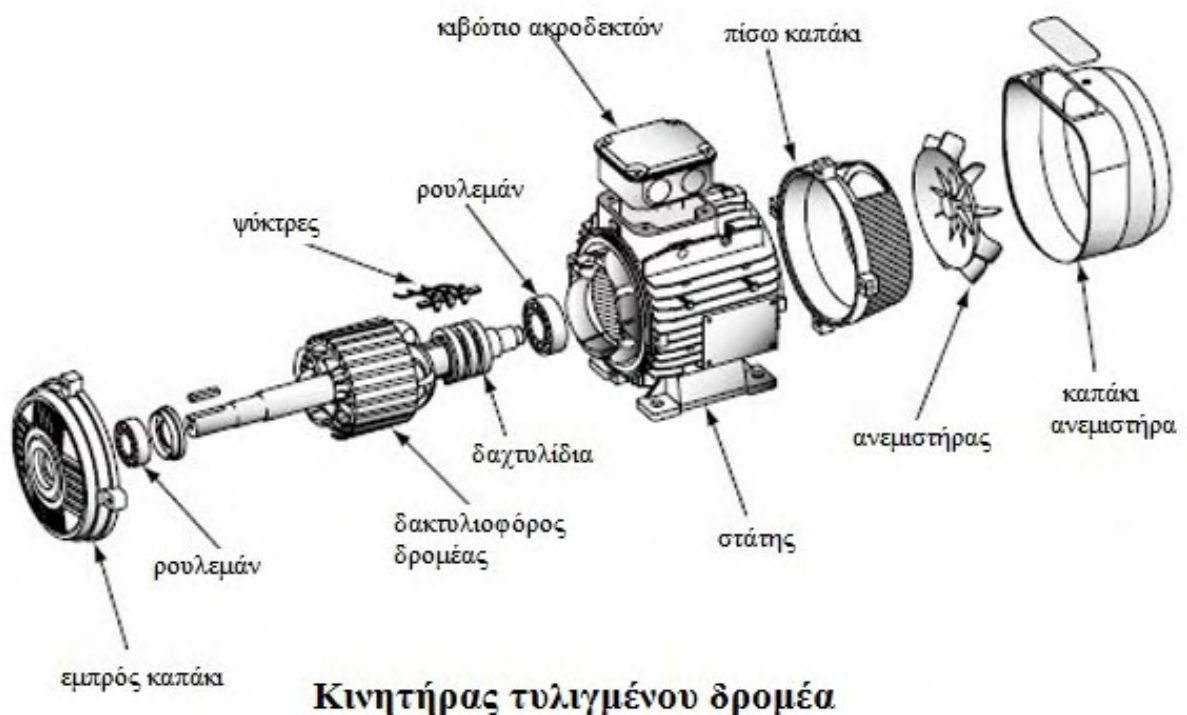
2.2.2 Κινητήρες τυλιγμένου δρομέα (με δαχτυλίδια)

Οι δακτυλιοφόροι κινητήρες ή επαγωγικοί κινητήρες τυλιγμένου δρομέα όπως αλλιώς ονομάζονται αποτελούνται από τα μέρη του στάτη και του δρομέα τους. Ο στάτης περιλαμβάνει το ζύγωμα, το επαγωγικό τύμπανο που περιέχει τον πυρήνα και το τριφασικό τύλιγμα, τα καπάκια και το κιβώτιο ακροδεκτών. Προαιρετικά μπορεί να υπάρξει στον στάτη και σύστημα ανύψωσης ψηκτρών. Το σύστημα αυτό μετατρέπει τον δακτυλιοφόρο κινητήρα σε κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα. Ανυψώνοντας τις ψύκτρες δεν υπάρχει επαφή με τα δαχτυλίδια και ταυτόχρονα βραχυκυκλώνονται τα δαχτυλίδια. Ο δρομέας περιλαμβάνει τα μέρη του άξονα και του επαγωγικού τυμπάνου το οποίο αποτελείται από τον πυρήνα, το τριφασικό τύλιγμα το οποίο είναι σε σύνδεση αστέρα και τα δαχτυλίδια που τοποθετούνται στον άξονα κίνησης.

Στους κινητήρες τυλιγμένου δρομέα τα τυλίγματα του δρομέα είναι παρόμοια με τα κατανεμημένα τυλίγματα του στάτη. Οι ακροδέκτες των τυλιγμάτων συνδέονται

στα δακτυλίδια. Οι δακτύλιοι αυτοί είναι απομονωμένοι ο ένας από τον άλλο αλλά και από τον άξονα του δρομέα. Στα τυλίγματα του δρομέα συνδέονται, μέσω των δακτυλίων, βαθμίδες εξωτερικών αντιστάσεων με σκοπό την αύξηση ροπής εκκίνησης, και περιορισμό του ρεύματος εκκίνησης και παράλληλα περιορίζεται η ταχύτητα του κινητήρα κατά την εκκίνηση.

Στο σχήμα 2.5 απεικονίζονται τα στοιχεία που απαρτίζουν τον κινητήρα τυλιγμένου δρομέα.



Σχήμα 2.5 Στοιχεία που απαρτίζουν τον επαγωγικό κινητήρα τυλιγμένου δρομέα

2.3 Κατασκευή Μονοφασικού κινητήρα

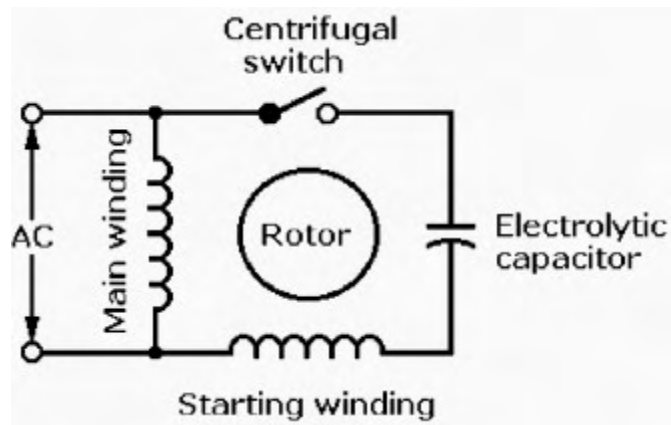
Οι μονοφασικοί κινητήρες αρχικά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι αυτή των κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα και η δεύτερη η κατηγορία των

κινητήρων με συλλέκτη. Η πρώτη κατηγορία διαιρείται σε τρεις υποκατηγορίες. Έτσι υπάρχουν οι κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα αντίστασης, με πυκνωτή και με βραχυκυκλωμένων σπειρών στο στάτη.

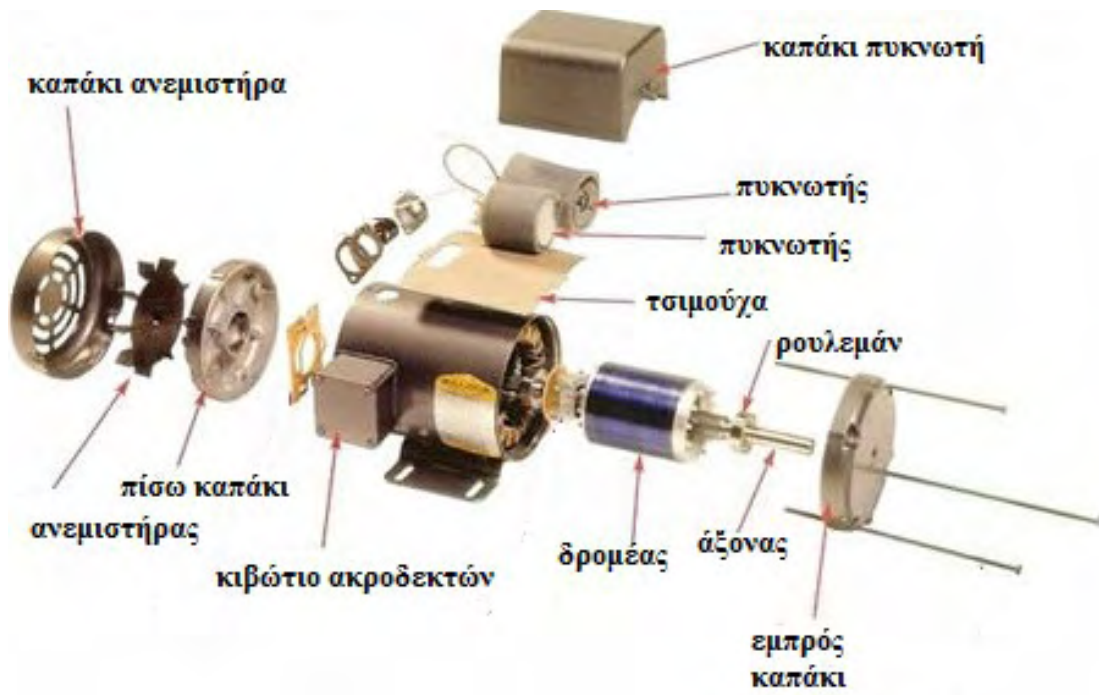
Κατασκευαστικά ο ένας μονοφασικός ασύγχρονος κινητήρας τύπου βραχυκυκλωμένου δρομέα διαχωρίζεται όπως και ο τριφασικός στο μέρος του στάτη και το μέρος του δρομέα. Ο στάτης περιλαμβάνει το ζύγωμα και το επαγωγικό τύμπανο του στάτη το οποίο αποτελείται από τον πυρήνα το κύριο τύλιγμα και το βοηθητικό τύλιγμα. Επίσης υπάρχει το κιβώτιο ακροδεκτών και τα καπάκια. Το βοηθητικό τύλιγμα είναι η ειδοποιός διαφορά του μονοφασικού ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα με τον αντίστοιχο τριφασικό. Το βοηθητικό τύλιγμα είναι απαραίτητο στοιχείο για την εκκίνηση του κινητήρα καθώς είναι αυτό που συμβάλλει μαζί με το κύριο τύλιγμα στη δημιουργία στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου ώστε να δημιουργηθεί ροπή στρέψης στον άξονα του κινητήρα. Το βοηθητικό τύλιγμα τοποθετείται είτε σε ξεχωριστές αυλακώσεις οι οποίες είναι συνήθως το 1/3 των αυλακώσεων είτε μαζί με το κύριο τύλιγμα. Επίσης, επειδή η λειτουργία του βοηθητικού τυλίγματος δεν είναι απαραίτητη όταν αποκτηθεί το 80% περίπου των στροφών του κινητήρα, η χρήση του διακόπτεται είτε με χρήση ενός χρονικού ρελέ είτε με φυγόκεντρο διακόπτη. Ο δρομέας του κινητήρα αποτελείται από τον άξονα και το επαγωγικό τύλιγμα που περιέχει τον πυρήνα και το τύλιγμα κλωβού.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι ασύγχρονοι μονοφασικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα διακρίνονται σε τρεις υποκατηγορίες. Οι κινητήρες τύπου βραχυκυκλωμένου πεδίου αντίστασης κατασκευάζονται έτσι ώστε το κύριο τύλιγμα τους να παρουσιάζει σχετικά μικρή ωμική αντίσταση και μεγάλη αυτεπαγωγική αντίσταση ενώ το βοηθητικό τύλιγμα περιέχει αγωγούς σε κάθε αυλάκωση των οποίων ο αριθμός είναι 30% μικρότερος από του κύριου τυλίγματος. Στην περίπτωση του τύπου με πυκνωτές το κύριο τύλιγμα κατασκευάζεται με μικρή ωμική αντίσταση και μεγάλη αυτεπαγωγική αντίσταση ενώ το βοηθητικό τύλιγμα χωρίζεται από τη σύνδεση του με πυκνωτή σε δύο ίσα μέρη (Σχήμα 2.6). Το βοηθητικό τύλιγμα μπορεί να επιφέρει και βελτίωση του συντελεστή ισχύος. Επίσης να σημειωθεί ότι ο αριθμός των πυκνωτών μπορεί να διπλασιαστεί αν έχουμε περισσότερες απαιτήσεις για την ροπή εκκίνησης και τη λειτουργία του κινητήρα. Ο κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα με σπείρες στο στάτη κατασκευαστικά παρουσιάζει μια διαφορά στον στάτη του. Κάθε πόλος χωρίζεται σε δύο μέρη τα οποία δεν έχουν το ίδιο μέγεθος και το μικρότερο μέρος του δέχεται μια μαγνητική επίδραση μέσω σπειρών ή δακτυλίων βραχυκύκλωσης. Έτσι ο στάτης ισοδυναμεί με μετασχηματιστή ο οποίος έχει ως πρωτεύον τύλιγμα το κύριο τύλιγμα και ως δευτερεύον τα πηνία μαγνητικής σκέδασης (σπείρες βραχυκύκλωσης ή δακτύλιοι βραχυκύκλωσης). Ο τύπος αυτός του μονοφασικού κινητήρα ονομάζεται κινητήρας γραμμοσκιασμένων πόλων.

Στο Σχήμα 2.7 αποτυπώνονται τα στοιχεία που απαρτίζουν ένα μονοφασικό ασύγχρονο κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα.



Σχήμα 2.6 Μονοφασικός επαγωγικός κινητήρας με πυκνωτή



Σχήμα 2.7 Μονοφασικός ασύγχρονος κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα.

2.4 Αρχή λειτουργίας Τριφασικών κινητήρων

Και για τους δύο τύπους τριφασικών επαγωγικών κινητήρων, του κινητήρα τυλιγμένου δρομέα αλλά και του βραχυκυκλωμένου δρομέα, η αρχή λειτουργίας είναι ίδια. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι η δημιουργία ενός περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, μέσω της τριφασικής τροφοδοσίας του κινητήρα στα τυλίγματα του στάτη. Το τύλιγμα του στάτη είναι ένα τριφασικό καταναμημένο τύλιγμα του οποίου οι μαγνητικοί άξονες των πόλων απέχουν 120 ηλεκτρικές μοίρες. Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται εξαρτάται από τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας αλλά και τον αριθμό των πόλων του κινητήρα. Αυτή λοιπόν η ταχύτητα περιστροφής ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα και συμβολίζεται με n_s και η μονάδα μέτρησης της είναι οι στροφές ανά λεπτό (rpm). Για τη σύγχρονη ταχύτητα ισχύει η Σχέση (2.1)

$$N = \frac{120 f}{P} \quad (2.1)$$

όπου $f = \omega_e / 2\pi$ κύκλοι ανά δευτερόλεπτο και $N = (\omega_m / 2\pi) \times 60$ στροφές ανά λεπτό. Η τιμή N που ικανοποιεί την παραπάνω σχέση ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα. Για τις ποσότητες ω_m και ω_e θα γίνει αναφορά στην παράγραφο 3.3

και για τη σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα ω_s (μηχανικά rad/s) η σχέση (2.2)

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2}{P} 2\pi f_1 = \frac{2}{P} \omega_1 \quad (2.2)$$

Η σύγχρονη ταχύτητα n_s είναι ουσιαστικά η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου στάτη. Αντίστοιχα η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι η n_r . Αν η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ήταν ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα, δεν θα είχαμε μεταβολή της μαγνητικής ροής στο τύλιγμα του δρομέα και άρα δεν θα είχαμε και ανάπτυξη ροπής. Έτσι έχουμε $n_r < n_s$. Η διαφορά των τιμών των αυτών ταχυτήτων δημιουργεί ένα νέο μέγεθος την ολίσθηση s η οποία ορίζεται από τη σχέση (2.3)

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.3)$$

Για την λειτουργία του κινητήρα ισχύει πως $n_r < n_s$ συνεπώς η ολίσθηση δε μπορεί να πάρει αρνητικές τιμές. Η τιμές της ολίσθησης κυμαίνονται συνήθως από 0,02-0,05 ή 2-5%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Βασικές έννοιες και μετασχηματισμοί

3.1 Εισαγωγή

Οι περισσότερες από τις ηλεκτρικές μηχανές της σημερινής εποχής χρησιμοποιούν σίδηρο ή χάλυβα ως μέσο για να συγκεντρώσουν και να κατευθύνουν τη μαγνητική ροή, τον αέρα ως μέσον αποθήκευσης ενέργειας και παροχής κίνησης και χαλκό ή αλουμίνιο ως αγωγό του ρεύματος και για να συλλεχθεί η επαγόμενη τάση. Τα τυλίγματα που αποτελούνται από πολλές σπείρες (βρόχοι) αλουμινίου ή χαλκού. Η τάση επάγεται σε ένα τύλιγμα όταν η μαγνητική ροή μεταβάλλεται στο χρόνο (Νόμος επαγωγής του Faraday). Στις στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές, η μεταβολή της μαγνητικής ροής στο χρόνο δημιουργείται είτε λόγω της σχετικής κίνησης μεταξύ του τυλίγματος και ενός χωρικά κατανεμημένου μαγνητικού πεδίου, είτε λόγω της διακύμανσης της μαγνητικής αντίστασης, λόγω της περιστροφή του δρομέα της μηχανής.

Τα τυλίγματα αποτελούνται συνήθως από όμοια πηνία που σχηματίζονται από ένα ή περισσότερα ελίγματα χάλκινων ή αλουμινένιων αγωγών. Τα ομόκεντρα τυλίγματα σχηματίζονται από παρόμοιου μεγέθους θηλιές των οποίων το κέντρο διέρχεται από ένα κοινό άξονα. Τέτοιου είδους τυλίγματα χρησιμοποιούνται σε μικρές ηλεκτρικές μηχανές. Αν και είναι φτηνά στην κατασκευή τους δεν είναι πρακτικά για μεγάλες μηχανές καθώς λόγω της μεγάλης διατομής τους θα χρειαζόταν και μεγάλο μεγέθους αυλακώσεις. Η αύξηση του πλάτους θα μείωνε την επιφάνεια του σιδήρου που χρησιμοποιείται για την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής, και η εκβάθυνση των αυλακώσεων θα οδηγούσε σε αύξηση της διαρροής της επαγωγικής αντίστασης που οδηγεί στο φαινόμενο της αυτεπαγωγής και σε κορεσμό της μαγνητικής ροής στα στενά τμήματα των οδοντώσεων. Η αυτεπαγωγή σχετίζεται με την εμπέδηση (σύνθετη αντίσταση) η οποία όταν έχει μεγάλες τιμές προκαλεί πτώση τάσης στα τυλίγματα της μηχανής

Όπως γνωρίζουμε, όταν ένα ευθύγραμμο τμήμα αγωγού μήκους L , διαρρέεται από ρεύμα i και βρίσκεται σε χώρο μαγνητικού πεδίου B , ασκείται μαγνητική δύναμη από το πεδίο γνωστή και ως δύναμη Laplace, η οποία δίνεται από τη σχέση (3.1)

$$\vec{F} = L \vec{i} \times \vec{B} \quad (3.1)$$

Στις δυνάμεις Laplace οφείλεται ουσιαστικά η αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών κινητήρων, όπου ουσιαστικά η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική, μέσω του μαγνητικού πεδίου διέγερσης.

Όταν το εσωτερικό ενός αγωγού είναι υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, εφαρμόζοντας δηλαδή μια διαφορά δυναμικού στα άκρα του, τότε τα ηλεκτρόνια κινούνται με μια μέση ταχύτητα ολίσθησης. Έτσι ασκούνται σε αυτά δυνάμεις Lorentz σύμφωνα με τη σχέση (3.2)

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad (3.2)$$

όπου με q συμβολίζεται το ηλεκτρικό φορτίο και v η ταχύτητα ολίσθησης.

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη ή αλλιώς διαφορά δυναμικού στα άκρα του αγωγού ορίζεται με τη σχέση (3.3)

$$\vec{e} = L \vec{v} \times \vec{B} \quad (3.3)$$

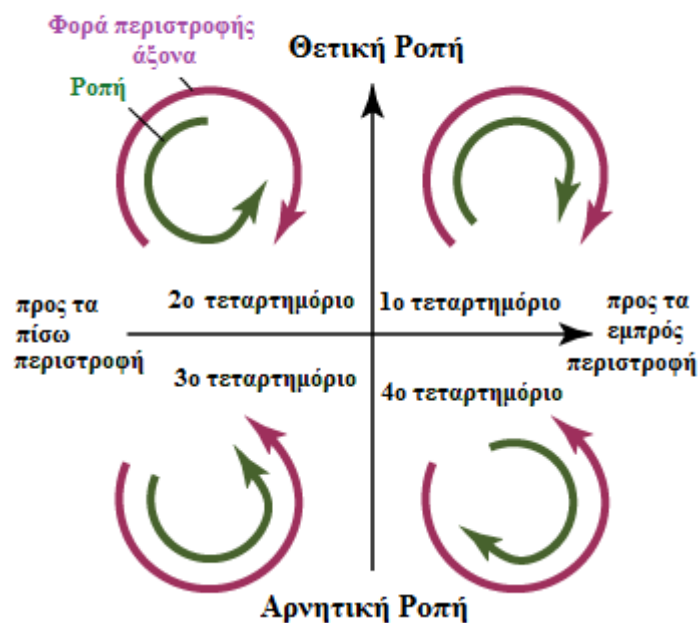
και πάνω σε αυτή τη σχέση βασίζεται η λειτουργία της ηλεκτρικής γεννήτριας, κατά την οποία οι μηχανικές δυνάμεις που ασκούνται στους αγωγούς εντός μαγνητικού πεδίου οδηγούν στην παραγωγή διαφοράς δυναμικού στα άκρα των αγωγών.

3.2 Λειτουργία στα τέσσερα τεταρτημόρια

Οι επαγωγικοί κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν και στα τέσσερα τεταρτημόρια της χαρακτηριστικής ροπής στροφών (Σχήμα 3.1). Η χαρακτηριστική ροπής στροφών που περικλείει τις περιοχές λειτουργίας του κινητήρα, της πέδησης και της γεννήτριας, όπως και η απεικόνιση της, αναλύονται στην παράγραφο 4.8. Η λειτουργία μιας ηλεκτρικής μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος ως κινητήρα συμβαίνει στο πρώτο και τρίτο τεταρτημόριο, ενώ στα δύο εναπομείναντα τεταρτημόρια μια ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια.

Στο πρώτο τεταρτημόριο ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται δεξιόστροφα και η κινούσα ηλεκτρική ροπή που παράγεται έχει και αυτή την ίδια φορά περιστροφής. Στην περιοχή λειτουργίας του πρώτου τεταρτημόριου η μηχανή απορροφά ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο και την μετατρέπει σε μηχανική. Αν η φορά του ρεύματος αλλάξει τότε γίνεται μετάβαση στο δεύτερο τεταρτημόριο όπου η μηχανή μπαίνει σε λειτουργία γεννήτριας. Ο δρομέας της μηχανής στη περιοχή αυτή θα επιβραδυνθεί καθώς η ηλεκτρική ροπή που παράγεται είναι αντίθετης φοράς με τη φορά περιστροφής του δρομέα, λειτουργώντας έτσι ως ηλεκτρική πέδη.

Στο τρίτο τεταρτημόριο ισχύει ότι και στο πρώτο απλώς η φορά ροπής και η φορά περιστροφής είναι αντίθετες, δηλαδή αριστερόστροφες. Τέλος το τέταρτο τεταρτημόριο λειτουργεί και αυτό όπως το δεύτερο με αντίθετη φορά περιστροφής.



Σχήμα 3.1 Λειτουργία στα τέσσερα τεταρτημόρια

3.3 Ηλεκτρικά ακτίνια και σύγχρονη ταχύτητα

Για μία P-πολική ηλεκτρική μηχανή η σχέση μεταξύ της ηλεκτρικής γωνίας και της μηχανικής γωνίας ορίζεται από τη σχέση (3.4)

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (3.4)$$

όπου θ_e είναι η ηλεκτρική γωνία που μετρείται σε ηλεκτρικές μοίρες και θ_m η μηχανική γωνία. Αντίστοιχα ισχύει ο τύπος για τις γωνιακές ταχύτητες, αν όπου θ_e θέσουμε ω_e , και όπου θ_m θέσουμε ω_m .

Η σχέση μεταξύ της συχνότητας της επαγόμενης τάσης σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο και της μηχανικής ταχύτητας N σε στροφές ανά λεπτό έχει οριστεί από τη σχέση (2.2) στην παράγραφο 2.4

3.4 Μαγνητική ροή ανά πόλο και επαγόμενη τάση

Η επαγόμενη τάση και η ροπή που αναπτύσσεται σε μια ηλεκτρική μηχανή, εξαρτώνται από την μαγνητική ροή ανά πόλο. Αν έχουμε μια ημιτονοειδή κατανομή πυκνότητα ροής σε δύο πόλους, με το μαγνητικό πεδίο να είναι της μορφής $B(\theta_e) = B_{pk} \cos \theta_e$, η σχέση που μας δίνει τη ροή ανά πόλο είναι η (3.6)

$$\phi_{pole} = \int_{-\pi_e/2}^{\pi_e/2} B_{pk} \cos \theta_e LR d\theta_m \quad (3.6)$$

όπου L είναι η απόσταση των μεταξύ σημείων καμπής του πηνίου στην περιοχή του πόλου, R η ακτίνα της στεφάνης του διάκενου, ενώ τα όρια του ολοκληρώματος υποδηλώνουν το διάστημα του πλάτους ενός ηλεκτρικού πόλου σε ηλεκτρικά ακτίνια. Αν αντικαταστήσουμε την γωνία θ που αναφέρεται σε μηχανικές μοίρες με την αντίστοιχη ηλεκτρική γωνία η παραπάνω σχέση θα πάρει την μορφή της σχέσης (3.7)

$$\phi_{pole} = \frac{2}{p} B_{pk} LR \int_{-\pi_e/2}^{\pi_e/2} \cos \theta_e d\theta_e = \frac{4}{p} B_{pk} LR \quad (3.7)$$

Για μια ημιτονοειδή κατανομή μαγνητικής ροής, η μέση τιμή της πυκνότητας της ροής, B_{ave} , είναι $(2/\pi)B_{pk}$. Η ροή ανά πόλο μπορεί να προσδιοριστεί και από την μέση πυκνότητα ροής πολλαπλασιασμένη με την πολική περιοχή. Έτσι καταλήγουμε στην σχέση (3.8)

$$\phi_{pole} = B_{ave} \frac{2\pi LR}{P} = \frac{4}{P} B_{pk} LR \quad (3.8)$$

όπου, η ποσότητα $2\pi LR / P$ ορίζει την πολική περιοχή.

Η πεπλεγμένη μαγνητική ροή που υπάρχει σε ένα πηνίο πλήρους βήματος κάθε στιγμή φαίνεται στη σχέση (3.9)

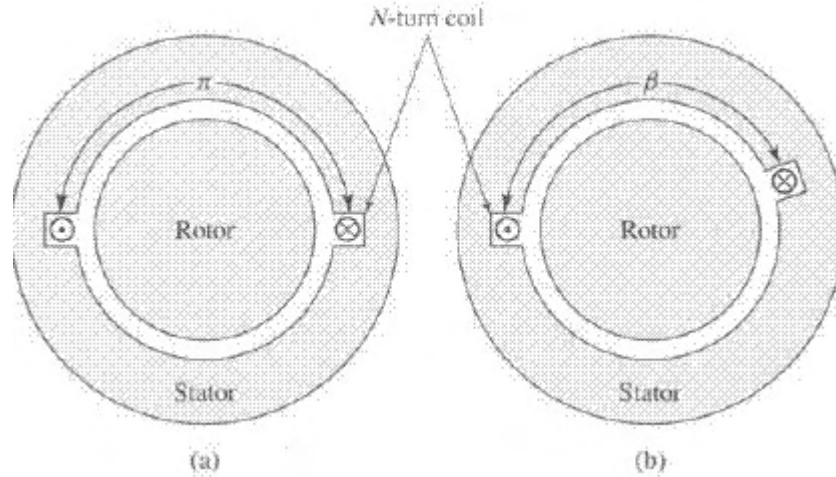
$$\lambda(t) = N\phi_{pole} \cos\omega_e t \quad (3.9)$$

και άρα η επαγόμενη τάση σε ένα πηνίο πλήρους βήματος από τη σχέση (3.10) ορίζεται ως

$$e = \frac{d\lambda(t)}{dt} = N \frac{d\phi_{pole}}{dt} \cos\omega_e t - \omega_e N\phi_{pole} \sin\omega_e t \quad (3.10)$$

Να σημειωθεί πως ως βήμα ενός πηνίου (coil-pitch) ορίζεται η γωνιακή απόσταση μεταξύ των δύο πλευρών του εν λόγω πηνίου. Αν η απόσταση αυτή είναι ίση με την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων (180°), τότε λέμε ότι έχουμε πηνίο πλήρους βήματος. Αντίθετα, αν η απόσταση αυτή είναι μικρότερη, τότε έχουμε πηνίο κλασματικού βήματος (Σχήμα 3.2). Στις περισσότερες ηλεκτρικές μηχανές η πυκνότητα της κατανομής της μαγνητικής ροής είναι σταθερή στη λειτουργία μόνιμης κατάστασης. Έτσι στη μόνιμη κατάσταση για την επαγόμενη τάση ισχύει η σχέση (3.11)

$$e = -\omega_e N\phi_{pole} \sin\omega_e t \quad (3.11)$$



Σχήμα 3.2 Τοπολογία τυλίγματος (a) πλήρους βήματος (b) κλασματικού βήματος

3.4.1 Τιμή RMS της επαγόμενης τάσης

Η τιμή RMS της επαγόμενης τάσης ορίζεται από τον τύπο (3.12)

$$E_{rms} = \frac{\omega_e N \phi_{pole}}{\sqrt{2}} = 4.44 f N \phi_{pole} \quad (3.12)$$

Στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, η φάση ενός τυλίγματος σχηματίζεται από την διασύνδεση όμοιων πηνίων των οποίων οι πλευρές βρίσκονται σε μία οι δύο γειτονικές αυλακώσεις. Επίσης εκτός από τα διανεμημένα τυλίγματα μπορεί να έχουν και πηνία κλασματικού βήματος (Σχήμα 3.2 b). Οι παράγοντες της διανομής αλλά και του κλασματικού βηματισμού προσδιορίζονται από τα k_d και k_p , αντίστοιχα. Το γινόμενο των δύο αυτών παραγόντων μας δίνει ένα συνολικό συνδυαστικό παράγοντα για την επαγόμενη τάση, τον συντελεστή τυλίγματος k_w . Έτσι η RMS επαγόμενη τάση ενός τυλίγματος είναι της μορφής που φαίνεται στη σχέση (3.13)

$$E_{rms} = 4.44 f k_w N \phi_{pole} \quad (3.13)$$

με $k_w = k_d k_p$

3.4.2 Συντελεστής Κατανομής

Σε μια μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί σε κάθε τύλιγμα να υπάρχει ένας συνδυασμός πηνίων εν σειρά ή/και εν παραλλήλω. Έτσι σε κάθε πόλο τα διανεμημένα τυλίγματα έχουν τα πηνία τους σε πολλές αυλακώσεις.

Ο συντελεστής κατανομής ορίζεται στη σχέση (3.14) ως η συνισταμένη τάση των πηνίων σε ένα ζεύγος πόλων ως προς το άθροισμα των τάσεων των πηνίων

$$k_d = \frac{|E_{pole}|}{\sum_i |E_{ci}|} \quad (3.14)$$

3.4.3 Συντελεστής βήματος (Pitch factor)

Ένας λόγος που σε μία μηχανή έχουμε πηνία κλασματικού βήματος, είναι πως ο αριθμός των αυλακώσεων δεν είναι πολλαπλάσιος του αριθμού των πόλων. Επίσης πηνία κλασματικού βήματος χρησιμοποιούνται για την καταστολή της επίδρασης συγκεκριμένων αρμονικών ταλαντώσεων.

Έτσι ο συντελεστής βήματος εκφράζει τον λόγο της επαγόμενης τάσης ενός κλασματικού πηνίου προς την επαγόμενη τάση του πηνίου πλήρους βήματος και ορίζεται από τη σχέση (3.15)

$$k_p = \frac{\tilde{E}_{ca}}{2|\tilde{E}_a|} = \cos\theta_e \quad (3.15)$$

Όπου για τα μεγέθη

$$\tilde{E}_{ca} = \tilde{E}_a + \tilde{E}_{-a}, \quad |\tilde{E}_a| = |\tilde{E}_{-a}|$$

3.4.4 Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

Αρχικά, ως μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) ορίζεται ως το γινόμενο του ρεύματος επί τον αριθμό των ελιγμάτων του πηνίου, και η μονάδα μέτρησης του είναι οι αμπεροστροφές (At). Οι αναλυτικές εκφράσεις των θεμελιωδών μαγνητεγερτικών δυνάμεων για κάθε φάση με τη χρήση της τριγωνομετρικής ταυτότητας ,

$$\cos(\omega t + \varphi) \cos(\theta + \varphi) = 0.5 [\cos(\theta + \omega t + 2\varphi) + \cos(\theta - \omega t)]$$

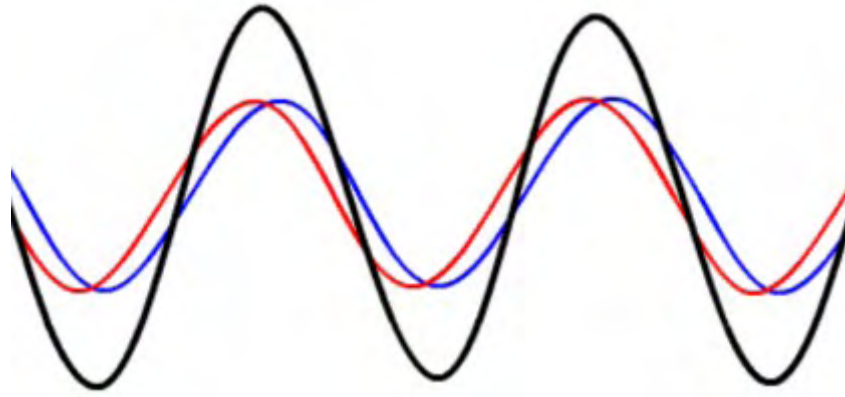
παίρνουν τη μορφή των σχέσεων (3.16)

$$\begin{aligned} F_{a1} &= \frac{1}{2} F_{1,max} [\cos(\theta + \omega t) + \cos(\theta - \omega t)] \\ F_{b1} &= \frac{1}{2} F_{1,max} [\cos(\theta + \omega t - 240^\circ) + \cos(\theta - \omega t)] \\ F_{c1} &= \frac{1}{2} F_{1,max} [\cos(\theta + \omega t + 240^\circ) + \cos(\theta - \omega t)] \end{aligned} \quad (3.16)$$

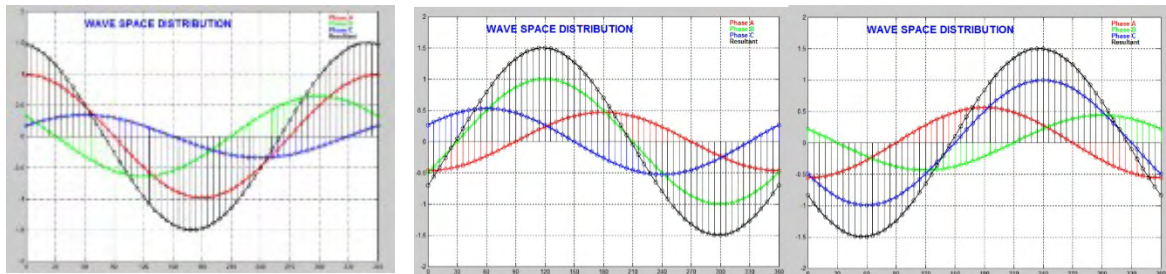
Με αυτό το τρόπο αναλύεται ένα στάσιμο κύμα σε δύο οδεύοντα κύματα με μέγεθος ίσο με το μισό του στάσιμου κύματος για το κάθε ένα. Τα κύματα αυτά περιστρέφονται στο χώρο με ταχύτητες ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς. Η συνισταμένη μαγνητεγερτική δύναμη σε μια τυχαία γωνία θ , θα ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των τριών παραπάνω εξισώσεων. Έτσι η συνολική μαγνητεγερτική δύναμη ορίζεται από τη σχέση (3.17) ως

$$F_{a1} + F_{b1} + F_{c1} = \frac{3}{2} F_{1,max} \cos(\theta - \omega t) \quad (3.17)$$

Δηλαδή, η συνισταμένη μαγνητεγερτική δύναμη, είναι ένα οδεύον κύμα σταθερού πλάτους και με φάση χώρου που μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο με γωνία $\varphi(t) = \omega t$. Έτσι τη χρονική στιγμή $t=0$ η κορυφή του κύματος θα συμπίπτει με το μαγνητικό άξονα της φάσης a, τη χρονική στιγμή $t=T/3$ με το μαγνητικό άξονα της φάσης b, και τη χρονική στιγμή $t=2T/3$ με το μαγνητικό άξονα της φάσης c (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.3 Στιγμιότυπο ανάλυσης τού στάσιμου κύματος (μαύρο) σε δύο οδεύοντα κινούμενα σε αντίθετη κατεύθυνση (κόκκινο-μπλε)



(α)

(β)

(γ)

Σχήμα 3.4 Η κορυφή του οδεύοντος κύματος ΜΕΔ συμπίπτει με το μαγνητικό άξονα της (α) φάσης a (β) φάσης b (γ) φάσης c

3.5 Επαγωγιότητες τυλιγμάτων

Ο συντελεστής αυτεπαγωγής του στάτη, L_{ss} , με N_{effs} σπείρες ανά πόλο που διαρρέεται από μαγνητική ϕ_{pole} σε κάθε πόλο από τη σχέση χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η μαγνητική ροή σκέδασης ορίζεται από τη σχέση (3.18)

$$L_{ss} = \frac{(P/2)N_{effs}\phi_{pole}}{i} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{g} N_{effs}^2 LR \quad (3.18)$$

Η πεπλεγμένη μαγνητική ροή του τυλιγματος του δρομέα, λ_{rs} , με N_{effr} σπείρες, λόγω του μαγνητικού πεδίου του στάτη με N_{effs} σπείρες δίνεται από τη σχέση (3.19)

$$\lambda_{rs} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{g} N_{effs} N_{effr} L R i_s \cos \alpha \quad (3.19)$$

και η αυτεπαγωγή που τα συνδέει φαίνεται στη σχέση (3.20)

$$L_{rs} = \frac{\lambda_{rs}}{i_s} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{g} N_{effs} N_{effr} L R \cos \alpha \quad (3.20)$$

Ενώ επίσης ισχύει πως $L_{rs} = L_{sr}$

Και για την L_{ss} σχέση (3.21)

$$L_{ss} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{g} N_{effr}^2 L R \quad (3.21)$$

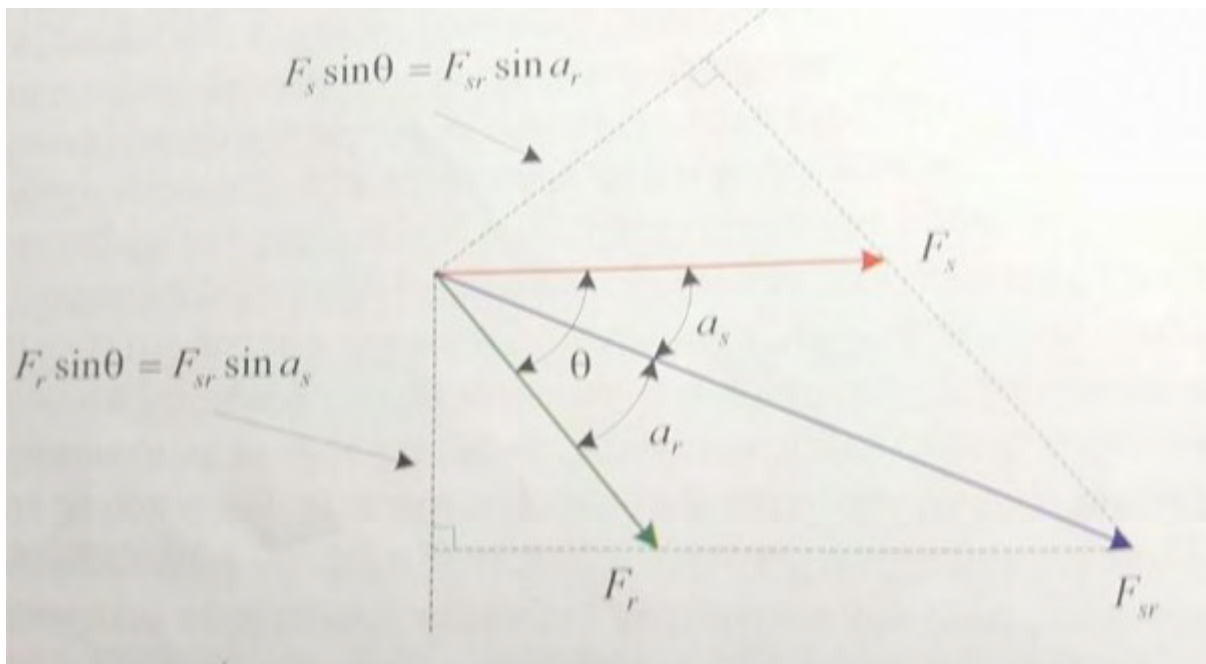
3.6 Ανάπτυξη ροπής

Η παραγωγή ροπής, οφείλεται στην προσπάθεια που γίνεται να ευθυγραμμιστούν τα μαγνητικά πεδία του στάτη και του δρομέα. Για την λειτουργία του κινητήρα το μαγνητικό πεδίο του στάτη προηγείται πάντα του δρομέα. Για να υπάρχει παραγόμενη ροπή διάφορη του μηδενός, θα πρέπει τα μαγνητικά πεδία του στάτη και του δρομέα να περιστρέφονται με την ίδια σύγχρονη ταχύτητα.

Για την παραγόμενη ροπή ισχύει η σχέση (3.22)

$$\tau = -\frac{\pi}{2} \left(\frac{P}{2} \right)^2 \Phi_{sr,av} F_{r,m} \sin \alpha_r \quad (3.22)$$

όπου P είναι ο αριθμός των πόλων $\Phi_{sr,av}$ η μέση τιμή της συνισταμένης μαγνητικής ροής ανά πόλο, $F_{r,m}$ το κύμα χώρου της μαγνητεγερτικής δύναμης του δρομέα και α_r είναι η γωνία κλίσης μεταξύ του διανύσματος της F_r και της F_{sr} (Σχήμα 3.5). Για την εξαγωγή της παραπάνω σχέσης θεωρήθηκε πως η μαγνητεγερτική αντίσταση του σιδηρομαγνητικού υλικού είναι μηδενική, και πως οι χωρικές κατανομές των μαγνητεγερτικών δυνάμεων είναι καθαρά ημιτονοειδείς. Επίσης δεν λήφθηκαν υπόψιν οι μη γραμμικότητες, που εμφανίζονται λόγω του μαγνητικού κορεσμού, όπως και οι μαγνητικές ροές σκέδασης.



Σχήμα 3.5 Διανυσματική αναπαράσταση μαγνητεγερτικών δυνάμεων των τυλιγμάτων στάτη και δρομέα [3]

3.7 Απόδοση και απώλειες

Η απόδοση του κινητήρα είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που ελέγχει κατά πόσο αποτελεσματικά και οικονομικά λειτουργεί ένας κινητήρας. Ο βαθμός απόδοσης μπορεί να βρεθεί είτε μετρώντας την ισχύ εισόδου και την ισχύ εξόδου στο σύστημα είτε μετρώντας τις επιμέρους απώλειες από τις οποίες εξαρτάται ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα. Όσο μικρότερος ο βαθμός των απωλειών τόσο μεγαλύτερη η απόδοση του κινητήρα. Ο βαθμός απόδοσης ορίζεται από τη σχέση (3.23)

$$\eta(\%) = \frac{P_{in} - P_{los}}{P_{in}} \times 100 \quad (3.23)$$

όπου P_{in} είναι η ισχύς εισόδου στο κινητήρα και P_{los} η ισχύς των απωλειών του κινητήρα.

Οι απώλειες του κινητήρα και γενικότερα των ηλεκτρικών μηχανών διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τις σταθερές απώλειες και τις μεταβλητές απώλειες

Οι σταθερές απώλειες ορίζονται όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε σταθερές συνθήκες. Οι απώλειες που συναντώνται κατά αυτή τη φάση λειτουργίας είναι οι απώλειες πυρήνα ή κενού φορτίου και οι μηχανικές απώλειες. Οι απώλειες πυρήνα περιλαμβάνουν τις απώλειες της μαγνητικής υστέρησης και των λόγω δινορρευμάτων ενώ στις μηχανικές απώλειες συγκαταλέγονται οι απώλειες λόγω τριβής μεταξύ των εξαρτημάτων της μηχανής και οι αεροδυναμικές απώλειες που οφείλονται στην ύπαρξη άερα στο διάκενο της μηχανής. Το σύνολο των απωλειών αυτών ορίζει τις απώλειες περιστροφής κενού φορτίου και ορίζεται από τη σχέση (3.24)

$$P_r = P_c + P_{m,nl} \quad (3.24)$$

όπου P_r οι απώλειες περιστροφής κενού φορτίου, P_c οι απώλειες πυρήνα και $P_{m,nl}$ οι μηχανικές απώλειες μετρημένες σε Watt.

Οι μεταβλητές απώλειες εμπεριέχουν τα είδη των απωλειών που μεταβάλλονται με το φορτίο του κινητήρα. Στις απώλειες αυτές συγκαταλέγονται οι απώλειες χαλκού στα τυλίγματα στάτη και δρομέα, οι ηλεκτρικές απώλειες λόγω του επιδερμικού φαινομένου και σε μικρότερο ποσοστό έχουμε τις απώλειες λόγω τις επαφής των ψηκτρών. Το σύνολο των απωλειών αυτών, δηλαδή το άθροισμα τους, ορίζεται ως απώλειες εξαρτώμενες από την ένταση του ρεύματος τυμπάνου και η σχέση (3.25) των απωλειών αυτών είναι

$$P_v = P_{Cu} + P_s + P_b \quad (3.25)$$

όπου P_v οι απώλειες εξαρτώμενες από την ένταση του ρεύματος τυμπάνου, P_{Cu} οι απώλειες χαλκού και P_s οι απώλειες επιδερμικού και P_b οι απώλειες λόγω τις επαφής των ψηκτρών μετρημένες σε Watt.

Και οι τρεις υποκατηγορίες μεταβλητών απωλειών εξαρτώνται από την τιμή της έντασης του ρεύματος. Έτσι, το άθροισμα των απωλειών αυτών ορίζει την κατηγορία των απωλειών εξαρτώμενων από την ένταση του ρεύματος τυμπάνου.

3.8 Τριφασικοί μετασχηματισμοί

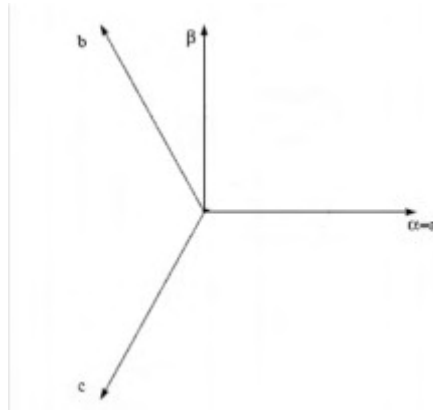
Στην μελέτη των συστημάτων ενέργειας, χρησιμοποιούνται μετασχηματισμοί για τον διαχωρισμό μεταβλητών, με σκοπό να επιλυθούν δύσκολες εξισώσεις, που έχουν συντελεστές εξαρτημένους από το χρόνο, ή για να αναγάγουμε όλες της μεταβλητές σε ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς. Στην περίπτωση των ασύγχρονων επαγωγικών κινητήρων οι μετασχηματισμοί αυτοί είναι το κλειδί για την δυναμική ανάλυση του. Με τη εφαρμογή των μετασχηματισμών οι αυτεπαγωγές και οι αλληλεπαγωγές του κινητήρα μετατρέπονται σε σταθερές ποσότητες και κατ' επέκταση το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων που προκύπτει με σταθερούς συντελεστές είναι ευκολότερο να επιλυθεί.

Εκτός από τους μετασχηματισμούς υπάρχουν και οι αντίστροφοι τους που μας επιτρέπουν να γυρίσουμε στην πρότερη κατάσταση. Υπάρχουν δύο είδη μετασχηματισμών που χρησιμοποιούνται στην δυναμική ανάλυση του κινητήρα. Ο μετασχηματισμός του Clarke, από το τριφασικό (a-b-c) πλαίσιο στο διφασικό (α-β-0), και ο μετασχηματισμός του Park από το τριφασικό (a-b-c) στο πλαίσιο (q-d-0).

3.8.1 Μετασχηματισμός του Clarke

Στο μετασχηματισμό του Clarke μετατρέπουμε ένα τριφασικό σύστημα a-b-c σε ένα σύστημα διφασικό α-β-0. Οι δύο σταθερές διφασικές μεταβλητές του μετασχηματισμού Clarke ορίζονται ως α και β.

Ο άξονας α συμπίπτει με τον άξονα a και ο άξονας β καθυστερεί του α κατά $\pi/2$. Για να είναι ο μετασχηματισμός αμφίδρομος προσθέτουμε και τη μεταβλητή 0 ώστε ο πίνακας μετασχηματισμού να είναι τετραγωνικός και άρα αντιστρέψιμος.



Σχήμα 3.6: Σχηματική απεικόνιση του μετασχηματισμού από το a-b-c στο α-β-0

Έτσι έχουμε τη σχέση $[f_{\alpha\beta 0}] = [T_{\alpha\beta 0}] [f_{abc}]$

Ο πίνακας μετασχηματισμού του Clarke $[T_{\alpha\beta 0}]$ ορίζεται ως

$$T_{\alpha\beta 0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

ενώ ο αντίστροφος μετασχηματισμός από τη σχέση

$$T_{\alpha\beta 0}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

3.8.2 Μετασχηματισμός του Park

Ο μετασχηματισμός του Park είναι ένας ευρέως διαδεδομένος μετασχηματισμός από ένα τριφασικό πεδίο σε ένα διφασικό, στην ανάλυση των σύγχρονων μηχανών. Η εξίσωση του μετασχηματισμού ορίζεται από τη σχέση (3.28)

$$[f_{dq0}] = [T_{dq0}(\theta)] [f_{abc}] \quad (3.28)$$

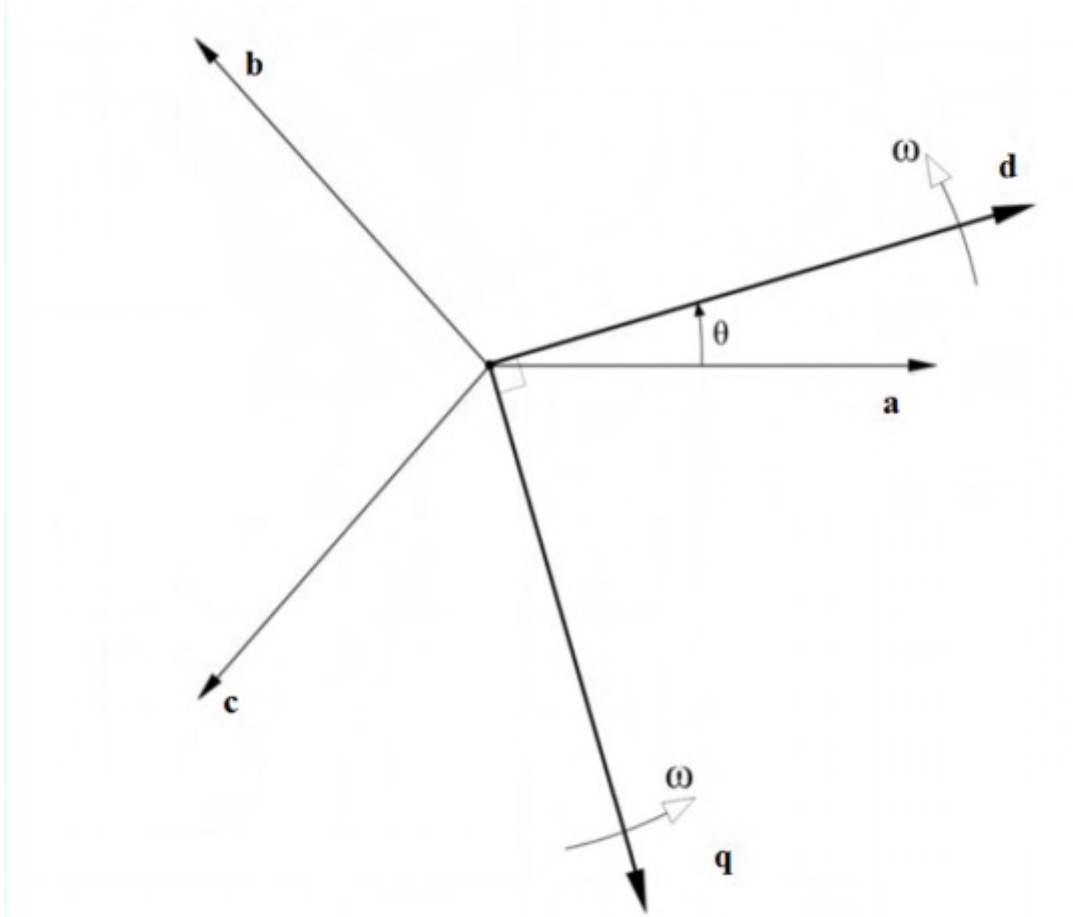
όπου ο πίνακας μετασχηματισμού του Park $[T_{dq0}(\theta)]$ ορίζεται από τον πίνακα (3.29)

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

ενώ ο αντίστροφος του από τον πίνακα (3.30)

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Στο μετασχηματισμό του Park ενώ το τριφασικό τύλιγμα a-b-c είναι σταθερό στο χώρο, το διφασικό τύλιγμα d-q περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7 ο άξονας q προηγείται του d κατά $\pi/2$.



Σχήμα 3.7 Απεικόνιση μετασχηματισμός από το a-b-c στο d-q-0

Ο dq0 μετασχηματισμός έχει οριστεί έτσι ώστε ο άξονας q να καθυστερεί του άξονα d κατά 90 μοίρες ($\pi/2$). Εκτός από τον dq0 μετασχηματισμό, χρησιμοποιείται και μια παραλλαγή του, η οποία επί της ουσίας είναι ακριβώς ο ίδιος μετασχηματισμός. Η διαφορά που έχουν είναι πως έχει οριστεί έτσι ώστε ο άξονας q να προηγείται του άξονα d κατά 90 μοίρες ($\pi/2$). Η παραλλαγή αυτή ονομάζεται ως qd0 αντί του dq0

Η σχέση του qd0 μετασχηματισμού ορίζεται από (3.31)

$$[f_{qd0}] = [T_{qd0}(\theta')] [f_{abc}] \quad (3.31)$$

με πίνακα μετασχηματισμού (3.32)

$$[T_{qd0}(\theta')] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta') & \cos(\theta' - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta' + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta') & \sin(\theta' - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta' + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

και αντίστροφο πίνακα μετασχηματισμού (3.33)

$$[T_{qd0}(\theta')]^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta') & \sin(\theta') & 1 \\ \cos(\theta' - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta' - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta' + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta' + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Να σημειωθεί πως για την γωνία θ' ισχύει η σχέση (3.34)

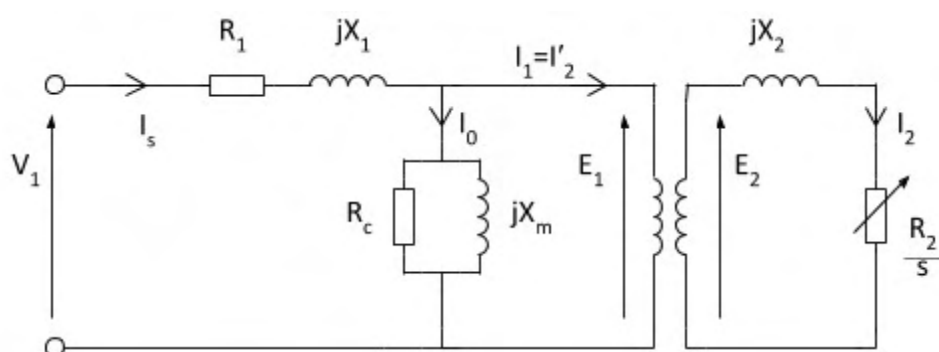
$$\theta' = \theta + \frac{\pi}{2} \quad (3.34)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Τριφασικοί Ασύγχρονοι Επαγωγικοί Κινητήρες

4.1 Μοντελοποίηση και Ισοδύναμα κυκλώματα για την μόνιμη κατάσταση

Η μοντελοποίηση του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, είναι της ίδιας φιλοσοφίας με το μοντέλο ενός μετασχηματιστή. Αυτό είναι απόλυτα λογικό μιας και η λειτουργία και των δύο στηρίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης, για την ανάλυση του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, είναι αρκετό μιας και όλες οι φάσεις είναι όμοιες επί της ουσίας. Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα.



Σχήμα 4.1 Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα

Η V_1 είναι η τάση εισόδου που εφαρμόζεται στο στάτη από την τροφοδοσία του δικτύου. Το τύλιγμα της φάσης στον στάτη συμβολίζεται από την εν σειρά συνδεσμολογία της ωμικής αντίστασης R_1 και του πηνίου jX_1 . Η αντίσταση συμβολίζει τις θερμικές απώλειες του τυλίγματος ενώ το πηνίο την επαγωγική αντίσταση ή αλλιώς αντίδραση σκέδασης την ροή που δημιουργείται από το τύλιγμα αλλά εμπλέκει μόνο το ίδιο το τύλιγμα. Το ρεύμα του τυλίγματος του στάτη I_s χωρίζεται σε δύο συνιστώσες. Το ρεύμα φορτίου I_1 και το ρεύμα διέγερσης I_0 . Το

ρεύμα διέγερσης διαρρέει τον κλάδο που περιέχει μια εν παραλλήλω συνδεσμολογία της ωμικής αντίστασης R_c και του πηνίου jX_m . Ο κλάδος αυτός ονομάζεται κλάδος μαγνήτισης, και σε αυτόν η ωμική αντίσταση συμβολίζει τις θερμικές απώλειες του σιδηρομαγνητικού πυρήνα λόγω της μαγνητικής υστέρησης και των δινορρευμάτων, ενώ το πηνίο συμβολίζει την αλληλεπαγωγή των τυλιγμάτων στάτη και δρομέα. Επίσης αξίζει να σημειωθεί πως το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση R_c είναι το ρεύμα απωλειών πυρήνα και το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο jX_m είναι το ρεύμα μαγνήτισης. Όσον αφορά το τύλιγμα του δρομέα, το πηνίο jX_2 προσομοιώνει την αντίδραση σκέδασης, ενώ η ωμική αντίσταση R_2 τις θερμικές απώλειες. Η R_2 είναι διαιρεμένη με την ολίσθηση λόγω της επίδρασης της διαφοράς ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και του στάτη.

Μπορούμε να ανάγουμε όλα στοιχεία του μοντέλου στο στάτη ενοποιώντας τα επιμέρους κυκλώματα του στάτη και του δρομέα σε ένα ισοδύναμο μοντέλο. Το αποτέλεσμα της ενοποίησης αυτής, ανά περίπτωση, στην ανάλυση ενός επαγωγικού κινητήρα περιγράφεται αλλά και απεικονίζεται στις επόμενες παραγράφους και αφορά την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Το μοντέλο αυτής της μορφής του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα αν και εξιδανικευμένο, είναι κατάλληλο για την προσομοίωση του κινητήρα μόνο στη μόνιμη κατάσταση με ικανοποιητικά μικρή απόκλιση. Για προσομοίωση στη μεταβατική κατάσταση θα χρησιμοποιηθούν μοντέλα που θα διαμορφωθούν με βάση τους μετασχηματισμούς Park και Clarke.

4.2 Λειτουργία εν κενώ

4.2.1 Δρομέας σε στάση

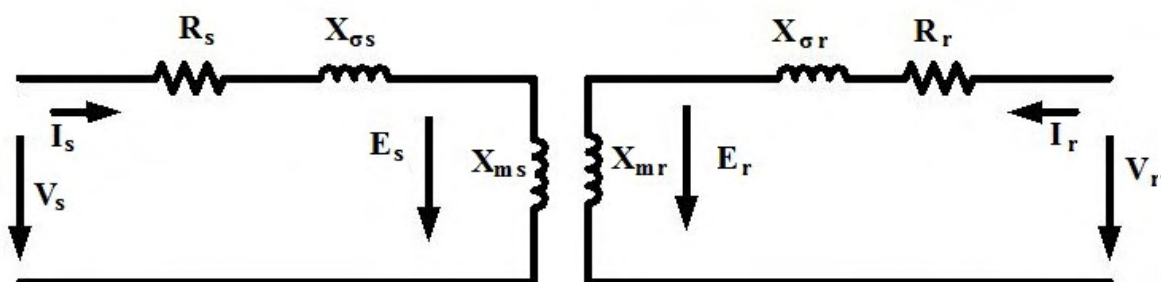
Για την κατάσταση του δρομέα σε στάση ισχύει $n_r=0$ και η ολίσθηση ισούται με την μονάδα ($s=1$). Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας υπάρχει μόνο η μαγνητική ροή του στάτη από το ρεύμα που τροφοδοτεί τον κινητήρα, η οποία περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα.

Αν διαιρέσουμε κατά μέλη τις σχέσεις που ορίζουν την ηλεκτρεγερτική δύναμη για τον στάτη και τον δρομέα θα προκύψει ένας σταθερός αριθμός, οποίος ονομάζεται σχέση μετασχηματισμού (4.4) και συμβολίζεται με a .

$$\frac{E_s}{E_r} = \frac{K_{ws}}{K_{wr}} \frac{N_s}{N_r} = a \quad (4.4)$$

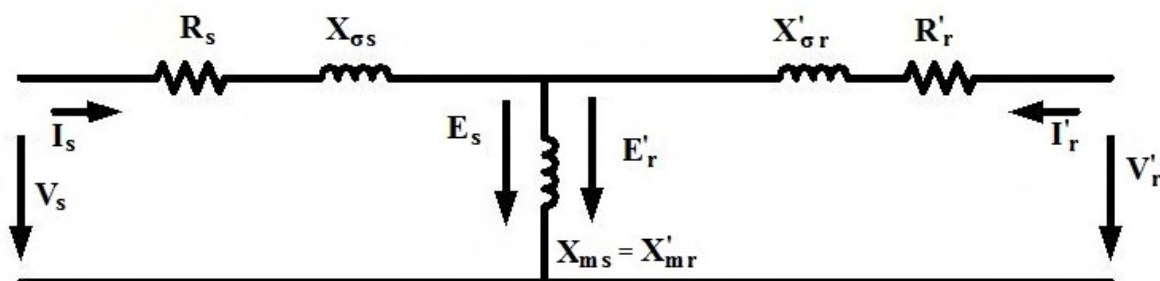
όπου K_{ws}, K_{wr} είναι κατασκευαστικοί συντελεστές και N_s, N_r ο αριθμός των σπειρών.

Ο ασύγχρονος κινητήρας σε στάση είναι ένας μετασχηματιστής ο οποίος αντί για εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο έχει περιστρεφόμενο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3 το ισοδύναμο κύκλωμα.



Σχήμα 4.3

Χρησιμοποιώντας τη σχέση μετασχηματισμού το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.3 παίρνει τη μορφή ενός απλοποιημένου κυκλώματος μετασχηματιστή. Στο Σχήμα 4.4 αναπαρίσταται αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα με όλες τις ποσότητες ανηγμένες στον στάτη.



Σχήμα 4.4

Τα μεγέθη του δρομέα μεταφέρονται στο πρωτεύον που είναι τα μεγέθη του στάτη. Οι σχέσεις που εκφράζουν αυτή τη μεταφορά χρησιμοποιώντας τη σχέση μετασχηματισμού είναι οι (4.5), (4.6), (4.7), (4.8), (4.9) και (4.10)

$$E'_r = E_s a \quad (4.5) \qquad V'_r = V_s a \quad (4.6)$$

$$I'_r = I_s a \quad (4.7) \qquad R'_r = R_s a^2 \quad (4.8)$$

$$X'_{\sigma r} = X_{\sigma s} a^2 \quad (4.9) \qquad X'_{mr} = X_{ms} \quad (4.10)$$

4.2.2 Περιστροφή δρομέα με $I_r = 0$

Σε αυτή την περίπτωση η περιστροφή του δρομέα γίνεται εφαρμόζοντας εξωτερική μηχανική ροπή, η οποία τον περιστρέφει κατά την φορά του μαγνητικού πεδίου με n στροφές ανά λεπτό. Η διαφορά με την προηγούμενη προσέγγιση όπου ο δρομέας είναι σε στάση, είναι πως η ολίσθηση θα είναι διάφορη της μονάδας (αφού $n > 0$) και επίσης η συχνότητα της ηλεκτρεγερτικής δύναμης θα είναι διαφορετική της συχνότητας του δικτύου. Αυτό συμβαίνει επειδή η συχνότητα της ηλεκτρεγερτικής δύναμης πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή s που είναι διάφορος της μονάδας.

Η σχέση (4.11) χαρακτηρίζει την τάση στην εν κενώ λειτουργία με περιστροφή του δρομέα.

$$V_r = s \frac{V_s}{1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_{ms}}} a \quad (4.11)$$

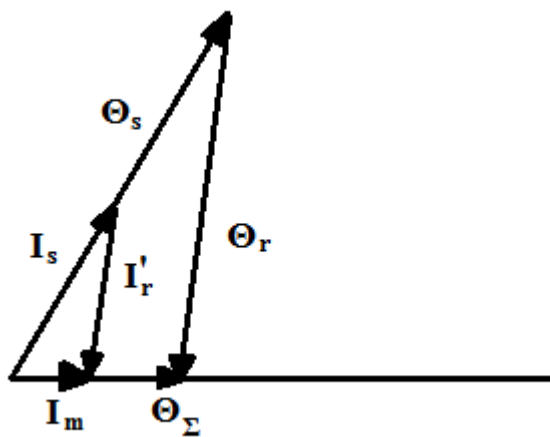
και όπως φαίνεται από την εξίσωση αυτή, η τάση της εν κενώ λειτουργίας τη μηχανής είναι ανάλογη τη ολίσθησης.

4.3 Λειτουργία υπό φορτίο

Κατά τη λειτουργία μιας επαγωγικής μηχανής υπό φορτίο δημιουργούνται δύο μαγνητικά πεδία, που προέρχονται από τα ρεύματα του στάτη και του δρομέα. Αυτά τα δύο μαγνητικά πεδία περιστρέφονται με την ίδια φορά και την ίδια ταχύτητα τόσο έναντι του στάτη όσο και του δρομέα. Το ρεύμα του πρωτεύοντος, δηλαδή του στάτη παράγει ένα διάρρευμα θ_s . Για να διεγερθεί μια μαγνητική γραμμή η οποία σχηματίζει μια κλειστή διαδρομή και κατ'επέκταση μια επιφάνεια χρειάζεται μια ποσότητα ρεύματος. Το διάρρευμα είναι το αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων που διαπερνούν την επιφάνεια που σχηματίζεται από την κλειστή αυτή διαδρομή. Παρόμοια ο δρομέας παράγει ένα διάρρευμα θ_r . Τα δύο αυτά διαρρέυμα αν και παράγονται από ρεύματα διαφορετικής συχνότητας, έχουν ίδια ταχύτητα περιστροφής όπως και τα μαγνητικά πεδία, ανεξάρτητα από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

Αθροίζοντας διανυσματικά τα διαρρέυμα του στάτη και του δρομέα προκύπτει το διάρρευμα θ_Σ . Υποθέτοντας πως το διάρρευμα αυτό προέρχεται από ένα ρεύμα μαγνήτησης I_m , παραλείποντας τις μαθηματικές πράξεις εδώ, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα, πως για διανύσματα των ρευμάτων ισχύει η σχέση (4.12)

$$I_m = I_s + I'_r \quad (4.12)$$



Σχήμα 4.5 Διανυσματικό διάγραμμα διαρρευμάτων

Για τις ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις μεταξύ στάτη και δρομέα ισχύει η (4.13)

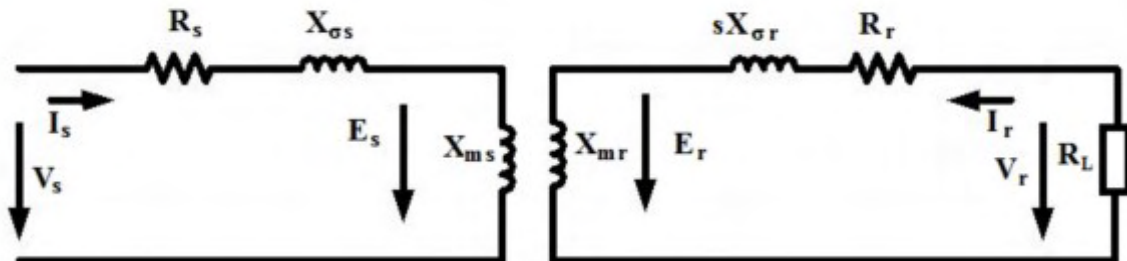
$$E_s = sE_r \alpha \quad (4.13)$$

και συναρτήσει του ρεύματος μαγνήτισης οι εξισώσεις των ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων παίρνουν τη μορφή (4.14)

$$E_s = -jX_{hs} I_m \quad (4.14)$$

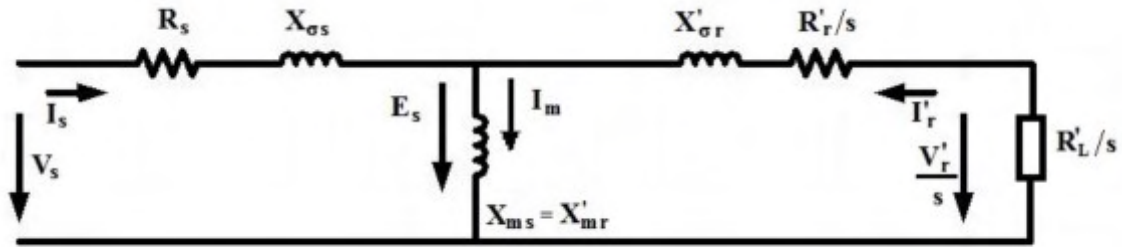
$$E_r = -jsX_{hr} I_m \alpha$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης μηχανής υπό φορτίο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.6



Σχήμα 4.6 Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης μηχανής υπό φορτίο

Το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 4.6 μπορεί να ενοποιηθεί σε ένα κύκλωμα με το δευτερεύον κύκλωμα του δρομέα να είναι ανηγμένο στο πρωτεύον του στάτη. Η ενοποίηση με τις απαραίτητες μετατροπές φαίνεται στο Σχήμα 4.7



Σχήμα 4.7

Από το Σχήμα 4.7 εξάγονται οι εξισώσεις (4.15), (4.16), (4.17) και (4.18)

$$-V_s + I_s R_s + jI_s X_{\sigma s} = -jX_{hs} I_m \quad (4.15)$$

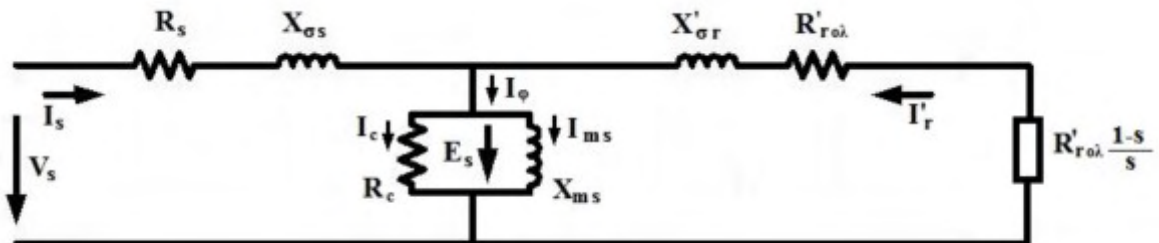
$$-\frac{V'_r}{s} + I'_r \frac{R'_r}{s} + jI'_r X'_{\sigma r} = -jX_{hs} I_m \quad (4.16)$$

$$I_m = I_s + I'_r \quad (4.17)$$

$$V'_r = I'_r R'_L \quad (4.18)$$

Επιπρόσθετα να σημειωθεί πως είναι σύνηθες οι αντιστάσεις του δευτερεύοντος μέρους να συνοψίζονται σε μία αντίσταση $R'_{\text{ρολ}}$.

Λαμβάνοντας υπόψιν και τις απώλειες σιδήρου μπορούμε να εξάγουμε το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα μια φάσης μια υπό φορτίο επαγωγικής μηχανής ανηγμένο στο πρωτεύον όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8

Το ρεύμα I_{ϕ} προσδιορίζει το ρεύμα του στάτη στην εν κενώ λειτουργία της μηχανής.

Όπως έχει ειπωθεί ξανά, από στο σχήμα φαίνεται πως ο επαγωγικός κινητήρας συμπεριφέρεται όπως ένας μετασχηματιστής έχοντας στο δευτερεύον μέρος του φορτίο με αντίσταση $R_{\text{ολ}}(1/s)s$. Η αντίσταση αυτή είναι μια εξωτερική αντίσταση που πρέπει να συνδεθεί στο κύκλωμα του δρομέα για να έχουμε ρεύμα I_r , ενώ επίσης είναι ένα στοιχείο του κυκλώματος στο οποίο καταναλώνεται ισχύς.

4.4 Κυκλωματικό μοντέλο τριφασικού κινητήρα

4.4.1 Εξισώσεις Τάσης

Οι εξισώσεις τάσεις για κάθε φάση του στάτη ορίζονται από τις σχέσεις (4.19), (4.20) και (4.21)

$$v_{as} = i_{as} r_s + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \quad (4.19)$$

$$v_{bs} = i_{bs} r_s + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \quad (4.20)$$

$$v_{cs} = i_{cs} r_s + \frac{d\lambda_{cs}}{dt} \quad (4.21)$$

και για κάθε φάση του δρομέα από τις (4.22), (4.23) και (4.24)

$$v_{ar} = i_{ar} r_s + \frac{d\lambda_{ar}}{dt} \quad (4.22)$$

$$v_{br} = i_{br} r_s + \frac{d\lambda_{br}}{dt} \quad (4.23)$$

$$v_{cr} = i_{cr} r_s + \frac{d\lambda_{cr}}{dt} \quad (4.24)$$

Οι εξισώσεις της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής, υπό τη μορφή πινάκων ορίζονται απο την σχέση (4.25) ως

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} \quad \text{Wb.turn} \quad (4.25)$$

Όπου για η πεπλεγμένη ροή και το ρεύμα στον στάτη και το δρομέα φαίνονται στην σχέση (4.26)

$$\begin{aligned} \lambda_s^{abc} &= (\lambda_{as}, \lambda_{bs}, \lambda_{cs})^T \\ \lambda_r^{abc} &= (\lambda_{ar}, \lambda_{br}, \lambda_{cr})^T \\ i_s^{abc} &= (i_{as}, i_{bs}, i_{cs})^T \\ i_r^{abc} &= (i_{ar}, i_{br}, i_{cr})^T \end{aligned} \quad (4.26)$$

Οι υποπίνακες των αυτεπαγωγιοτήτων των τυλιγμάτων L_{ss} (στάτη σε στάτη) και L_{rr} (δρομέα σε δρομέα) είναι της μορφής (4.27) και (4.28)

$$L_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$$L_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

με μονάδα μέτρησης το H

Οι υποπίνακες των αμοιβαίων επαγωγιοτήτων των τυλιγμάτων από στάτη σε δρομέα L_{sr} και δρομέα σε στάτη L_{rs} σε μορφή πινάκων είναι της μορφής που ορίζεται στην (4.29)

$$L_{sr}^{abc} = [L_{rs}^{abc}]^T = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\theta_r + \frac{2\pi}{3} & \cos\theta_r - \frac{2\pi}{3} \\ \cos\theta_r - \frac{2\pi}{3} & \cos\theta_r & \cos\theta_r + \frac{2\pi}{3} \\ \cos\theta_r + \frac{2\pi}{3} & \cos\theta_r - \frac{2\pi}{3} & \cos\theta_r \end{bmatrix} H \quad (4.29)$$

Να σημειωθεί, πως στις παραπάνω σχέσεις η ποσότητα L_{ls} συμβολίζει την ανά φάση σκέδαση της επαγωγής στο τύλιγμα του στάτη και η L_{lr} συμβολίζει την ανά φάση σκέδαση της επαγωγής στο τύλιγμα του δρομέα. Η ποσότητα L_{sm} συμβολίζει την αμοιβαία επαγωγή των τυλιγμάτων του στάτη, η L_{rm} την αμοιβαία επαγωγή των τυλιγμάτων του δρομέα και η L_{sr} είναι η κορυφαία τιμή της αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα.

Αγνοώντας τις απώλειες σιδήρου είναι δυνατό να εκφραστούν οι παραπάνω ποσότητες των επαγωγιμοτήτων συναρτήσει του αριθμού των θηλιών του στάτη N_s , του δρομέα N_r και της μαγνητικής αγωγιμότητας του διάκενου P_g , όπως φαίνεται στις σχέσεις (4.30), (4.31), (4.32), (4.33) και (4.34)

$$L_{ss} = N_s^2 P_g \quad (4.30)$$

$$L_{rr} = N_r^2 P_g \quad (4.31)$$

$$L_{sr} = N_s N_r P_g \quad (4.32)$$

$$L_{sm} = N_s^2 P_g \cos \frac{2\pi}{3} \quad (4.33)$$

$$L_{rm} = N_r^2 P_g \cos \frac{2\pi}{3} \quad (4.34)$$

Ένας ιδανικός ηλεκτρικός κινητήρας περιγράφεται από διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης για κάθε τύλιγμα του. Οι εξισώσεις αυτές είναι συζευγμένες μέσω της αμοιβαίας επαγωγής που υπάρχει μεταξύ των τυλιγμάτων. Οι μετασχηματισμοί των Park και Clark είναι το κλειδί για τη δυνατότητα της μοντελοποίησης των επαγωγικών κινητήρων στην μεταβατική κατάσταση τους (Transient State), καθώς οι εξαρτώμενες από τον χρόνο επαγωγιμότητες των διαφορικών εξισώσεων θα έχουν σταθερές τιμές.

4.5 Μοντελοποίηση κινητήρα στο αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς dq0

Θεωρητικά ένας ιδανικός επαγωγικός κινητήρας έχει ομοιόμορφο διάκενο. Η επιλογή των πλαισίων dq0 γίνεται βάση της συμβατότητας τους με τα στοιχεία του δικτύου. Στην ανάλυση των επαγωγικών κινητήρων χρησιμοποιούνται δύο πλαίσια αναφοράς. Το σταθερό πλαίσιο αναφοράς και το στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Η επιλογή του σταθερού πλαισίου είναι προτιμότερη όταν το δίκτυο παροχής είναι μεγάλο και πολύπλοκο. Από την άλλη στο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς οι μεταβλητές dq είναι σταθερές στη μόνιμη κατάσταση. Κάτι τέτοιο αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για την κατασκευή μοντέλου μικρού σήματος σε ένα σημείο λειτουργίας.

Αρχικά θα εξάγουμε τις εξισώσεις του επαγωγικού κινητήρα στο αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς, του οποίου η συχνότητα περιστροφής ω έχει την ίδια κατεύθυνση με την περιστροφή του δρομέα. Για το σταθερό πλαίσιο αναφοράς θέτουμε $\omega=0$ ενώ για το στρεφόμενο πλαίσιο $\omega=\omega_e$.

Η εξίσωση μετασχηματισμού από το abc πλαίσιο της τριφασικής τροφοδοσίας στο dq0 πλαίσιο ορίζεται από την σχέση (4.35)

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix} = [T_{qd0}(\theta)] \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Η γωνία θ που σχηματίζεται από τον άξονα q και τον άξονα a του τυλίγματος του στάτη ορίζεται από τη σχέση (4.36)

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \theta(0) \quad \text{elec. rad} \quad (4.36)$$

Παρομοίως η γωνία $\theta_r(t)$ που σχηματίζεται από τον άξονα φάσης a του στάτη και τον άξονα φάσης a του δρομέα που έχει γωνιακή συχνότητα περιστροφής $\omega_r(t)$ ορίζεται από τη σχέση (4.37)

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_r(0) \quad \text{elec. rad}$$

(4.37)

Ο πίνακας μετασχηματισμού $[T_{qd0}(\theta)]$ ορίζεται από την σχέση (4.38)

$$[T_{qd0}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\theta - \frac{2\pi}{3} & \cos\theta + \frac{2\pi}{3} \\ \sin\theta & \sin\theta - \frac{2\pi}{3} & \sin\theta + \frac{2\pi}{3} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

και ο αντίστροφος του από την σχέση (4.39)

$$[T_{qd0}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos\theta - \frac{2\pi}{3} & \sin\theta - \frac{2\pi}{3} & 1 \\ \cos\theta + \frac{2\pi}{3} & \sin\theta + \frac{2\pi}{3} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

4.5.1 Εξισώσεις τάσης qd0

Οι εξισώσεις τάσης του τυλίγματος του στάτη εκφράζονται από την σχέση (4.40)

$$v_s^{abc} = p\lambda_s^{abc} + r_s^{abc} i_s^{abc} \quad (4.40)$$

όπου το p συμβολίζει τον τελεστή d/dt

Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό του Park στην παραπάνω σχέση παίρνουμε ως αποτέλεσμα την σχέση (4.41)

$$v_s^{qd0} = [T_{qd0}(\theta)]p[T_{qd0}(\theta)]^{-1}[\lambda_s^{qd0}] + [T_{qd0}(\theta)]r_s^{abc}[T_{qd0}(\theta)]^{-1}[i_s^{qd0}] \quad (4.41)$$

Παραγωγίζοντας ως προς το χρόνο τον όρο

$$p[T_{qd0}(\theta)]^{-1}[\lambda_s^{qd0}]$$

και κάνοντας την κατάλληλες αντικαταστάσεις στην προηγούμενη σχέση, καταλήγουμε στην σχέση (4.42)

$$v_s^{qd0} = \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda_s^{qd0} + p\lambda_s^{qd0} + r_s^{abc}i_s^{qd0} \quad (4.42)$$

$$\text{όπου } \omega = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{και} \quad r_s^{qd0} = r_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Παρομοίως οι ποσότητες στο δρομέα αν μετασχηματιστούν στο πλαίσιο qd0 θα έχουμε την σχέση (4.43)

$$v_r^{qd0} = (\omega - \omega_r) \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda_r^{qd0} + p\lambda_r^{qd0} + r_r^{qd0}i_r^{qd0} \quad (4.43)$$

4.5.2 Σχέση πεπλεγμένης μαγνητικής ροής

Εφαρμόζοντας τον πίνακα μετασχηματισμού $[T_{dq0}]$ στη σχέση για την πεπλεγμένη ροή (4.44)

$$\lambda_s^{qd0} = [T_{dq0}(\theta)](L_{ss}^{abc} i_s^{abc} + L_{sr}^{abc} i_r^{abc}) \quad (4.44)$$

και χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο πίνακα μετασχηματισμού για να αντικατασταθούν τα ρεύματα στο πλαίσιο qd0 από το τριφασικό abc, έχουμε τελικά την σχέση (4.45) για την πεπλεγμένη μαγνητική ροή στο στάτη

$$\lambda_s^{qd0} = \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} i_s^{qd0} + \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} i_r^{qd0} \quad (4.45)$$

ενώ για το δρομέα ισχύει η σχέση (4.46)

$$\lambda_r^{qd0} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} i_s^{qd0} + \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} i_r^{qd0} \quad (4.46)$$

Συνολικά οι πεπλεγμένες μαγνητικές ροές του στάτη και του δρομέα μπορούν να συνοψιστούν σε ένα μοναδικό πίνακα, όπως φαίνεται στην σχέση (4.47), ενώ τα συστατικά του πίνακα στις σχέσεις (4.48) και (4.49)

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

όπου

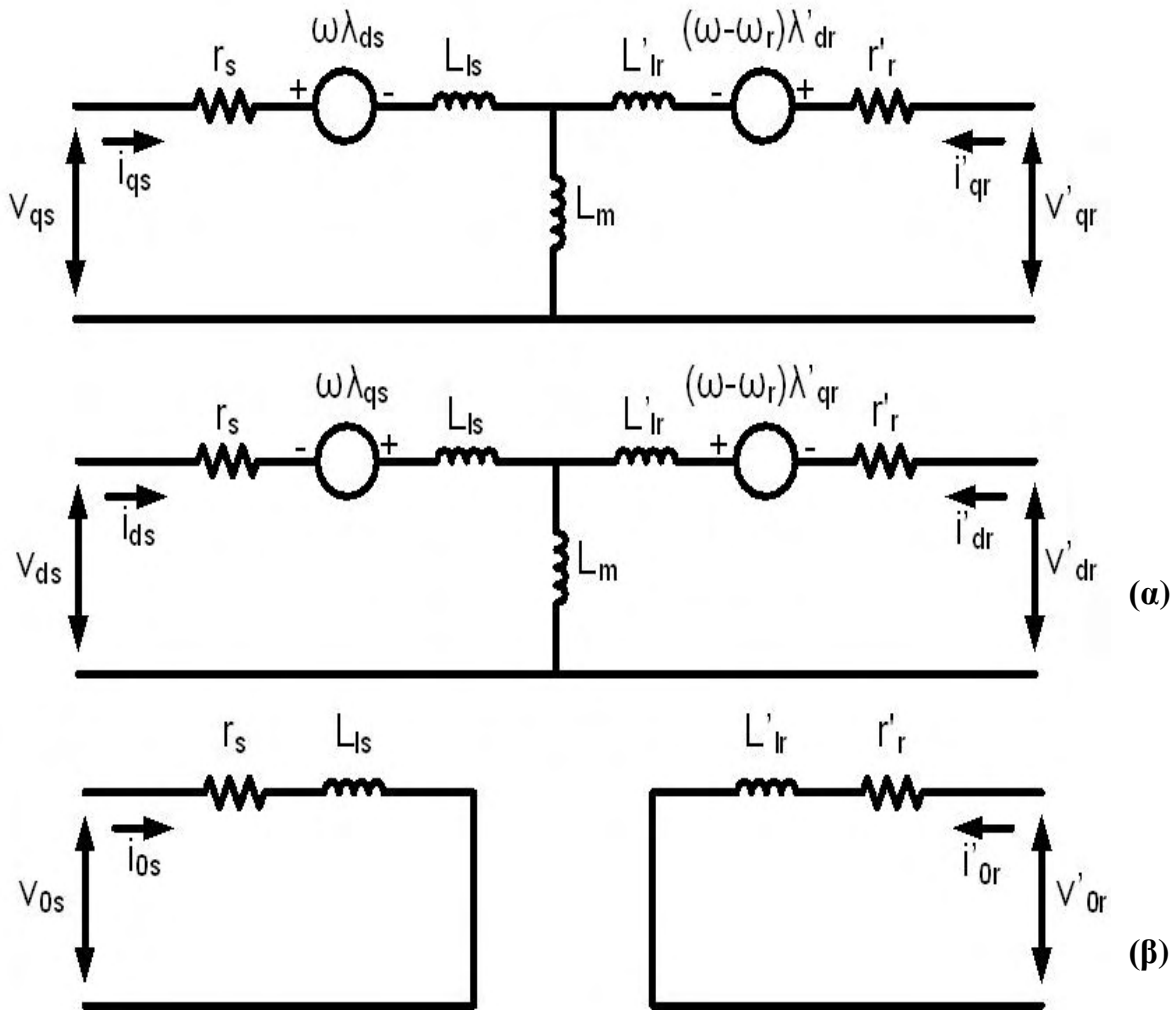
$$\lambda'_{qr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{qr} \quad , \quad \lambda'_{dr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{dr}$$
$$i'_{qr} = \frac{N_s}{N_r} i_{qr} \quad , \quad i'_{dr} = \frac{N_s}{N_r} i_{dr} \quad (4.48)$$

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_{lr}$$

και η μαγνητική επαγωγιμότητα στο στάτη L_m

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ss} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{N_r} L_{sr} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{N_r} L_{rr} \quad (4.49)$$

Στο Σχήμα 4.9 απεικονίζεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα στο αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς.



Σχήμα 4.9 ισοδύναμο κύκλωμα ενός ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα στο αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς. (α) άξονας d (β) άξονας q (γ) μηδενική ακολουθία

4.5.3 Εξίσωση ροπής qd0

Η συνολική ισχύς εισόδου στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα δίνεται από τη σχέση (4.50) της qd0 μορφής

$$P_{in} = \frac{3}{2} (v_{qs}i_{qs} + v_{ds}i_{ds} + 2v_{0s}i_{0s} + v'_{qr}i'_{qr} + v'_{dr}i'_{dr} + 2v'_{0r}i'_{0r}) \quad W \quad (4.50)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 4.42 και 4.43 που έχουν ήδη αναφερθεί, για να αντικαταστήσουμε τις τάσεις στην σχέση 4.50, θα προκύψουν οι όροι i^2r , i^2r_l και $\omega_l i$. Ο όρος i^2r συμβολίζει τις απώλειες χαλκού, ο όρος i^2r_l αναπαριστά το ποσό της ανταλλαγής ενέργειας του μαγνητικού πεδίου μεταξύ των τυλιγμάτων και ο όρος $\omega_l i$ το ποσό της ενέργειας που μετατρέπεται σε ωφέλιμο μηχανικό έργο. Η ηλεκτρομηχανική ροπή που παράγει ο κινητήρας διαμορφώνεται από το άθροισμα των όρων που περιέχουν τον παράγοντα ω_l διαιρούμενο από τ μηχανική ταχύτητα, και έτσι εξάγεται η σχέση (4.51).

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_r} [\omega(\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) + (\omega - \omega_r)(\lambda'_{dr}i'_{qr} - \lambda'_{qr}i'_{dr})] \quad Nm \quad (4.51)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις των πεπλεγμένων μαγνητικών ροών η προηγούμενη σχέση (4.51), μπορεί να πάρει μια από τις μορφές (4.52) και (4.53) και (4.54)

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda'_{qr}i'_{dr} - \lambda'_{dr}i'_{qr}) \quad Nm \quad (4.52)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) \quad Nm \quad (4.53)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (i'_{dr}i_{qs} - i'_{qr}i_{ds}) \quad Nm \quad (4.54)$$

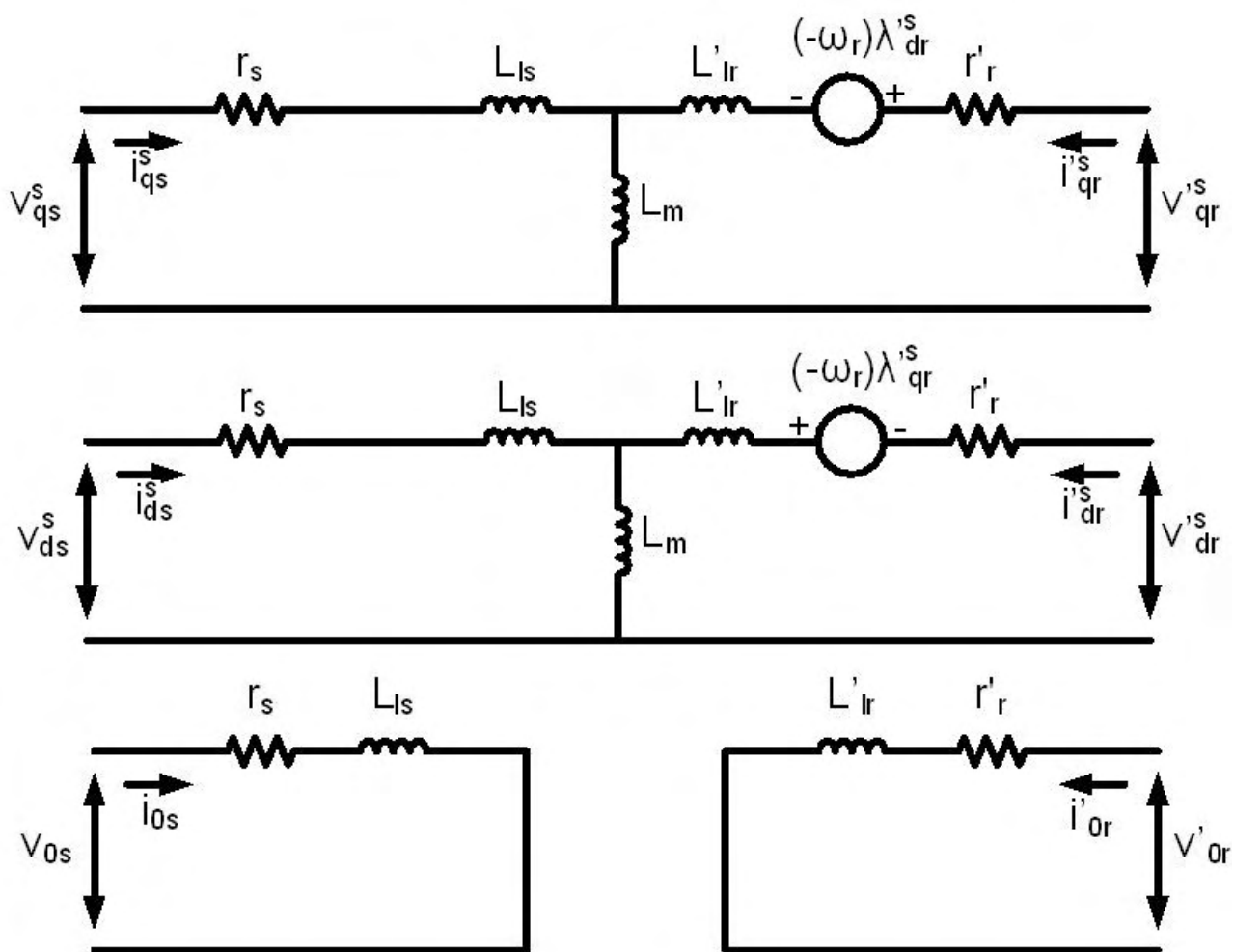
Αναλόγως με τους σκοπούς και τα δεδομένα που διατίθενται για κάθε προσομοίωση επιλέγεται ποια από τις παραπάνω μορφές θα χρησιμοποιηθεί.

4.6 Σταθερό και σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς

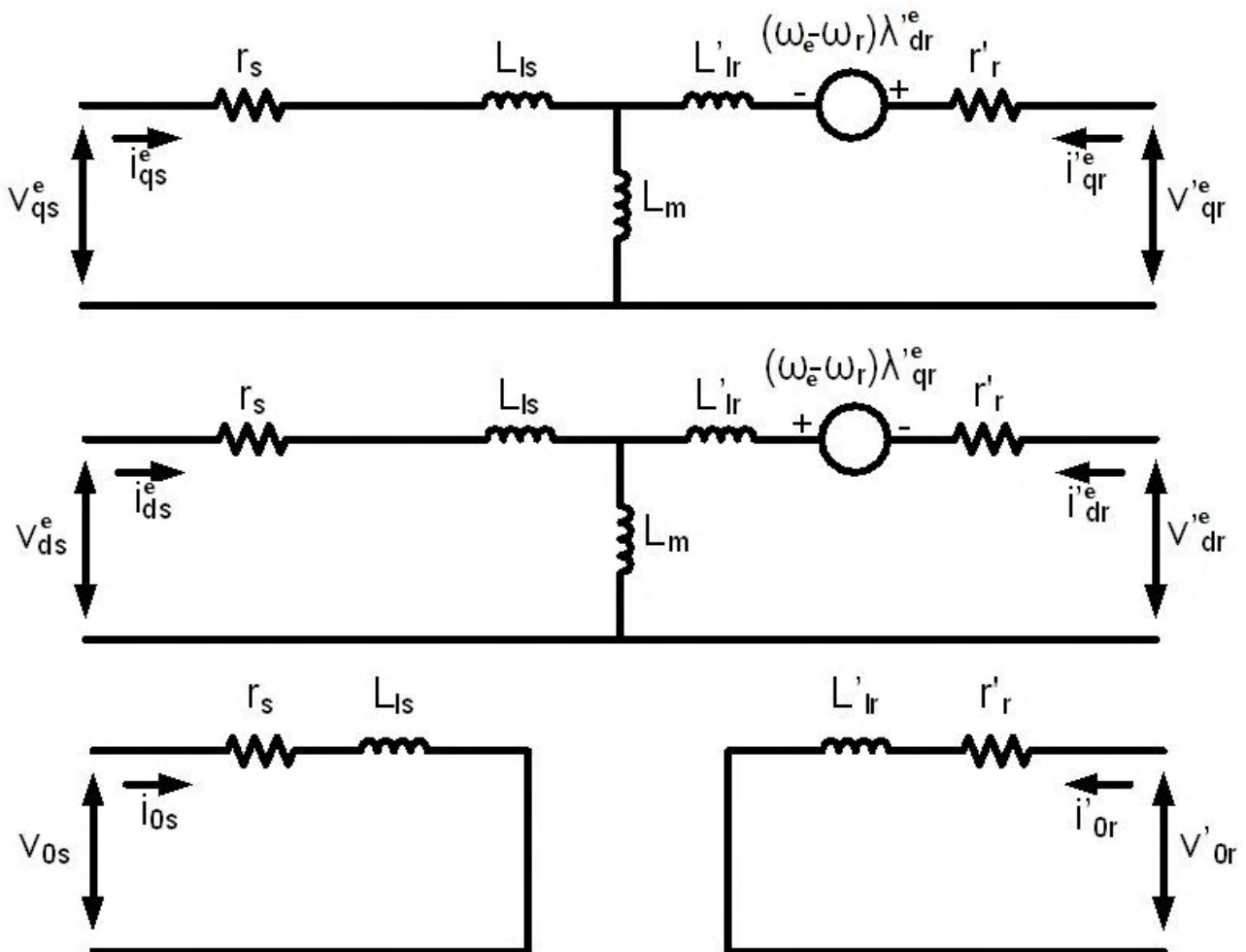
Η προσομοίωση ενός επαγωγικού κινητήρα στο αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς είναι ένα γεγονός σπάνιας συχνότητας. Στην μελέτη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, τα φορτία των επαγωγικών κινητήρων μαζί με τα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος προσομοιώνονται στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Όμως όσον αφορά τη μεταβατική κατάσταση είναι βολικότερο αυτή η προσομοίωση να λάβει χώρα στο σταθερό πλαίσιο αναφοράς. Για την ανάλυση της δυναμικής σταθερότητας για κάποια τυχαία κατάσταση λειτουργίας χρησιμοποιείται ένα σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς με τιμές τάσεων και ρευμάτων της μόνιμης κατάστασης.

Έχοντας ήδη αναφερθεί στο αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς, αξίζει να σημειωθεί πως οι εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν στο σταθερό και σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς είναι όμοιες με αυτές του αυθαίρετου, με την διαφορά στον συμβολισμό της γωνιακής ταχύτητας ω , θέτοντας απλά $\omega = \omega_e$ ή $\omega = 0$. Ο δείκτης e χρησιμοποιείται για να προσδιορίσουμε ότι βρισκόμαστε στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς ενώ ο δείκτης s χρησιμοποιείται για να προσδιορίσουμε πως βρισκόμαστε στο σταθερό πλαίσιο αναφοράς. Επίσης η γωνιακή ταχύτητα ισούται με μηδέν όταν βρισκόμαστε στο σταθερό πλαίσιο αναφοράς.

Στα Σχήματα 4.10 και 4.11 απεικονίζονται τα ισοδύναμα κυκλωματικά μοντέλα στο σταθερό και το στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς.



Σχήμα 4.10 Ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο στο σταθερό πλαίσιο αναφοράς για τις συνιστώσες d, q και την μηδενική



Σχήμα 4.11 Ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς

4.7 Μοντέλο μόνιμης κατάστασης

Για την μόνιμη κατάσταση από την παροχή ημιτονοειδούς τριφασικού ρεύματος έχουμε τις εξισώσεις τάσεων και ρευμάτων στον στάτη όπως φαίνονται στην (4.55)

$$\begin{aligned}
v_{as} &= V_{ms} \cos(\omega_e t) & i_{as} &= I_{ms} \cos(\omega_e t - \phi_s) \\
v_{bs} &= V_{ms} \cos(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}) & i_{bs} &= I_{ms} \cos(\omega_e t - \frac{2\pi}{3} - \phi_s) \\
v_{cs} &= V_{ms} \cos(\omega_e t - \frac{4\pi}{3}) & i_{cs} &= I_{ms} \cos(\omega_e t - \frac{4\pi}{3} - \phi_s)
\end{aligned} \tag{4.55}$$

Ενώ οι εξισώσεις για τον δρομέα ο οποίος περιστρέφεται με ολίσθηση s εκφράζονται ανά φάση στις (4.56) και (4.57) για τις τάσεις και τα ρεύματα αντίστοιχα.

$$\begin{aligned}
v_{ar} &= V_{ms} \cos(s\omega_e t - \theta_r(0) - \delta) \\
v_{br} &= V_{ms} \cos(s\omega_e t - \frac{2\pi}{3} - \theta_r(0) - \delta) \\
v_{cr} &= V_{ms} \cos(s\omega_e t - \frac{4\pi}{3} - \theta_r(0) - \delta)
\end{aligned} \tag{4.56}$$

$$\begin{aligned}
i_{ar} &= I_{ms} \cos(s\omega_e t - \theta_r(0) - \delta - \phi_r) \\
i_{br} &= I_{ms} \cos(s\omega_e t - \frac{2\pi}{3} - \theta_r(0) - \delta - \phi_r) \\
i_{cr} &= I_{ms} \cos(s\omega_e t - \frac{4\pi}{3} - \theta_r(0) - \delta - \phi_r)
\end{aligned} \tag{4.57}$$

Αν μετασχηματίσουμε τις παραπάνω σχέσεις του στάτη και του δρομέα από το τριφασικό abc πλαίσιο σε ένα σταθερό qd0 πλαίσιο αναφοράς, όπου ο άξονας q έχει ευθυγραμμιστεί με τον άξονα α της α φάσης του στάτη προκύπτουν οι εξισώσεις (4.58), (4.59), (4.60) και (4.61)

$$\vec{v}_s = v_{qs}^s - jv_{ds}^s = V_{ms} e^{j\omega_e t} \quad (4.58)$$

$$\vec{v}_r = (v_{qr}^r - jv_{dr}^r) e^{j\theta_r(t)} = V_{mr} e^{j(s\omega_e t - \theta_r(0) - \delta)} e^{j\theta_r(t)} \quad (4.59)$$

$$\vec{i}_s = i_{qs}^s - ji_{ds}^s = I_{ms} e^{-j\phi_s} e^{j\omega_e t} \quad (4.60)$$

$$\vec{i}_r = (i_{qr}^r - ji_{dr}^r) e^{j\theta_r(t)} = I_{mr} e^{j(s\omega_e t - \theta_r(0) - \delta - \phi_r)} e^{j\theta_r(t)} \quad (4.61)$$

όπου οι δείκτες s και r στον εκθέτη υποδεικνύουν τα στοιχεία του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα.

Στην λειτουργία τς μόνιμης κατάστασης με τον δρομέα να περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα $\omega_e(1-s)$ ισχύει η σχέση (4.62)

$$\theta_r(t) = \omega_e(1-s)t + \theta_r(0) \quad (4.62)$$

και τελικά οι εξισώσεις που παράγονται είναι οι (4.63) και (4.64)

$$\vec{v}_r = v_{qr}^s - jv_{dr}^s = V_{mr} e^{-j\delta} e^{-j\omega_e t} \quad (4.63)$$

$$\vec{i}_r = i_{qr}^s - ji_{dr}^s = I_{mr} e^{-j(\delta + \phi_r)} e^{-j\omega_e t} \quad (4.64)$$

Η ανάλυση της μόνιμης κατάστασης με ημιτονοειδή διέγερση συνήθως εκτελείται χρησιμοποιώντας χρονικούς φασιθέτες της τιμής rms. Οι φασιθέτες είναι μιγαδικοί αριθμοί που αναπαριστούν μια ημιτονοειδή συνάρτηση της οποίας το πλάτος, η γωνιακή συχνότητα και η αρχική φάση είναι χρονικά αναλλοίωτα. Οι rms τιμές των χωρικών διανυσμάτων συμβολίζονται με κεφαλαίο γράμμα και ένα βέλος από πάνω, ενώ οι φασιθέτες συμβολίζονται με κεφαλαίο γράμμα και περισπωμένη. Οι σχέσεις που έχουμε σε αυτή τη περίπτωση είναι οι (4.65) (4.66) (4.67) (4.68)

$$\tilde{V}_{as} = \frac{V_{ms}}{\sqrt{2}} e^{j0} \quad (4.65)$$

$$\tilde{I}_{as} = \frac{I_{ms}}{\sqrt{2}} e^{-j\phi_s} \quad (4.66)$$

$$\tilde{V}_{ar} = \frac{V_{mr}}{\sqrt{2}} e^{-j\delta} \quad (4.67)$$

$$\tilde{I}_{ar} = \frac{I_{mr}}{\sqrt{2}} e^{-j(\delta+\phi_r)} \quad (4.68)$$

Και (4.69), (4.70), (4.71), (4.72)

$$\vec{V}_{qs}^s - j\vec{V}_{ds}^s = \frac{v_{qs}^s - jv_{ds}^s}{\sqrt{2}} = \tilde{V}_{as} e^{j\omega_e t} \quad (4.69)$$

$$\vec{V}_{qr}^s - j\vec{V}_{dr}^s = \frac{v_{qr}^s - jv_{dr}^s}{\sqrt{2}} = \tilde{V}_{ar} e^{j\omega_e t} \quad (4.70)$$

$$\vec{I}_{qs}^s - j\vec{I}_{ds}^s = \frac{i_{qs}^s - ji_{ds}^s}{\sqrt{2}} = \tilde{I}_{as} e^{j\omega_e t} \quad (4.71)$$

$$\vec{I}_{qr}^s - j\vec{I}_{dr}^s = \frac{i_{qr}^s - ji_{dr}^s}{\sqrt{2}} = \tilde{I}_{ar} e^{j\omega_e t} \quad (4.72)$$

Όταν οι τάσεις και τα ρεύματα του δρομέα είναι ανηγμένα στον στάτη ισχύουν οι σχέσεις (4.73) και (4.74)

$$\vec{V}_{qr}^s - j\vec{V}_{dr}^s = \left(\frac{N_s}{N_r} \right) \tilde{V}_{ar} e^{j\omega_e t} = \tilde{V}'_{ar} e^{j\omega_e t} \quad (4.73)$$

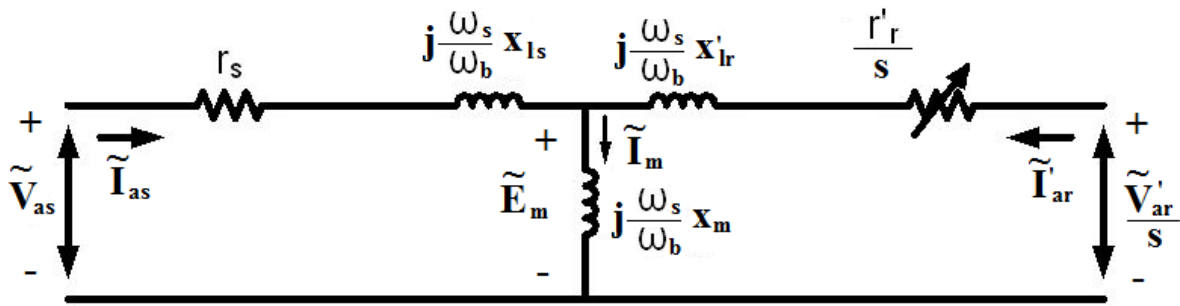
$$\vec{I}_{qr}^s - j\vec{I}_{dr}^s = \left(\frac{N_s}{N_r} \right) \tilde{I}_{ar} e^{j\omega_e t} = \tilde{I}'_{ar} e^{j\omega_e t} \quad (4.74)$$

Οι εξισώσεις της μαγνητικής ροής και των τάσεων στο σταθερό πλαίσιο αναφοράς, μπορούν να εκφραστούν, με όρους των rms φασιθετών τάσεων και ρευμάτων. Στις προκύπτουσες εξισώσεις κάνοντας κάποιες παραλλαγές, αντικαθιστώντας το $\omega_e - \omega_r$ με $s \omega_e$, απαλείφοντας κοινούς όρους κλπ, καταλήγουμε τις εξής εξισώσεις (4.75) και (4.76)

$$\tilde{V}_{as} = r_s \tilde{I}_{as} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} x_{ls} \tilde{I}_{as} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} x_m (\tilde{I}_{as} + \tilde{I}'_{ar}) \quad (4.75)$$

$$\frac{\tilde{V}'_{as}}{s} = \frac{r'_r}{s} \tilde{I}'_{ar} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} x'_{lr} \tilde{I}'_{ar} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} x_m (\tilde{I}_{as} + \tilde{I}'_{ar}) \quad (4.76)$$

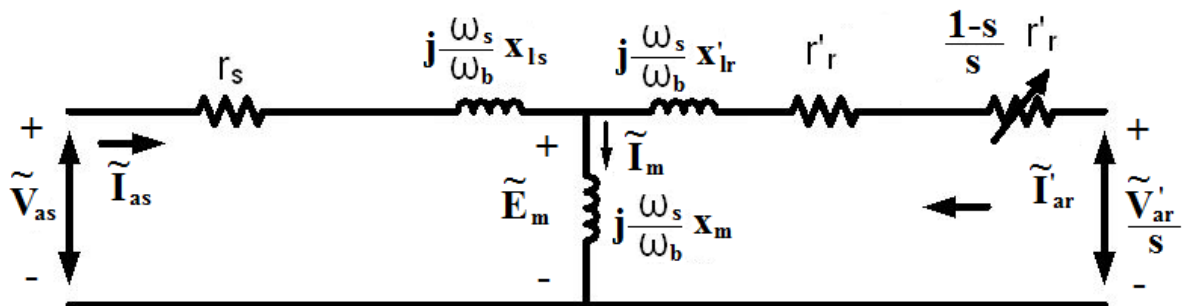
Στο Σχήμα 4.12 αποτυπώνεται το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης του τριφασικού λειτουργίας στη μόνιμη κατάσταση σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις.



Σχήμα 4.12 Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης του τριφασικού λειτουργίας στη μόνιμη κατάσταση

Οι απώλειες πυρήνα, ποικίλουν ανάλογα με το τετράγωνο της μεταβολής της μαγνητικής ροής στο διάκενο του πυρήνα ή αλλιώς, ή αλλιώς αναλόγως τάσης E_m και μπορούν να απεικονιστούν στο ισοδύναμο κύκλωμα τοποθετώντας μια αντίσταση r_c παράλληλα του πηνίου που εμπεριέχει την επαγωγική αντίσταση x_m .

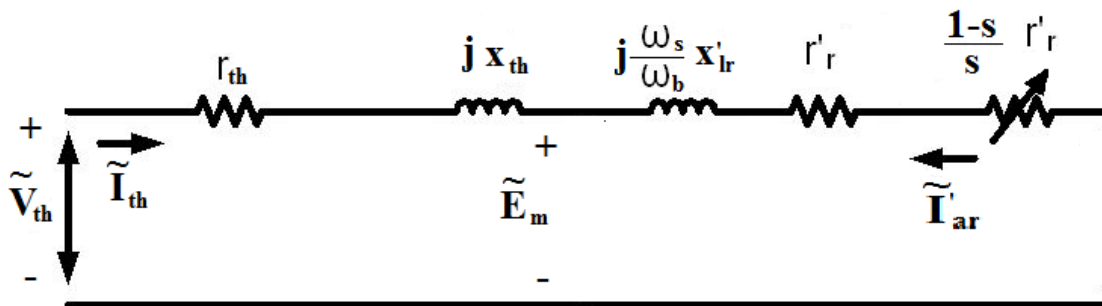
Το βέλος που διαπερνά το σύμβολο της αντίστασης στο κύκλωμα, ορίζει τον συμβολισμό της αναπαράστασης μια μεταβλητής αντίστασης. Ο όρος που μεταβάλλει την αντίσταση είναι η ολίσθηση s . Μπορούμε να διαχωρίσουμε την μεταβλητή αντίσταση σε δύο κομμάτια. Το αποτέλεσμα του διαχωρισμού αυτού θα είναι μια αντίσταση κανονική με την έννοια της σταθερής τιμής που θα έχει, και μία μεταβλητή αντίσταση η οποία περιέχει και πάλι την ολίσθηση s Σχήμα 4.13



Σχήμα 4.13

Η παραλλαγή αυτή του ισοδύναμου κυκλώματος, του Σχήματος 4.7 δεν είναι άνευ ουσίας. Στην παραλλαγή αυτή η μεταβλητή αντίσταση του σχήματος έχει άμεση σχέση με την μηχανική ισχύ του δρομέα, ενώ στην περίπτωση όπου το ισοδύναμο κύκλωμα είχε μόνο την μεταβλητή αντίσταση στο δευτερεύον μέρος του δρομέα, η αντίσταση αυτή ήταν άμεσα συνδεδεμένη με την ισχύ του διάκενου του κινητήρα.

Υπάρχει και μια δεύτερη παραλλαγή του σχήματος του ισοδύναμου κυκλώματος Σχήμα 4.14. Στην περίπτωση αυτό το κύκλωμα εκφράζεται με το ισοδύναμο Thevenin και χρήση της παραλλαγής αυτής γίνεται όταν η ροπή του κινητήρα είναι το αντικείμενο του ενδιαφέροντος της μελέτης του κινητήρα. Για το κύκλωμα αυτό ισχύει πως $\omega_e = \omega_b$ και $\tilde{V}'_{ar} = 0$.



Σχήμα 4.14 Ισοδύναμο Thevenin

Στην μόνιμη κατάσταση η αναπτυσσόμενη ισχύς ορίζεται από τη σχέση (4.77)

$$P_{em} = 3I_{ar}^2 \frac{1-s}{s} r'_r \quad (4.77)$$

ενώ η ηλεκτρομαγνητική ροπή ενός P-πολικού κινητήρα από τη σχέση (4.78)

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{P_{mech}}{\omega_{rm}} = 3I_{ar}^2 \frac{(1-s)}{s\omega_{sm}(1-s)} r'_r \\ &= \frac{3I_{ar}^2 r'_r}{s\omega_{sm}} = \frac{3I_{ar}^2 r'_r}{\omega_{sm} - \omega_{rm}} \end{aligned} \quad (4.78)$$

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας μιας επαγωγικής μηχανής γενικότερα, διαφέρουν αναλόγως με το είδος της τροφοδοσίας. Η τροφοδοσία μπορεί να είναι μια πηγή τάσης ή μια πηγή ρεύματος. Στην περίπτωση της πηγής τάσης, όταν η πτώση τάσης είναι μικρή η τάση στο διάκενο της μηχανής είναι σχεδόν ίδια με την τάση τροφοδοσίας. Στην περίπτωση της πηγής ρεύματος οι τάσεις εξόδου και διάκενου της μηχανής θα μεταβάλλονταν ανάλογα με το φορτίο της μηχανής αν το ρεύμα του στάτη διατηρούνταν σταθερό.

Χρησιμοποιώντας το κυκλωματικό μοντέλο κατά Thevenin η μέση τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής αποτυπώνεται μέσω της σχέσης (4.79)

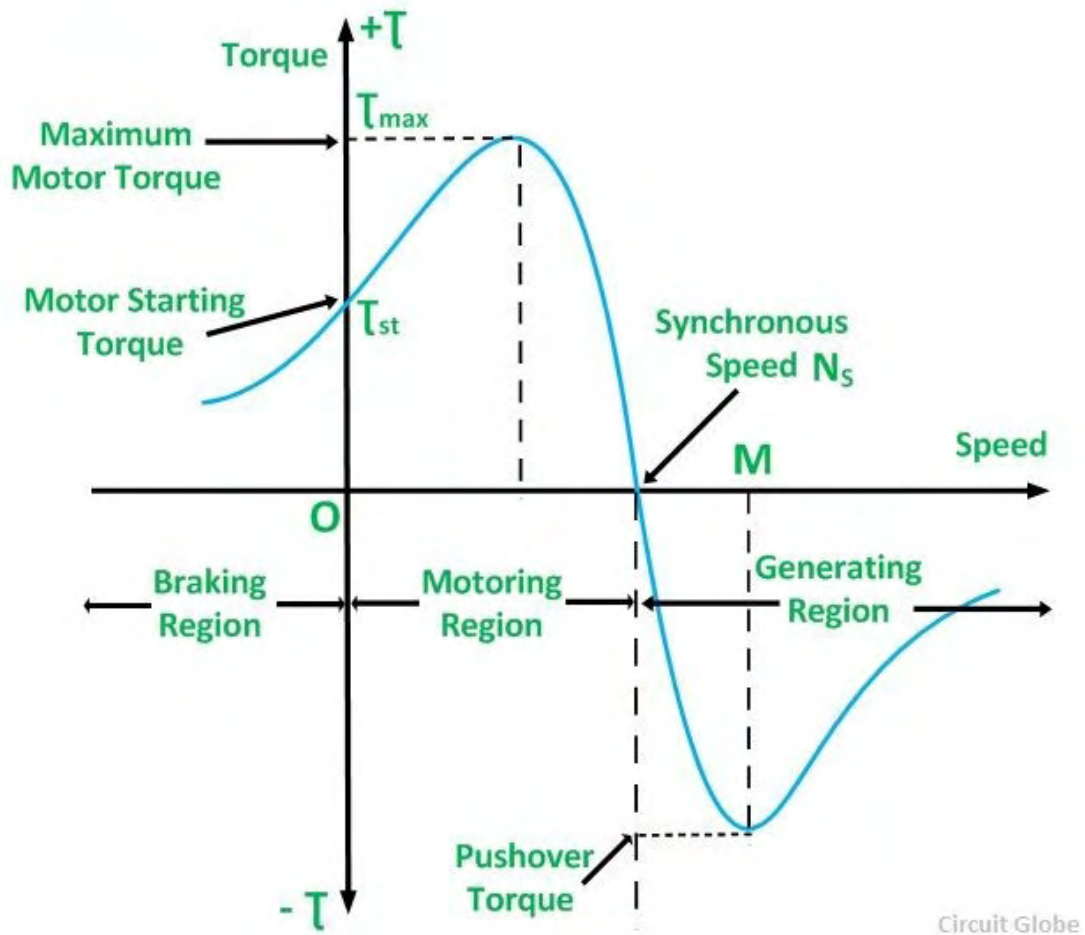
$$T_{em} = \frac{3P}{2\omega_e} \frac{V_{th}^2 (r'_r/s)}{(r_{th}+r'_r/s)^2 + (x_{th}+x'_{lr})^2} \quad (4.79)$$

Για τις παραμέτρους του κυκλώματος Thevenin ισχύουν οι σχέσεις (4.80) και (4.81)

$$\tilde{V}_{th} = \frac{jx_m}{r_s + j(x_{ls} + x_m)} \tilde{V}_{as} \quad (4.80)$$

$$\tilde{Z}_{th} = r_{th} + jx_{th} = \frac{jx_m(r_s + jx_{ls})}{r_s + j(x_{ls} + x_m)} \quad (4.81)$$

Διαμέσου της σχέσης της μέσης ροπής με τις παραμέτρους Thevenin, εξάγεται η γραφική παράσταση του Σχήματος 4.15, όπου απεικονίζεται η μέση ροπή συναρτήσει της ολίσθησης s (ή της ταχύτητας).



Σχήμα 4.15

Στη γραφική παράσταση διακρίνονται οι περιοχές κατά τις οποίες η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας, ως γεννήτρια αλλά και η περιοχή πέδησης της μηχανής.

Στην σχέση (4.82) προσδιορίζεται το σημείο καμψής της συνάρτησης, όπου η συνάρτηση έχει την μέγιστη ροπή

$$\frac{r'_r}{s_{maxt}} = \sqrt{r_{th}^2 + (x_{th} + x'_{lr})^2} \quad (4.82)$$

ενώ ο τύπος που μας δίνει την μέγιστη ροπή είναι δίνεται από τη σχέση (4.83)

$$T_{em}^{max} = \frac{3P}{4\omega_e} \frac{V_{th}^2}{r_{th} + \sqrt{r_{th}^2 + (x_{th} + x'_{lr})^2}} \quad Nm \quad (4.83)$$

Αξίζει να σημειωθεί πως η τιμή της μέγιστης ροπής, δεν εξαρτάται από την τιμή της αντίστασης του δρομέα, παρόλο που η τιμή της ολίσθησης στο σημείο όπου η ροπή της μηχανής είναι η μέγιστη εξαρτάται από την τιμή της αντίστασης του δρομέα.

4.8 Μοντέλο μεταβατικής κατάστασης

Η χρονική σταθερά της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη στους μεγάλους επαγωγικούς κινητήρες ή στους επαγωγικούς κινητήρες υψηλής απόδοσης. Στις πιο σύντομες μεταβάσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πιο απλό μοντέλο μεταβατικής κατάστασης. Το γεγονός που καθιστά το μοντέλο αυτό απλούστερο είναι η υπόθεση πως η πεπλεγμένη μαγνητική ροή στο τύλιγμα του δρομέα του κινητήρα είναι σταθερή κατά την μεταβατική κατάσταση. Ένα τέτοιο μοντέλο χρησιμοποιείται στα προγράμματα μεταβατικής σταθερότητας για να αναπαραστήσει τα φορτία των επαγωγικών κινητήρων.

Ξεκινώντας την κατασκευή του μοντέλου, το πρώτο βήμα είναι να εκχωρήσουμε κάποιες παραμέτρους που εκφράζουν την διαταραχή στις εξισώσεις των πεπλεγμένων μαγνητικών ροών του στάτη και του δρομέα, στους σύγχρονα περιστρεφόμενους άξονες qd που εκφράζονται μέσω των σχέσεων (4.84), (4.85), (4.86) και (4.87)

$$\lambda_{qs}^e = L_s i_{qs}^e + L_m i_{qr}^{te} \quad (4.84)$$

$$\lambda_{ds}^e = L_s i_{ds}^e + L_m i_{dr}^{te} \quad (4.85)$$

$$\lambda_{qr}^{te} = L'_r i_{qr}^{te} + L_m i_{qs}^e \quad (4.86)$$

$$\lambda_{dr}^{te} = L'_r i_{dr}^{te} + L_m i_{ds}^e \quad (4.87)$$

Οι εξισώσεις αυτές θα μετατραπούν στις εξισώσεις (4.88),(4.89),(4.90) και (4.91)

$$\lambda_{qso}^e + \Delta\lambda_{qs}^e = L_s(i_{qso}^e + \Delta i_{qs}^e) + L_m(i_{qro}^{te} + \Delta i_{qr}^{te}) \quad (4.88)$$

$$\lambda_{dso}^e + \Delta\lambda_{ds}^e = L_s(i_{dso}^e + \Delta i_{ds}^e) + L_m(i_{dro}^{te} + \Delta i_{dr}^{te}) \quad (4.89)$$

$$\lambda_{qro}^{te} + \Delta\lambda_{qr}^{te} = L'_r(i_{qro}^{te} + \Delta i_{qr}^{te}) + L_m(i_{qso}^e + \Delta i_{qs}^e) \quad (4.90)$$

$$\lambda_{dro}^{te} + \Delta\lambda_{dr}^{te} = L'_r(i_{dro}^{te} + \Delta i_{dr}^{te}) + L_m(i_{dso}^e + \Delta i_{ds}^e) \quad (4.91)$$

με το Δ να συμβολίζει τις αλλαγές των μεταβλητών και τον δείκτη \mathbf{o} να συμβολίζει τις ονομαστικές τιμές, ή τις τιμές χωρίς την διαταραχή, των μεταβλητών.

Εφαρμόζοντας την υπόθεση πως η πεπλεγμένη μαγνητική ροή στο τύλιγμα του δρομέα του κινητήρα είναι σταθερή κατά την μεταβατική κατάσταση, οι εξισώσεις θα πάρουν τη μορφή όπως φαίνεται στις (4.94) και (4.95)

$$\lambda_{qso}^e + \Delta\lambda_{qs}^e = L_s i_{qso}^e + L_m i_{qro}^{te} + (L_s - \frac{L_m^2}{L'_r}) \Delta i_{qs}^e \quad (4.94)$$

$$\lambda_{dso}^e + \Delta\lambda_{ds}^e = L_s i_{dso}^e + L_m i_{dro}^{te} + (L_s - \frac{L_m^2}{L'_r}) \Delta i_{ds}^e \quad (4.95)$$

Όταν οι τιμές της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής του δρομέα παραμένουν σταθερές η διαφορά – αλλαγή της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής, αλλά και των ρευμάτων στον στάτη εκφράζεται από τις σχέσεις (4.96) και (4.97)

$$\Delta\lambda_{qs}^e = \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r'} \right) \Delta i_{qs}^e = L_s' \Delta i_{qs}^e \quad (4.96)$$

$$\Delta\lambda_{ds}^e = \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r'} \right) \Delta i_{ds}^e = L_s' \Delta i_{ds}^e \quad (4.97)$$

όπου το L_s' συμβολίζει την μεταβατική επαγωγιμότητα του στάτη.

Συνεχίζοντας, οι σχέσεις των των τάσεων στοιχείων που φαίνονται στις σχέσεις (4.98) και (4.99)

$$\begin{aligned} E'_{qs} &= \omega_e (\lambda_{ds}^e - L_s' i_{ds}^e) \\ &= \omega_e (L_s i_{ds}^e + L_m i_{dr}^{te} - L_s' i_{ds}^e) \\ &= \omega_e \frac{L_m}{L_r'} \lambda_{dr}^{te} \end{aligned} \quad (4.98)$$

$$\begin{aligned} E'_{ds} &= -\omega_e (\lambda_{qs}^e - L_s' i_{qs}^e) \\ &= -\omega_e (L_s i_{qs}^e + L_m i_{qr}^{te} - L_s' i_{qs}^e) \\ &= -\omega_e \frac{L_m}{L_r'} \lambda_{qr}^{te} \end{aligned} \quad (4.99)$$

δείχνουν πως οι τάσεις των στοιχείων του στάτη υπό την μεταβατική τους κατάσταση είναι ανάλογες με τις πεπλεγμένες μαγνητικές ροές του δρομέα.

Έτσι, όταν οι μεταβλητές της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής στον δρομέα έχουν σταθερή τιμή, οι τάσεις E'_{qs} και E'_{ds} που ορίστηκαν παραπάνω θα έχουν και αυτές σταθερή τιμή.

Χρησιμοποιώντας τις qd εξισώσεις τάσης τού σύγχρονα στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς, όπως και τις εξισώσεις των E'_{qs} και E'_{ds} τάσεων εξάγουμε τις εξισώσεις τάσης κατά την λειτουργία του μεταβατικού μοντέλου (4.100), όπου οι τιμές της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής στον στάτη έχουν θεωρηθεί σταθερές.

$$\frac{d\lambda_{qs}^e}{dt} = v_{qs}^e - r_s i_{qs}^e - E'_{qs} + \omega_e L'_s i_{ds}^e \quad (4.100)$$

$$\frac{d\lambda_{ds}^e}{dt} = v_{ds}^e - r_s i_{ds}^e - E'_{ds} + \omega_e L'_s i_{qs}^e$$

Υπό την μορφή με όρους φασιθετών η εξίσωση (4.101)

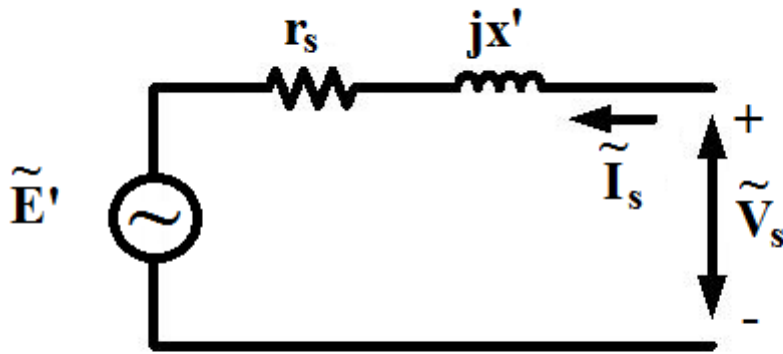
$$(v_{qs}^e - jv_{ds}^e) = (r_s + j\omega_e L'_s)(i_{qs}^e - ji_{ds}^e) + (E'_{qs} - jE'_{ds}) \quad (4.101)$$

που προέρχεται από τις εξισώσεις τάσης της μεταβατικής κατάστασης αν της αφαιρέσουμε κατά μέλη αφού έχουμε προσθέσει και το j στην εξίσωση του άξονα q γίνεται όπως φαίνεται στην σχέση (4.102)

$$\tilde{V}_{as} = (r_s + j\omega_e L'_s) \tilde{I}_{as} + \tilde{E}' \quad (4.102)$$

ενώ το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα της μεταβατικής κατάστασης βρίσκεται στο Σχήμα 4.16. Στο σχήμα αυτό φαίνεται η μία φάση της τάσης \tilde{E}' όπως και η σύνθετη αντίσταση της μεταβατικής κατάστασης. Στην απλοποιημένη μεταβατική ανάλυση η τιμή \tilde{E}' μπορεί να υπολογιστεί και πριν την διατάραξη με την σχέση (4.103)

$$\tilde{E}' = \tilde{V}_{aso} - (r_s - jx')\tilde{I}_{aso} \quad (4.103)$$



Σχήμα 4.16 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα της μεταβατικής κατάστασης

Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά μια απότομη αλλαγή της κατάστασης της λειτουργίας ενός επαγωγικού κινητήρα, όπως για παράδειγμα μια ξαφνική διακοπή της τροφοδοσίας ή ένα βραχυκύκλωμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις υποθέτεται πως η τιμή της πεπλεγμένης ροής στον δρομέα μετά την διατάραξη της κατάστασης λειτουργίας είναι ίδια με την τιμή πριν τη διατάραξη της. Στην περίπτωση που υπάρξει απότομη διακοπή τροφοδοσίας, η μείωση της τιμής της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής στον δρομέα θα έχει ρυθμό μείωσης που προσδιορίζεται από την χρονική σταθερά ανοιχτού κυκλώματος (4.104)

$$T'_0 = \frac{x'_{lr} + x_m}{\omega_e F'_r} \quad (4.104)$$

ενώ στην περίπτωση του βραχυκυκλώματος η χρονική σταθερά βραχυκυκλώματος

προσδιορίζεται από τη σχέση

$$T' = \left(x'_{lr} \frac{x_{ls} x_m}{x_{ls} + x_m} \right) \frac{I}{\omega_e F'_r} \quad (4.105)$$

Για μεγαλύτερες χρονικά μεταβάσεις η ανοχή για τις αλλαγές των τιμών της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής και της τάσης E' , για την μετάβαση από ένα ανοιχτοκύκλωμα σε βραχυκύκλωμα, μπορεί να προσεγγιστεί με εκθετική μείωση των χρονικών σταθερών T' και T_0' . Για παράδειγμα ο υπολογισμός της τάσης E μπορεί να προσεγγιστεί από την σχέση (4.106)

$$\tilde{E}'(t) = \tilde{E}'(0) e^{-\frac{t}{T_0}} \quad (4.106)$$

με το t να συμβολίζει την χρονική στιγμή όπου συνέβη η διατάραξη στο σύστημα.

4.9 Γραμμικοποίηση στο qd0 πλαίσιο

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά των ασύγχρονων επαγωγικών μηχανών είναι μη γραμμικές και λύνονται μόνο με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η γραμμικοποιημένη έκδοση αυτών των εξισώσεων μπορεί να μας δώσει αρκετά χρήσιμες πληροφορίες της συμπεριφοράς των ηλεκτρικών μηχανών. Η γραμμικοποίηση επιτυγχάνεται με την εφαρμογή των αναπτυγμάτων Taylor σε ένα σημείο λειτουργίας. Με αυτό τον τρόπο οι ηλεκτρικές μηχανές συμπεριφέρονται σαν γραμμικά συστήματα μέσω των οποίων υπολογίζονται οι ιδιοτιμές και οι συναρτήσεις μεταφοράς που χρησιμοποιούνται στην σχεδίαση του ελέγχου των μηχανών.

4.9.1 Εξισώσεις προς γραμμικοποίηση

Οι γραμμικοποιημένες εξισώσεις προέρχονται από τις εξισώσεις τάσεις που χαρακτηρίζονται από σταθερές παραμέτρους, και ανεξαρτησία από χρονικές μεταβλητές. Κατά τη μόνιμη κατάσταση οι εξισώσεις τάσης στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς πληρούν τα κριτήρια γραμμικοποίησης.

Οι εξισώσεις τάσης για τον επαγωγικό κινητήρα, χρησιμοποιώντας το ρεύμα ως μεταβλητή κατάστασης, στο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς φαίνονται στην σχέση (4.107)

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^e \\ v_{ds}^e \\ v_{qr}^{te} \\ v_{dr}^{te} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ss} & \frac{\omega_e}{\omega_b} X_{ss} & \frac{p}{\omega_b} X_M & \frac{\omega_e}{\omega_b} X_M \\ -\frac{\omega_e}{\omega_b} X_{ss} & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ss} & -\frac{\omega_e}{\omega_b} X_M & \frac{p}{\omega_b} X_M \\ \frac{p}{\omega_b} X_M & s \frac{\omega_e}{\omega_b} X_M & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{rr} & s \frac{\omega_e}{\omega_b} X'_{rr} \\ -s \frac{\omega_e}{\omega_b} X_M & \frac{p}{\omega_b} X_M & -s \frac{\omega_e}{\omega_b} X'_{rr} & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^e \\ i_{ds}^e \\ i_{qr}^{te} \\ i_{dr}^{te} \end{bmatrix} \quad (4.107)$$

όπου s είναι η ολίσθηση, ενώ οι ποσότητες του άξονα 0 από το $qd0$ έχουν παραβλεφθεί αφού λήφθηκαν υπόψιν μόνο οι καταστάσεις ισορροπίας.

Έχοντας διαλέξει το ρεύμα ως μεταβλητή κατάστασης η ηλεκτρομαγνητική ροπή εκφράζεται από την σχέση (4.108)

$$T_e = X_M (i_{qs}^e i_{dr}^{te} - i_{ds}^e i_{qr}^{te}) \quad (4.108)$$

4.9.2 Γραμμικοποίηση εξισώσεων

Μία μέθοδος για την γραμμικοποίηση των εξισώσεων είναι η εφαρμογή των αναπτυγμάτων Taylor για ένα σημείο λειτουργίας. Κάθε μεταβλητή της μηχανής f_i μπορεί να γραφεί σε μορφή αναπτύγματος Taylor για σταθερή τιμή f_{i0} όπως στην σχέση (4.109)

$$g(f_i) = g(f_{i0}) + g'(f_{i0})\Delta f_i + \frac{g''(f_{i0})}{2} \Delta f_i^2 + \dots \quad (4.109)$$

όπου

$$f_i = f_{i0} + \Delta f_i$$

Αν για το σημείο λειτουργίας που εξετάζουμε οι όροι της δεύτερης τάξης και άνω παρουσιάζουν μόνο μια ελάχιστη ταλάντωση, τότε οι όροι αυτοί δεν λαμβάνονται υπόψη και ισχύει η προσεγγιστική σχέση (4.110)

$$g(f_i) \approx g(f_{i0}) + g'(f_{i0})\Delta f_i \quad (4.110)$$

Έτσι οι όροι της πρώτης τάξης του αναπτύγματος Taylor, μας δίνουν τα χαρακτηριστικά των μετατοπίσεων που συμβαίνουν στο σύστημα για το επιλεγμένο σημείο λειτουργίας, όπως στη σχέση (4.111)

$$\Delta g(f_i) = g'(f_{i0})\Delta f_i \quad (4.111)$$

Για συναρτήσεις με δύο μεταβλητές έχουμε την σχέση (4.112)

$$g(f_1, f_2) \approx g(f_{10}, f_{20}) + \frac{\partial}{\partial f_1} g(f_{10}, f_{20})\Delta f_1 + \frac{\partial}{\partial f_2} g(f_{10}, f_{20})\Delta f_2 \quad (4.112)$$

Για τον επαγωγικό κινητήρα οι γραμμικές διαφορικές εξισώσεις, χρησιμοποιώντας την per unit μορφή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής (4.113)

$$T_e = 2Hp \frac{\omega_r}{\omega_b} + T_L \quad (4.113)$$

με
$$H = \frac{1}{2} \frac{2}{P} \frac{J\omega_b}{T_b} = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{P} \right)^2 \frac{J\omega_b^2}{P_b} \quad (4.114)$$

Καταλήγουμε στην (4.115)

$$\begin{bmatrix} \Delta v_{qs}^e \\ \Delta v_{ds}^e \\ \Delta v_{qr}^{ec} \\ \Delta v_{dr}^{ec} \\ \Delta T_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ss} & \frac{\omega_c}{\omega_b} X_{ss} & \frac{p}{\omega_b} X_M & \frac{\omega_c}{\omega_b} X_M & 0 \\ -\frac{\omega_c}{\omega_b} X_{ss} & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ss} & -\frac{\omega_c}{\omega_b} X_M & \frac{p}{\omega_b} X_M & 0 \\ \frac{p}{\omega_b} X_M & s_o \frac{\omega_c}{\omega_b} X_M & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{rr} & s_o \frac{\omega_c}{\omega_b} X'_{rr} & -X_M i_{ds}^e - X'_{rr} i_{dr}^{ec} \\ -s_o \frac{\omega_c}{\omega_b} X_M & \frac{p}{\omega_b} X_M & -s_o \frac{\omega_c}{\omega_b} X'_{rr} & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{rr} & X_M i_{qs}^e + X'_{rr} i_{qr}^{ec} \\ X_M i_{dr}^e & -X_M i_{qr}^e & -X_M i_{dr}^e & X_M i_{qs}^e & -2Hp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{qs}^e \\ \Delta i_{ds}^e \\ \Delta i_{qr}^{ec} \\ \Delta i_{dr}^{ec} \\ \frac{\Delta \omega_r}{\omega_b} \end{bmatrix} \quad (4.115)$$

όπου

$$s_o = \frac{\omega_e - \omega_{ro}}{\omega_e}$$

Ξεχωρίζοντας τους όρους που έχουν παράγωγο η παραπάνω εξίσωση πινάκων μπορεί να εκφραστεί ως (4.116)

$$Epx = Fx + u \quad (4.116)$$

Όπου για τα F, E, x και u ισχύουν οι (4.117), (4.118), (4.119) (4.120)

$$F = - \begin{bmatrix} r_s & \frac{\omega_e}{\omega_b} X_{ss} & \frac{p}{\omega_b} X_M & \frac{\omega_e}{\omega_b} X_M & 0 \\ -\frac{\omega_e}{\omega_b} X_{ss} & r_s & -\frac{\omega_e}{\omega_b} X_M & 0 & 0 \\ 0 & s_o \frac{\omega_e}{\omega_b} X_M & r'_r & s_o \frac{\omega_e}{\omega_b} X'_{rr} & -X_M i_{dso}^e - X'_{rr} i_{dro}^e \\ -s_o \frac{\omega_e}{\omega_b} X_M & 0 & -s_o \frac{\omega_e}{\omega_b} X'_{rr} & r'_r & X_M i_{qso}^e + X'_{rr} i_{qro}^e \\ X_M i_{dro}^e & -X_M i_{qro}^e & -X_M i_{dso}^e & X_M i_{qso}^e & -2Hp \end{bmatrix} \quad (4.117)$$

$$E = \frac{1}{\omega_b} \begin{bmatrix} X_{ss} & 0 & X_M & 0 & 0 \\ 0 & X_{ss} & 0 & X_M & 0 \\ X_M & 0 & X'_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & X_M & 0 & X'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2H\omega_b \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} \Delta i_{qs}^e \\ \Delta i_{ds}^e \\ \Delta i_{qr}^{re} \\ \Delta i_{dr}^{re} \\ \frac{\Delta \omega_r}{\omega_b} \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} \Delta v_{qs}^e \\ \Delta v_{ds}^e \\ \Delta v_{qr}^{re} \\ \Delta v_{dr}^{re} \\ \Delta T_L \end{bmatrix} \quad (4.118)$$

$$(4.119) \quad (4.120)$$

Στην ανάλυση των γραμμικών συστημάτων είναι προτιμότερη η μορφή έκφρασης των εξισώσεων μέσω της σχέσης (4.121)

$$px = Ax + Bu \quad (4.121)$$

και άρα οι γραμμικές διαφορικές εξισώσεις εκφράζονται στη σχέση (4.122) ως

$$px = (E)^{-1}Fx + (E)^{-1}u \quad (4.122)$$

4.10 Λειτουργία Ασύγχρονου Μονοφασικού Κινητήρα

Ο ασύγχρονος μονοφασικός κινητήρας δέχεται τροφοδοσία εναλλασσόμενου μονοφασικού ρεύματος. Η τροφοδοσία αυτή θα δημιουργήσει ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του κινητήρα, αλλά όχι και ροπή στρέψης ώστε να περιστραφεί ο δρομέας του. Αυτό συμβαίνει διότι αν αναλυθεί το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, θα προκύψουν δύο ισοδύναμα στρεφόμενα μαγνητικά πεδία, οποία έχουν αντίθετη φορά περιστροφής. Έτσι ουσιαστικά υπάρχει αλληλεξουδετέρωση των δυνάμεων τους, που συνεπάγεται μηδενικής ροπή στρέψης. Αν δρομέας όμως βρισκόταν για κάποιο λόγο ήδη σε περιστροφική κίνηση, η μονοφασική τροφοδοσία θα ήταν ικανή να διατηρήσει την κίνηση αυτή.

Απαιτείται λοιπόν ένα βοηθητικό μέσο ώστε να τεθεί σε κίνηση ο δρομέας του κινητήρα. Το μέσο αυτό είναι ένα βοηθητικό τύλιγμα το οποίο τοποθετείται παράλληλα και σε απόσταση 90 ηλεκτρικών μοιρών από το κύριο τύλιγμα. Η τοποθέτηση γίνεται είτε σε ξεχωριστές αυλακώσεις από το κύριο τύλιγμα, είτε στις ίδιες.

Επί της ουσίας η λειτουργία του βοηθητικού τυλίγματος εξουδετερώνει προσωρινά τη μία συνιστώσα του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου, με αποτέλεσμα η συνιστώσα που παραμένει να παράγει την απαραίτητη ροπή για την περιστροφή του δρομέα.

4.10.1 Εξαγωγή ισοδύναμου κυκλώματος στο dq0 σταθερό πλαίσιο αναφοράς

Οι σχέσεις των τάσεων στο dq0 πλαίσιο ορίζονται στις σχέσεις (4.123), (4.124), (4.125) και (4.126)

$$v_{qs} = i_{qs} r_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad V \quad (4.123)$$

$$v_{ds} = i_{ds} r_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \quad V \quad (4.124)$$

$$v_{qr} = i_{qr} r_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} \quad V \quad (4.125)$$

$$v_{dr} = i_{dr} r_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} \quad V \quad (4.126)$$

ενώ οι σχέσεις των πεπλεγμένων μαγνητικών ροών υπό μορφή πίνακα ορίζονται στην σχέση (4.127)

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{qr} \\ \lambda_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{qsqs} & & L_{qsqr} \cos\theta_r & L_{qsdr} \sin\theta_r \\ & L_{dsds} & -L_{dsqr} \sin\theta_r & L_{dsdr} \cos\theta_r \\ L_{qrqs} \cos\theta_r & -L_{qrds} \sin\theta_r & L_{qrqr} & \\ L_{drqs} \sin\theta_r & L_{drds} \cos\theta_r & & L_{drdr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (4.127)$$

Αν αγνοηθούν οι απώλειες οι σιδήρου, οι επαγωγιμότητες του παραπάνω πίνακα μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει της ισχύος του διάκενου P_g και του αριθμού των σπειρών $N_{qs}, N_{qr}, N_{ds}, N_{dr}$, κατά την (4.128)

$$\begin{aligned} L_{qsqs} &= L_{lqs} + N_{qs}^2 P_g & L_{qsqr} &= N_{qs} N_{qr} P_g & L_{qsdr} &= N_{qs} N_{dr} P_g \\ L_{dsds} &= L_{lds} + N_{ds}^2 P_g & L_{dsqr} &= N_{ds} N_{qr} P_g & L_{dsdr} &= N_{ds} N_{dr} P_g \\ L_{qrqr} &= L_{lqr} + N_{qr}^2 P_g & L_{drdr} &= L_{ldr} + N_{dr}^2 P_g & & \end{aligned} \quad (4.128)$$

Οι ποσότητες L_{lqs} , L_{lqr} , L_{lds} , L_{ldr} , αναπαριστούν τις επαγωγιότητες σκέδασης στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Για ένα συμμετρικό δρομέα τύπου κλωβού (βραχυκυκλωμένου δρομέα) τα μεγέθη των επαγωγιμοτήτων L_{lqr} , L_{ldr} είναι ίσα όπως και ο αριθμός των σπειρών N_{qr} με τον αριθμό των σπειρών N_{dr} .

Στο $qd0$ πλαίσιο αναφοράς όπου ο άξονας q έχει ευθυγραμμιστεί με τον άξονα του qs τυλίγματος και ο άξονας d με τον άξονα του ds τυλίγματος, για να μετασχηματίσουμε τα τυλίγματα του δρομέα στο σταθερό $dq0$ πλαίσιο αναφοράς θα χρησιμοποιηθεί ο πίνακας μετασχηματισμού $T_{qd}(\theta_r)$ με την σχέση (4.129)

$$\begin{bmatrix} f_{qr}^s \\ f_{dr}^s \end{bmatrix} = [T_{qd}\theta_r] \begin{bmatrix} f_{qr}^r \\ f_{dr}^r \end{bmatrix} \quad (4.129)$$

με

$$[T_{qd}\theta_r] = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ -\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix}$$

και

$$[T_{qd}\theta_r]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & -\sin\theta_r \\ \sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix}$$

Η γωνία θ_r είναι η γωνία μεταξύ των αξόνων των τυλιγμάτων qs και qr και η μεταβλητή f μπορεί να συμβολίζει ρεύματα, τάσεις, ή μαγνητική ροή των τυλιγμάτων qr και dr .

Εκτός από το μετασχηματισμό των ποσοτήτων του δρομέα, θα πρέπει να γίνει οι αναγωγή των ποσοτήτων των τυλιγμάτων dr και qr , στο κύριο τύλιγμα. Επίσης οι ποσότητες του βοηθητικού τυλίγματος ds θα πρέπει και αυτές να ανηχθούν στο κύριο τύλιγμα qs . Η επιλογή να γίνει η αναγωγή στο κύριο τύλιγμα είναι θέμα επιλογής.

Με τις παραπάνω ενέργειες και μέσω πράξεων και απλοποιήσεων παίρνουμε εν τέλει τις παρακάτω σχέσεις τάσεων (4.130), (4.131), (4.132) και (4.133)

$$v_{qs} = r_{qs} i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (4.130)$$

$$v'_{ds} = r'_{ds} i'_{ds} + \frac{d\lambda'_{ds}}{dt} \quad (4.131)$$

$$v_{qr}^s = r'_r i_{qr}^s + \lambda_{dr}^s \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\lambda_{qr}^s}{dt} \quad (4.132)$$

$$v_{dr}^s = r'_r i_{dr}^s + \lambda_{qr}^s \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\lambda_{dr}^s}{dt} \quad (4.133)$$

Για το ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού κινητήρα στο σταθερό qd0 πλαίσιο αναφοράς θα ορίσουμε τα μεγέθη που συγκροτούν το κύκλωμα, του Σχήματος 4.17 θέτοντας $\psi = \lambda_{\omega}$ στις σχέσεις (4.134). Επίσης να σημειωθεί πως στο σχήμα, το κομμάτι του κυκλώματος που ανήκει στην γκρι περιοχή είναι ανηγμένο στο κύριο τύλιγμα qs

$$v'_{ds} = \frac{N_{qs}}{N_{ds}} v_{ds}$$

$$v'_{ds} = \frac{N_{qs}}{N_{ds}} v_{ds}$$

$$L_{mq} = N_{qs}^2 P_g$$

$$L'_{md} = \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}} \right)^2 N_{ds}^2 P_g = L_{mq}$$

$$L'_{lds} = \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}} \right)^2 L_{lds}$$

$$r'_{ds} = \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}} \right)^2 r_{ds}$$

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_{qs}}{N_r} \right)^2 L_{lr}$$

$$r'_r = \left(\frac{N_{qs}}{N_r} \right)^2 r_r$$

(4.134)

$$v^s_{qr} = \frac{N_{qs}}{N_r} v^s_{qr}$$

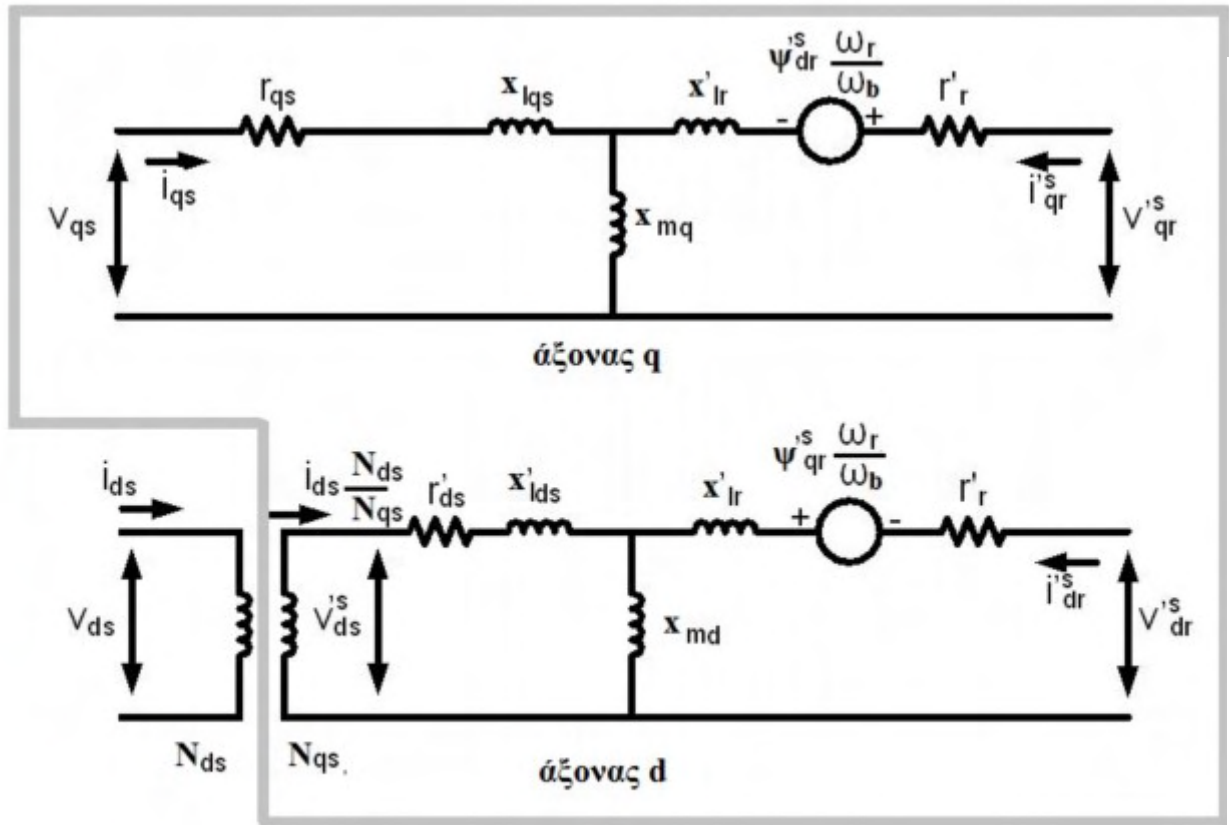
$$v^s_{dr} = \frac{N_{qs}}{N_r} v^s_{dr}$$

$$i^s_{qr} = \frac{N_r}{N_{qs}} i^s_{qr}$$

$$i^s_{dr} = \frac{N_r}{N_{qs}} i^s_{dr}$$

$$\lambda^s_{qr} = \frac{N_{qs}}{N_r} \lambda^s_{qr}$$

$$\lambda^s_{dr} = \frac{N_{qs}}{N_r} \lambda^s_{dr}$$



Σχήμα 4.17. Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού κινητήρα στο σταθερό πλαίσιο αναφοράς dq0

Η ροπή που αναπτύσσεται στον μονοφασικό κινητήρα ορίζεται από τη σχέση (4.135)

$$\begin{aligned}
 T_{em} &= \frac{P}{2} (\lambda_{qr}^{rs} i_{dr}^{rs} - \lambda_{dr}^{rs} i_{qr}^{rs}) & N.m \\
 &= \frac{P}{2} L_{mq} (i_{qs} i_{dr}^{rs} - i'_{ds} i_{qr}^{rs}) & N.m
 \end{aligned}
 \tag{4.135}$$

4.10.2 Ανάλυση μόνιμης κατάστασης

Στους μονοφασικούς κινητήρες, όσον αφορά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας τους, επειδή δεν υπάρχει αυτή συμμετρικότητα στα τυλίγματα τους, διακρίνονται διαφορές σε σχέση με την ομοιομορφία της κίνησης της μαγνητικής ροής της μηχανής στο διάκενο της, άλλα και στην σταθερότητα της ροπής της, πλεονεκτήματα που έχουν οι τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες.

Η μαγνητεγερτική δύναμη ενός μονοφασικού κινητήρα είναι ουσιαστικά η συνισταμένη των δυνάμεων των στοιχείων που περιστρέφονται προς τα εμπρός ή προς τα πίσω. Στην μαθηματική της μορφή η παραπάνω έννοια ορίζεται με όρους χωρικών διανυσμάτων, ώστε η μαγνητεγερτική δύναμη που εφαρμόζεται στο διάκενο της μηχανής να αποτελείται από όρους των ρευμάτων i_s και i_q συναρτήσει μιας γωνίας θ_q , οποία σχηματίζεται από τον άξονα i_q με φορά αντίθετη από αυτή του ρολογιού.

Έτσι έχουμε την σχέση (4.136)

$$\begin{aligned}\vec{F}_s &= \vec{F}_{qs} + \vec{F}_{ds} \\ &= \frac{N_{qsine}}{2} \vec{i}_{qs} + \frac{N_{dsine}}{2} \vec{i}_{ds} \\ &= \frac{N_{qsine}}{2} \left(\vec{i}_{2s} e^{j\theta_q} + \vec{i}_{1s} e^{-j\theta_q} \right)\end{aligned}\quad (4.136)$$

για τα ρεύματα της οποίας ισχύουν οι σχέσεις (4.137) και (4.138)

$$\vec{i}_{1s} = \frac{i_{qs}}{2} - j \frac{N_{dsine}}{N_{qsine}} \frac{i_{ds}}{2} \quad (4.137)$$

$$\vec{i}_{2s} = \frac{i_{qs}}{2} + j \frac{N_{dsine}}{N_{qsine}} \frac{i_{ds}}{2} \quad (4.138)$$

Όπου $\vec{i}_{1s}, \vec{i}_{2s}$ είναι τα χωρικά διανύσματα που περιέχουν τις θετικές και αρνητικές ακολουθίες των ρευμάτων i_{qs} και i_{ds} του στάτη, ενώ N_{qsine} και N_{dsine} είναι ο αριθμός των σπειρών, των ισοδύναμα ημιτονοειδώς κατανομημένων qs και ds τυλιγμάτων στον στάτη.

Στην ανάλυση της μόνιμης κατάστασης όπου οι τάσεις και ρεύματα είναι ημιτονοειδούς μορφής, η σχέση μετασχηματισμού μεταξύ των χρονικών φασιθετών των θετικών και αρνητικών ακολουθιών και των χρονικών φασιθετών της φάσης των ρευμάτων για τις rms τιμές ορίζεται από την σχέση (4.139)

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_{1s} \\ \tilde{I}_{2s} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_{qs} \\ \frac{N_{dsine}}{N_{qsine}} \tilde{I}_{ds} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_{qs} \\ \tilde{I}'_{ds} \end{bmatrix} \quad (4.139)$$

Όταν ισχύει $I_{qrms} = I_{drms}$ και $\varphi_d = \varphi_q - \pi/2$ σχηματίζεται δηλαδή ένα ορθογώνιο σχήμα

τότε για τον φασιθέτη των θετικών ακολουθιών ισχύει $\tilde{I}_{1s} = I_{qrms} \angle 0$

ενώ ο φασιθέτης των αρνητικών ακολουθιών \tilde{I}_{2s} ισούται με μηδέν. Η αντίστροφη σχέση μετασχηματισμού από τη σχέση (4.140)

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_{qs} \\ \tilde{I}'_{ds} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ j & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_{1s} \\ \tilde{I}_{2s} \end{bmatrix} \quad (4.140)$$

Αξίζει να σημειωθεί πως ο μετασχηματισμός παρουσιάζει αμεταβλητότητα ισχύος (power invariance), που σημαίνει πως ο μετασχηματισμός δεν αλλοιώνει τις τιμές των μεταβλητών.

Οι εξισώσεις των πεπλεγμένων μαγνητικών ροών εκφρασμένες και πάλι υπό τη μορφή των όρων των θετικών και αρνητικών ακολουθιών ορίζονται από τη σχέση (4.141)

$$\begin{bmatrix} \tilde{\lambda}_{1s} \\ \tilde{\lambda}_{2s} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (L_{lqs} + L'_{lds}) & (L_{lqs} - L'_{lds}) \\ (L_{lqs} - L'_{lds}) & (L_{lqs} + L'_{lds}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_{1s} \\ \tilde{I}_{2s} \end{bmatrix} + L_{mq} \begin{bmatrix} \tilde{I}_{1s} + \tilde{I}'_{1r} \\ \tilde{I}_{2s} + \tilde{I}'_{1r} \end{bmatrix} \quad (4.141)$$

Γενικά, όταν τα τυλίγματα του στάτη δεν είναι όμοια μεταξύ, τα στοιχεία του “πίνακα απωλειών” (leakage matrix) L_1 , που δεν βρίσκονται στη διαγώνιο, δεν θα είναι μηδενικά. Επίσης οι τιμές των επαγωγιμοτήτων L_{mq} και L_{md} θεωρούνται ίδιες στην περίπτωση όπου το διάκενο στο εσωτερικό του κινητήρα είναι ομοιόμορφο και όλα τα τυλίγματα έχουν σημείο αναφοράς το qs τυλίγμα. Οι εξισώσεις με τις πεπλεγμένες μαγνητικές ροές των συμμετρικών τυλιγμάτων του δρομέα ορίζονται σε απλοποιημένη μορφή από τη σχέση (4.142)

$$\begin{bmatrix} \tilde{\lambda}_{1s} \\ \tilde{\lambda}_{2s} \end{bmatrix} = L'_{lr} \begin{bmatrix} \tilde{I}'_{1r} \\ \tilde{I}'_{2r} \end{bmatrix} + L_{mq} \begin{bmatrix} \tilde{I}_{1s} + \tilde{I}'_{1r} \\ \tilde{I}_{2s} + \tilde{I}'_{1r} \end{bmatrix} \quad (4.142)$$

Κατά την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας οι διαφορικοί τελεστές d/dt και $d\theta_r/dt$ μπορούν να αντικατασταθούν από τη γωνιακή συχνότητα $j\omega_e$ και γωνιακή ταχύτητα ω_r αντίστοιχα. Έπειτα από τις αντικαταστάσεις αυτές οι εξισώσεις τάσεων στην μόνιμη κατάσταση για τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα προσδιορίζονται μέσω των σχέσεων (4.143) και (4.144)

$$\begin{bmatrix} \tilde{V}_{1s} \\ \tilde{V}_{2s} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (r_{qs} + r'_{ds}) & (r_{qs} - r'_{ds}) \\ (r_{qs} - r'_{ds}) & (r_{qs} + r'_{ds}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_{1s} \\ \tilde{I}_{2s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j\omega_e \tilde{\lambda}_{1s} \\ j\omega_e \tilde{\lambda}_{2s} \end{bmatrix} \quad (4.144)$$

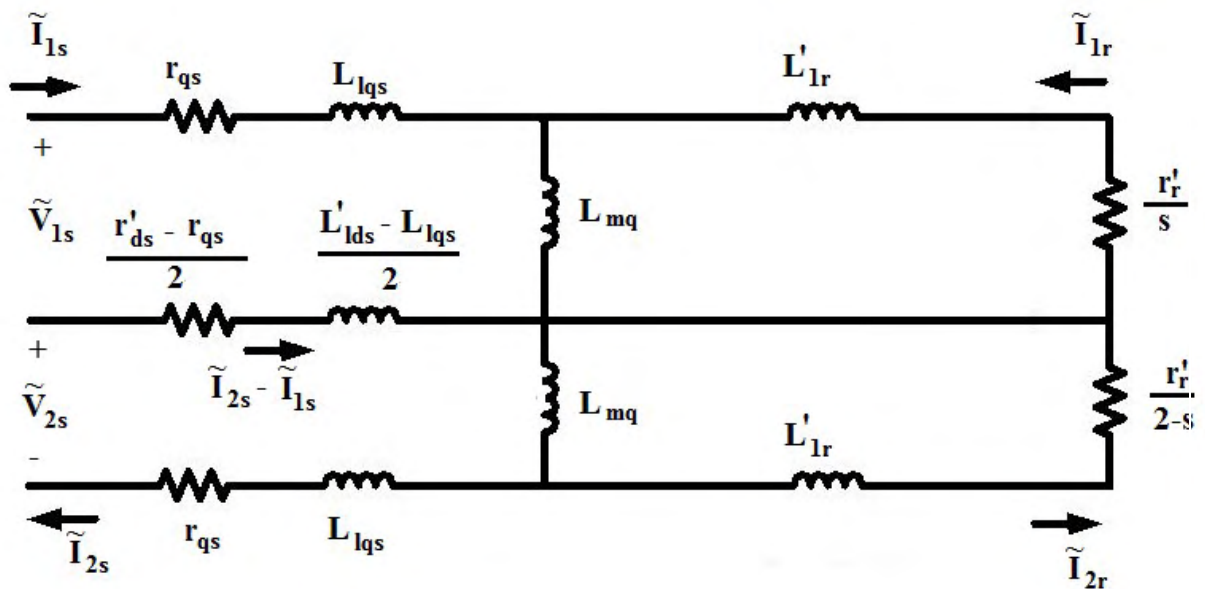
$$\begin{bmatrix} \tilde{V}'_{1r} \\ \tilde{V}'_{2r} \end{bmatrix} = r'_r \begin{bmatrix} \tilde{I}'_{1r} \\ \tilde{I}'_{2r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j(\omega_e - \omega_r) \tilde{\lambda}'_{1r} \\ j(\omega_e + \omega_r) \tilde{\lambda}'_{2r} \end{bmatrix} \quad (4.144)$$

Στην περίπτωση ενός δρομέα τύπου κλωβού, οι τιμές των τάσεων \tilde{V}'_{1r} και \tilde{V}'_{2r} είναι μηδενικές. Διαιρώντας μάλιστα τις εξισώσεις με $(\omega_e - \omega_r)/\omega_e$ και $(\omega_e + \omega_r)/\omega_e$ κατάλληλα, αντικαθιστώντας έπειτα τον όρο $(\omega_e - \omega_r)/\omega_e$ με s και τον όρο $(\omega_e + \omega_r)/\omega_e$ με $2-s$ καταλήγουμε στις εξισώσεις (4.145) και (4.146) για τα τυλίγματα του δρομέα που είναι της μορφής

$$0 = \frac{r'_r}{s} \tilde{I}_{1r} + j\omega_e \{ \tilde{L}'_{lr} \tilde{I}'_{1r} + L_{mq}(\tilde{I}_{1s} + \tilde{I}'_{1r}) \} \quad (4.145)$$

$$0 = \frac{r'_r}{(2-s)} \tilde{I}_{2r} + j\omega_e \{ \tilde{L}'_{lr} \tilde{I}'_{2r} + L_{mq}(\tilde{I}_{2s} + \tilde{I}'_{2r}) \} \quad (4.146)$$

Οι εξισώσεις αυτές βοηθούν στην εξαγωγή συμπεράσματος για το ποιο θα είναι το κυκλωματικό μοντέλο (ισοδύναμο κύκλωμα) του μονοφασικού κινητήρα στη μόνιμη κατάσταση του Σχήματος 4.18



Σχήμα 4.18 Ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού κινητήρα στη μόνιμη κατάσταση

Η σύζευξη των στοιχείων των θετικών και αρνητικών ακολουθιών, των στοιχείων του πίνακα απωλειών, που δεν βρίσκονται στη διαγώνιο του έχουν την μορφή που φαίνεται στις σχέσεις (4.147) και (4.148)

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{1s} = & r_{qs} \tilde{I}_{1s} + \frac{r'_{ds} - r_{qs}}{2} (\tilde{I}_{1s} - \tilde{I}_{2s}) \\ & + j\omega_e \left\{ L_{lqs} \tilde{I}_{1s} + \frac{L'_{lds} - L_{lqs}}{2} (\tilde{I}_{1s} - \tilde{I}_{2s}) + L_{mq} (\tilde{I}_{1s} + \tilde{I}'_{1r}) \right\} \end{aligned} \quad (4.147)$$

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{2s} = & r_{qs} \tilde{I}_{2s} + \frac{r'_{ds} - r_{qs}}{2} (\tilde{I}_{2s} - \tilde{I}_{1s}) \\ & + j\omega_e \left\{ L_{lqs} \tilde{I}_{2s} + \frac{L'_{lds} - L_{lqs}}{2} (\tilde{I}_{2s} - \tilde{I}_{1s}) + L_{mq} (\tilde{I}_{2s} + \tilde{I}'_{2r}) \right\} \end{aligned} \quad (4.148)$$

4.10.3 Μέση ροπή στην μόνιμη κατάσταση

Η παροχή ισχύος προς το δρομέα διαμέσου του διάκενου ορίζεται από την σχέση (4.149)

$$S_{ag} = -\tilde{E}_{1r} \tilde{I}'_{1r} - \tilde{E}_{2r} \tilde{I}'_{2r} \quad (4.149)$$

θέτοντας

$$\tilde{E}_{1r} = j\omega_e \tilde{\lambda}'_{1r} \quad (4.151)$$

$$\tilde{E}_{2r} = j\omega_e \tilde{\lambda}'_{2r} \quad (4.152)$$

Η S_{ag} είναι η φαινόμενη ισχύς που παρέχεται στον κινητήρα και κατά συνέπεια το πραγματικό μέρος της μιγαδικής αυτής ποσότητας ανταποκρίνεται στην ποσότητα της ισχύος που μεταφέρεται διαμέσου του διάκενου στον δρομέα του κινητήρα και κατ' επέκταση στην ποσότητα της ροπής που αναπτύσσεται όταν η ταχύτητα του κινητήρα είναι η σύγχρονη.

Η μέση ροπή μπορεί να βρεθεί κρατώντας το πραγματικό μέρος της ποσότητας της φαινόμενης ισχύς διαιρεμένης με την συχνότητα της σύγχρονης ταχύτητας σε μηχανικά ακτίνια, παίρνοντας έτσι την σχέση (4.153)

$$T_{avg} = Re \left\{ \frac{-\tilde{E}_{1r} \tilde{I}_{1r}^*}{\omega_{bm}} - \frac{\tilde{E}_{2r} \tilde{I}_{2r}^*}{-\omega_{bm}} \right\} = \frac{P}{2\omega_e} \left\{ \tilde{I}_{1r}^2 \left(\frac{r'_r}{s} \right) - \tilde{I}_{2r}^2 \left(\frac{r'_r}{2-s} \right) \right\} \quad (4.153)$$

4.11 Projects Προσομοίωσης

4.11.1 Προσομοίωση τριφασικού επαγωγικού κινητήρα

Στην παράγραφο αυτή θα προσομοιωθεί ένας επαγωγικός κινήτρας όπως αναλύθηκε στο σταθερό πλαίσιο αναφοράς (παράγραφος 4.8) και θα σχολιαστούν οι αλλαγές στις μεταβλητές του κινητήρα σχέση με το φορτίο του.

Να σημειωθεί πως η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το εμπορικό λογισμικό Matlab/Simulink. Τα στοιχεία του κινητήρα με τον οποίο έγινε η προσομοίωση παραθέτονται στον Πίνακα 4.1, ενώ το μοντέλο του τριφασικού κινητήρα στο Simulink απεικονίζεται στο Σχήμα 4.19.

Αρχικά, κατά την πρώτη προσομοίωση (Σχήμα 4.20), όταν ο κινητήρας είναι σε στάση, και δεν λειτουργεί, η συνολική εμπέδηση ισούται με το άθροισμα των αντιστάσεων και των αντιδράσεων σκέδασης των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα, αφού τα στοιχεία των αντιστάσεων και των πηνίων του κυκλώματος είναι συνδεδεμένα σε σειρά σε αυτή τη φάση. Κατά συνέπεια, με την εφαρμογή της μέγιστης επιτρεπτής τάσης (Rated Voltage) το ρεύμα διέγερσης στον κινητήρα κατά την εκκίνηση του είναι πολύ υψηλό. Μπορεί να έχει τιμή μέχρι και δέκα φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική του τιμή του, και γι' αυτό συνίστανται μέθοδοι

εκκίνησης του κινητήρα με μειωμένη τάση, ώστε να αποφευχθούν δυσάρεστες συνέπειες στα μηχανικά μέρη της μηχανής.

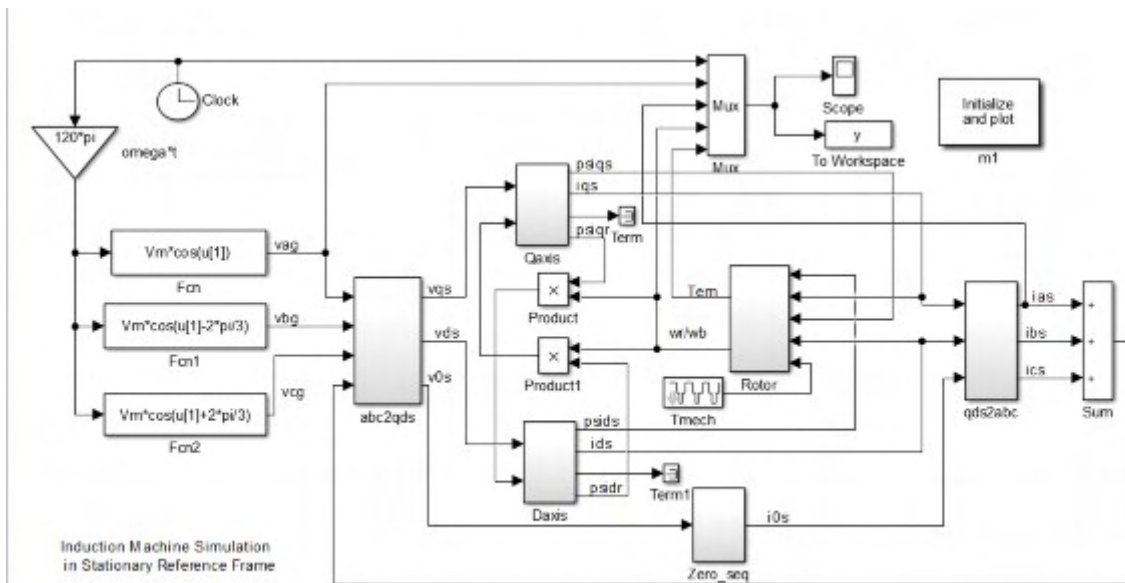
Επίσης παρατηρείται πως ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο κινητήρας να περάσει στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι περίπου τα 0,6 sec. Κατά το διάστημα της εκκίνησης δεν υπάρχει φορτίο, ενώ και οι μηχανικές απώλειες δεν έχουν ληφθεί υπόψιν. Όπως φαίνεται και στη γραφική παράσταση Ροπής (T_{em}) – χρόνου την χρονική στιγμή 0,8 sec έχουμε μεταβολή της τιμής T_{mech} από το 0 στο 50% μέχρι και την χρονική στιγμή 1,2 sec όπου τιμή της T_{mech} μεταβάλλεται από 50 στο 100%. Τέλος την χρονική στιγμή 1,6 sec η T_{mech} μεταβάλλεται από το 100% στο 50%.

Στην δεύτερη προσομοίωση δεν υπάρχει φορτίο στο κινητήρα (Σχήμα 4.21). Η διαφορά της δεύτερης προσομοίωσης με την πρώτη φαίνεται στις γραφικές παράστασης του ρεύματος, της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και της ω_r/ω_b . Το ρεύμα της φάσης a παραμένει σταθερό καθώς δεν υπάρχει φορτίο στη μόνιμη κατάσταση, η ηλεκτομαγνητική ροπή σταθεροποιείται στο μηδέν ενώ και η μηχανή διατηρεί σχεδόν την σύγχρονη ταχύτητα στροφών, κατά την μόνιμη κατάσταση, όσο το φορτίο είναι μηδενικό.

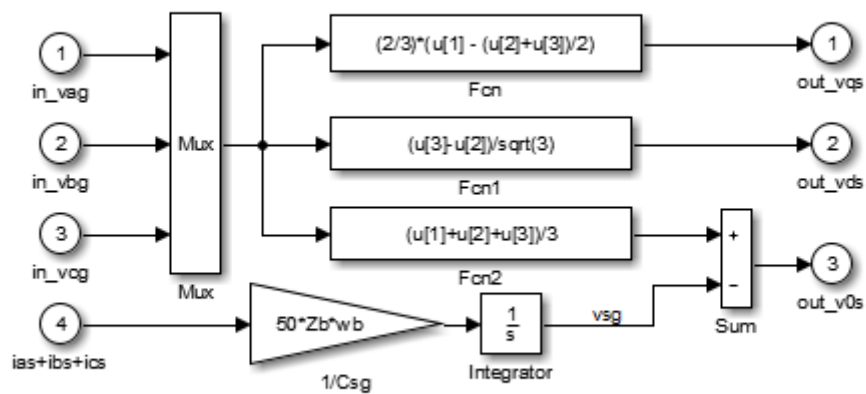
Στην τρίτη προσομοίωση ο κινητήρας εκκινείται με το 100% του φορτίου του. Η διαφορά σε σχέση με τις υπόλοιπες προσομοιώσεις είναι εμφανής. Η μεταβατική κατάσταση είναι μεγαλύτερης διάρκειας περίπου μέχρι την χρονική στιγμή 1 sec. Επίσης το ρεύμα διέγερσης διατηρεί τις πολύ υψηλές τιμές για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας της μεταβατικής κατάστασης.

Στοιχεία Κινητήρα	
Ισχύς	1 Hp
Μέγιστη επιτρεπτή τάση	200V
Συχνότητα	60Hz
Αριθμός πόλων	4
Αντίσταση Στάτη	3,35 Ohm
Αντίδραση σκέδασης στάτη	6.94e-3 ω_b Ohm
Ανηγμένη αντίσταση δρομέα	1.99 Ohm
Ανηγμένη αντίδραση σκέδασης δρομέα	163.73e-3 ω_b Ohm
Αντίδραση μαγνητισμού	163.73e-3 ω_b Ohm
Αδράνεια δρομέα	Kg-m ²
ω_b	120π

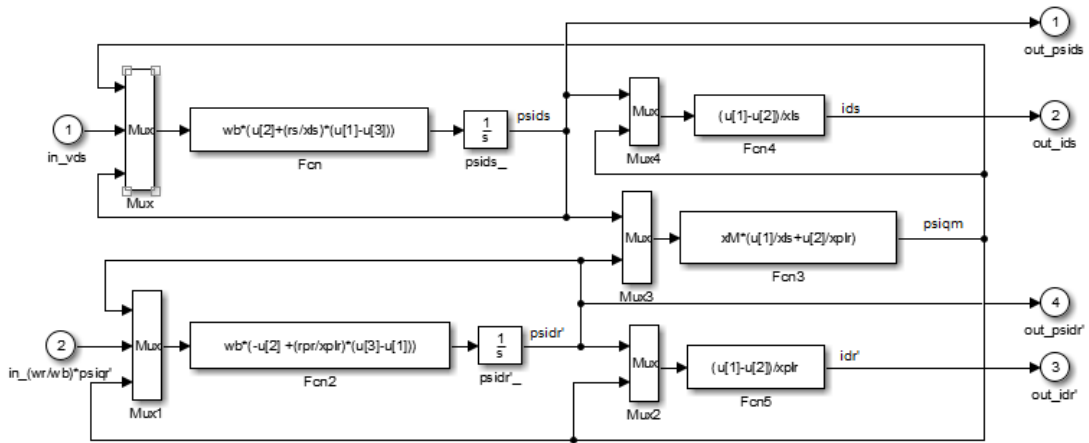
Πίνακας 4.1



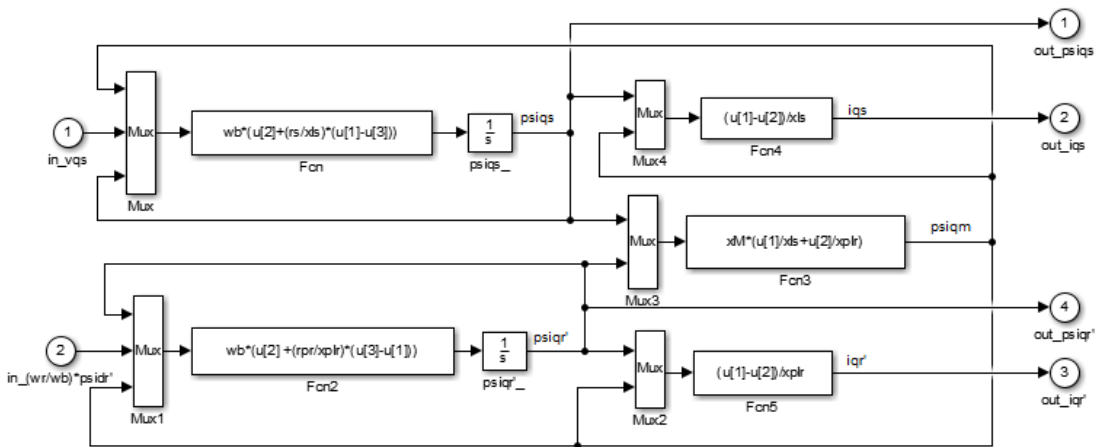
Σχήμα 4.19 Μοντέλο επαγωγικού κινητήρα στο σταθερό πλαίσιο αναφοράς του Simulink



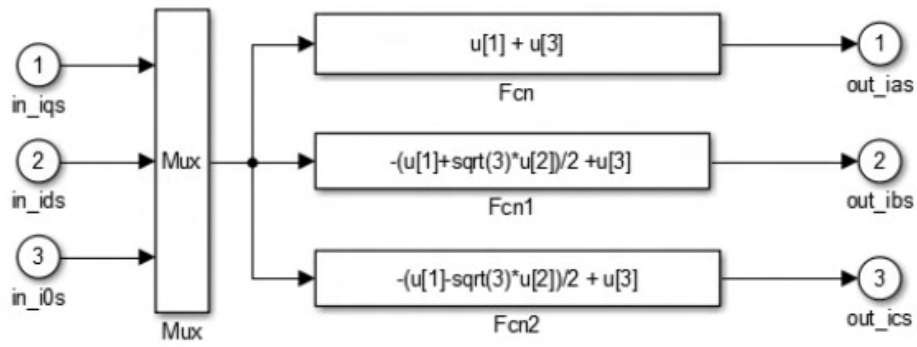
Σχήμα 4.20 Block abc2qds



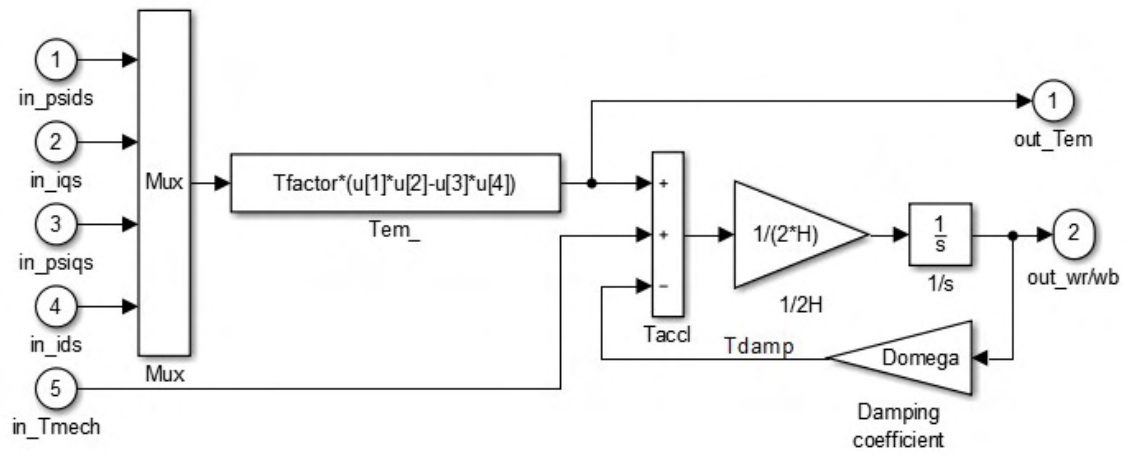
Σχήμα 4.21 Block άξονα d



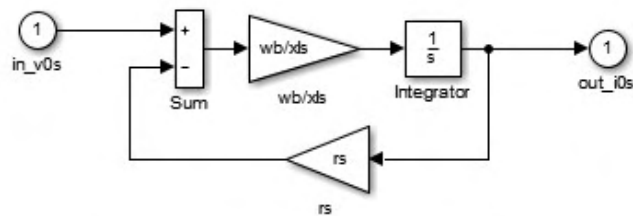
Σχήμα 4.22 Block άξονα q



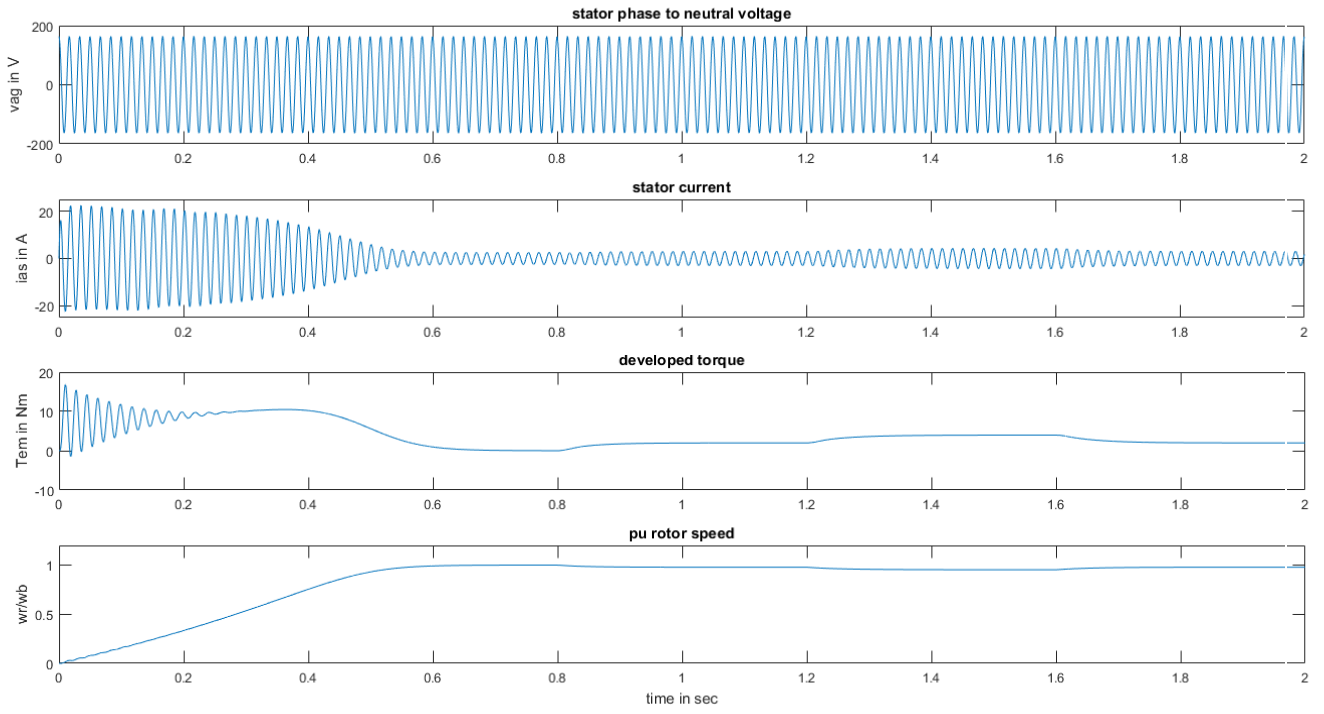
Σχήμα 4.22 Block qds2abc



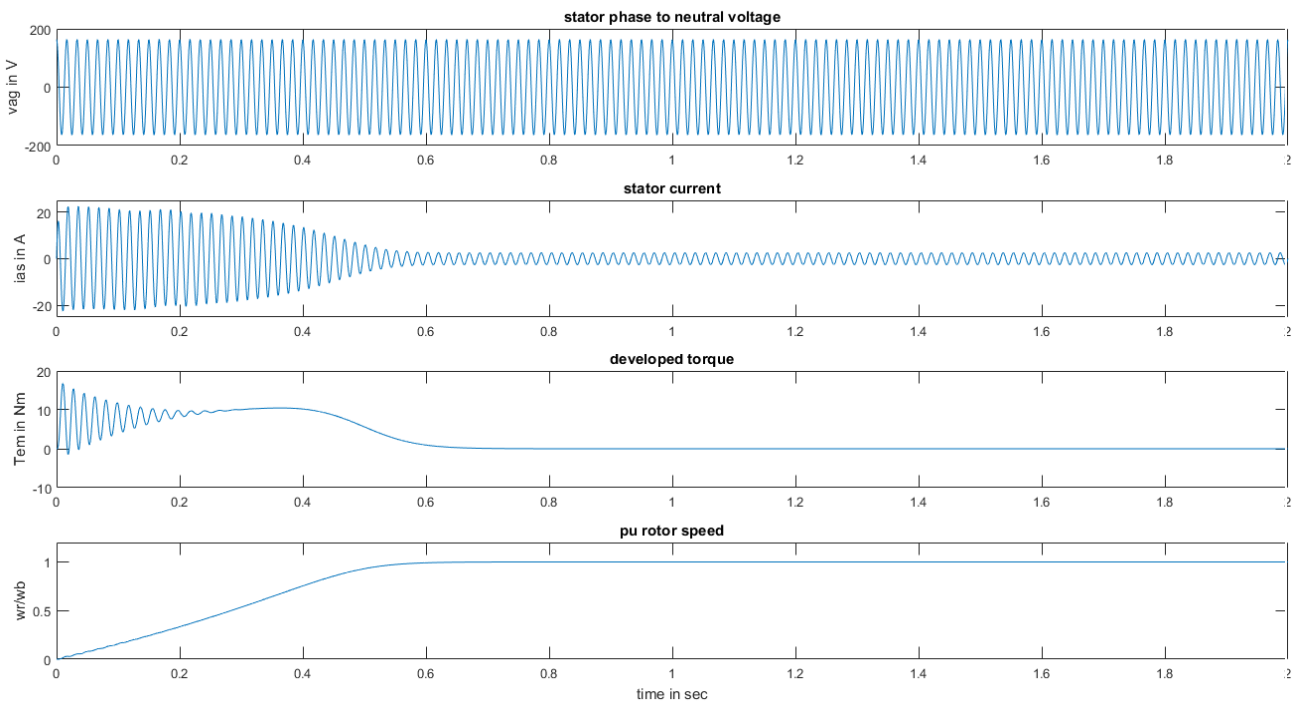
Σχήμα 4.23 Block rotor (δρομέα)



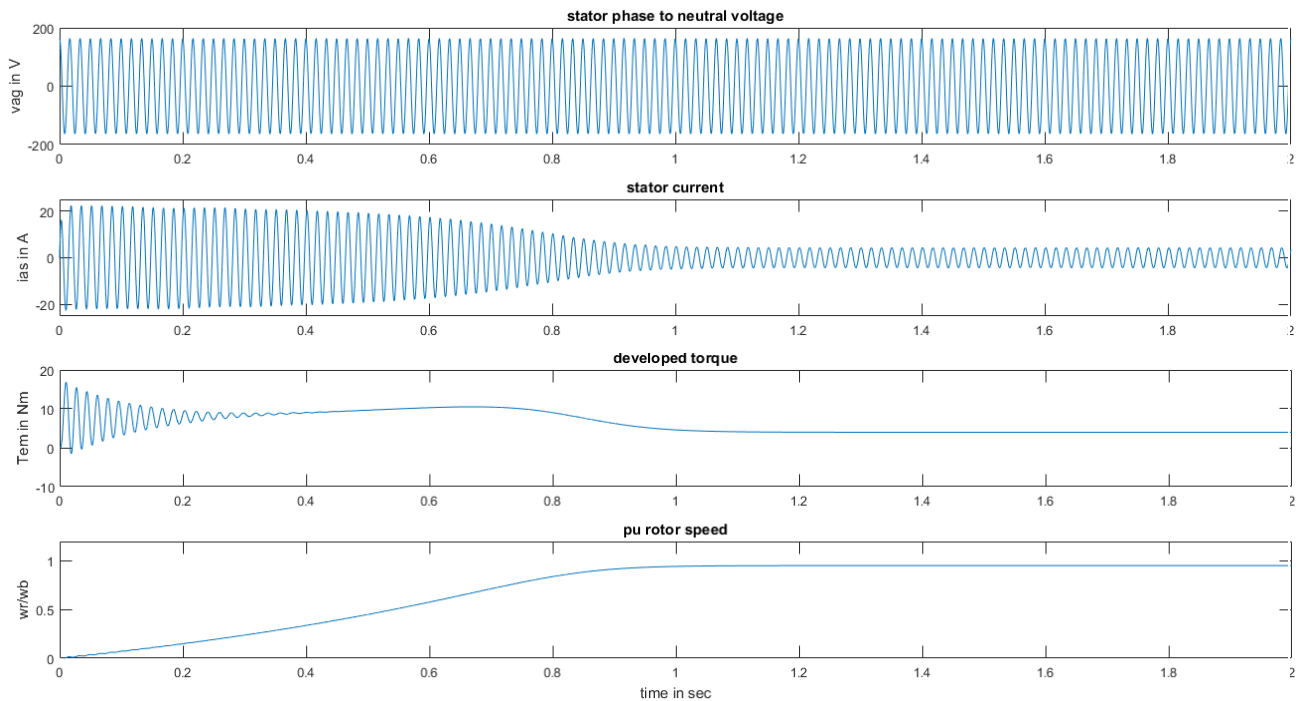
Σχήμα 4.24 Block zero seq



Σχήμα 4.25 Προσομοίωση με μεταβολή φορτίου



Σχήμα 4.26 Προσομοίωση χωρίς φορτίο



Σχήμα 4.27 Προσομοίωση με πλήρες φορτίο

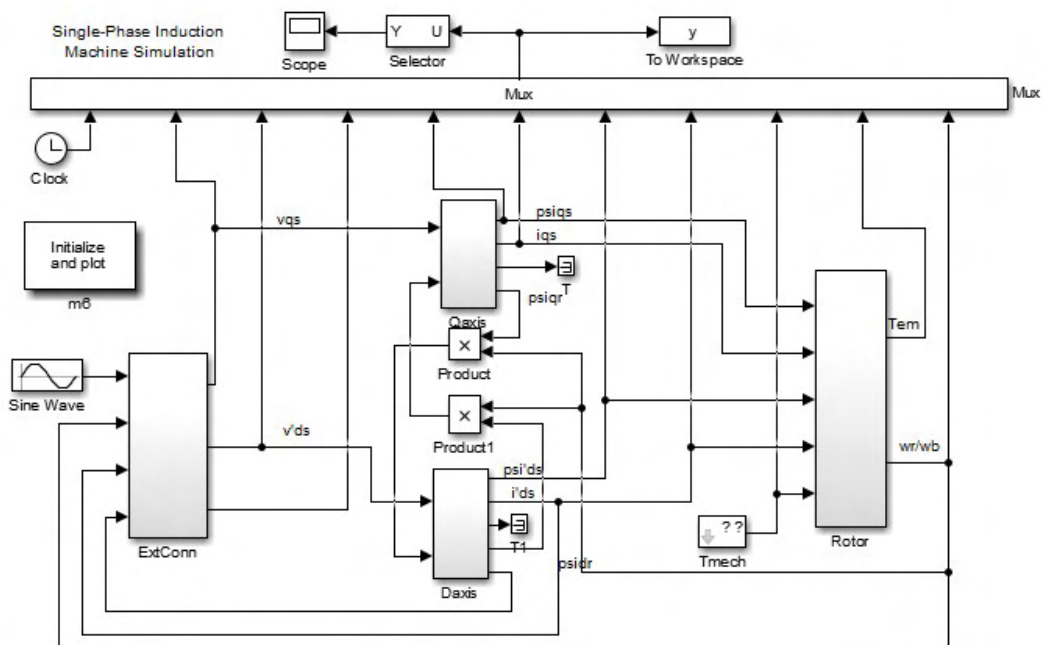
4.11.2 Προσομοίωση μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα

Στην παράγραφο αυτή θα προσομοιωθούν τρία είδη μονοφασικών κινητήρων. Θα εξεταστεί η συμπεριφορά του μονοφασικού κινητήρα αντιστάσεως (χωρίς πυκνωτή), του κινητήρα με πυκνωτή εκκίνησης και του κινητήρα με δύο πυκνωτές (εκκίνησης-λειτουργίας). Η προσομοίωση γίνεται με το εμπορικό λογισμικό Matlab/Simulink και τα κατασκευαστικά στοιχεία του μονοφασικού κινητήρα δίνονται στον Πίνακα 4.2. Στην συνδεσμολογία του μονοφασικού κινητήρα αντιστάσεως, δεν υπάρχει κάποιος πυκνωτής, και συνεπώς δεν υπάρχει κάποια μέθοδος περιορισμού των στοιχείων αρνητικών ακολουθιών, τα οποία είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία ενός αντίθετα στρεφόμενο μαγνητικού πεδίου, που δημιουργεί απώλειες στην παραγόμενη ροπή. Ο τύπος μονοφασικού κινητήρα χρησιμοποιεί έναν πυκνωτή ο επιλέγεται με τέτοια χωρητικότητα, ώστε το ρεύμα μέσα από το βοηθητικό τύλιγμα, να προηγείται του ρεύματος του κύριου τυλίγματος, περίπου κατά 90° . Όσο μεγαλύτερη είναι η προπορεία του ρεύματος τόσο περισσότερο μειώνονται τα στοιχεία των αρνητικών ακολουθιών. Μόλις ο κινητήρας φτάσει την ταχύτητα αποκοπής το βοηθητικό τύλιγμα και ο πυκνωτής αποσυνδέονται με τη βοήθεια φυγοκεντρικού διακόπτη.

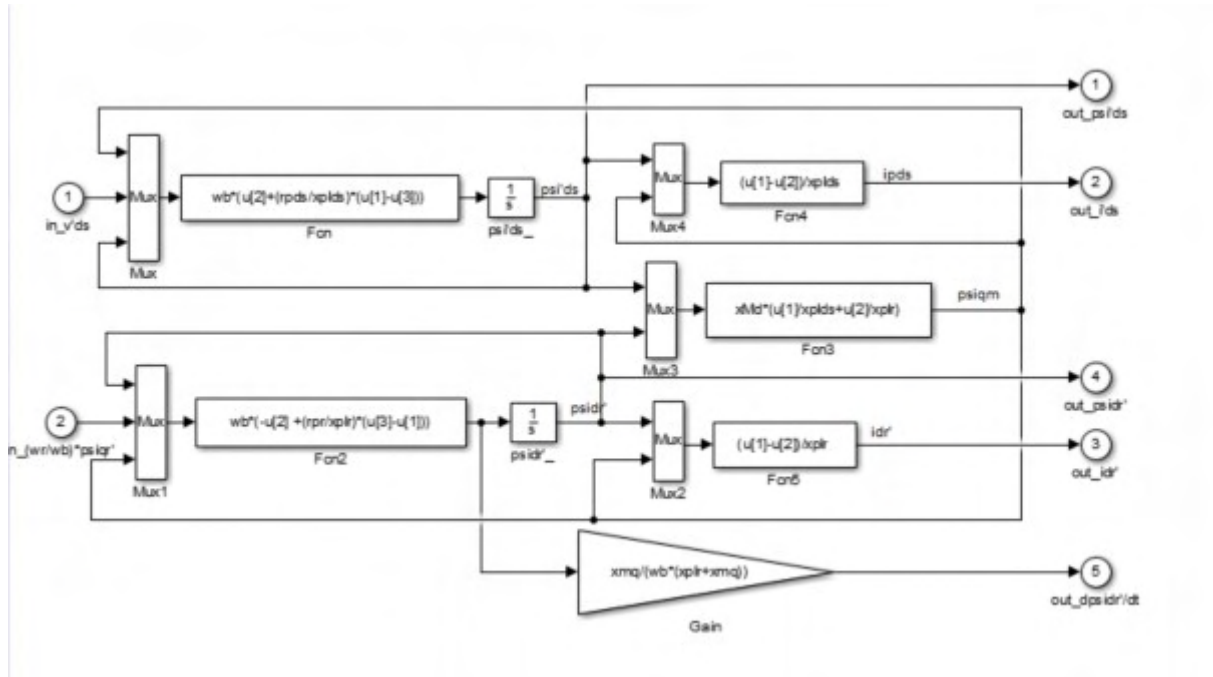
Στον μονοφασικό κινητήρα δύο πυκνωτών (εκκίνησης και λειτουργίας), οι λειτουργίες του πυκνωτή εκκίνησης είναι όμοιες με αυτές που προαναφέρθηκαν, ενώ ο πυκνωτής λειτουργίας συμμετέχει στο κύκλωμα με σκοπό να δώσει μια μέγιστη ροπή σε μια ονομαστική κατάσταση λειτουργίας. Οι δύο πυκνωτές είναι παράλληλα συνδεδεμένοι μέχρι τη στιγμή που ο κινητήρας φτάνει την ταχύτητα αποκοπής κατά την οποία ο πυκνωτής εκκίνησης αποσυνδέεται. Στις παραγράφους 4.11.2.1, 4.11.2.2, 4.11.2.3 φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που θα σχολιαστούν παρακάτω.

Στοιχεία Κινητήρα [21]	
Ισχύς	0.25hp
Μέγιστη επιτρεπτή τάση	120V
Συχνότητα	60Hz
ω_b	120π
Γ_{qs}	2.02 Ohm
χ_{lqs}	2.79 Ohm
Γ_{ds}	7.14 Ohm
χ_{lds}	3.22 Ohm
Γ_{pr}	4.12 Ohm
χ_{mq}	66.8 Ohm
Αδράνεια	1,4e-2 kgm ²
Πυκνωτής εκκίνησης	3-j14,5 Ohm
Πυκνωτής λειτουργίας	9-j172 Ohm

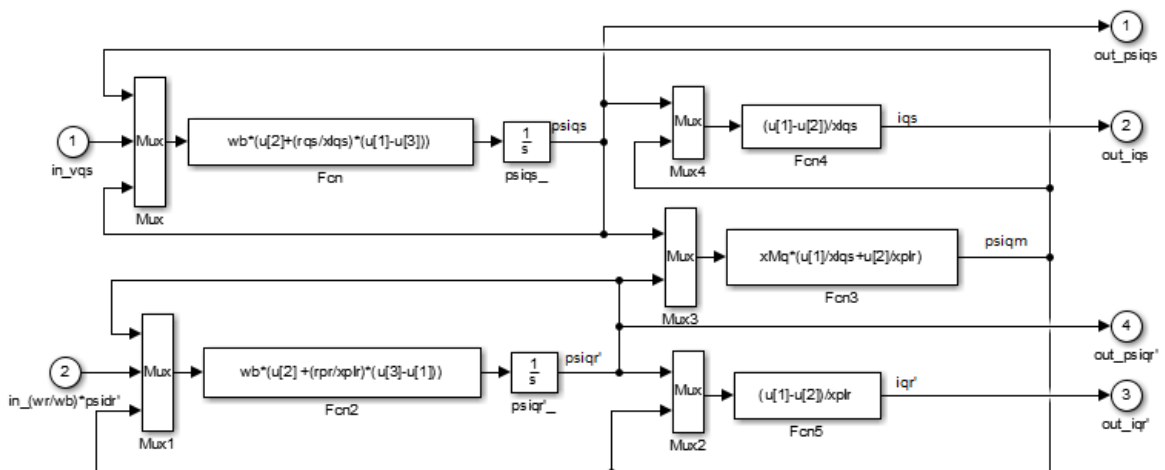
Πίνακας 4.2



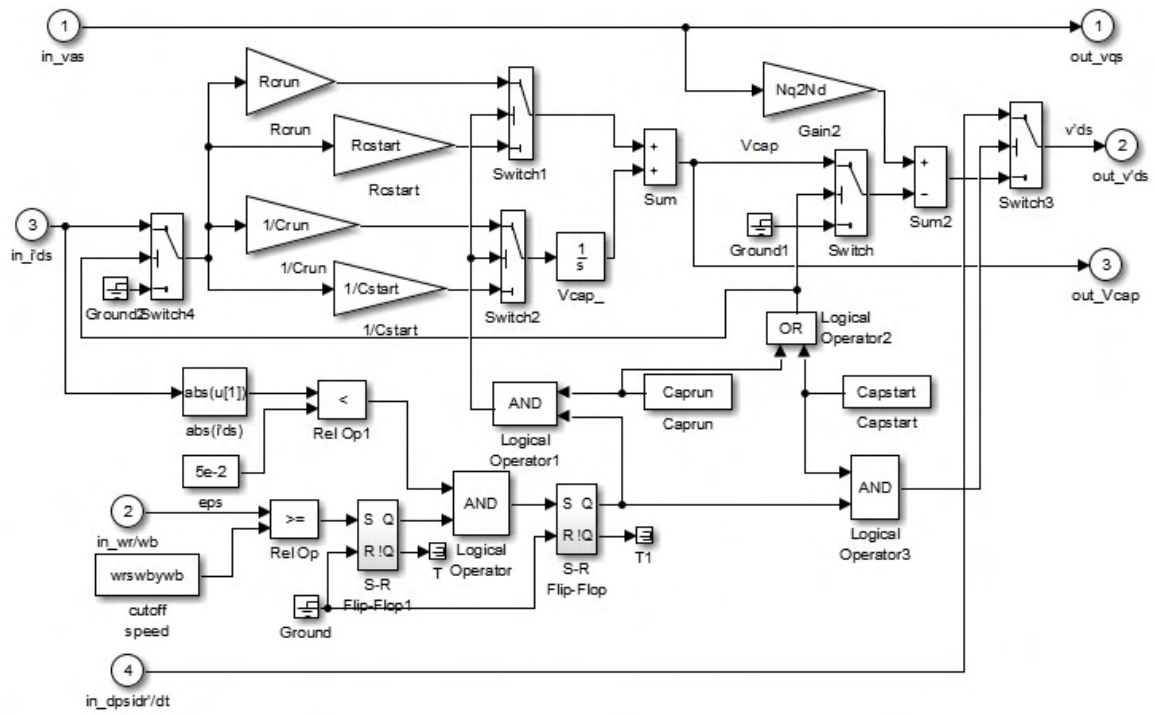
Σχήμα 4.28 Γενικό μοντέλο μονοφασικού κινητήρα στο Simulink



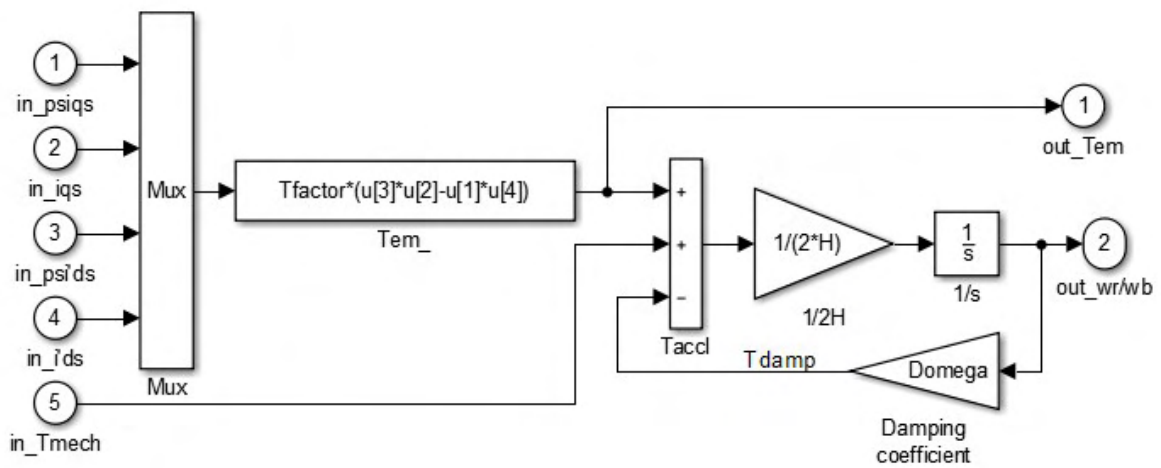
Σχήμα 4.29 Block d άξονα



Σχήμα 4.30 Block q άξονα

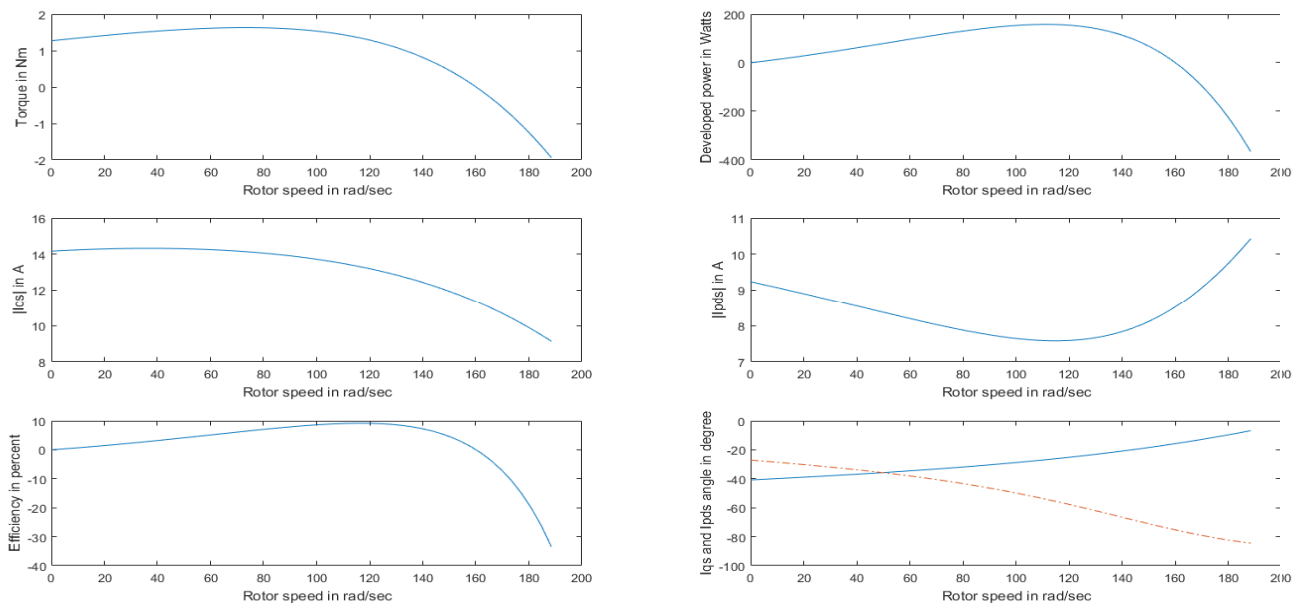


Σχήμα 4.31 Block Extconn άξονα

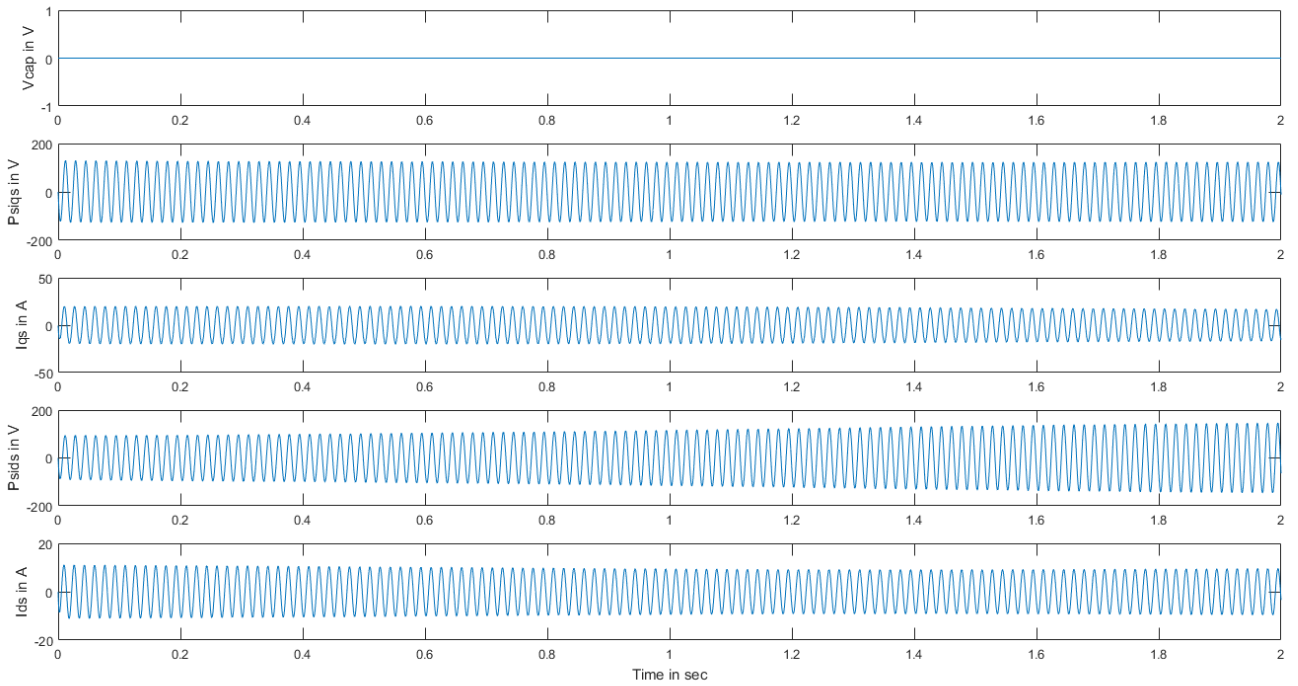
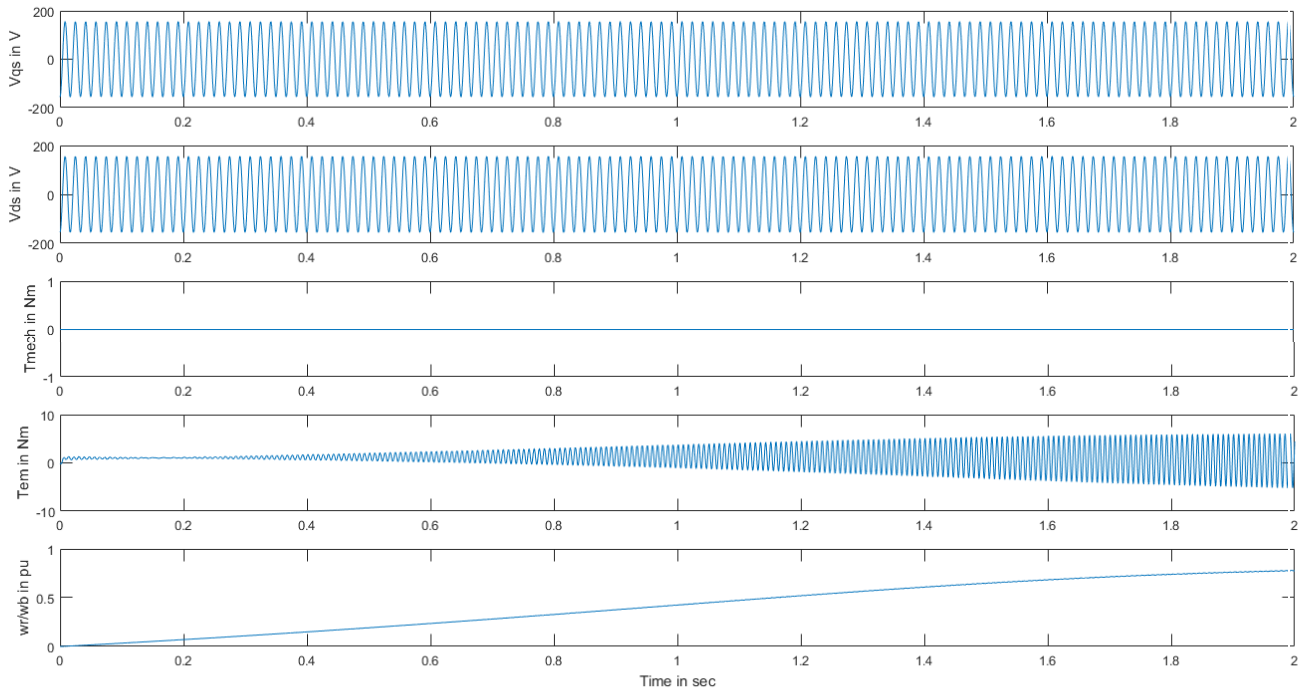


Σχήμα 4.32 Block του rotor (δρομέας)

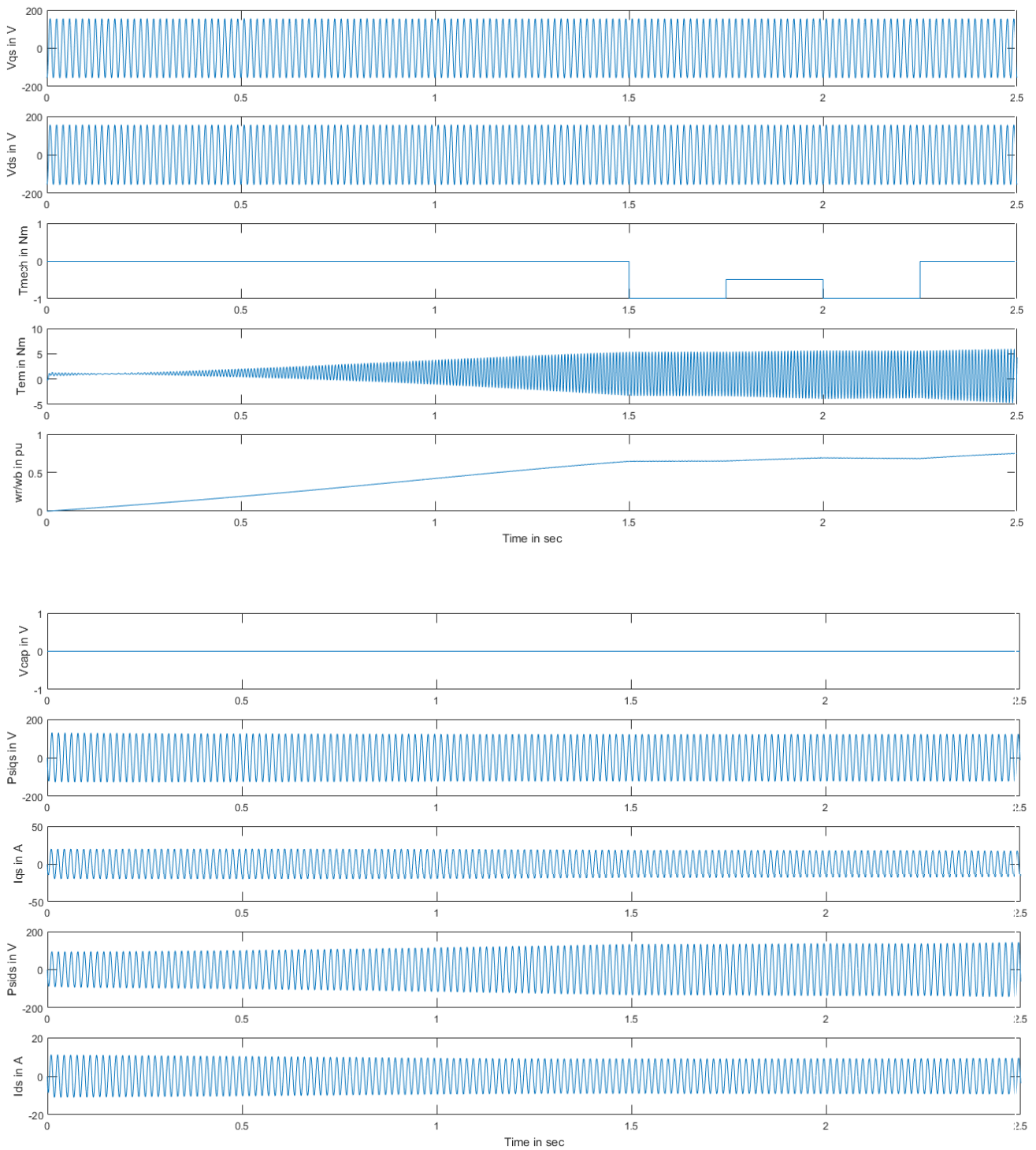
4.11.2.1 Προσομοίωση μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα αντίστασης



Σχήμα 4.33 Μόνιμη κατάσταση μονοφασικού κινητήρα αντίστασης

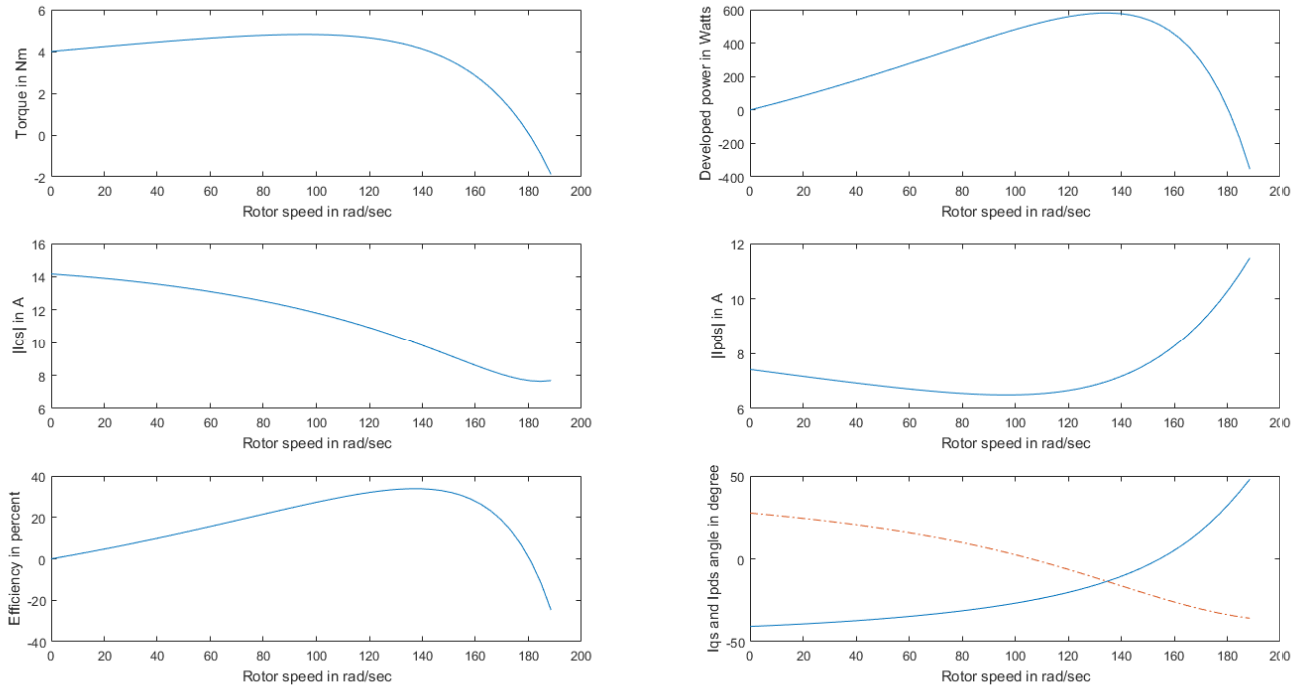


Σχήμα 4.34 Μονοφασικός κινητήρας αντίστασης (χωρίς πυκνωτή) χωρίς φορτίο

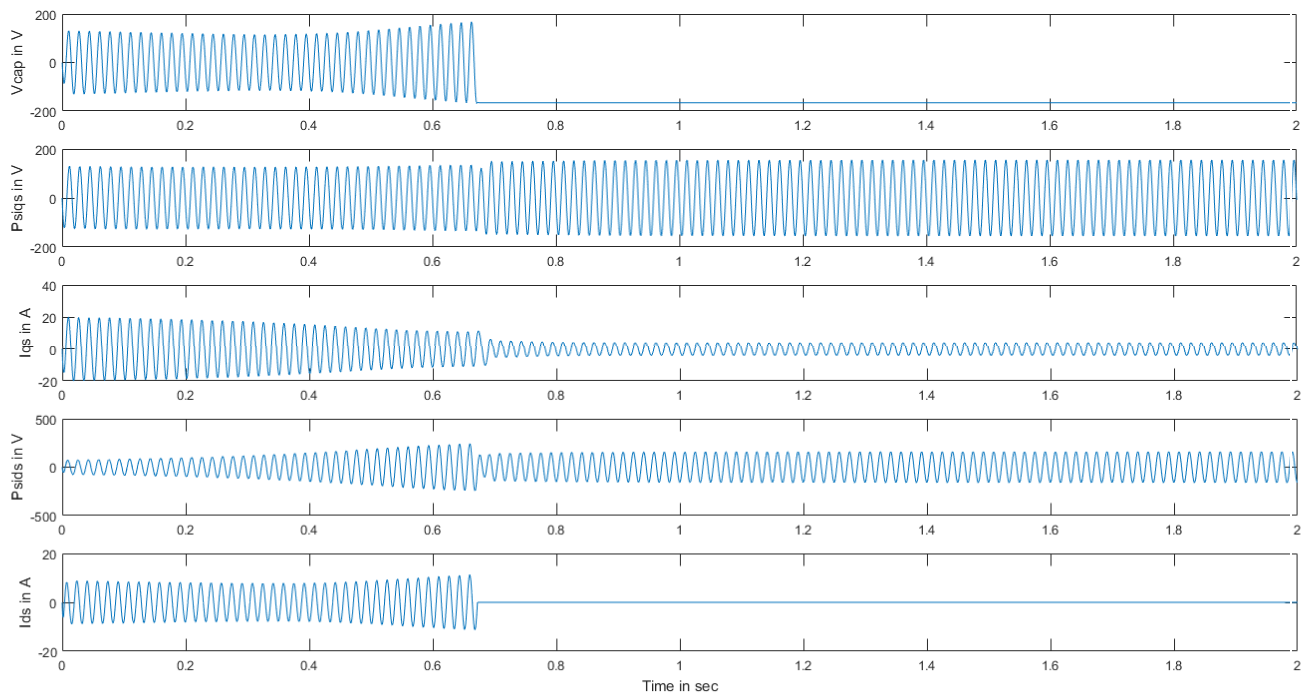
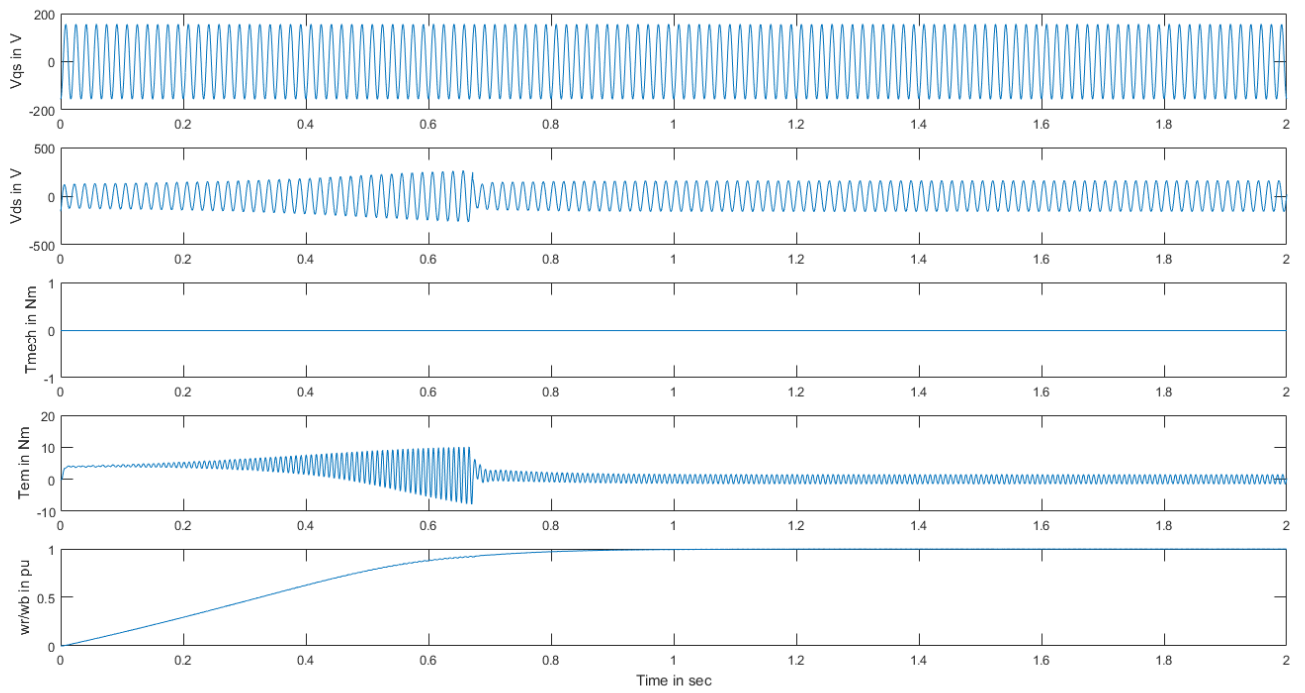


Σχήμα 4.35 Μονοφασικός κινητήρας αντίστασης (χωρίς πυκνωτή) με μεταβολή φορτίου

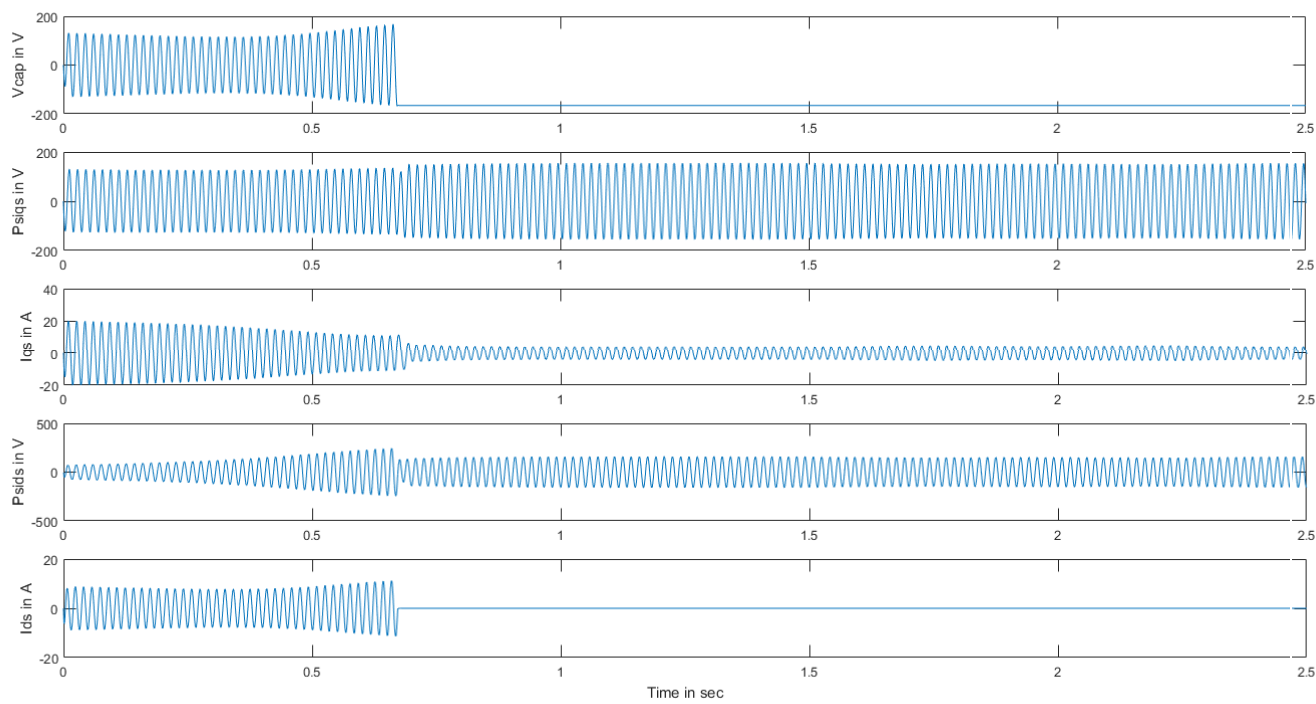
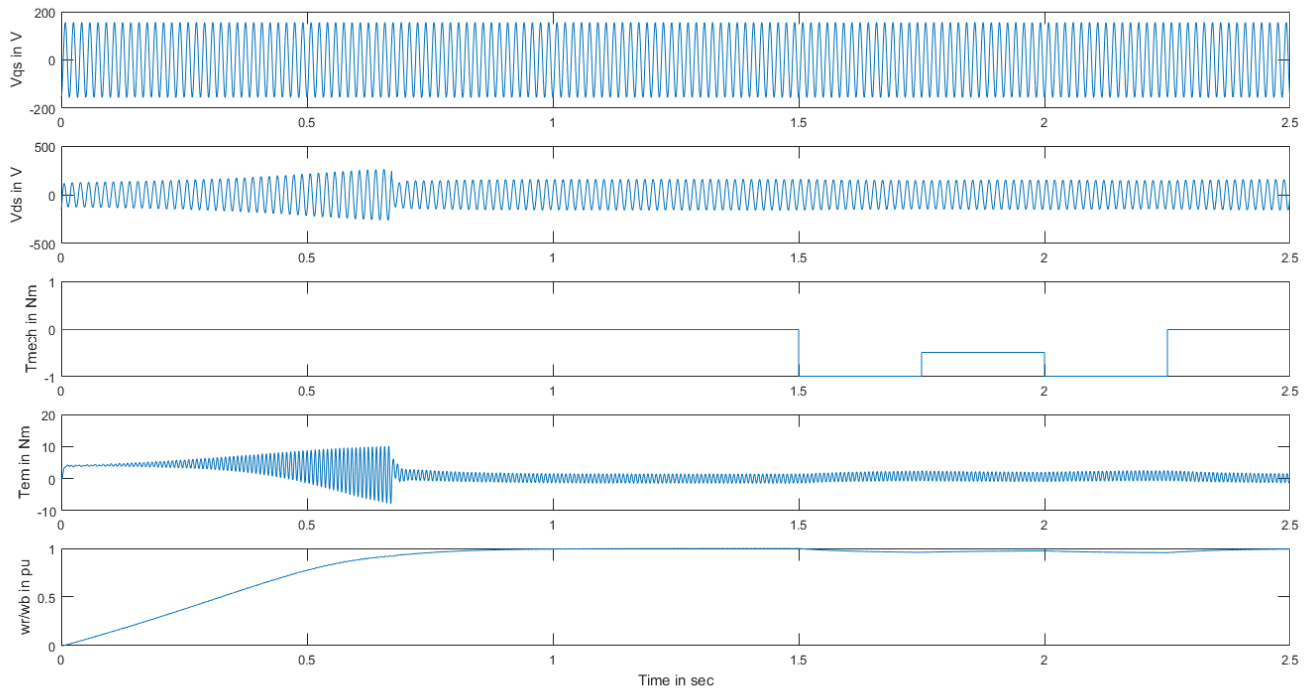
4.11.2.2 Προσομοίωση μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα με πυκνωτή εκκίνησης



Σχήμα 4.36 Μόνιμη κατάσταση μονοφασικού κινητήρα με πυκνωτή εκκίνησης

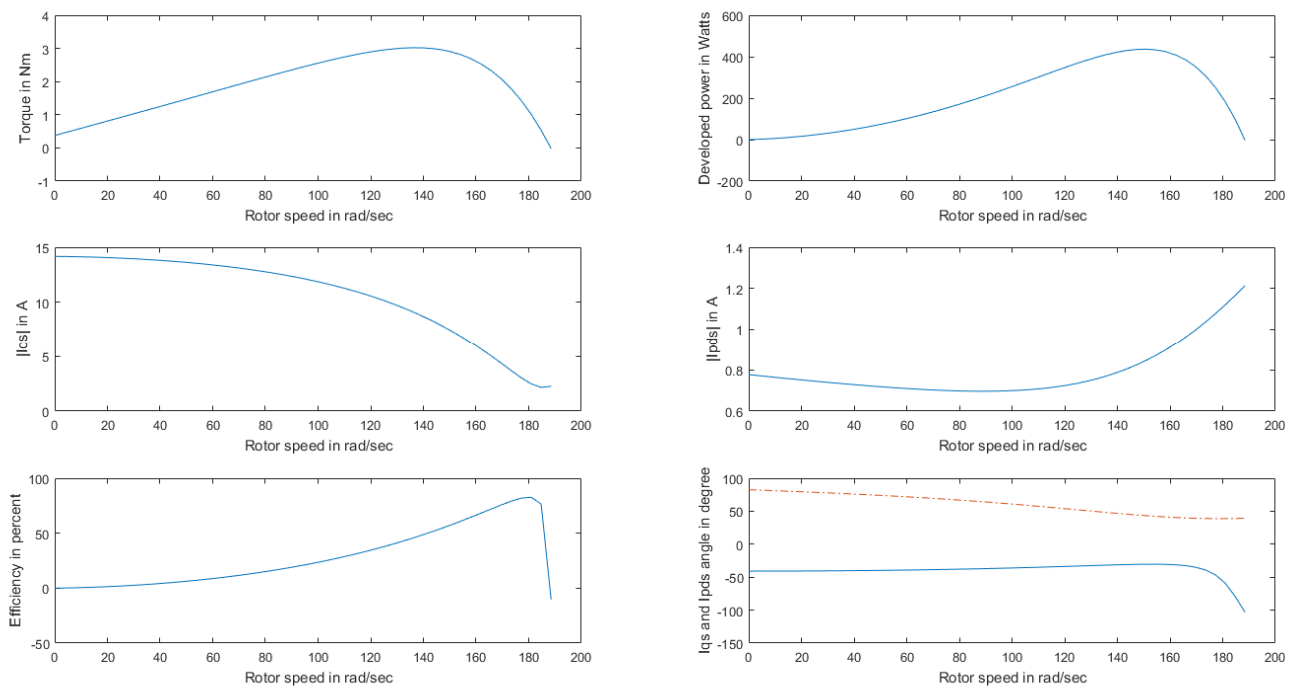


Σχήμα 4.37 Μονοφασικός κινητήρας με πυκνωτή εκκίνησης χωρίς φορτίο

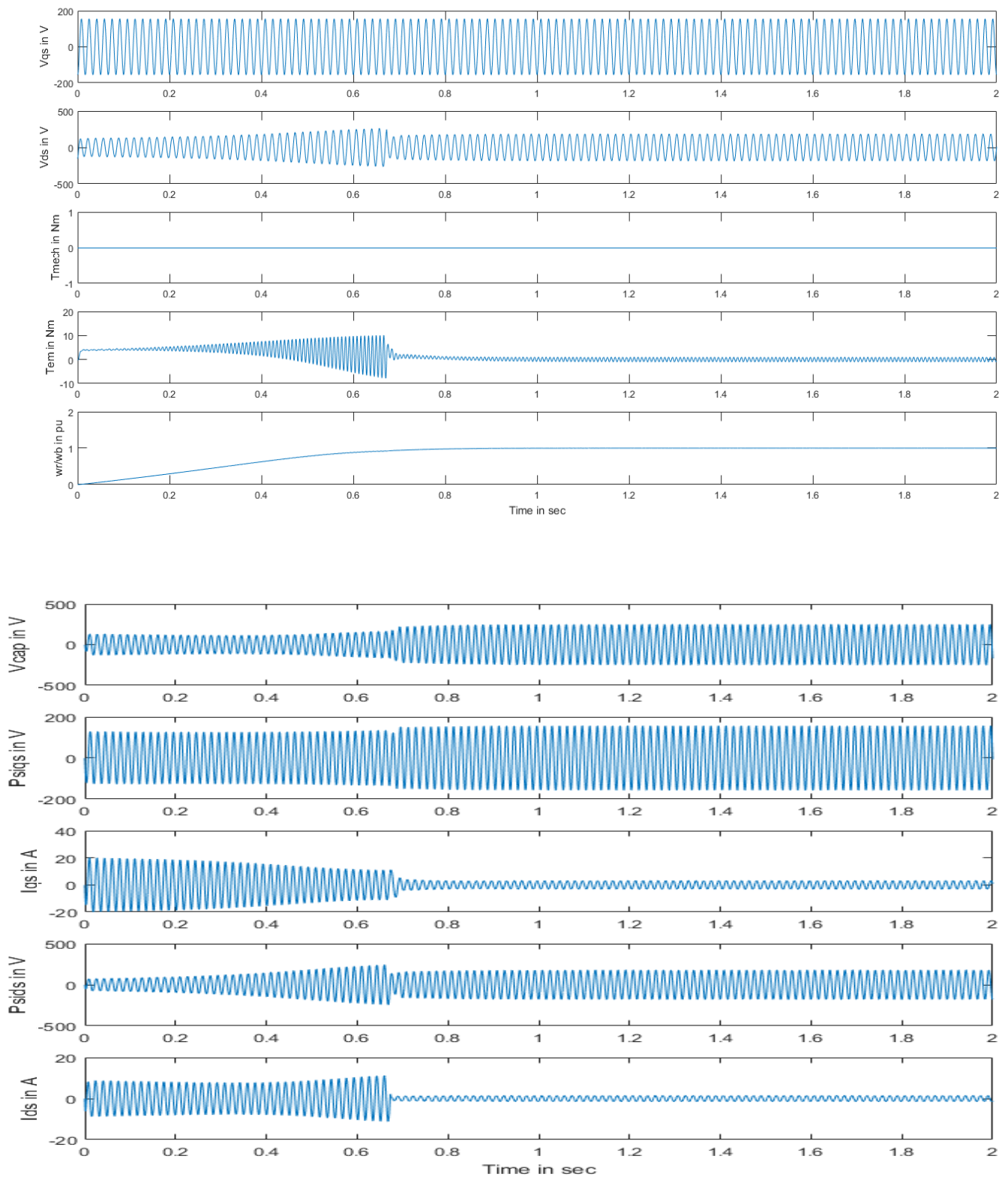


Σχήμα 4.38 Μονοφασικός κινητήρας με πυκνωτή εκκίνησης με μεταβολή φορτίου

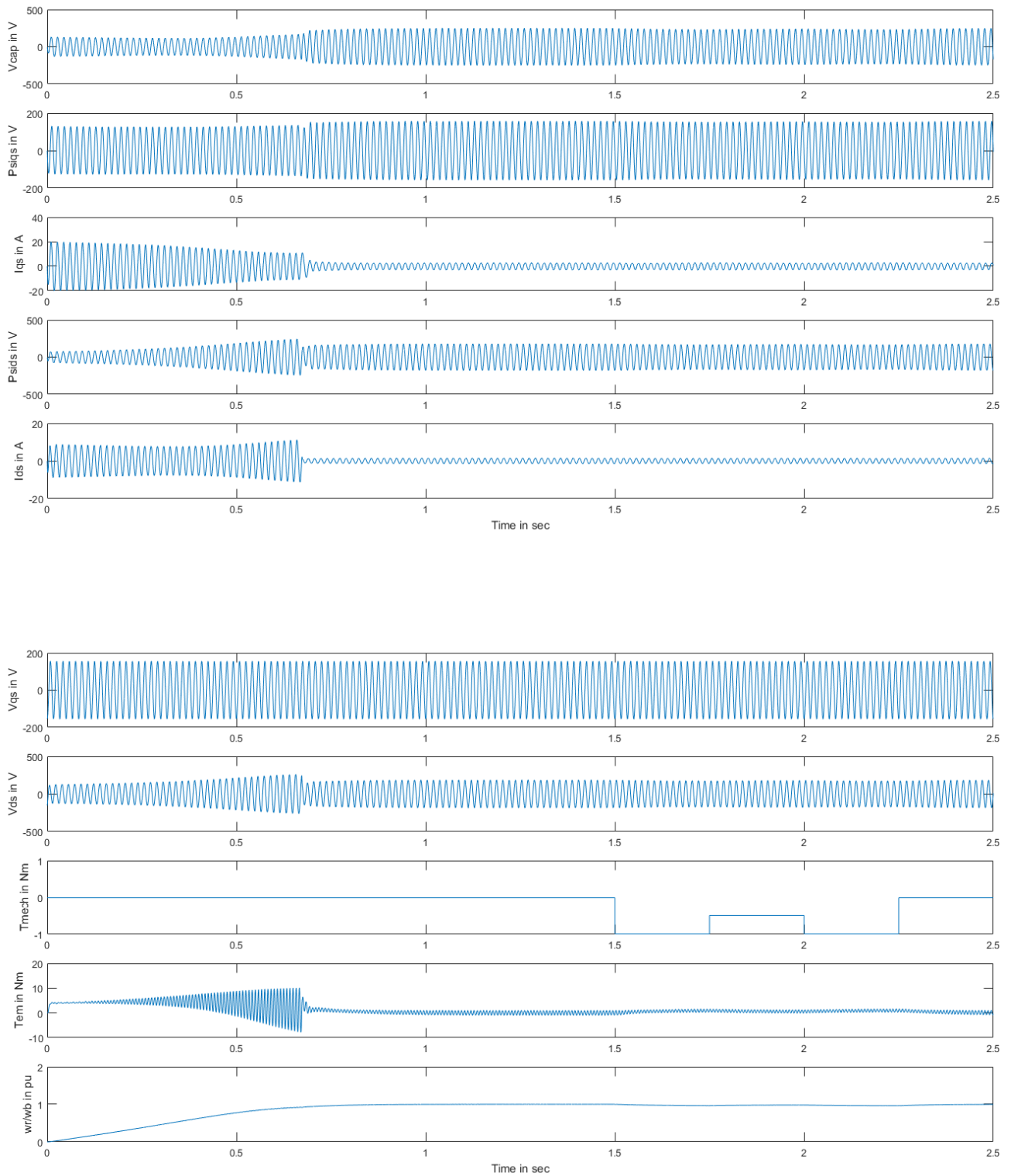
4.11.2.3 Προσομοίωση μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα με πυκνωτή εκκίνησης και πυκνωτή λειτουργίας



Σχήμα 4.39 Μόνιμη κατάσταση μονοφασικού κινητήρα με πυκνωτές εκκίνησης και λειτουργίας



Σχήμα 4.40 Μονοφασικός κινητήρας με πυκνωτές εκκίνησης και λειτουργίας χωρίς φορτίο



Σχήμα 4.41 Μονοφασικός κινητήρας με πυκνωτές εκκίνησης και λειτουργίας με μεταβολή φορτίου

4.11.2.4 Παρατηρήσεις

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα της μόνιμης κατάστασης (Σχήματα 4.24, 4.27, 4.30) των παραπάνω μηχανών παρατηρούμε την διαφορά της αποδοτικότητας τους, της ροπής και της αναπτυσσόμενης ισχύος, που δημιουργείται από την συνδεσμολογία των πυκνωτών. Ο μονοφασικός κινητήρας αντίστασης που δεν έχει πυκνωτή είναι φανερά λιγότερο αποδοτικός σε σχέση με τους άλλους δύο. Ο πυκνωτής εκκίνησης όπως φαίνεται και στο διάγραμμα με τις φάσεις των ρευμάτων δίνει το επιθυμητό προβάδισμα στην φάση του βοηθητικού τυλίγματος, ενώ στη περίπτωση όπου χρησιμοποιείται και πυκνωτής λειτουργίας παρατηρούμε την ακόμα μεγαλύτερη αποδοτικότητα της μηχανής. Ο πυκνωτής λειτουργίας ρυθμίζει την λειτουργία του κινητήρα, διατηρώντας την διαφορά φάσης των ρευμάτων των τυλιγμάτων, και έτσι ο κινητήρας μπορεί να λειτουργεί για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Έλεγχος λειτουργίας ασύγχρονων κινητήρων

5.1 Ρύθμιση στροφών ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα

Για τη ρύθμιση στροφών του τριφασικού κινητήρα υπάρχουν τρεις επιλογές.

- α) Μεταβολή της συχνότητας ρεύματος τροφοδότησης του δικτύου.
- β) Μεταβολή του αριθμού των πόλων .
- γ) Μεταβολή της ολίσθησης s .

5.1.1 Μεταβολή της συχνότητας ρεύματος τροφοδότησης του δικτύου.

Η χρήση της επιλογής της μεταβολής της συχνότητας του ρεύματος τροφοδότησης γίνεται κυρίως όταν η απαίτηση στροφών ανά λεπτό rpm του κινητήρα είναι, ή ξεπερνάει τις 3000, ή όταν χρειάζεται να γίνει επιβράδυνση του κινητήρα κατά 90% . Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι μηχανήματα επεξεργασίας ξύλου, τα οποία λειτουργούν σε μεγάλες ταχύτητες ώστε το ξύλο να κόβεται σαν βούτυρο, ή ένας ανελκυστήρας ο οποίος παρουσιάζει συχνές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις κατά τη λειτουργία του.

Επειδή ο λόγος των μεγεθών της τάσης τροφοδοσίας προς την τάση του δικτύου είναι ανάλογος της μαγνητικής ροής στον στάτη του κινητήρα, η αυξομείωση της συχνότητας τροφοδοσίας θα απαιτούσε την αντίστοιχη αυξομείωση στην τάση τροφοδοσίας ώστε η μαγνητική ροή αλλά και η ροπή του κινητήρα να παραμείνει στα ίδια επίπεδα. Το γεγονός αυτό σχετίζεται με τη αποδοτικότητα του κινητήρα και της ψύξης του κινητήρα. Έτσι, κατά λειτουργία του κινητήρα σε μεγάλες συχνότητες και συνεπώς σε μεγάλες τάσεις, η απόδοση του κινητήρα είναι βελτιωμένη καθώς και η ψύξη είναι αποτελεσματικότερη λόγω της μειωμένης ζήτησης ρεύματος. Αντιστρόφως σε χαμηλές συχνότητες και μικρές τάσεις, η απόδοση του κινητήρα είναι μειωμένη, λόγω της μειωμένης ψύξης και της απορρόφησης περισσότερου ρεύματος.

Η τροφοδοσία μεταβλητής τάσης και συχνότητας γίνεται μέσω εναλλακτήρα μεταβλητού αριθμού στροφών ή από ασύγχρονο μετατροπέα συχνότητας. Η επιλογή

της μεταβολής της συχνότητας τροφοδοσίας είναι ιδιαίτερα ακριβή για κινητήρες μεγάλης ισχύος.

5.1.2 Μεταβολή του αριθμού των πόλων.

Με την μεταβολή του αριθμού των πόλων, όταν ο τύπος του κινητήρα το επιτρέπει, μπορούν να επιλεγθούν διάφορα μεγέθη αριθμού στροφών. Η χρήση αυτής της τεχνικής ρύθμισης στροφών χρησιμοποιείται σε κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα με απευθείας εκκίνηση. Βασικό συστατικό της τεχνικής είναι η συνδεσμολογία Dahlander. Η αλλαγή της συνδεσμολογίας γίνεται με ειδικό διακόπτη.

5.1.3 Μεταβολή της ολίσθησης

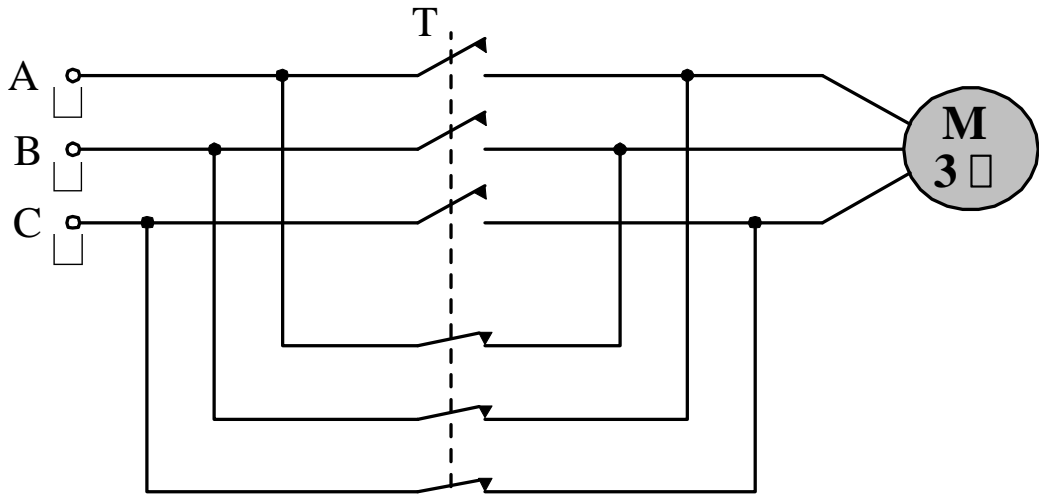
Η μεταβολή της ολίσθησης στους κινητήρες τυλιγμένου δρομέα επιτυγχάνεται με προσθήκη τριφασικής αντίστασης στο τύλιγμα του δρομέα του κινητήρα. Οι αντιστάσεις που ρυθμίζουν την ταχύτητα των στροφών έχουν κατάλληλη ισχύ ώστε να έχουν μεγάλα διαστήματα αντοχής σε φορτίο. Βέβαια η μέθοδος αυτή δεν είναι ιδιαίτερος οικονομική διότι οι αντιστάσεις οδηγούν σε μεγάλες απώλειες και συνεπώς σε μειωμένη απόδοση του κινητήρα.

Για τους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα η αλλαγή της ολίσθησης επιτυγχάνεται με μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας. Επειδή η ροπή είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης μια μείωση της τάσης θα επέφερε μια ανάλογη μείωση της ροπής του κινητήρα. Όμως επειδή για σταθερό φορτίο τα ρεύματα του στάτη και του δρομέα αυξάνονται η μεταβολή της τάσης δεν επιφέρει ιδιαίτερα μεγάλη μεταβολή του αριθμού των στροφών.

5.2 Μέθοδοι πέδησης ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων

5.2.1 Δυναμική πέδηση

Η μέθοδος της δυναμικής πέδησης περιλαμβάνει την αλλαγή της φοράς της περιστροφής του μαγνητικού πεδίου στο τυλίγμα του στάτη. Αυτό επιτυγχάνεται αλλάζοντας τη διαδοχή δύο οποιονδήποτε από τις τρεις φάσεις της τάσης τροφοδοσίας.



Σχήμα 5.1 Διάταξη δυναμικής πέδησης

Όταν πραγματοποιηθεί αλλαγή της φοράς περιστροφής του μαγνητικού πεδίου, ο δρομέας θα αποκτήσει ολίσθηση “2-s”. Η ηλεκτρική ροπή θα αλλάξει και αυτή πρόσημο, μαζί με την ροπή του φορτίου. Το άθροισμα των μέτρων των ροπών, επαναφέρει το κινητήρα στη νέα φορά περιστροφής που είναι ίδια με τη φορά του μαγνητικού πεδίου του τυλίγματος του στάτη.

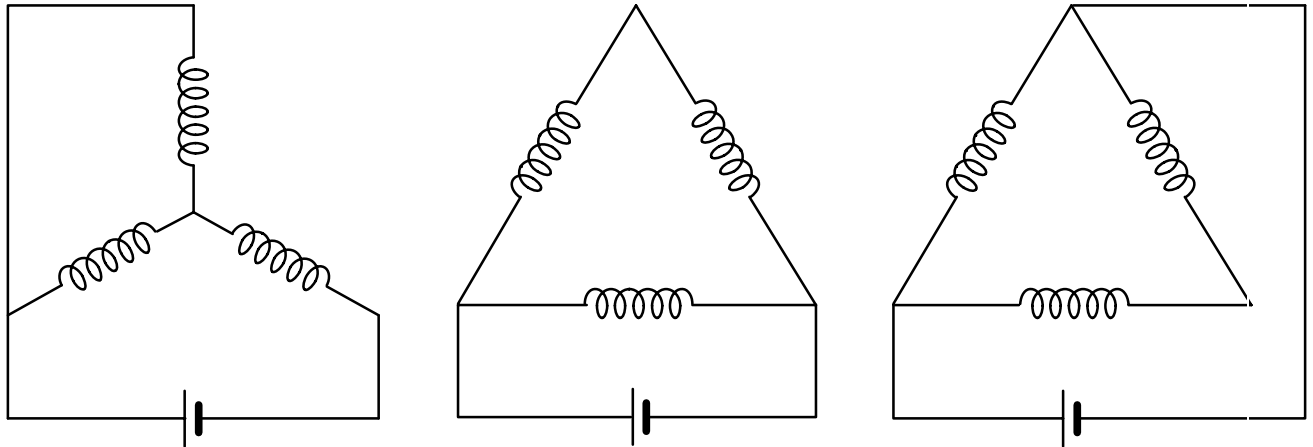
Στην περιοχή λειτουργίας $2 < s < 1$, η μηχανική ισχύς που παράγεται είναι αρνητική. Οι απώλειες χαλκού του δρομέα είναι αρκετά υψηλές, καθώς ισούνται με το άθροισμα της μηχανικής ισχύος στον άξονα του δρομέα και της ισχύος του διάκενου.

Για να ολοκληρωθεί η διαδικασία της πέδησης με απόλυτη επιτυχία, στο σύστημα προστίθεται ένας αισθητήρας ταχύτητας ώστε, την στιγμή που οι στροφές του κινητήρα είναι μηδενικές, ο κινητήρας να αποσυνδεθεί από το δίκτυο πριν αλλάξει τεταρτημόριο και αρχίσει να περιστρέφεται με την αντίθετη φορά.

5.2.2 Δυναμική πέδηση με συνεχές ρεύμα

Στη μέθοδο της δυναμικής πέδησης με συνεχές ρεύμα, γίνεται αποσύνδεση του κινητήρα, και συγκεκριμένα του τυλίγματος του στάτη, από το δίκτυο τροφοδοσίας

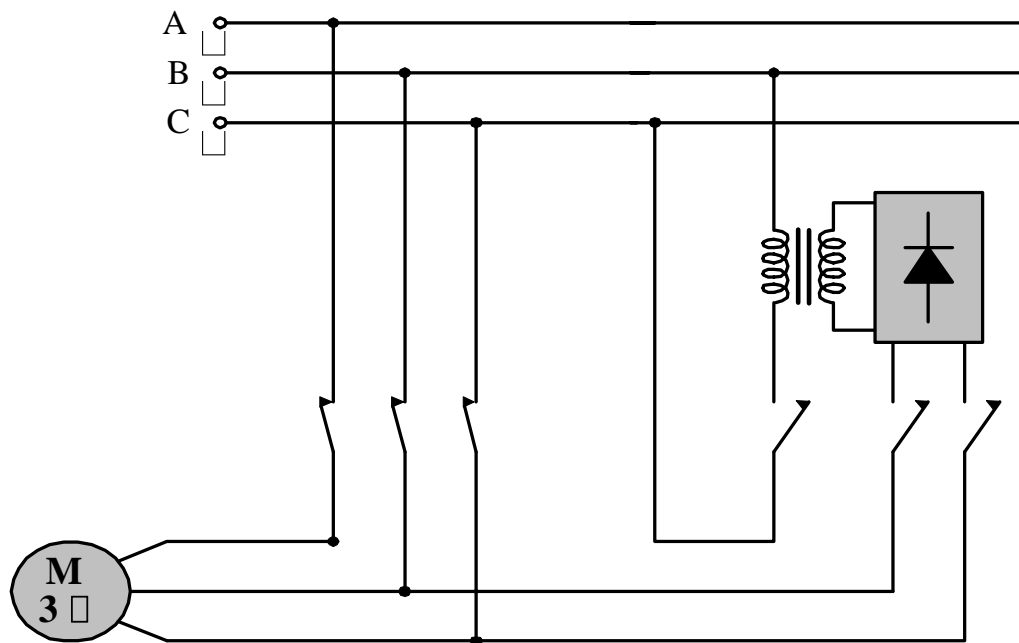
εναλλασσόμενου ρεύματος και μετέπειτα ο κινητήρας συνδέεται μέσω μιας ανορθωτικής διάταξης σε τροφοδοσία συνεχούς ρεύματος. Οι δύο φάσεις του τυλίγματος του στάτη συνδέονται σε σειρά και τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα ενώ το τύλιγμα της τρίτης φάσης, αναλόγως με τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων που θα είναι σε συνδεσμολογία αστέρα ή τριγώνου, συνδέεται με τα υπόλοιπα όπως στο Σχήμα 5.2



Σχήμα 5.2 Διατάξεις σύνδεσης τυλιγμάτων του στάτη

Στην κατάσταση λειτουργίας αυτής τη μεθόδου το τύλιγμα διέγερσης βρίσκεται στο σταθερό μέρος ενώ το τύλιγμα του δρομέα είναι το τύλιγμα τυμπάνου της γεννήτριας. Η κινητική ενέργεια του στρεφόμενου δρομέα μετατρέπεται σε θερμική στο ωμικό του μέρος και ο δρομέας επιβραδύνεται μέχρι να σταματήσει εντελώς χωρίς να υπάρχει περίπτωση να επιταχύνει ξανά προς τη αντίθετη φορά.

Στο Σχήμα 5.3 απεικονίζεται η διάταξη πέδησης του τριφασικού κινητήρα με συνεχές ρεύμα.



Σχήμα 5.3 Διάταξη πέδησης με συνεχές ρεύμα

5.2.3 Πέδηση με αλλαγή του αριθμού των πόλων

Αρχικά πρέπει να σημειωθεί πως για την εφαρμογή της μεθόδου πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα της αλλαγής του αριθμού των πόλων στον κινητήρα. Η πιο συνηθισμένη συνδεσμολογία μεταβολής του αριθμού των πόλων, είναι η συνδεσμολογία Dahlander. Αν για παράδειγμα διπλασιαστεί ο αριθμός των πόλων η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου στο στάτη υποδιπλασιάζεται, με αποτέλεσμα ο κινητήρας να μετατραπεί σε γεννήτρια κατά τη λειτουργία του στην περιοχή στροφών $n_1/2$ έως n_1 , επιστρέφοντας παράλληλα ισχύ στο δίκτυο. Η ολίσθηση πριν και μετά την αλλαγή του αριθμού των πόλων φαίνεται στις σχέσεις (5.1) και (5.2)

$$s_1 = \frac{n_{s_1} - n_1}{n_{s_1}} \quad (5.1)$$

$$s_2 = \frac{\frac{n_{s_1}}{2} - n_1}{n_{s_1}} = \frac{n_1}{n_{s_1}} - s_1 \quad (5.2)$$

Με την δημιουργία της ροπής αντίθετης φοράς έχουμε σταδιακή μείωση των στροφών. Μόλις ο αριθμός των στροφών γίνει μικρότερος του αριθμού των στροφών της καινούριας σύγχρονης ταχύτητας, η λειτουργία της μηχανής θα επανέλθει στη λειτουργία της ως κινητήρας καθώς θα αλλάξει και το πρόσημο της ηλεκτρικής ροπής. Βέβαια για να είναι είναι η πέδηση του κινητήρα επιτυχημένη εις στο ακέραιο θα πρέπει να υπάρξει υποστήριξη και από μια άλλη βοηθητική διάταξη, στο διάστημα $0 \leq n_r \leq n_{s2}$.

5.3 Τεχνικές Αυτομάτου Ελέγχου Επαγωγικού Κινητήρα

Τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης που χρησιμοποιούν επαγωγικούς κινητήρες, χρήζουν κάποιου είδους αυτοματοποιημένου ελέγχου ώστε να διατηρείται η ομαλή λειτουργία του συστήματος με άρτια απόδοση και σωστή προσαρμογή τις προκύπτουσες καταστάσεις. Ο έλεγχος των επαγωγικών κινητήρων είναι μια διαδικασία ιδιαίτερος πολύπλοκη, καθώς τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που δημιουργούνται κατά τη λειτουργία του κινητήρα είναι από τη φύση τους και αυτά πολύπλοκα. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές ελέγχου, αλλά στη παρούσα ενότητα θα εξεταστούν δύο τεχνικές ελέγχου επαγωγικών κινητήρων. Οι τεχνικές αυτές θα είναι

- α) ο έλεγχος λειτουργίας με σταθερό V/f και
- β) ο διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμένο πεδίο

Και οι δύο αυτές τεχνικές έχουν ως στόχο να θέσουν υπό έλεγχο τις μεταβολές που υπάρχουν στην μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής, αλλά και της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα που προέρχονται από τις μεταβολές της τάσης τροφοδοσίας.

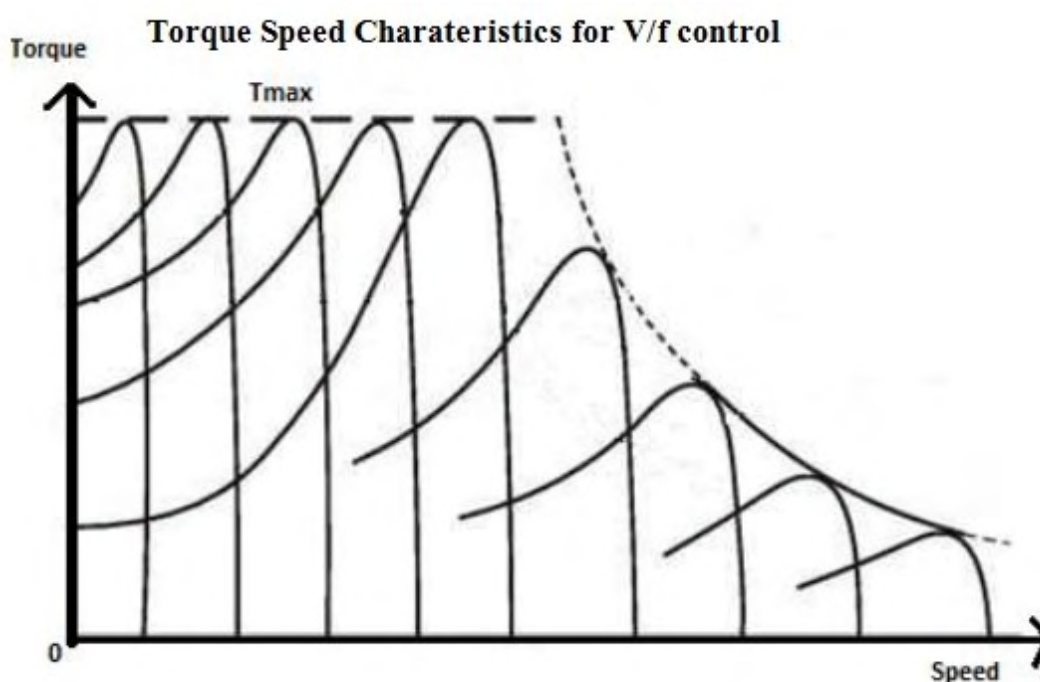
5.3.1 Έλεγχος λειτουργίας με σταθερό V/f

Ο έλεγχος λειτουργίας με σταθερό V/f είναι μια τεχνική που ανήκει στη κατηγορία του μονόμετρου ή βαθμωτού ελέγχου. Στο πνεύμα της κατηγορίας αυτής εντάσσεται η ιδέα της μεταβολής μόνο του μέτρου (πλάτους) των εμπλεκόμενων μεγεθών, μη λαμβάνοντας υπόψιν τη συζευγμένη μορφή των εξισώσεων. Σε αυτή τη τεχνική το κύριο σημείο αναφοράς είναι ο σταθερός λόγος της τάσης προς τη συχνότητα τροφοδοσίας. Πρόκειται για μία τεχνική με εκτεταμένη χρήση σε βιομηχανικές εφαρμογές, που διακρίνεται για την απλότητα της, καθώς δεν

απαιτούνται πολλοί υπολογισμοί για την εφαρμογή της. Παρόλα αυτά η χρήση της συγκεκριμένης τεχνικής περιορίζεται σε μια κατηγορία εφαρμογών κατά τις οποίες δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια και ιδιαίτερα καλή μεταβατική συμπεριφορά.

Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου στον στάτη ή αλλιώς σύγχρονη ταχύτητα μπορεί να ελεγχθεί μεταβάλλοντας την συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι ανάλογη του γινομένου της μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής και της συχνότητας τροφοδοσίας. Αν παραλείψουμε το φαινόμενο της πτώσης τάσης θα έχουμε μια σχέση κατά την οποία η τάση τροφοδοσίας θα είναι ανάλογη του γινομένου της μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής με τη συχνότητα τροφοδοσίας. Έτσι εξάγεται το συμπέρασμα πως αν μειωθεί η συχνότητα, με το μέγεθος τη τάσης να παραμένει σταθερό, η μαγνητική ροή του διακένου θα παρουσιάσει φυσικά, μια αύξηση η οποία δεν είναι διόλου επιθυμητή, καθώς συνεπάγεται με ηλεκτρικές απώλειες. Για διατηρηθεί αυτό το μέγεθος της μαγνητικής ροής σταθερό και άρα η μέγιστη ροπή του κινητήρα, όταν μεταβάλλεται η ταχύτητα του, θα πρέπει ο λόγος της τάσης προς τη συχνότητα να παραμείνει σταθερός.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.4, αν εφαρμοστεί η τεχνική ελέγχου με σταθερό λόγο V/f η μέγιστη δυνατή τιμή της ροπής για τον κινητήρα θα είναι διαθέσιμη για οποιαδήποτε ταχύτητα θέλουμε να λειτουργήσει ο κινητήρας.



Σχήμα 5.4

5.3.2 Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμένο πεδίο

Η τεχνική του διανυσματικού ελέγχου βασίζεται στη αξιοποίηση του μετασχηματισμού του Park, μέσω του οποίου γίνεται σημαντική απλοποίηση του μοντέλου του κινητήρα σε ένα σύστημα εξισώσεων με σταθερούς συντελεστές ή όπως είναι γνωστό σε ένα σύστημα dq0. Μέσω της τεχνικής αυτής εξαλείφεται το πρόβλημα της συζευγμένης μορφής των εξισώσεων του μοντέλου της μηχανής.

Με τον μετασχηματισμό του Park, όπως έχει ξανά ειπωθεί, έχουμε την αναγωγή του τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος σε δε δύο κάθετους άξονες, τον άξονα d και τον άξονα q. Όσον αφορά τον άξονα 0 στον διανυσματικό έλεγχο συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψιν. Στο διανυσματικό έλεγχο η γωνία θ που υπάρχει στον πίνακα μετασχηματισμού επιλέγεται έτσι ώστε το προκύπτον σύστημα να περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, ώστε τα εναλλασσόμενα μεγέθη του τριφασικού συστήματος να μετασχηματιστούν σε συνεχείς ποσότητες για την εύκολη εφαρμογή τεχνικών ελέγχου.

Κατά τη διάρκεια του προσανατολισμού του πεδίου, η ανεξαρτητοποίηση των μεταβλητών της μαγνητικής ροής και της ροπής του κινητήρα είναι πραγματικότητα. Έτσι τα μεγέθη της ταχύτητας του κινητήρα, της ροπής του κινητήρα αλλά και της μαγνητικής ροής να μεταβληθούν ανεξάρτητα και χωρίς επιπλοκές. Έτσι αναδεικνύεται το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής καθώς ο επαγωγικός κινητήρας ελέγχεται σαν να ήταν κινητήρας συνεχούς ρεύματος.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι διανυσματικού ελέγχου ανάλογα τον προσανατολισμό του συστήματος αναφοράς ή ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται ο προσανατολισμός του συστήματος αναφοράς. Έτσι για τη πρώτη περίπτωση έχουμε διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό στο πεδίο του στάτη, διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό στο πεδίο του δρομέα και διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό στο πεδίο του διάκενου της μηχανής. Για την δεύτερη περίπτωση που αφορά τον τρόπο προσανατολισμού διακρίνονται οι κατηγορίες της μεθόδου του έμμεσου διανυσματικού ελέγχου με χρήση της συχνότητας ολίσθησης και την μέθοδο του άμεσου διανυσματικού ελέγχου, με τη χρήση αισθητήρων σε συνδυασμό με το μαθηματικό μοντέλο για την εξαγωγή των διανυσμάτων.

Ο διανυσματικός έλεγχος είναι μια τεχνική ελέγχου που παρέχει μεγάλη ακρίβεια στον προσδιορισμό της ταχύτητας αλλά και τις μαγνητικής ροής σε οποιαδήποτε συνθήκη. Με τη ανεξαρτητοποίηση των μεγεθών των συζευγμένων εξισώσεων επιτεύχθηκε μεγαλύτερη απόδοση και επίδοση των συστημάτων. Επίσης μέσω της τεχνικής αυτής παρέχεται και η δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας, που επιτυγχάνεται με τη μείωση της μαγνητικής ροής όταν η ροπή που απαιτείται δεν είναι η μέγιστη. Έτσι έχουμε μειωμένη κατανάλωση χωρίς να επηρεάζεται το επιθυμητό αποτέλεσμα.

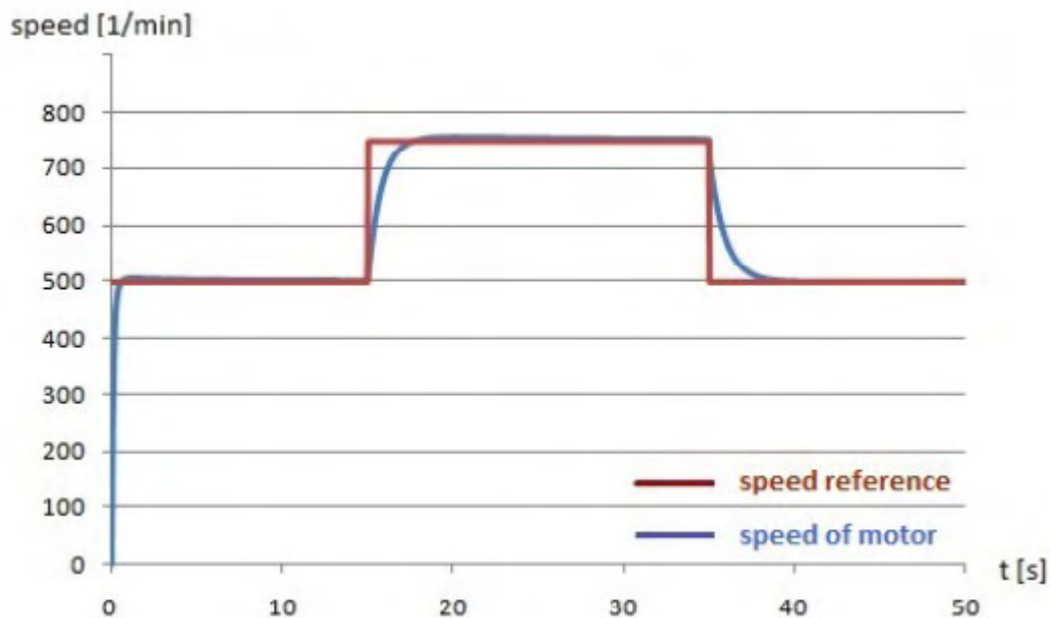
Βέβαια υπάρχουν κάποια μελανά σημεία στη χρήση του διανυσματικού ελέγχου. Καταρχάς πρόκειται για ένα ιδιαίτερος πολύπλοκο σύστημα υπολογισμού που είναι απαραίτητο για τον σωστό προσανατολισμό του πεδίου. Απαιτούνται συνεπώς ισχυρά υπολογιστικά συστήματα ώστε να διαχειρίζονται γρήγορα και αποδοτικά τον μεγάλο φόρτο υπολογισμών. Επίσης είναι αναγκαίος ο έλεγχος του ρεύματος του αντιστροφέα ο οποίος γίνεται με έλεγχο στιγμιαίου ρεύματος σε ζώνη

υστέρησης ή με πρόβλεψη των επιθυμητών τάσεων από τα στοιχεία του μοντέλου κάνοντας χρήση ημιτονοειδούς διαμόρφωσης πλάτους παλμού.

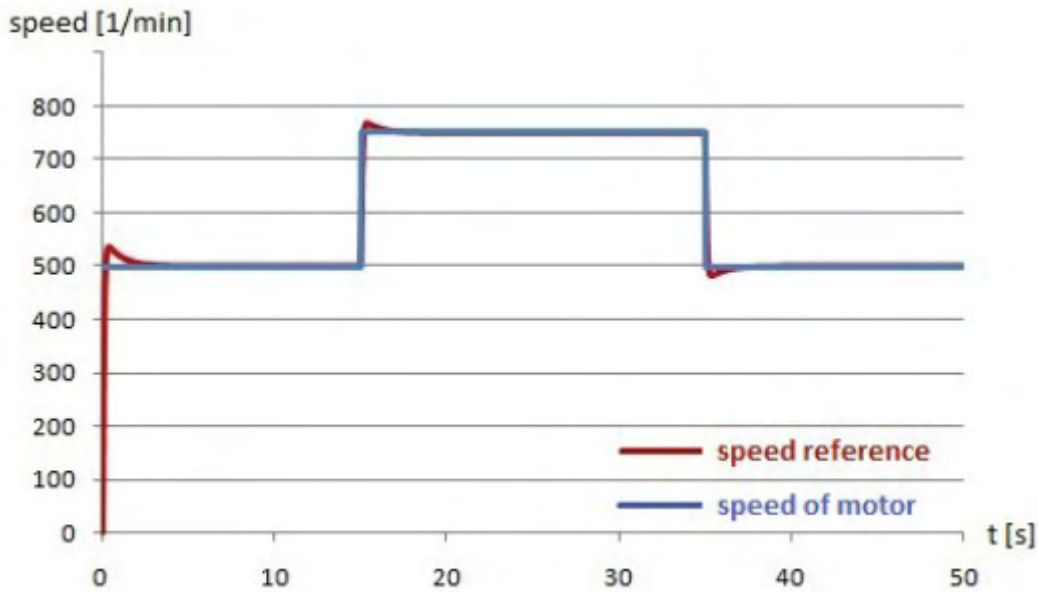
5.3.3 Σύγκριση Τεχνικών Αυτομάτου Ελέγχου

Για την σύγκριση των τεχνικών αυτομάτου ελέγχου χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό Matlab/Simulink. Στα Σχήματα 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 υπάρχει παράθεση[12] αποτελεσμάτων της προσομοίωσης των δύο αυτών μεθόδων. Οι προσομοιώσεις δείχνουν το πώς ο κινητήρας προσαρμόζεται στις μεταβολές της ταχύτητας και της ροπής, ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται.

Συγκρίνοντας τις δύο τεχνικές ελέγχου ως προς την μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής (Σχήμα 5.5 και Σχήμα 5.6) φαίνεται πόσο πιο αργά προσαρμόζεται ο κινητήρας στην επιθυμητή ταχύτητα χρησιμοποιώντας την τεχνική ελέγχου λειτουργίας με σταθερό V/f. Αντίθετα στον διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμένο πεδίο, η προσαρμογή του κινητήρα είναι γρήγορη και σχεδόν ακαριαία.

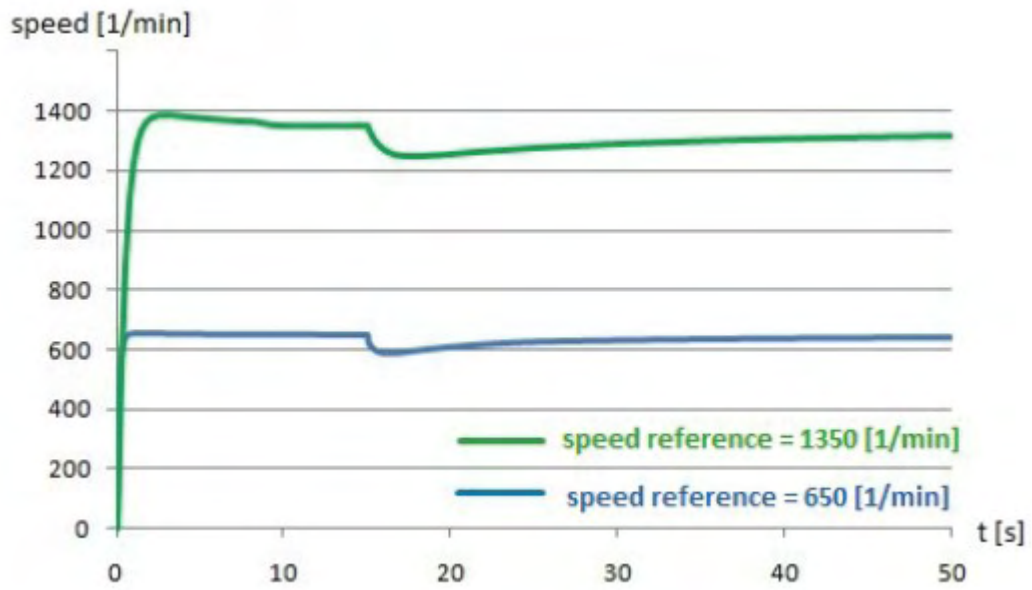


Σχήμα 5.5 Έλεγχος με σταθερό V/f

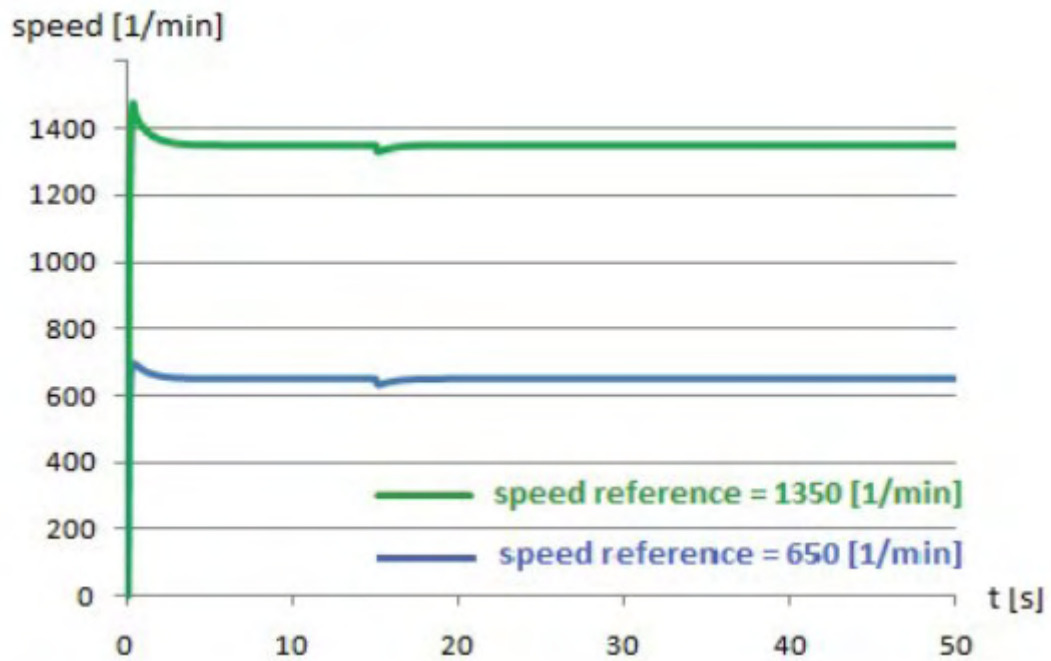


Σχήμα 5.6 Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμένο πεδίο

Στα Σχήματα 5.7 και 5.8 διακρίνεται η συμπεριφορά του κινητήρα στην μεταβολή της ροπής εφαρμόζοντας τις τεχνικές έλεγχου με σταθερό V/f και με προσανατολισμένο πεδίο. Η υπεροχή του διανυσματικού έλεγχου με προσανατολισμένο πεδίο είναι εμφανής καθώς και πάλι η απόκριση στις μεταβολή της ροπής είναι πολύ πιο γρήγορη. Συμπερασματικά, μέσω της προσομοίωσης επιβεβαιώνεται η ανωτερότητα του διανυσματικού έλεγχου έναντι του έλεγχου με σταθερό V/f, καθώς οι μεταβάσεις στις επιθυμητές καταστάσεις λειτουργίας είναι πολύ πιο σύντομες. Υπενθυμίζεται όμως, πως η εξαιρετική απόδοση της τεχνικής αυτής, ειδικά σε συστήματα με δυναμική συμπεριφορά, έχει πολύ μεγαλύτερο κόστος από τον ανταγωνιστή της.



Σχήμα 5.7 Έλεγχος με σταθερό V/f



Σχήμα 5.8 Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμένο πεδίο

Βιβλιογραφικές Αναφορές και Παραθέσεις

1. "Dynamic Simulation of Electric Machinery, using Matlab/Simuling", Chee-Mun Ong, Prentice Hall PTR, Purdue University, 1998.
2. "Analysis of Electric Machinery", Paul C. Krauss, McGraw-Hill, 1986.
3. "Ηλεκτρικές Μηχανές", Παντελής Β. Μαλατέστας, 3η Έκδοση, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2015.
4. "Ηλεκτρικές Μηχανές Εναλλασσόμενου Ρεύματος" ", Βαγγέλης Στεργίου, Στέφανος Τουλόγλου, Εκδόσεις ΙΩΝ.
5. Ηλεκτρικές Μηχανές ΙΙ, Γεώργιος Εμμ. Μαραβελάκης, ΟΕΔΒ 1983.
6. Συγκριτική Μελέτη Τεχνικών Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών Επαγωγής, Διπλωματική Εργασία, Ιάκωβος Στ. Μανωλάς Ε.Μ.Π, 2006
7. Σύγχρονες Τεχνικές Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών Επαγωγής, Ιάκωβος Στ. Μανωλάς, 2009
8. Σχεδίαση και ανάλυση λειτουργίας κινητήρα εσωτερικών μονίμων μαγνητών διπλής στρώσης για εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων", Διπλωματική Εργασία, Γεώργιος Αλπογιάννης, Ε.Μ.Π, 2013.
9. V/f Control of Induction Motor Drive, Thesis, Devraj Jee, Nikhar Patel 2013.
10. Σύγχρονες τεχνικές στο διανυσματικό έλεγχο ασύγχρονων κινητήρων, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Ε.Μητρονίκας, Ε. Τατάκης, Α. Σαφάκας.
11. Modeling and Simulation of an Induction Motor, Sunita Kumari Jain, Fanibhushan Sharma, Mukesh Kumar Baliwal, April 2014
12. Comparison of Scalar and Vector Control Strategies of inducton motors, G. Kohlrusz, D. Fodor, Univerisity of Panonia, 2011
13. <http://www.wisdompage.com/>
14. <http://hlektrologia.weebly.com/>
15. <http://machinedesign.com/>
16. <http://archive.cnx.org/>
17. <http://keysan.me/>
18. <http://electrical-engineering-portal.com/>
19. <http://circuitglobe.com>
20. <http://www.electrical4u.com/>
21. Krause, P. C. , "Simulation of Unsymmetrical Induction Machinery," IEEE Trans. on Power Apparatus, Vol.PAS-84, No.11, November 1965. Copyright 1965 IEEE