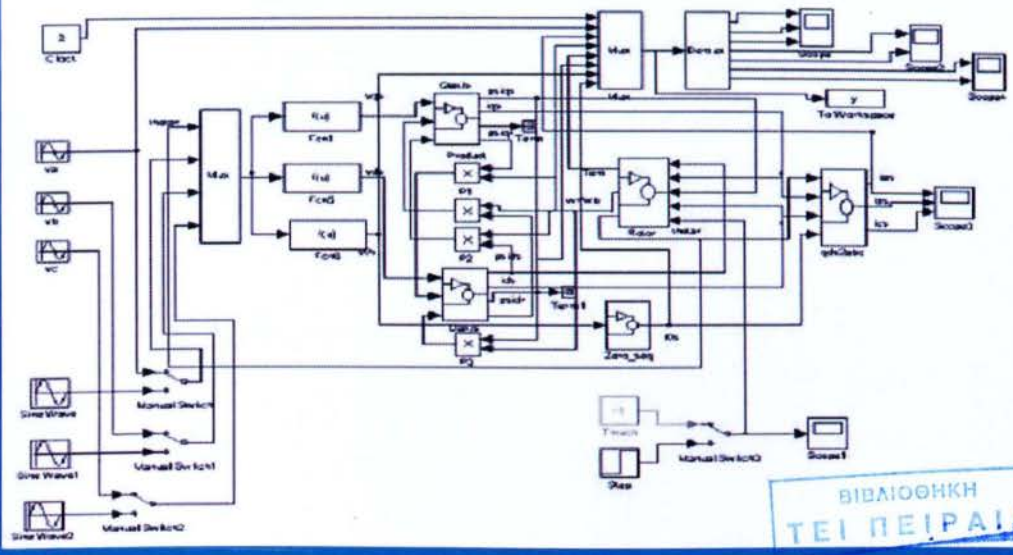
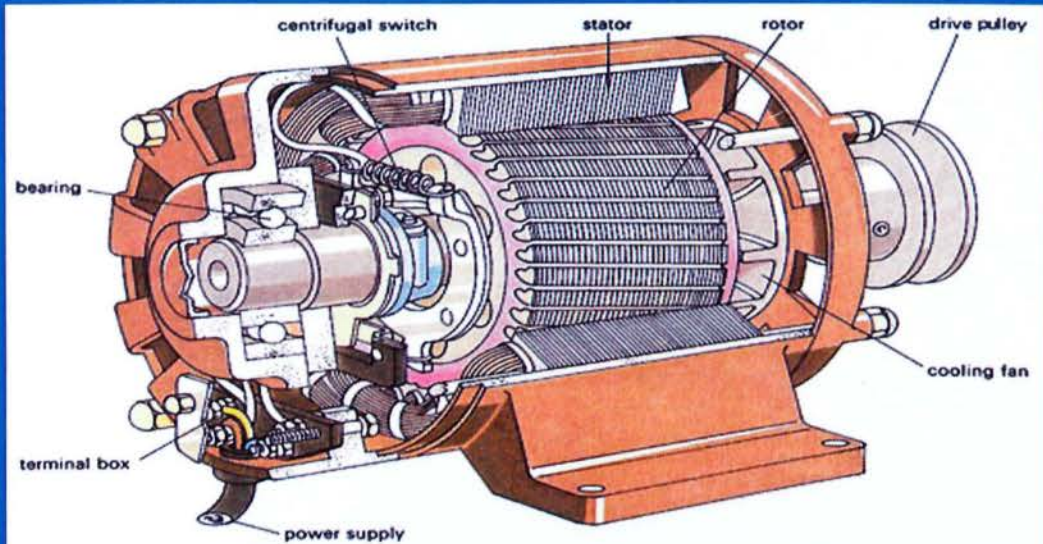


Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
Σ.Τ.Εφ.
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Προσομοίωση Συστημάτων Ηλεκτρικών Μηχανών με την χρήση του Matlab/Simulink



ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΟΡΕΛΑΤΟΣ Α.Μ.: 32102
ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΣΠΥΡΟΥ Α.Μ.: 32768
Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ. ηλ. μηχαν. Καραϊσάς Πέτρος

Πειραιάς, Ιούνιος 2012

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1^ο

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	7
1.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	10
1.4 ΟΛΙΣΘΗΣΗ.....	11
1.5 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΔΡΟΜΕΑ	13
1.6 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ	14
1.6.1 Ισοδύναμο Κύκλωμα Δρομέα.....	14
1.6.2 Τελικό Ισοδύναμο Κύκλωμα	17
1.7 ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗ	22
1.7.1 Ροή Ισχύος.....	22
1.7.2 Ισχύς και Ροπή.....	23
1.8 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗΣ – ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	27
1.9 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ – ΣΤΡΟΦΩΝ	36
1.9.1 Έλεγχος Χαρακτηριστικής Ροπής – Στροφών Με Δρομέα Κλωβού	38
1.9.2 Δρομέας Με Βαθιά Μπάρα Και Διπλό Κλωβό	39
1.9.3 Κατηγορίες Κινητήρων Επαγωγής Βραχυκυκλωμένου Δρομέα Και χαρακτηριστικά τους	40
1.10 ΕΚΚΙΝΗΣΗ.....	42
1.11 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ.....	44
1.11.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ	45
1.11.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΤΑΤΗ	47
1.11.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΠΟΛΩΝ.....	50
1.11.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ	51
1.12 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ	56
1.12.1 Δοκιμή Κενού Φορτίου	56
1.12.2 Δοκιμή Συνεχούς Ρεύματος.....	58
1.12.3 Δοκιμή Ακινητοποιημένου Δρομέα.....	59
1.13 Η ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ ΩΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	62

Κεφάλαιο 2^ο

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ Matlab/Simulink.....	65
2.2 Εξισώσεις Τριφασικής Ασύγχρονης Μηχανής.....	66
2.3 Αρχείο Matlab	67
2.4 Παράμετροι Συστήματος.....	70
2.5 Προσομοίωση Ασύγχρονου Κινητήρα.....	70
2.6 Γραφικές Παραστάσεις.....	74
2.6.1 Εκκίνηση Χωρίς Φορτίο.....	75
2.6.1.1 Εκκίνηση Υπό Φορτίο.....	76
2.6.2 Τριφασικό Βραχυκύκλωμα.....	77
2.6.2.1 Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα.....	78
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	82

Ευρετήριο Σχημάτων

Τύλιγμα κλωβού ασύγχρονης μηχανής	8
Δρομέας τριφασικού κινητήρα με δακτυλίδια.....	8
Γεωμετρία ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα.....	9
Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα δρομέα κινητήρα επαγωγής.....	15
Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα δρομέα κινητήρα επαγωγής όπου η επίδραση της ολίσθησης έχει συγκεντρωθεί στην αντίσταση R_R του δρομέα.....	16
Αρχικό μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα επαγωγής	18
Τελικό μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα επαγωγής ανηγμένο στο στάτη	21
Ροή ισχύος σε κινητήρα επαγωγής.....	22
Τελικό μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα επαγωγής με διαχωρισμένες τις απώλειες δρομέα $\{P_{RCL}\}$ από τις μηχανικές απώλειες $\{P_{conv}\}$	27
Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα επαγωγής.....	28
Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin για τον υπολογισμό της V_{TH} και Z_{TH}	28
Τελικό ισοδύναμο κύκλωμα με βάση το θεώρημα Thevenin.....	30
Χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα για διάφορες καταστάσεις λειτουργίας	32
Χαρακτηριστική μηχανικής ισχύος - στροφών κινητήρα επαγωγής.....	33
Επίδραση της R_2 στη χαρακτηριστική ροπής – στροφών	35
Τροποποίηση των χαρακτηριστικών ροπής – ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα, με τη μεταβολή της αντίστασης στο τύλιγμα του δρομέα	37
Τυπικές χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου κλωβού, ανάλογα με την κλάση σχεδίασης.....	42

Εισαγωγή ρυθμιστικών αντιστάσεων στο δρομέα, για τη ρύθμιση της ταχύτητας του κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα	45
Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα, με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα	46
Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, με τη μεταβολή της τάσης του στάτη	48
Τριφασικός ρυθμιστής εναλλασσόμενης τάσης με φορτίο σε σύνδεση αστέρα	49
Τριφασικός ρυθμιστής εναλλασσόμενης τάσης με φορτίο σε σύνδεση αστέρα	50
Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με τη μεταβολή της συχνότητας σε τιμές μικρότερες από τη βασική, με σταθερή τη μαγνητική ροή	52
Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με τη μεταβολή της συχνότητας σε τιμές μεγαλύτερες από τη βασική, με σταθερή την τάση	53
Κυκλωματική δομή του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης	54
Κυματομορφές της πολικής και της φασικής τάσης στον κινητήρα.....	56
Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα στο πείραμα κενού.....	56
Καμπύλη μαγνήτισης του επαγωγικού κινητήρα από το πείραμα κενού φορτίου.....	57
Διάταξη μέτρησης της αντίστασης του στάτη, με το πείραμα συνεχούς ρεύματος	58
Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, στο πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα	59
Αυτόνομη λειτουργία της τριφασικής επαγωγικής γεννήτριας, με τη σύνδεση πυκνωτών για την παροχή της άεργου ισχύος	63
Καθορισμός της τάσης εξόδου της επαγωγικής γεννήτριας,.....	64
Χαρακτηριστική φορτίου της επαγωγικής γεννήτριας, όταν	64
τροφοδοτεί ένα επαγωγικό φορτίο με σταθερό συντελεστή ισχύος.....	64
Μοντέλο προσομοίωσης ασύγχρονου κινητήρα	71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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

Οι κινητήρες επαγωγής ή ασύγχρονοι κινητήρες είναι οι πλέον αξιόπιστοι, οικονομικοί και εύκολοι στη συντήρηση κινητήρες. Για τους λόγους αυτούς είναι οι πλέον διαδεδομένοι στη βιομηχανία.

Αποτελούνται από δύο μέρη, το στάτη με τα τυλίγματα διέγερσης και το δρομέα. Το εναλλασσόμενο ρεύμα τροφοδοτεί απ' ευθείας τα τυλίγματα του στάτη ενώ τα τυλίγματα του δρομέα διαρρέονται από ρεύμα λόγω του φαινομένου της επαγωγής. Έτσι με βάση το φαινόμενο της επαγωγής όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο τότε στον αγωγό αυτό ασκείται από το μαγνητικό πεδίο μια δύναμη που τείνει να τον κινήσει. Η δύναμη αυτή είναι ανάλογη με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, την ένταση του μαγνητικού πεδίου, αλλά και το μήκος του αγωγού.

Οι κινητήρες επαγωγής κατασκευάζονται για τριφασική και μονοφασική λειτουργία. Οι τριφασικοί κινητήρες επαγωγής κατασκευάζονται για ισχείς από 0,3kW έως μερικά MW.

Σε αντίθεση με τους μονοφασικούς κινητήρες οι τριφασικοί εκκινούν μόνοι τους, χωρίς την ανάγκη βοηθητικού τυλίγματος ή πυκνωτή κατά τη εκκίνηση.

Η φορά περιστροφής τους αλλάζει με εναλλαγή της τροφοδοσίας δύο εκ των τριών φάσεων. Οι μονοφασικοί κινητήρες είναι χαμηλότερης ισχύος και χρησιμοποιούνται κυρίως όταν δεν υπάρχει εύκολη πρόσβαση σε τριφασική τάση.

Οι τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε αντλιοστάσια (εκκίνηση αντλιών), χημικά εργοστάσια (αντλίες, πύργοι ψύξης, αναδευτήρες), βιομηχανικές εγκαταστάσεις (κίνηση συμπιεστών, ιμάντες αντλιών, ανεμιστήρων, εργαλειομηχανών, ανυψωτήρων, στον εξαερισμό, κ.λ.π.)

Οι μονοφασικοί κινητήρες επαγωγής χρησιμοποιούνται κυρίως σε οικιακές συσκευές και σε μικρά εργαλεία οικιακής χρήσης.

Στη βιομηχανία η προτίμηση των ηλεκτρικών συστημάτων κίνησης οφείλεται στα πλεονεκτήματά σε σχέση με άλλα συστήματα κίνησης όπως μηχανικά εσωτερικής καύσης, υδραυλικά.

- Ευρεία περιοχή ισχύος, από μερικά Watt έως αρκετά MW (100MW αντλίες σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς).
- Προσαρμογή σε διάφορες λειτουργικές καταστάσεις όπως κλειστοί χώροι χωρίς αερισμό, σε εκρηκτικό ή ραδιενεργό περιβάλλον.
- Δεν εκπέμπουν καυσαέρια και ο θόρυβος που δημιουργούν είναι χαμηλότερος από άλλα συστήματα.

- Δουλεύουν και στα τέσσερα τεταρτημόρια, σαν κινητήρας ή σαν γεννήτρια ή σαν πέδη, δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα
- Φορτίζονται αμέσως χωρίς την ανάγκη προθέρμανσης
- Έχουν χαμηλές απώλειες, υψηλή απόδοση και δυνατότητα προσωρινής υπερφόρτισης.
- Κατασκευάζονται για μεγάλη ποικιλία εφαρμογών όπως γραμμικοί κινητήρες για οχήματα, βηματικοί κινητήρες κ.α.

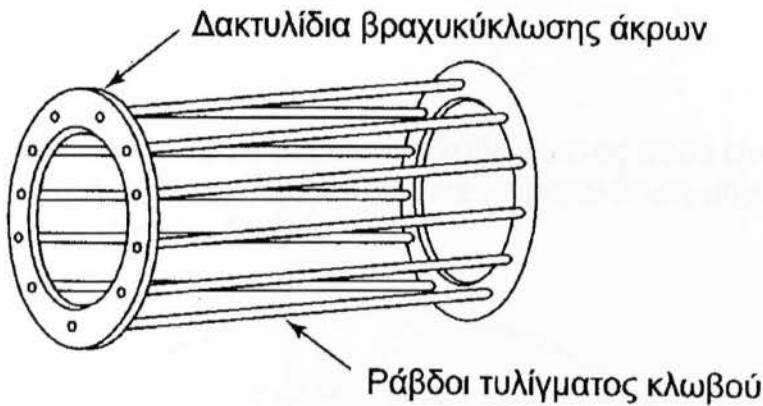
1.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Οι κινητήρες επαγωγής απαρτίζονται κυρίως από τον ακίνητο στάτη και τον περιστρεφόμενο δρομέα.

Ο κυλινδρικός στάτης κατασκευάζεται από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή ελασμάτων, για τον περιορισμό δινορευμάτων και φέρει μονοφασικό ή τριφασικό τύλιγμα που τοποθετούνται σε αυλάκια της εσωτερικής του επιφάνειας. Ο δρομέας χωρίζεται από το στάτη με ένα διάκενο 0.4mm έως 4mm. Ο δρομέας κατασκευάζεται από σιδηρομαγνητικό υλικό και φέρει αυλάκια στην εξωτερική του επιφάνεια.

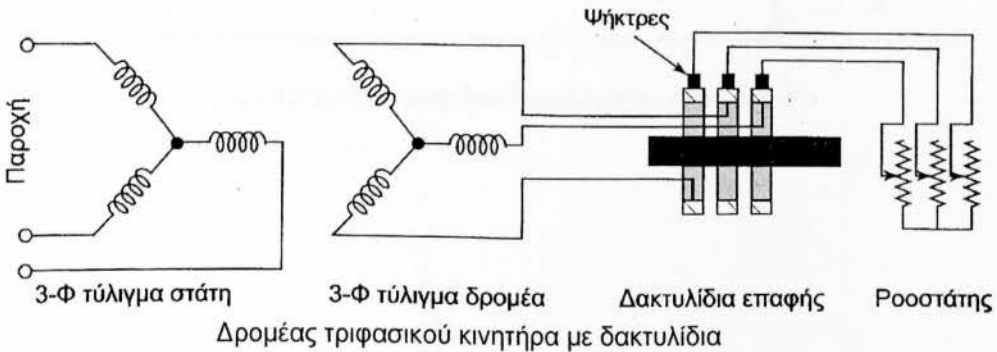
Υπάρχουν τρεις τύποι δρομέα, ο δρομέας κλωβού ή βραχυκυκλωμένου κλωβού, ο τυλιγμένος δρομέας και ο δρομέας χωρίς αύλακες.

Ο δρομέας κλωβού αποτελείται από ράβδους αλουμινίου ή χαλκού που τοποθετούνται μέσα στα αυλάκια του δρομέα και βραχυκυκλώνονται στα άκρα τους με δακτυλίδια από αλουμίνιο ή χαλκό. Ο δρομέας που προκύπτει είναι ένα ενιαίο σύνολο και δεν είναι δυνατό να αποσυναρμολογηθεί.



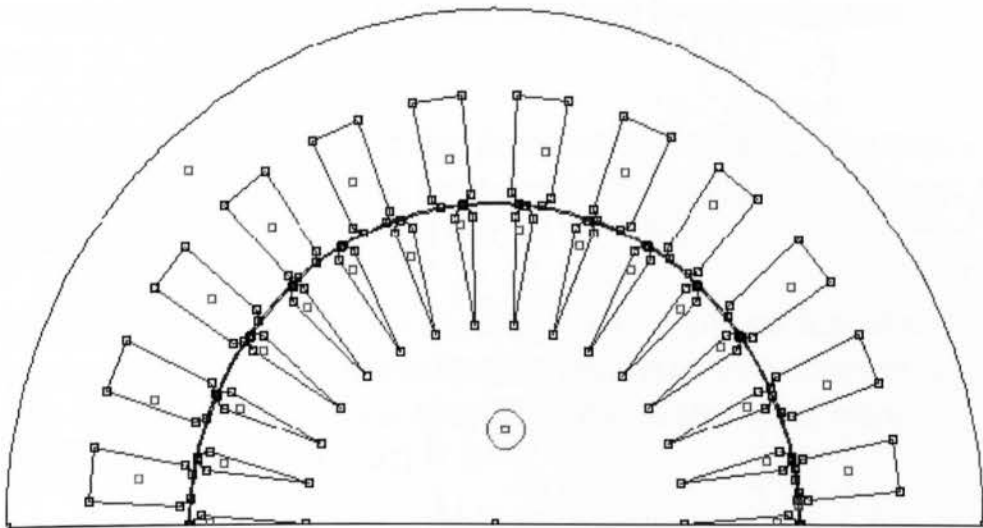
Τύλιγμα κλωβού ασύγχρονης μηχανής

Ο τυλιγμένος δρομέας έχει τρία τυλίγματα, τριφασικός, ίδια με αυτά του στάτη, που συνδέονται σε διάταξη αστέρα ή τριγώνου. Οι τρεις ακροδέκτες που προκύπτουν συνδέονται με δακτυλίους ολισθήσεως που βρίσκονται σε μόνιμη επαφή με σταθερές ψήκτρες. Τα τυλίγματα του τυλιγμένου δρομέα βραχυκυκλώνονται ή συνδέονται με εξωτερικές αντιστάσεις για τον έλεγχο της μηχανής.



Ο δρομέας χωρίς αύλακες κατασκευάζεται συνήθως από ολόσωμο σίδηρο. Ο βαθμός απόδοσης, ο συντελεστής ισχύος και η ικανότητα υπερφόρτισης ενός τέτοιου κινητήρα είναι μειωμένοι. Οι κινητήρες με δρομέα χωρίς αύλακες έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή και χρησιμοποιούνται σε συστήματα κίνησης που απαιτείται υψηλός αριθμός στροφών ανά λεπτό.

Ο δρομέας τύπου κλωβού είναι ο πιο διαδεδομένος αφού είναι απλός στην κατασκευή του, οικονομικός και με μεγαλύτερη μηχανική αντοχή από τον τυλιγμένο δρομέα.



Γεωμετρία ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα

1.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι επαγωγικοί κινητήρες μοιάζουν με τους μετασχηματιστές, αν θεωρήσουμε το δρομέα ακίνητο. Τα ρεύματα που διαρρέουν το πρωτεύον τύλιγμα του στάτη, δημιουργούν από επαγωγή τάσεις στο δευτερεύον τύλιγμα του δρομέα. Σε αντίθεση με τους μετασχηματιστές στους κινητήρες επαγωγής η μαγνητική ροή δε διαρρέει μόνο συνεχές σιδηρομαγνητικό υλικό, αλλά διαρρέει και ένα διάκενο αέρα, το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα.

Οι τάσεις από επαγωγή δημιουργούν ένα ρεύμα στους αγωγούς του δρομέα, όταν είναι τύπου κλωβού, ή όταν τα τυλίγματα του είναι βραχυκυκλωμένα με εξωτερική αντίσταση όταν έχουμε τυλιγμένο δρομέα.

Στους αγωγούς του δρομέα που βρίσκονται μέσα στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο στάτης και διαρρέονται από ρεύμα, ασκείται δύναμη Lorentz που τείνει να τον κινήσει, $F = I B \lambda$

Η κύρια διαφορά μεταξύ των κινητήρων επαγωγής και των άλλων κινητήρων είναι ότι το ρεύμα του δρομέα παράγεται από επαγωγή και όχι από διεγέρτρια (σύγχρονοι κινητήρες) ή από εξωτερική πηγή (κινητήρες συνεχούς ρεύματος).

Σε αντίθεση με τους μετασχηματιστές που η συχνότητα των ρευμάτων στο δευτερεύον είναι ίση με τη συχνότητα που τροφοδοτούμε το πρωτεύον, στους κινητήρες επαγωγής δεν ισχύει παρά μόνο σε κατάσταση ακινησίας.

1.4 ΟΛΙΣΘΗΣΗ

Όταν ο στάτης ενός τριφασικού κινητήρα επαγωγής τροφοδοτηθεί με τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα, δημιουργεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα περιστροφής ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα.

$$n_{sync} = \frac{120 \cdot f_e}{p} \quad (1.1)$$

Όπου:

n_{sync} = σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του στάτη (rpm)

f_e = συχνότητα δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος (Hz)

p = ο αριθμός των πόλων του κινητήρα

Εάν ο δρομέας στρέφεται και αυτός με την ίδια σύγχρονη ταχύτητα, τότε σε αυτόν δεν επάγεται τάση και οι αγωγοί του δεν διαρρέονται από ρεύμα, επειδή προϋπόθεση για τα δύο φαινόμενα είναι η σχετική κίνηση αγωγού μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο δρομέας του επαγωγικού κινητήρα δεν μπορεί να στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, αλλά με κάποια μικρότερη, έτσι ώστε να υπάρχει σχετική ταχύτητα μεταξύ του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και των ρευμάτων του δρομέα που παράγονται με επαγωγή.

Η σχετική ταχύτητα πεδίου – δρομέα ονομάζεται ταχύτητα ολίσθησης και είναι ίση με τη διαφορά της σύγχρονης ταχύτητας n_{sync} από την ταχύτητα του δρομέα

$$n_{slip} = n_{sync} - n_{mech} \quad (1.2)$$

Όπου:

n_{slip} = η ταχύτητα ολίσθησης του κινητήρα επαγωγής (rpm)

n_{mech} = η μηχανική ταχύτητα περιστροφής (μηχανικές στροφές) του δρομέα (rpm).

Στην ανάλυση των κινητήρων επαγωγής η ολίσθηση ορίζεται ως εξής:

$$s = \frac{n_{slip}}{n_{sync}} \quad (1.3)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (1.2) και (1.3) έχουμε ότι η ολίσθηση s είναι:

$$s = \frac{n_{sync} - n_{mech}}{n_{sync}} \quad \text{ή} \quad s = 1 - \frac{n_{mech}}{n_{sync}} \quad (1.4)$$

Η ολίσθηση εκφράζεται σαν αριθμός μικρότερος της μονάδας, ή σαν ποσοστό πολλαπλασιασμένος με 100%. Η ολίσθηση είναι συνήθως πολύ μικρή, γύρω στο 3% έως 8%. Κατά την εκκίνηση η ολίσθηση είναι ίση με 1. Αν ο δρομέας περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή ($n_{sync} = n_{mech}$) τότε η ολίσθηση $s = 0$.

Η εξίσωση (1.4) μπορεί να εκφραστεί και συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ως εξής:

$$s = \frac{\omega_{sync} - \omega_{mech}}{\omega_{sync}} \quad (1.5)$$

Όπου:

ω_{sync} = σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του στάτη
(rad/s)

ω_{mech} = μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής (μηχανικές
στροφές) του δρομέα (rad/s)

s = ολίσθηση

Από (1.4) προκύπτει ότι:

$$n_{mech} = (1-s) \cdot n_{sync} \quad (1.6)$$

Από (1.5) προκύπτει ότι:

$$\omega_{mech} = (1-s) \cdot \omega_{sync} \quad (1.7)$$

1.5 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΔΡΟΜΕΑ

Για $n_{mech} = 0$, η συχνότητα του δρομέα f_r είναι ίση με τη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου εναλλασσομένου ρεύματος f_e , δηλαδή $f_r = f_e$.

Για $n_{sync} = n_{mech}$ η συχνότητα του δρομέα είναι $f_r = 0$. Η συχνότητα του δρομέα, f_r , υπολογίζεται ως εξής:

$$f_r = s \cdot f_e \quad (1.8)$$

Δύο ακόμα σχέσεις υπολογισμού της συχνότητας του δρομέα f_r είναι:

$$f_r = \left(\frac{n_{sync} - n_{mech}}{n_{sync}} \right) \cdot f_e \quad (1.9)$$

$$f_r = \frac{p}{120} \cdot (n_{sync} - n_{mech}) \quad (1.10)$$

Όπου p ο αριθμός των πόλων του κινητήρα

1.6 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ

Χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο κύκλωμα μπορούν να υπολογιστούν τα ρεύματα ή η πραγματική ισχύς που απορροφά ο κινητήρας, η άεργος ισχύς, σε δεδομένη ολίσθηση s . Επιπλέον μπορούν να καθοριστούν οι συνθήκες μηχανικής εξόδου του κινητήρα.

1.6.1 Ισοδύναμο Κύκλωμα Δρομέα

Κάθε φάση του δρομέα μπορεί να παρασταθεί από μια επαγόμενη τάση και μια αντίδραση σε σειρά με μια ωμική αντίσταση. Επειδή η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων του δρομέα είναι:

$$f_r = s \cdot f_e, \text{ η αντίδραση του δρομέα θα είναι:}$$

$$X_R = \omega_r \cdot L_R = 2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot L_R \quad (1.11)$$

Από (1.8) και (1.11)

$$X_R = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot f_e \cdot L_R = s \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_e \cdot L_R) = s \cdot X_{R0} \quad (1.12)$$

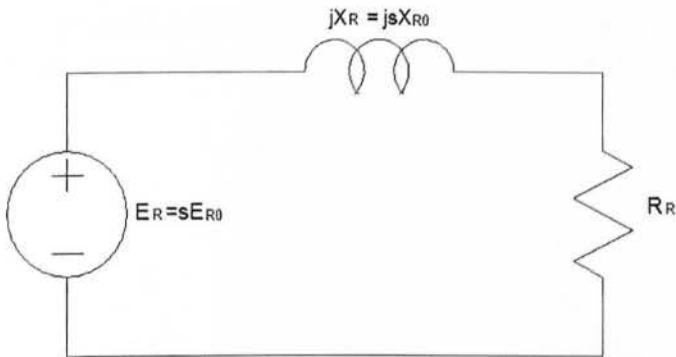
Όπου:

X_R = η αντίδραση του δρομέα (Ω)

X_{R0} = η αντίδραση του ακινητοποιημένου δρομέα (Ω)

s = η ολίσθηση

Το ισοδύναμο κύκλωμα του δρομέα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα δρομέα κινητήρα επαγωγής

Αν E_{R0} είναι η επαγόμενη τάση στο δρομέα όταν ο δρομέας είναι σε ακινησία, τότε η επαγόμενη τάση E_R στο δρομέα ε οποιαδήποτε ολίσθηση s δίνεται από τη σχέση:

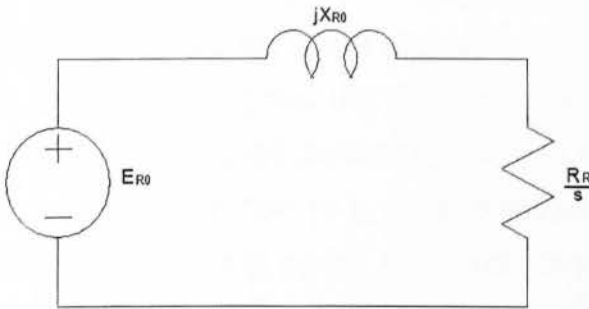
$$E_R = s \cdot E_{R0} \quad (1.13)$$

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του δρομέα και με βοήθεια των τύπων (1.12) και (1.13) προκύπτει ότι:

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} \quad I_R = \frac{s \cdot E_R}{R_R + js \cdot X_{R0}}$$

$$I_R = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}} \quad (1.14)$$

Με βάση τη σχέση (1.14) το ισοδύναμο κύκλωμα του δρομέα, στο οποίο η επίδραση της ολίσθησης έχει συγκεντρωθεί στην αντίσταση του δρομέα

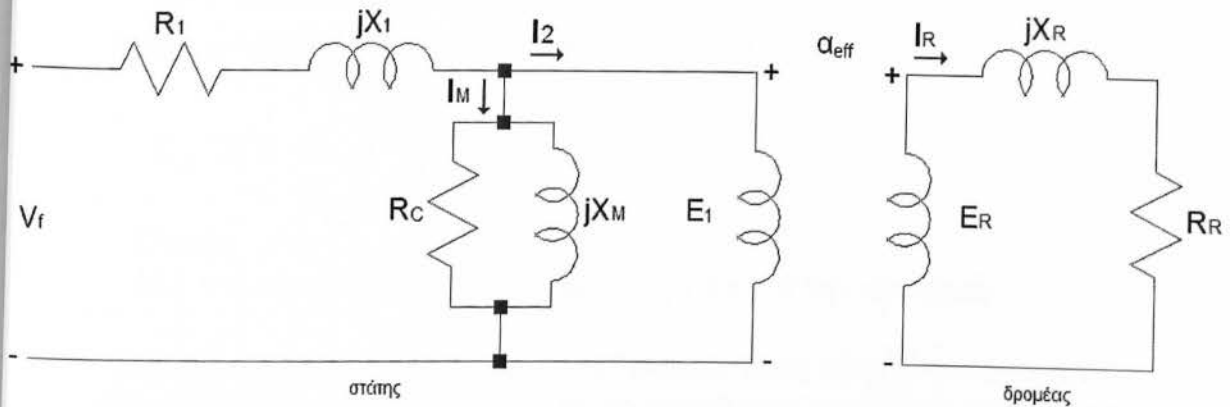


Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα δρομέα κινητήρα επαγωγής όπου η επίδραση της ολίσθησης έχει συγκεντρωθεί στις αντίσταση R_R του δρομέα

1.6.2 Τελικό Ισοδύναμο Κύκλωμα

Για την εξαγωγή του ισοδύναμου κυκλώματος ενός επαγωγικού κινητήρα, λαμβάνεται υπόψη ότι η λειτουργία του είναι όμοια με αυτή ενός μετασχηματιστή (όχι, όμως, πανομοιότυπη, αφού η συχνότητα της τάσης στο δρομέα διαφέρει από αυτή στο στάτη).

Έτσι, το τύλιγμα του στάτη μπορεί να θεωρηθεί ως το πρωτεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή με αντίσταση R_1 η οποία αντικατοπτρίζει τις θερμικές απώλειες στους αγωγούς του αντίστοιχου τριφασικού τυλίγματος. Σημειώνεται πως εξαιτίας της παρουσίας του διακένου, η σύζευξη μεταξύ των δύο επιμέρους κυκλωμάτων στην περίπτωση του επαγωγικού κινητήρα (δηλ. του στάτη και του δρομέα) δεν είναι τόσο καλή, όσο στην περίπτωση ενός καλά σχεδιασμένου μετασχηματιστή. Αυτό συμβαίνει διότι η συνολική ροή που δημιουργείται από το κύκλωμα του στάτη μπορεί να αναλυθεί σε δύο μέρη: σε αυτό το τμήμα της ροής που σχετίζεται με το κύκλωμα του δρομέα (*αμοιβαία ροή*) και στη *ροή σκέδασης*, η οποία παριστάνεται μέσω της αντίδρασης X_1 . Επιπλέον, το I_M είναι το ρεύμα μαγνήτισης (η αιτία ανάπτυξης της μαγνητικής ροής), στο οποίο αντιστοιχίζεται η αντίδραση X_M . Για το ρεύμα απωλειών του σιδηρομαγνητικού υλικού εισάγεται η ωμική αντίσταση R_C , περιγράφοντας τις απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων. Η εσωτερική τάση E_1 σχετίζεται με την τάση E_R που επάγεται στο δρομέα μέσω κάποιου λόγου μετασχηματισμού α_{eff} . Προφανώς η E_R είναι αυτή που προκαλεί την κυκλοφορία ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμα του δρομέα.



Αρχικό μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα επαγωγής

Όπου:

R_1 = η ωμική αντίσταση ανά φάση του στάτη (Ω)

X_1 = η επαγωγική αντίδραση ανά φάση του στάτη (Ω)

R_C = η ωμική αντίσταση μαγνήτισης ανά φάση του στάτη (Ω)

X_M = η επαγωγική αντίδραση μαγνήτισης ανά φάση του στάτη (Ω)

E_1 = η εσωτερική τάση (ΑΗΕΔ) ανά φάση του στάτη (V)

E_R = η εσωτερική τάση (ΑΗΕΔ) ανά φάση του δρομέα (V)

X_R = η επαγωγική αντίδραση ανά φάση του δρομέα (Ω)

R_R = η ωμική αντίσταση ανά φάση του δρομέα (Ω)

V_ϕ = η εφαρμοζόμενη τάση ανά φάση του στάτη (V)

α_{eff} = λόγος μετασχηματισμού

Η τάση που επάγεται στους αγωγούς του δρομέα εξαρτάται άμεσα από τη σχετική ταχύτητά του ως προς το πεδίο του στάτη. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της επαγόμενης τάσης.

Αν ο δρομέας είναι ακινητοποιημένος (κατά την εκκίνηση του κινητήρα), η τάση στα τυλίγματα του είναι η μέγιστη δυνατή. Αντίθετα όταν ο δρομέας περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, η τάση στους αγωγούς του είναι μηδενική.

Για οποιαδήποτε άλλη τιμή της ταχύτητας περιστροφής η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη της ολίσθησης.

$$E_R = s \cdot E_{R0} \quad (1.15)$$

Όπου:

E_{R0} = η τάση στα τυλίγματα του δρομέα κατά την εκκίνηση

Όσον αφορά την αντίδραση του δρομέα, αυτή εξαρτάται τόσο από την αυτεπαγωγή του, όσο και από τη συχνότητα του ρεύματος που τη διαρρέει. Από τη σχέση $\omega_R = s \cdot \omega_e$ η αντίδραση του δρομέα μπορεί να εκφραστεί ως:

$$X_R = \omega_R \cdot L_R = s \cdot \omega_e \cdot L_R = s \cdot X_{R0} \quad (1.16)$$

Όπου X_{R0} η αντίδραση του δρομέα όταν αυτός είναι ακινητοποιημένος.

Για το ρεύμα του δρομέα έχουμε:

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} \Rightarrow I_R = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}} \quad (1.17)$$

Το κύκλωμα μπορεί να θεωρηθεί ότι τροφοδοτείται από μια σταθερή πηγή τάσης E_{R0} και περιλαμβάνει μια ισοδύναμη μεταβλητή σύνθετη αντίσταση $\frac{R_R}{s} = jX_{R0}$.

Όταν η ολίσθηση είναι μικρή, η ωμική αντίσταση λαμβάνει μεγάλες τιμές και το ρεύμα μεταβάλλεται γραμμικά με την ολίσθηση.

Αντίθετα για μεγάλες τιμές ολίσθησης το ρεύμα προσεγγίζει μια σταθερή τιμή.

Αν συνυπολογίσουμε το λόγο μετασχηματισμού a_{eff} , έχουμε:

- Η τάση E_{R0} του δρομέα ανηγμένη στη τάση E_1 στη πλευρά του στάτη

$$E_1 = a_{eff} \cdot E_{R0} \quad (1.18)$$

- Το ρεύμα I_R του δρομέα ανηγμένο στο ρεύμα I_2 του στάτη

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{eff}} \quad (1.19)$$

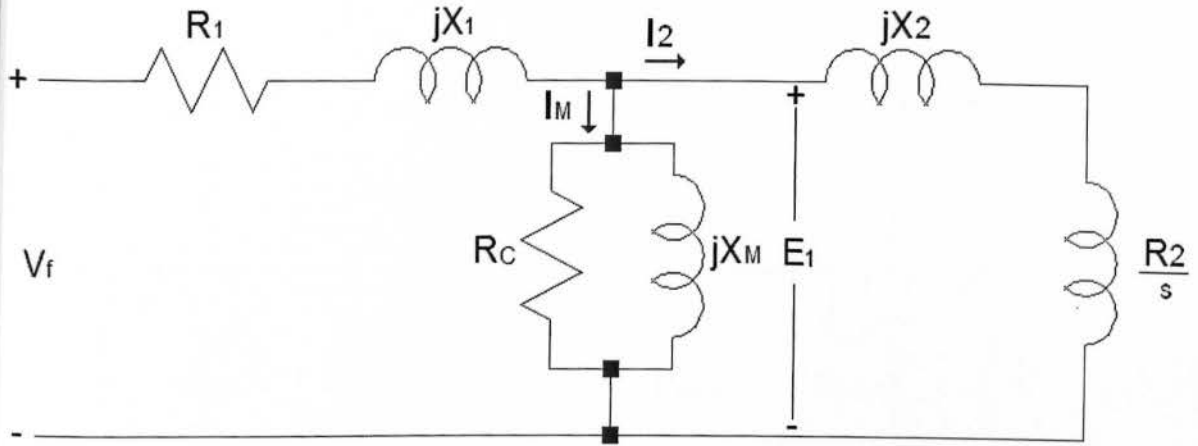
- Η συνολική σύνθετη αντίσταση $Z_R = \frac{R_R}{s} + jX_{R0}$ του δρομέα μπορεί να ανηχθεί στη συνολική αντίσταση Z_2 του δρομέα ανηγμένη στη πλευρά του στάτη

$$Z_2 = a_{eff}^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \quad (1.20)$$

Ορίζοντας $R_2 = a_{eff}^2 \cdot R_R$ και $X_2 = a_{eff}^2 \cdot X_{R0}$ και αντικαθιστώντας στη (1.20) έχουμε:

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (1.21)$$

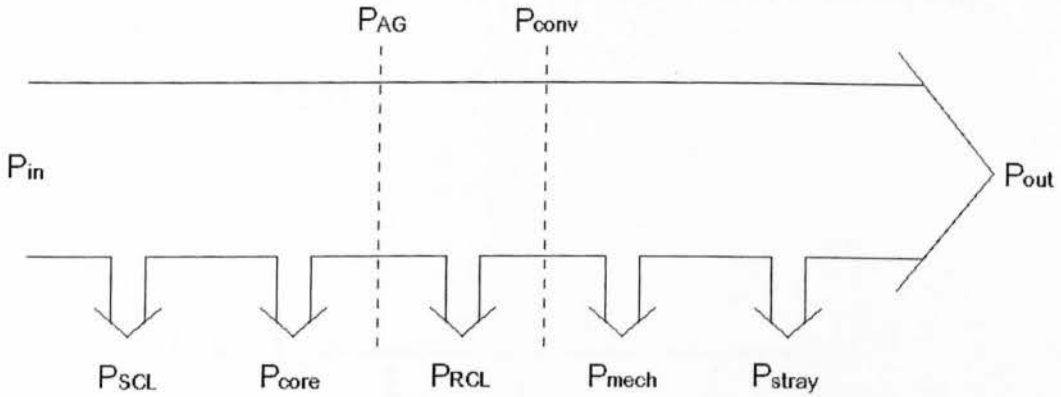
Από τις παραπάνω σχέσεις καταλήγουμε στο τελικό ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα επαγωγής, ανηγμένο στο στάτη



Τελικό μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα επαγωγής ανηγμένο στο στάτη

1.7 ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗ

1.7.1 Ροή Ισχύος



Ροή ισχύος σε κινητήρα επαγωγής

Όπου:

P_{SCL} = απώλειες χαλκού στάτη

P_{core} = απώλειες πυρήνα

P_{RCL} = απώλειες χαλκού δρομέα

P_{mech} = μηχανικές απώλειες

P_{stray} = παρασιτικές απώλειες

P_{AG} = ισχύς διακένου

$P_{conv} = T_{ind} \omega_{mech} =$ μηχανική ισχύς

1.7.2 Ισχύς και Ροπή

Οι εξισώσεις ισχύος και ροπής του κινητήρα επαγωγής προκύπτουν από το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα:

Το φασικό ρεύμα εισόδου I του κινητήρα υπολογίζεται ως εξής:

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{eq}} \quad (1.22)$$

Όπου:

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_C} + \frac{1}{jX_M} + \frac{1}{\frac{R_2}{s} + jX_2}} \quad (1.23)$$

ή ισοδύναμα:

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_C - jB_M + \frac{1}{\frac{R_2}{s} + jX_2}} \quad (1.24)$$

όπου:

$$G_C = \frac{1}{R_C}$$

και

$$B_M = \frac{1}{X_M}$$

Οι απώλειες χαλκού του στάτη είναι:

$$P_{SCL} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \quad (1.25)$$

Οι απώλειες πυρήνα είναι:

$$P_{core} = 3 \cdot E_1^2 \cdot G_C$$

Η ισχύς διακένου είναι:

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{core} \quad (1.26)$$

Το μοναδικό στοιχείο στο οποίο μπορεί να καταναλωθεί πραγματική ισχύς στο δρομέα είναι η αντίσταση R_2/s , άρα η ισχύς διακένου μπορεί να αναλογιστεί επίσης από τη σχέση:

$$P_{AG} = 3 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} \quad (1.27)$$

Οι πραγματικές ωμικές απώλειες στο δρομέα είναι:

$$P_{RCL} = 3 \cdot I_R^2 \cdot R_R \quad (1.28)$$

Επειδή η ισχύς είναι αμετάβλητη κατά μήκος ενός ιδανικού μετασχηματιστή, οι πραγματικές ωμικές απώλειες του δρομέα μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$P_{RCL} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad (1.29)$$

Η ισχύς μετατροπής, η οποία επίσης ονομάζεται αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς, όπως μπορούμε να δούμε από το διάγραμμα ροής ισχύος δίνεται από τη σχέση:

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \Rightarrow P_{conv} = 3 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} - 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \Rightarrow$$

$$P_{conv} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (1.30)$$

Από τις σχέσεις (1.27) και (1.29) προκύπτει ότι:

$$P_{RCL} = s \cdot P_{AG} \quad (1.31)$$

Από το διάγραμμα ισχύος προκύπτει ότι:

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \Rightarrow P_{conv} = P_{AG} - s \cdot P_{AG} \Rightarrow P_{conv} = (1-s) \cdot P_{AG} \quad (1.32)$$

Η ισχύς εξόδου είναι:

$$P_{out} = P_{conv} - P_{mech} - P_{stray} \quad (1.32)$$

Η επαγόμενη ή αναπτυσσόμενη ροπή του κινητήρα επαγωγής υπολογίζεται ως εξής:

$$T_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_{mech}} \quad (1.33)$$

Μια ισοδύναμη έκφραση για την επαγόμενη ροπή προκύπτει ως εξής:

$$T_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_{mech}} \Rightarrow T_{ind} = \frac{(1-s) \cdot P_{AG}}{(1-s) \cdot \omega_{sync}} \Rightarrow T_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} \quad (1.34)$$

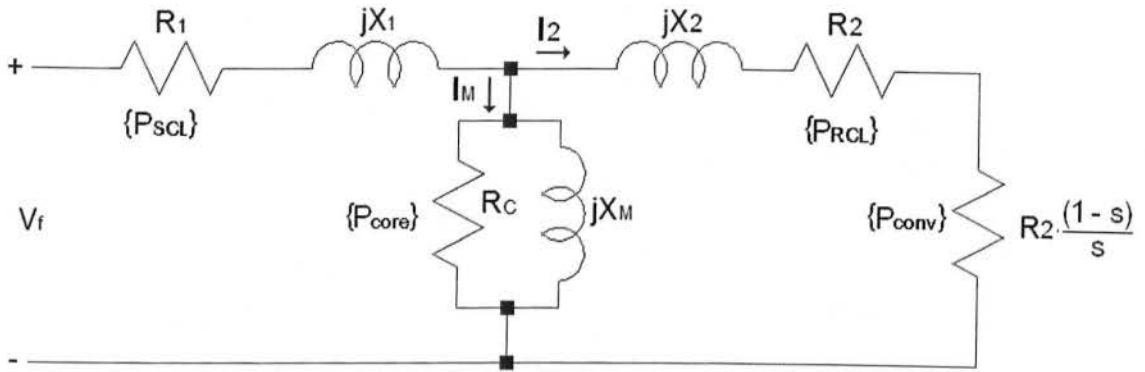
Η σχέση (1.27) δίνει μια έκφραση για τη συνολική ισχύ διακένου σε ένα κινητήρα επαγωγής, ενώ η εξίσωση (1.29) δίνει τις πραγματικές ωμικές απώλειες του δρομέα του κινητήρα.

Η ισχύς διακένου είναι η ισχύς που καταναλώνεται σε μια αντίσταση R_2/s , ενώ οι απώλειες χαλκού του δρομέα είναι η ισχύς που καταναλώνεται στην αντίσταση R_2 .

Η διαφορά ανάμεσα σε αυτές τις δύο ισχύεις είναι η ισχύς P_{conv} , η οποία συνεπώς είναι η ισχύς που καταναλώνεται σε μια αντίσταση με τιμή R_{conv} .

$$R_{conv} = \frac{R_2}{s} - R_2 \Rightarrow R_{conv} = R_2 \cdot \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \Rightarrow R_{conv} = R_2 \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (1.35)$$

Το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα με τις απώλειες χαλκού στο δρομέα και την ισχύ που μετατρέπεται σε μηχανική, διαχωρίζονται σε διακριτά στοιχεία, όπως φαίνεται παρακάτω.



Τελικό μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα επαγωγής με διαχωρισμένες τις απώλειες δρομέα $\{P_{RCL}\}$ από τις μηχανικές απώλειες $\{P_{conv}\}$

1.8 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗΣ – ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Η ροπή ενός κινητήρα επαγωγής δίνεται από τη σχέση

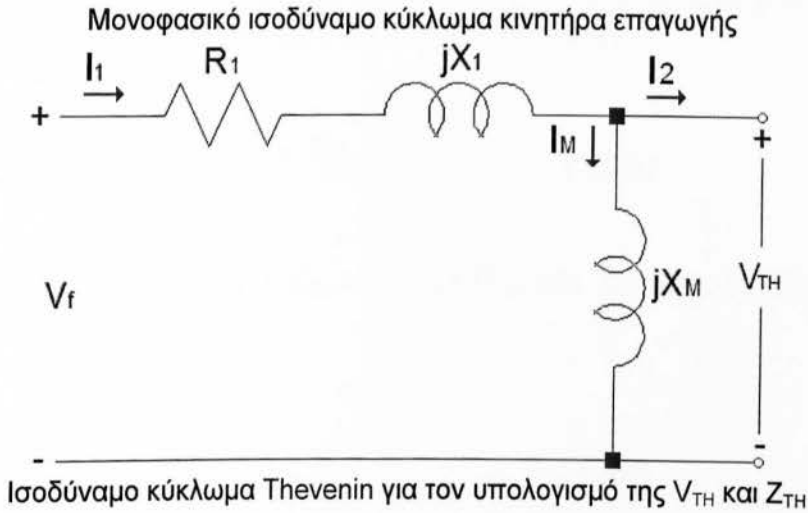
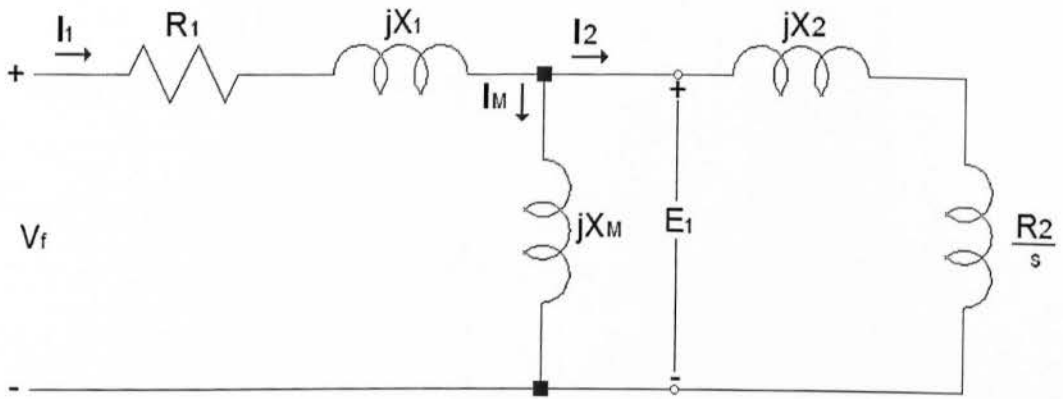
$$T_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}}$$

Επειδή η ω_{sync} είναι σταθερή για δεδομένη συχνότητα και αριθμό πόλων του κινητήρα επαγωγής, για να υπολογιστεί η επαγόμενη ροπή αρκεί να υπολογιστεί η ισχύς διακένου, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$P_{AG} = 3 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s}$$

Οπότε αρκεί να υπολογίσουμε το ρεύμα I_2 για να βρεθεί η επαγόμενη ροπή.

Ο υπολογισμός του ρεύματος I_2 γίνεται με τη βοήθεια του τελικού μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος του κινητήρα επαγωγής, εφαρμόζοντας το θεώρημα Thevenin, αν αγνοήσουμε την αντίσταση R_C .



Με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin υπολογίζουμε τη V_{TH}

$$V_{TH} = V_{\Phi} \cdot \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M}$$

Το μέτρο της τάσης V_{TH} είναι:

$$V_{TH} = V_{\Phi} \cdot \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \quad (1.36)$$

Επειδή $X_1 + X_M \gg R_1$ έχουμε ότι:

$$V_{TH} \approx V_{\Phi} \cdot \frac{X_M}{X_1 + X_M} \quad (1.37)$$

Ο υπολογισμός της σύνθετης αντίστασης Thevenin Z_{TH} γίνεται με τη βοήθεια του ισοδύναμου κυκλώματος Thevenin:

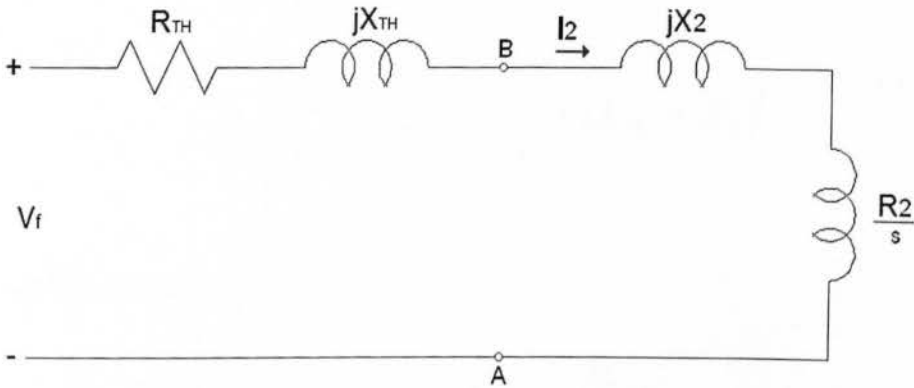
$$Z_{TH} = \frac{jX_M \cdot (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} = R_{TH} + jX_{TH} \quad (1.38)$$

Επειδή $X_M \gg X_1$ και $X_1 + X_M \gg R_1$ οι R_{TH} και X_{TH} υπολογίζονται προσεγγιστικά ως εξής:

$$R_{TH} \approx R_1 \cdot \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 \quad (1.39)$$

$$X_{TH} \approx X_1 \quad (1.40)$$

Το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται παρακάτω



Τελικό ισοδύναμο κύκλωμα με βάση το θεώρημα Thevenin

Από το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα I_2

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + \frac{R_2}{s} + j(X_{TH} + X_2)} \quad (1.41)$$

Το μέτρο του ρεύματος I_2 είναι:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (1.41)$$

Η ισχύς διακένου είναι:

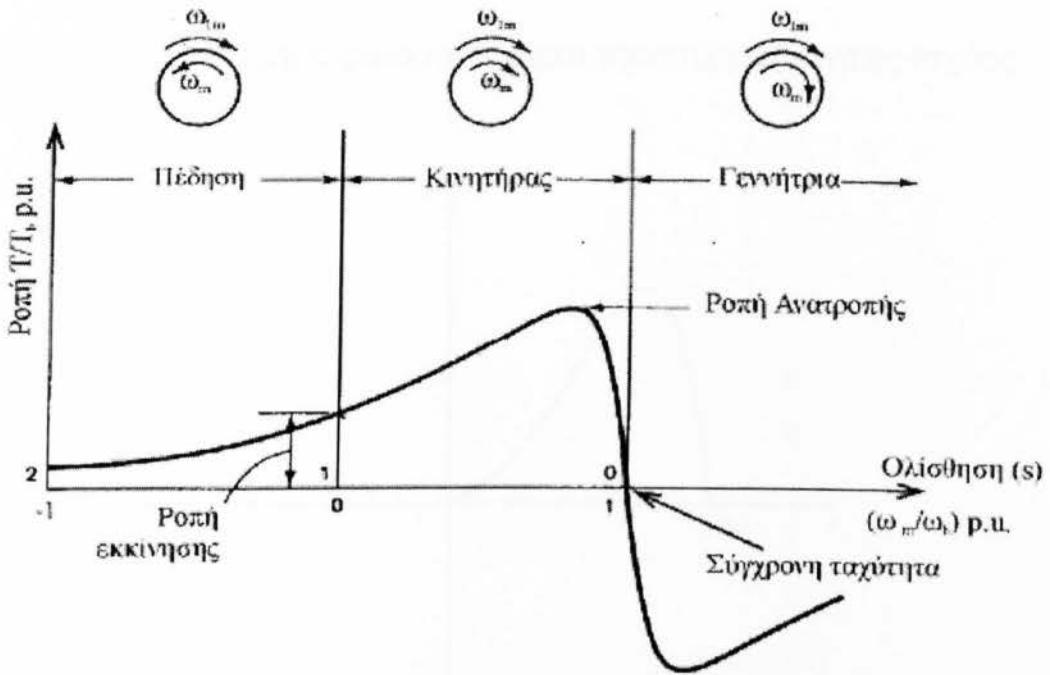
$$P_{AG} = 3 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} \Rightarrow P_{AG} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (1.42)$$

Η επαγόμενη ροπή είναι:

$$T_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} \Rightarrow T_{ind} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{\omega_{sync} \cdot \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2\right]} \quad (1.43)$$

Η εξίσωση (1.43) ονομάζεται χαρακτηριστική ροπής – στροφών του κινητήρα επαγωγής.

Ακολουθεί η χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας :



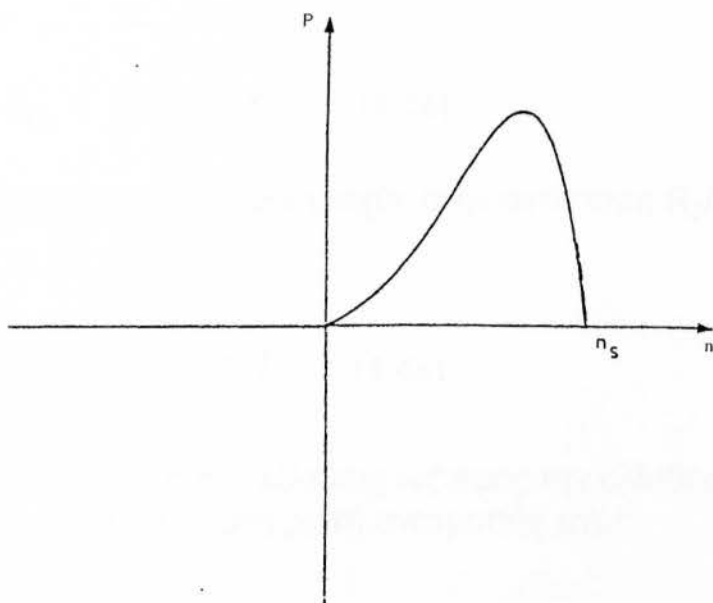
Χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα για διάφορες καταστάσεις λειτουργίας

- Η επαγόμενη ροπή του κινητήρα είναι μηδενική στη σύγχρονη ταχύτητα, όταν η ολίσθηση είναι ίση με τη μονάδα.
- Η μέγιστη τιμή που μπορεί να φτάσει ο κινητήρας ονομάζεται μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής και είναι περίπου ίση με δύο έως τρεις φορές τη ροπή πλήρους φορτίου.
- Η ροπή εκκίνησης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από από τη ροπή πλήρους φορτίου για να μπορεί ο κινητήρας να εκκινήσει

Η μηχανική ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$P_{conv} = T_{ind} \cdot \omega_{mech}$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η χαρακτηριστική μηχανικής ισχύος – στροφών



Χαρακτηριστική μηχανικής ισχύος - στροφών κινητήρα επαγωγής

Για την επαγόμενη ισχύ έχουμε:

$$T_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}}$$

Η επαγόμενη ισχύς T_{ind} είναι μέγιστη όταν η ισχύς διακένου, P_{AG} είναι μέγιστη. Όμως επειδή η ισχύς διακένου είναι ισχύς που καταναλώνεται στην αντίσταση R_2/s , η μέγιστη επαγόμενη ροπή θα συμβαίνει όταν η ισχύς που καταναλώνεται από την αντίσταση R_2/s είναι μέγιστη.

Αν στο ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin εφαρμόσουμε το θεώρημα της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, προκύπτει ότι η ισχύς στην αντίσταση R_2/s είναι μέγιστη όταν το μέτρο της αντίστασης R_2/s είναι ίσο με το μέτρο της σύνθετης αντίστασης εισόδου Z_{source} , η οποία είναι:

$$Z_{source} = R_{TH} + j(X_{TH} + X_2) \quad (1.44)$$

Έτσι η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς στην αντίσταση R_2/s συμβαίνει όταν

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (1.45)$$

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς την ολίσθηση, βρίσκουμε ότι η ολίσθηση στη ροπή ανατροπής είναι:

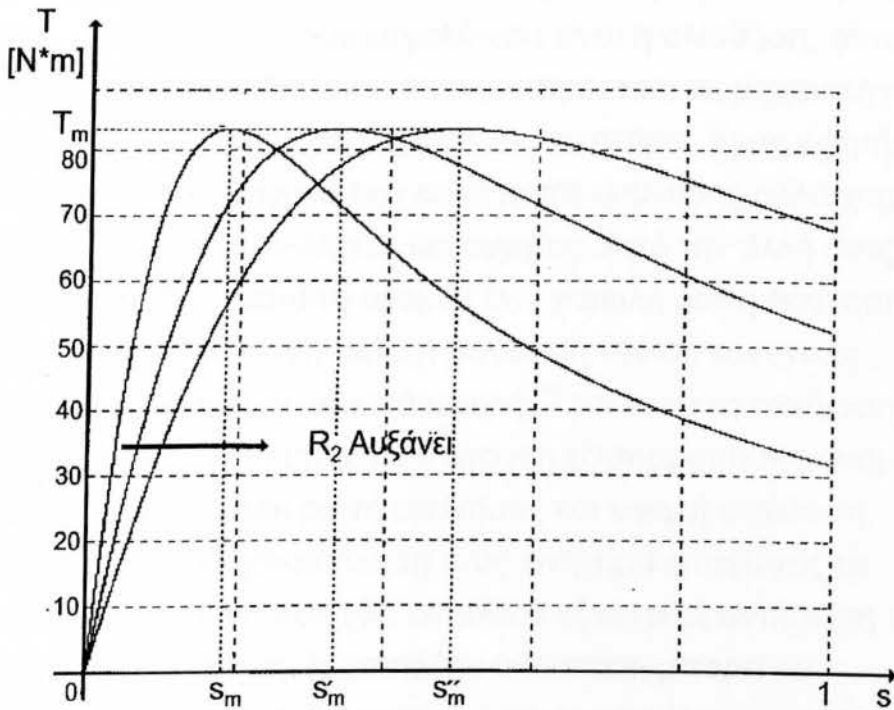
$$s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (1.46)$$

Επειδή η αντίσταση R_2 του δρομέα εμφανίζεται μόνο στον αριθμητή της σχέσης (1.46), η ολίσθηση του δρομέα στη μέγιστη ροπή είναι απευθείας ανάλογη της αντίστασης του δρομέα.

Αντικαθιστώντας τη σχέση (1.46) στην (1.43), προκύπτει ότι η μέγιστη ροπή δίνεται από τη σχέση:

$$T_{max} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2}{2 \cdot \omega_{sync} \cdot \left[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right]} \quad (1.47)$$

Από τις δύο προηγούμενες σχέσεις παρατηρούμε ότι η μέγιστη ροπή T_{max} είναι μια σταθερή ποσότητα που εξαρτάται από τις παραμέτρους του ισοδύναμου κυκλώματος Thevenin, ενώ η ολίσθηση στην οποία $T = T_{max}$ εξαρτάται από την τιμή της R_2 .



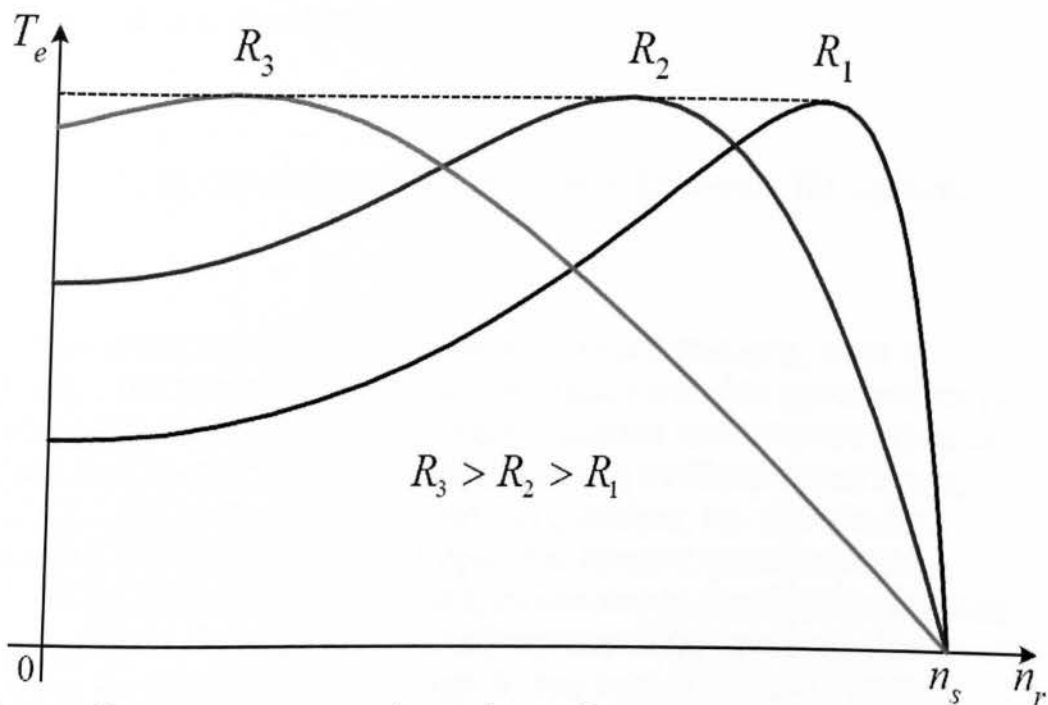
Επίδραση της R_2 στη χαρακτηριστική ροπής – στροφών

Έτσι στις δακτυλιοφόρες μηχανές όπου έχουμε τη δυνατότητα να προσθέσουμε εξωτερική αντίσταση στο δρομέα, μπορούμε να ρυθμίσουμε κατά βούληση την ταχύτητα στην οποία θέλουμε τη μέγιστη ροπή.

1.9 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ – ΣΤΡΟΦΩΝ

Αν ο δρομέας σχεδιαστεί με μεγάλη αντίσταση, τότε η ροπή εκκίνησης του κινητήρα είναι αρκετά υψηλή, αλλά επίσης και η ολίσθηση είναι αρκετά υψηλή σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Επειδή $P_{conv} = (1 - s) \cdot P_{AG}$, όσο μεγαλύτερη είναι η ολίσθηση, τόσο μικρότερη είναι η ισχύς διακένου που μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ και έτσι είναι χαμηλότερη η αντίδραση του κινητήρα. Ένας κινητήρας με μεγάλη αντίσταση δρομέα έχει καλή ροπή εκκίνησης αλλά χαμηλή απόδοση σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Από την άλλη ένας κινητήρας με μικρή αντίσταση δρομέα έχει χαμηλή ροπή εκκίνησης και υψηλό ρεύμα εκκίνησης, αλλά η απόδοσή του σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας είναι αρκετά υψηλή. Έτσι κατά τη σχεδίαση ενός κινητήρα επαγωγής υπάρχει η ανάγκη εξισορρόπησης ανάμεσα στις απαιτήσεις για υψηλή ροπή εκκίνησης και υψηλή απόδοση.

Μια λύση είναι η χρησιμοποίηση ενός κινητήρα επαγωγής με τυλιγμένο δρομέα και να εισαχθεί επιπλέον εξωτερική αντίσταση στο δρομέα κατά την εκκίνηση. Η επιπλέον αντίσταση μπορεί να αφαιρεθεί πλήρως κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας για καλύτερη απόδοση. Η χρήση όμως ενός τέτοιου κινητήρα αυξάνει το κόστος ενώ απαιτεί μεγαλύτερη συντήρηση και πιο πολύπλοκο σύστημα ελέγχου από τους κινητήρες με δρομέα κλωβού. Επίσης αν η εφαρμογή απαιτεί ο κινητήρας να είναι σφραγισμένος πλήρως, όταν τοποθετείται σε επικίνδυνο περιβάλλον, είναι ευκολότερο να γίνει με ένα πλήρως αυτόνομο κινητήρα. Σε αυτή την περίπτωση είναι δύσκολο να υπάρχουν εξωτερικές αντιστάσεις με τη παρεμβολή χειριστή, εκτός και αν χρησιμοποιηθεί κάποιο σύστημα ελέγχου.



Τροποποίηση των χαρακτηριστικών ροπής – ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα, με τη μεταβολή της αντίστασης στο τύλιγμα του δρομέα

Η επιθυμητή μεταβολή της αντίστασης του δρομέα ανάλογα με την τιμή της ολίσθησης, μπορεί να επιτευχθεί και στους κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, με την κατάλληλη σχεδίαση των αυλακώσεων του δρομέα. Όταν οι αυλακώσεις είναι κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, οι ράβδοι του τυλίγματος κλωβού είναι σε ισχυρή σύζευξη με το τύλιγμα του στάτη. Επομένως, μόνο ένα μικρό τμήμα της ροής δεν συνδέει το τύλιγμα του στάτη. Έτσι, η αντίδραση σκέδασης του δρομέα είναι μικρή.

Αντίθετα, όταν οι ράβδοι είναι τοποθετημένες βαθιά μέσα στο δρομέα, η ροή και η αντίδραση σκέδασης του δρομέα είναι υψηλές. Η ωμική αντίσταση του τυλίγματος κλωβού εξαρτάται από το μέγεθος

των αυλακώσεων, η οποία επιβάλλει τη διατομή των ράβδων. Όσο μεγαλύτερη είναι η διατομή των ράβδων, τόσο μικρότερη είναι η ωμική αντίσταση του κλωβού.

1.9.1 Έλεγχος Χαρακτηριστικής Ροπής – Στροφών Με Δρομέα Κλωβού

Η αντίδραση σκεδάσεως X_2 ενός κινητήρα επαγωγής, είναι η αντίδραση εξαιτίας των μαγνητικών γραμμών που δεν εμπλέκονται με τα τυλίγματα του στάτη. Γενικά, όσο πιο μακριά από το στάτη είναι οι μπάρες του δρομέα, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίδραση σκέδασης, καθώς μικρότερο ποσοστό της ροής στις μπάρες του δρομέα θα φτάνει στο στάτη. Έτσι, αν οι μπάρες του δρομέα τοποθετηθούν κοντά στην επιφάνεια του δρομέα η αντίδραση X_2 του δρομέα θα είναι μικρή. Αντίθετα, αν οι μπάρες τοποθετηθούν βαθύτερα στην επιφάνεια του δρομέα, η αντίδραση X_2 του δρομέα θα είναι μεγάλη.

Οι επαγωγικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη διαμόρφωση των αυλακώσεων του δρομέα, οι οποίες ονομάζονται κλάσεις σχεδίασης.

Η κατηγορία κινητήρων NEMA A έχει μεγάλες μπάρες κοντά στην επιφάνεια του στάτη, οπότε μια τέτοια σχεδίαση θα έχει χαμηλή αντίσταση R_2 (λόγω της μεγάλης διατομής) και χαμηλή αντίδραση X_2 (λόγω της θέσης των μπαρών κοντά στο στάτη). Εξαιτίας της χαμηλής αντίστασης δρομέα R_2 , η ολίσθηση s_{max} που αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή T_{max} θα είναι πολύ μικρή άρα θα είναι πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα, οπότε η μηχανική ισχύς $P_{conv} = (1-s) \cdot P_{AG}$ θα είναι σχεδόν ίση με την ισχύ διακένου, άρα ο κινητήρας θα είναι αρκετά αποδοτικός. Όμως επειδή η αντίσταση R_2 είναι μικρή, η ροπή εκκίνησης του κινητήρα θα είναι μικρή, και το ρεύμα εκκίνησης θα είναι υψηλό.

Η κατηγορία κινητήρων NEMA A είναι μια τυπική κατηγορία κινητήρων με δρομέα κλωβού και τα χαρακτηριστικά της κατηγορίας αυτής είναι βασικά τα ίδια με εκείνα των κινητήρων με τυλιγμένο δρομέα χωρίς εισαγωγή επιπλέον αντίστασης στο δρομέα.

Όμως, οι κινητήρες της κατηγορίας NEMA D έχουν μικρές μπάρες τοποθετημένες κοντά στην επιφάνεια του στάτη. Επειδή η επιφάνεια των μπαρών είναι μικρή, η αντίσταση R_2 του δρομέα είναι σχετικά μεγάλη. Επειδή οι μπάρες είναι τοποθετημένες κοντά στο στάτη, η αντίδραση σκέδασης του δρομέα είναι μικρή. Ο κινητήρας αυτός μοιάζει πολύ με τον κινητήρα τυλιγμένου δρομέα με εισαγωγή επιπλέον αντίστασης στο δρομέα. Εξαιτίας της μεγάλης αντίστασης του δρομέα, η μέγιστη ροπή συμβαίνει σε μεγάλη ολίσθηση και η ροπή εκκίνησης είναι αρκετά υψηλή.

Η αντίσταση του δρομέα στους κινητήρες κλάσης A και D είναι σταθερή. Αντίθετα, στους κινητήρες με κλάση σχεδίασης B και C, η αντίσταση του δρομέα μεταβάλλεται με την ολίσθηση (ταχύτητα). Έτσι, οι κινητήρες αυτοί συνδυάζουν την υψηλή ροπή εκκίνησης των κινητήρων κλάσης D και τον υψηλό βαθμό απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία των κινητήρων κλάσης A.

1.9.2 Δρομέας Με Βαθιά Μπάρα Και Διπλό Κλωβό

Στους κινητήρες με κλάση B, η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα με την ολίσθηση, επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δρομέα με *βαθιά αυλάκια*. Στην ονομαστική λειτουργία, όπου η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων στο δρομέα είναι μικρή, το ρεύμα ρέει ομοιόμορφα σ' όλη τη διατομή των ράβδων. Έτσι, η ενεργός διατομή των ράβδων είναι μεγάλη και η αντίσταση του δρομέα μικρή, όπως στους κινητήρες κλάσης A. Κατά την εκκίνηση, όπου η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων είναι μεγάλη, οι αντιδράσεις σκέδασης των

ράβδων είναι υψηλές. Το ρεύμα του δρομέα ρέει μόνο από τις περιοχές των ράβδων που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, οι οποίες έχουν μικρές αντιδράσεις. Με τον τρόπο αυτό η ενεργός διατομή των ράβδων μειώνεται και η αντίσταση του δρομέα εμφανίζεται αυξημένη κατά την εκκίνηση, όπως στους κινητήρες κλάσης D. Η ροπή εκκίνησης των κινητήρων τάξης B είναι σχεδόν ίση μ' εκείνη των κινητήρων τάξης A, αλλά το ρεύμα εκκίνησης είναι μειωμένο κατά 25% περίπου.

Στους κινητήρες κλάσης C, η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα με την ταχύτητα είναι εντονότερη και επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δρομέα με διπλό κλωβό. Ο κινητήρας φέρει ένα τύλιγμα κλωβού, το οποίο αποτελείται από ράβδους μεγάλης διατομής τοποθετημένες στο εσωτερικό του δρομέα. Ένας δεύτερος ανεξάρτητος κλωβός από ράβδους μικρής διατομής, βρίσκεται στην επιφάνεια του δρομέα. Στην κανονική λειτουργία του κινητήρα, το ρεύμα του δρομέα ρέει και από τα δύο τυλίγματα κλωβού και ο κινητήρας εμφανίζει μικρή αντίσταση στο δρομέα. Κατά την εκκίνηση, το ρεύμα κυκλοφορεί κυρίως από το εξωτερικά τοποθετημένο τύλιγμα κλωβού, με την υψηλή αντίσταση. Το μειονέκτημα των κινητήρων με διπλό κλωβό είναι το μεγαλύτερο κόστος κατασκευής τους, σε σχέση με τις υπόλοιπους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα.

1.9.3 Κατηγορίες Κινητήρων Επαγωγής Βραχυκυκλωμένου Δρομέα Και χαρακτηριστικά τους

Οι κινητήρες κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με την αντίσταση του δρομέα κλωβού.

- **Κινητήρες κατηγορίας NEMA A**

Αυτοί οι κινητήρες χαρακτηρίζονται από κανονική ροπή εκκίνησης και υψηλό ρεύμα εκκίνησης. Οι δρομείς έχουν

χαμηλή αντίσταση και χαμηλή ονομαστική ολίσθηση (0,005 έως 0,015).

Είναι κατάλληλοι για εφαρμογές όπου η ροπή εκκίνησης είναι χαμηλή (ανεμιστήρες, αντλίες) και φθάνουν στις ονομαστικές στροφές γρήγορα, μειώνοντας το πρόβλημα της ψύξης. Σε μεγαλύτερες μηχανές, χρησιμοποιείται χαμηλή τάση εκκίνησης για να περιοριστεί το ρεύμα εκκίνησης.

- **Κινητήρες κατηγορίας NEMA B**

Χαρακτηρίζονται από κανονική ροπή εκκίνησης, υψηλό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ονομαστική ολίσθηση. Η ροπή εκκίνησης είναι περίπου ίση με αυτή των κινητήρων κατηγορίας NEMA A, αλλά το ονομαστικό ρεύμα χαμηλό, 75% του αντίστοιχου της κατηγορίας NEMA A.

Είναι κατάλληλοι για γενικές εφαρμογές κυρίως όταν το φορτίο απαιτεί σταθερές στροφές και δεν αναπτύσσονται μεγάλες ροπές εκκίνησης. Είναι κατάλληλοι για κατασκευή αντλιών, ανεμιστήρων, φυσητήρων κλπ.

- **Κινητήρες κατηγορίας NEMA C**

Αυτοί οι κινητήρες χαρακτηρίζονται από υψηλή ροπή εκκίνησης και χαμηλό ρεύμα εκκίνησης. Η ονομαστική ολίσθηση είναι υψηλότερη από τις προηγούμενες κατηγορίες και ο συντελεστής απόδοσης μικρότερος.

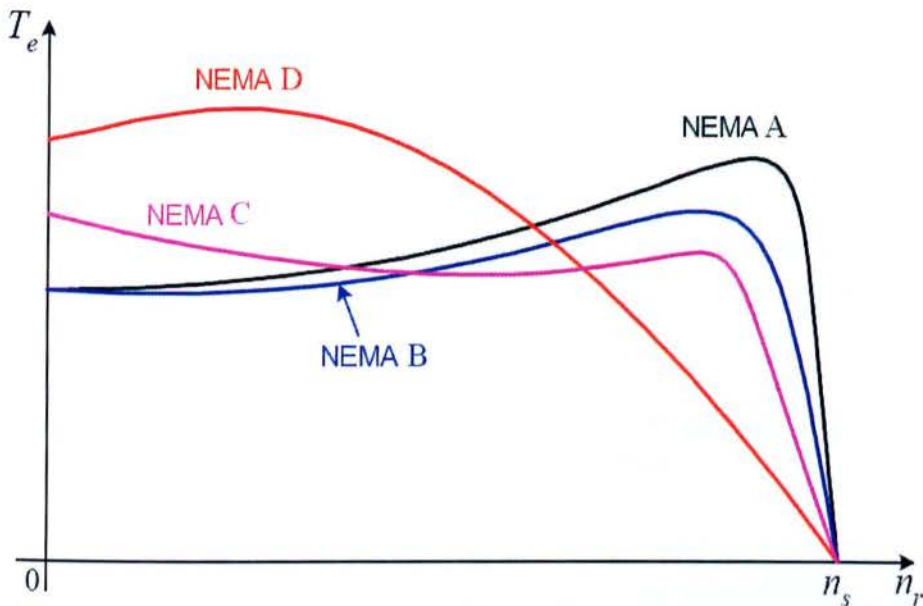
Είναι κατάλληλοι για οδήγηση συμπιεστών, μηχανών σύνθλιψης, μεταφορικές ταινίες κλπ.

- **Κινητήρες κατηγορίας NEMA D**

Αυτοί οι κινητήρες χαρακτηρίζονται από υψηλή ροπή εκκίνησης, χαμηλό ρεύμα εκκίνησης και υψηλή ονομαστική ολίσθηση (8% έως 15%). Η μέγιστη ροπή παρουσιάζεται σε ολίσθηση 0,5 ή υψηλότερη. Ο συντελεστής απόδοσης είναι χαμηλός λόγω της υψηλής ολίσθησης. Οι υψηλές απώλειες απαιτούν μεγάλη σε όγκο μηχανή και επομένως οι μηχανές αυτές είναι ακριβές σχετικά με την ισχύ που αποδίδουν.

Είναι κατάλληλοι για οδήγηση περιοδικών φορτίων που χρειάζονται μεγάλες επιταχύνσεις ή σε περίπτωση που υπάρχουν κρουστικά φορτία (πρέσσες, στράντζες). Στην περίπτωση των κρουστικών φορτίων, ο κινητήρας εφοδιάζεται με σφόνδυλο που λειτουργεί σαν αποθήκη μηχανικής ενέργειας.

Παρακάτω φαίνονται οι τυπικές χαρακτηριστικές ροπής – στοφών για διαφορετικές κατηγορίες κινητήρων επαγωγής



Τυπικές χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου κλωβού, ανάλογα με την κλάση σχεδίασης

1.10 ΕΚΚΙΝΗΣΗ

Οι επαγωγικοί κινητήρες δεν παρουσιάζουν τα προβλήματα των κινητήρων (εκκινούν σαν επαγωγικοί κινητήρες). Το ρεύμα εκκίνησης είναι τέσσερεις με πέντε φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα και η ροπή εκκίνησης μία έως δυόμισι φορές μεγαλύτερη από την

ονομαστική ροπή. Προκειμένου να εκκινήσει ο κινητήρας, πρέπει η προσφερόμενη ροπή από τον κινητήρα να είναι ίση ή μεγαλύτερη από τη ροπή που απαιτεί το φορτίο.

Οι κινητήρες χαμηλής ισχύος (έως 2 kW) μπορούν να εκκινήσουν με απλή σύνδεση στο δίκτυο. Οι μεγάλοι κινητήρες οι οποίοι κατά την εκκίνησή τους μπορεί να προκαλέσουν ανεπιθύμητη βύθιση τάσης στα άλλα φορτία της γραμμής, απαιτούν κατάλληλες μεθόδους εκκίνησης όπως:

1. Εκκίνηση με μειωμένη τάση τυλιγμάτων ή εκκίνηση αστέρα – τριγώνου. Ο κινητήρας εκκινεί με τα τυλίγματα του στάτη σε σύνδεση αστέρα και όταν εκκινήσει καταλήγει σε σύνδεση τριγώνου. Το ρεύμα εκκίνησης και η ροπή εκκίνησης είναι ίση με το 1/3 των αντίστοιχων μεγεθών σε σύνδεση τριγώνου.
2. Εκκίνηση με ηλεκτρονικό ρυθμιστή τάσης. Οι διατάξεις αυτές τείνουν να εξαπλωθούν τελευταία λόγω της μείωσης του κόστους τους.
3. Εκκίνηση με αυτόμετασχηματιστή. Η τάση εξόδου του αυτομετασχηματιστή αυξάνει προοδευτικά.
4. Εκκίνηση με εξωτερικούς ροοστάτες (αντιστάσεις) στην περίπτωση των κινητήρων με τυλιγμένους δρομείς. Ο τρόπος αυτός έχει το μειονέκτημα της κατανάλωσης ενέργειας στις αντιστάσεις.

Η φαινόμενη ισχύς εκκίνησης του κινητήρα επαγωγής, S_{start} , υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την ονομαστική ισχύ του κινητήρα, S_{rated} , με ένα συντελεστή μετατροπής, CLF, ως εξής:

$$S_{start} = S_{rated} \cdot CLF \quad (1.48)$$

Και το ρεύμα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_L = \frac{S_{start}}{\sqrt{3} \cdot V_T} \quad (1.49)$$

1.11 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

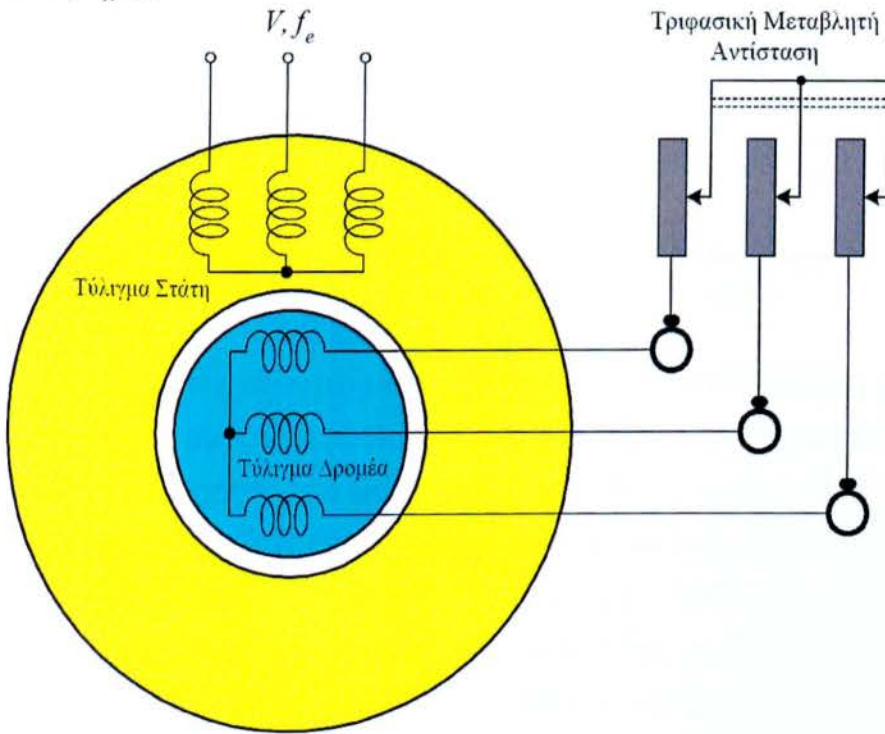
Όταν ένας τριφασικός επαγωγικός κινητήρας τροφοδοτείται από το δίκτυο σταθερής τάσης και συχνότητας, στρέφεται με μια ταχύτητα η οποία είναι λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη. Η μεταβολή της ταχύτητας από τη σύγχρονη εξαρτάται από το φορτίο και είναι τόσο μεγαλύτερη όσο υψηλότερη είναι η αντίσταση του δρομέα. Όμως, η λειτουργία του κινητήρα με μειωμένη ταχύτητα σημαίνει αύξηση της ολίσθησης και των απωλειών χαλκού στο δρομέα με συνέπεια τη μείωση του βαθμού απόδοσης. Ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων (έλεγχος ανοικτού βρόχου) επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

- Με τη ρύθμιση της ολίσθησης.
- Με τη ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας.

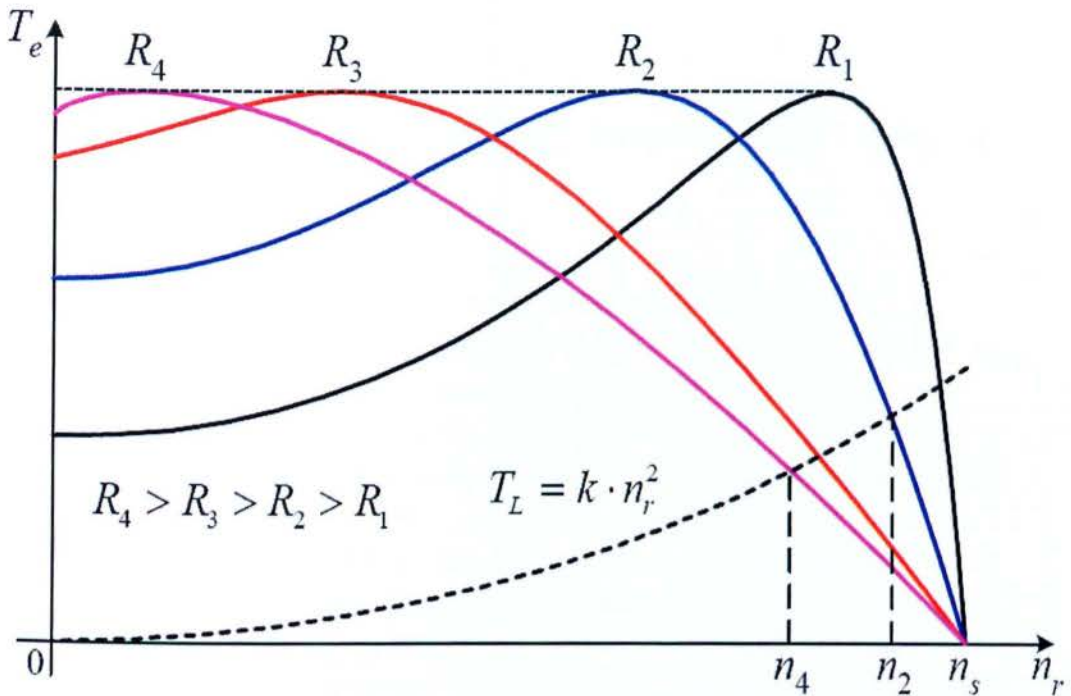
Η ρύθμιση της ολίσθησης, για δεδομένη ροπή φορτίου, επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα στον κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα και με τον έλεγχο της τάσης τροφοδοσίας στον κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού. Η ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας από τη σχέση $n_s = \frac{120 \cdot f_e}{p}$, επιτυγχάνεται είτε με τη μεταβολή του αριθμού των πόλων του τυλίγματος του στάτη, ή με τη μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας.

1.11.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ

Η ταχύτητα των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα ρυθμίζεται με την εισαγωγή μεταβλητών αντιστάσεων στο τύλιγμα του δρομέα, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής – ταχύτητας του κινητήρα.



Εισαγωγή ρυθμιστικών αντιστάσεων στο δρομέα, για τη ρύθμιση της ταχύτητας του κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα



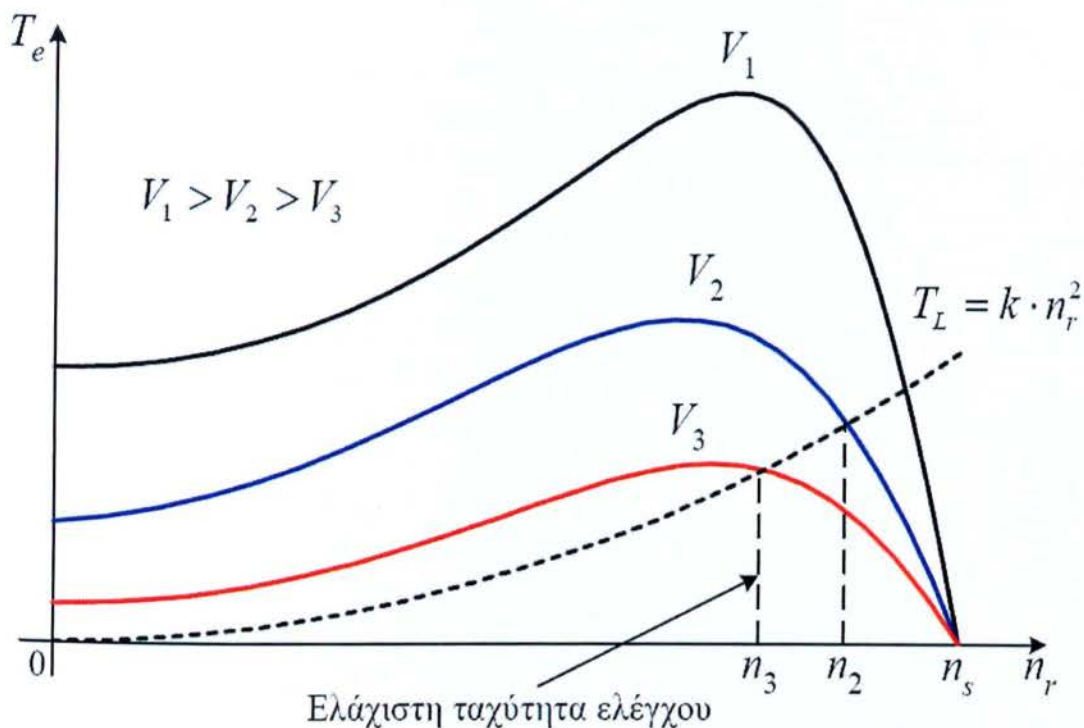
Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα, με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα

Στο σχήμα εικονίζονται οι χαρακτηριστικές του κινητήρα για τέσσερις τιμές της αντίστασης του δρομέα, μαζί με τη χαρακτηριστική του φορτίου. Η ροπή του φορτίου μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας. Αυτή η χαρακτηριστική φορτίου είναι πολύ κοινή και απαντάται στις αντλίες, τους ανεμιστήρες και τα ανυψωτικά (*pump, fan, crane*). Η μεταβολή της ταχύτητας με τη ρύθμιση της αντίστασης είναι φανερή. Η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται από την τιμή n_2 όταν $R_r = R_2$ στην τιμή n_4 όταν $R_r = R_4$. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι, ο βαθμός απόδοσης της διάταξης μειώνεται με τη μείωση της ταχύτητας, εξαιτίας των εξωτερικών αντιστάσεων.

1.11.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΤΑΤΗ

Στους επαγωγικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, η ρύθμιση της ολίσθησης (ταχύτητας) επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη. Η συχνότητα των τάσεων είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Καθώς η ροπή που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης του στάτη, οι χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας μεταβάλλονται όπως στο παρακάτω σχήμα, για διάφορες τιμές της τάσης. Η ροπή του φορτίου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας. Από το σχήμα είναι φανερό ότι, η ταχύτητα του κινητήρα δεν μπορεί να ελεγχθεί σε τιμές πολύ μικρότερες από τη σύγχρονη. Η ελάχιστη δυνατή ταχύτητα είναι η n_3 , που αντιστοιχεί στη ροπή ανατροπής για την τάση V_3 . Ακόμη, το ρεύμα του κινητήρα είναι ανάλογο της τάσης. Έτσι, ο λόγος ροπής προς ρεύμα, η μέγιστη ροπή, ο συντελεστής ισχύος και ο βαθμός απόδοσης, μειώνονται με τη μείωση της ταχύτητας.

Επομένως, ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων με τη ρύθμιση της τάσης του στάτη δεν είναι αποτελεσματικός. Ο έλεγχος της τάσης στα τυλίγματα του στάτη επιτυγχάνεται με κατάλληλους μετατροπείς ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται *ρυθμιστές εναλασσόμενης τάσης (ac voltage controllers)*. Τα τυλίγματα του κινητήρα μπορεί να είναι σε σύνδεση αστέρα ή τριγώνου. Ο ρυθμιστής αποτελείται από έξι *ελεγχόμενους ανορθωτές πυριτίου (SCR)*, οι οποίοι συνδέονται ανά δύο αντιπαράλληλα. Σε μικρές ισχύς χρησιμοποιούνται ως διακόπτες τρία *TRIAC*, στη θέση των έξι *SCR*. Το *TRIAC* συμπεριφέρεται όπως δύο αντιπαράλληλοι ελεγχόμενοι ανορθωτές πυριτίου, όμως έχει πολύ μικρότερη ικανότητα χειρισμού ισχύος απ' αυτούς. Οι *SCR* δέχονται παλμούς έναυσης με τη σειρά αρίθμησής τους και με διαφορά φάσης 60° .

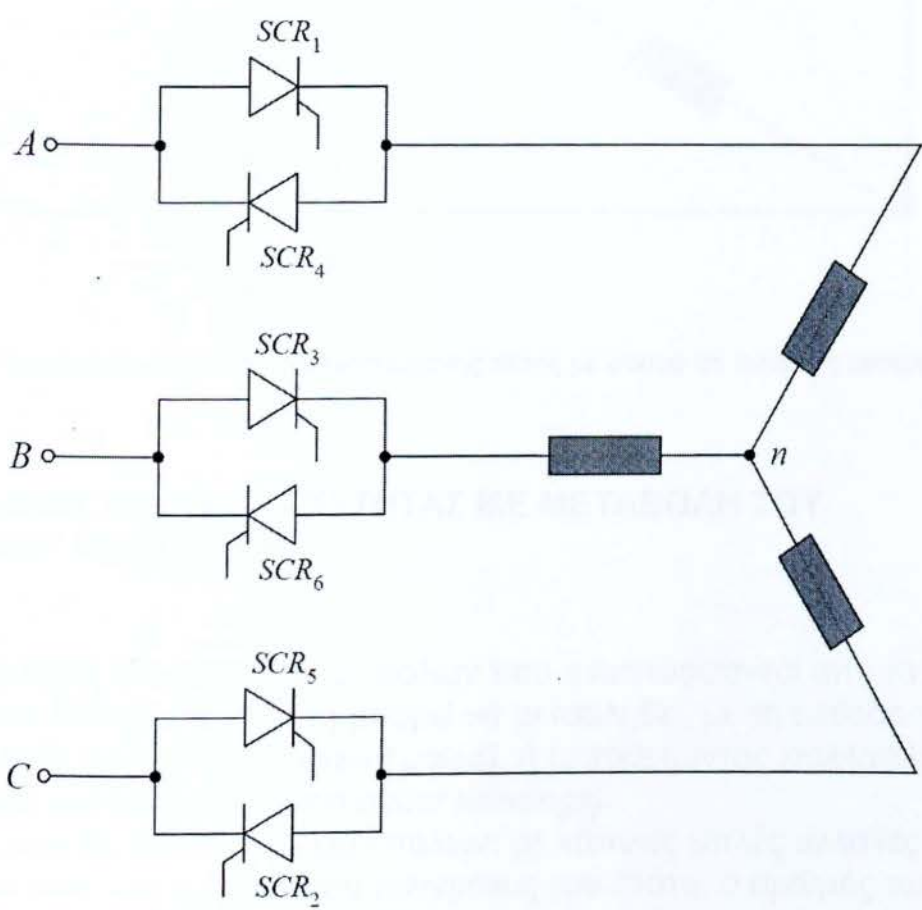


Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, με τη μεταβολή της τάσης του στάτη

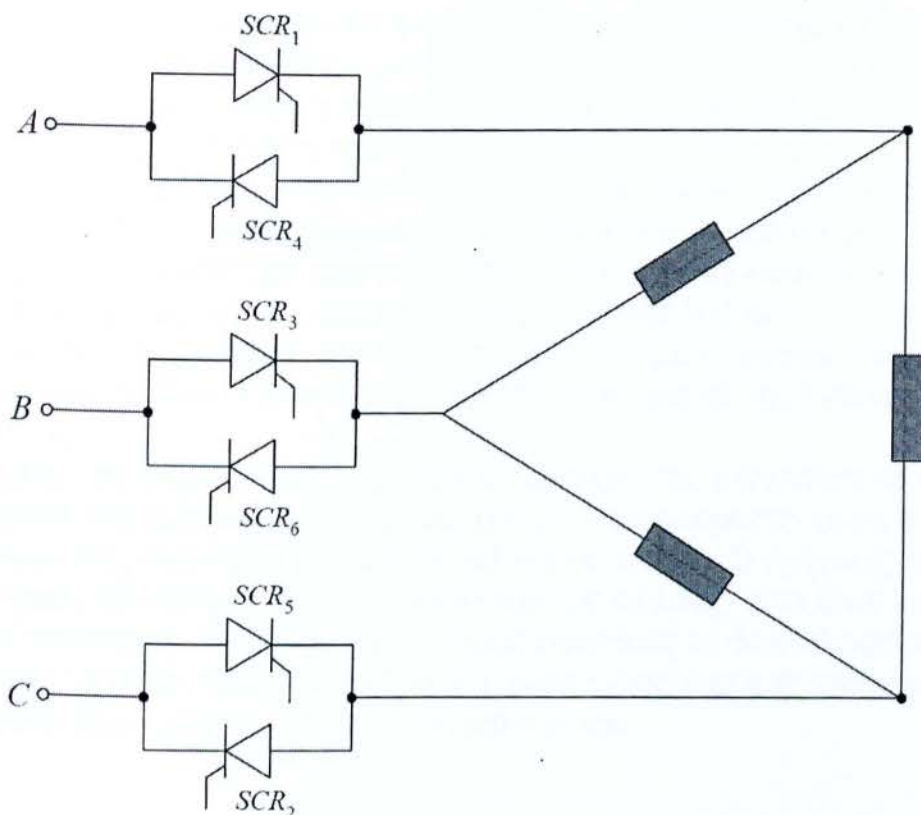
Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιούνται συνήθως στον έλεγχο της ταχύτητας επαγωγικών κινητήρων κλάσης D, σε εφαρμογές αντλιών και ανεμιστήρων, όπου δεν απαιτείται έλεγχος της ταχύτητας σε μικρές τιμές. Όμως, η κυριότερη εφαρμογή τους είναι στην εκκίνηση των επαγωγικών κινητήρων όλων των κατηγοριών, οπότε ονομάζονται *soft starters*.

Οι ηλεκτρονικοί εκκινητές έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους εκκίνησης, με αυτομετασχηματιστή ή διακόπτη αστέρα – τριγώνου. Κάποια από τα πλεονεκτήματα είναι: η ομαλή επιτάχυνση και επιβράδυνση, ο έλεγχος του ρεύματος, η μειωμένη συντήρηση, η προστασία από έλλειψη ή ασυμμετρία των φάσεων. Επιπλέον, ένας εκκινητής με ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ελαχιστοποίηση των

απωλειών του επαγωγικού κινητήρα, λειτουργώντας τον κινητήρα με μειωμένη τάση σε μικρά φορτία. (Ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί με το μέγιστο βαθμό απόδοσης στο ονομαστικό φορτίο, όπου η κατανομή των επιμέρους απωλειών του είναι η βέλτιστη. Όταν το φορτίο μειώνεται, η βέλτιστη κατανομή των απωλειών διαταράσσεται και ο βαθμός απόδοσης μειώνεται. Μεταβάλλοντας την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα ανάλογα με το φορτίο του, ώστε η μαγνητική ροή στο διάκενο να έχει πάντα τη βέλτιστη τιμή, επιτυγχάνουμε το μέγιστο βαθμό απόδοσης. Η βέλτιστη τιμή της μαγνητικής ροής εξαρτάται από το φορτίο και την ταχύτητα του κινητήρα).



Τριφασικός ρυθμιστής εναλλασσόμενης τάσης με φορτίο σε σύνδεση αστέρα



Τριφασικός ρυθμιστής εναλλασσόμενης τάσης με φορτίο σε σύνδεση αστέρα

1.11.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΠΟΛΩΝ

Ο αριθμός των μαγνητικών πόλων που αναπτύσσονται από το τριφασικό τυλίγμα του στάτη μπορεί να μεταβληθεί, με τη μέθοδο των διαδοχικών πόλων (*consequent poles*), ή τοποθετώντας πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη (*multiple stator windings*).

Στη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, με κάποιες απλές αλλαγές στη σύνδεση των ομάδων του τυλίγματος του στάτη, ο αριθμός των πόλων του μεταβάλλεται με ένα λόγο 2 προς 1. Έτσι, ο επαγωγικός

κινητήρας μπορεί να έχει δύο ή τέσσερις πόλους και σύγχρονη ταχύτητα 3000 rpm ή 1500 rpm αντίστοιχα.

Όταν ο λόγος 2 προς 1 στην ταχύτητα δεν είναι βολικός, τοποθετούνται στο στάτη περισσότερα από ένα ανεξάρτητα τριφασικά τυλίγματα, με τον επιθυμητό αριθμό πόλων. Ανάλογα με τη ζητούμενη ταχύτητα, τροφοδοτείται κάθε φορά το κατάλληλο τύλιγμα. Το μειονέκτημα των πολλαπλών τυλιγμάτων είναι ότι αυξάνουν το κόστος του κινητήρα. Ακόμη, η μέθοδος των πολλαπλών τυλιγμάτων μπορεί να συνδυασθεί με τη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, για τη λειτουργία του κινητήρα σε περισσότερες ταχύτητες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη μεταβολή του αριθμών των πόλων, μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε επαγωγικούς κινητήρες με βραχυκυκλωμένο κλωβό. Ο δρομέας των κινητήρων αυτών αναπτύσσει πάντα τόσους πόλους, όσοι είναι και οι πόλοι του στάτη. Αυτό δεν ισχύει στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα, όπου το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσει ένα καθορισμένο αριθμό πόλων, ανάλογο με την κατασκευή του.

1.11.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

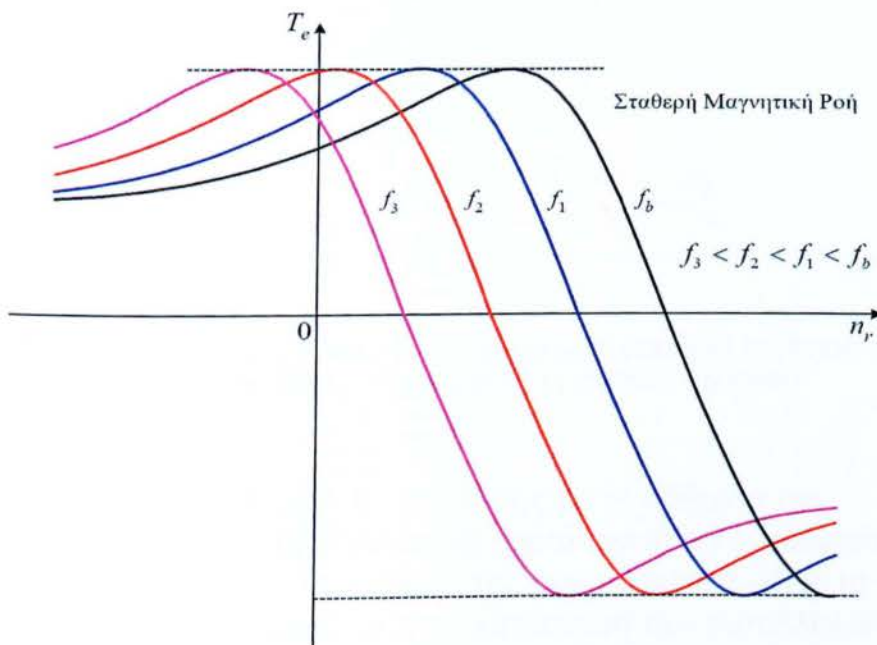
Η βέλτιστη μέθοδος για τον έλεγχο της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων κάθε είδους, είναι με τη ρύθμιση της συχνότητας τροφοδοσίας του στάτη. Έτσι, μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή η ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων και μαζί τους η ταχύτητα του κινητήρα. Η σύγχρονη ταχύτητα που αντιστοιχεί στην ονομαστική συχνότητα f_b , ονομάζεται *βασική (base)*.

Καθώς η συχνότητα των τάσεων τροφοδοσίας μπορεί να ρυθμιστεί σε τιμές μικρότερες αλλά και μεγαλύτερες της ονομαστικής, η ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να μεταβληθεί από το μηδέν, μέχρι μια τιμή πολλαπλάσια της βασικής. Το άνω όριο της ταχύτητας περιορίζεται από τη μηχανική αντοχή του κινητήρα. Εκτός από την

ευρεία περιοχή ρύθμισης της ταχύτητας, η μέθοδος εξασφαλίζει τη λειτουργία του κινητήρα με μικρή ολίσθηση σε κάθε ταχύτητα. Έτσι, ο βαθμός απόδοσης διατηρείται υψηλός.

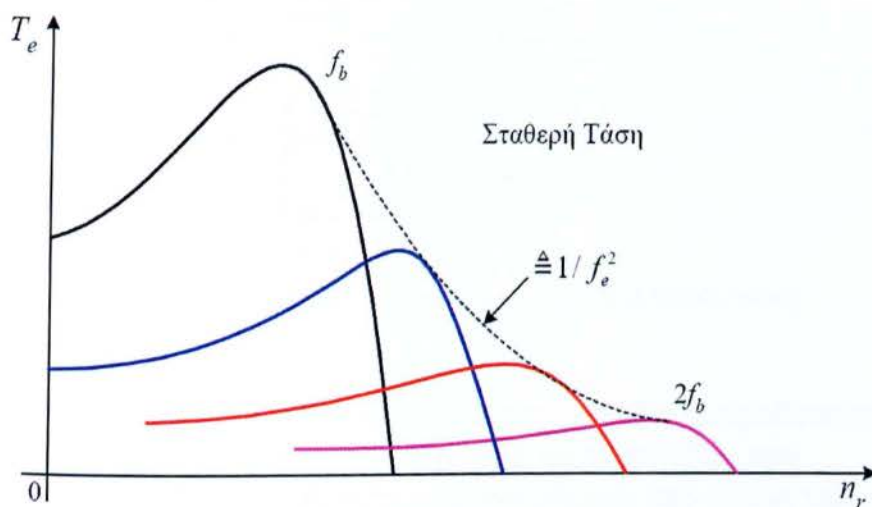
Όταν η ταχύτητα του κινητήρα ρυθμίζεται σε τιμές μικρότερες της βασικής, η μείωση της συχνότητας συνοδεύεται από αντίστοιχη μείωση της τάσης. Ειδικότερα, ο λόγος της τάσης προς τη συχνότητα V/f_e διατηρείται σταθερός. Με τον τρόπο αυτό η μαγνητική ροή στο διάκενο του κινητήρα παραμένει περίπου σταθερή $\left(\phi_m = \frac{E}{f_e}\right)$ Στο παρακάτω σχήμα εικονίζονται οι χαρακτηριστικές ροπής

– ταχύτητας του κινητήρα, σε διάφορες συχνότητες μικρότερες από τη βασική, όταν μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή. Παρατηρούμε ότι η ροπή ανατροπής (μέγιστη ροπή), δεν μεταβάλλεται με τη μεταβολή της συχνότητας. Έτσι, ο κινητήρας μπορεί να ελέγξει φορτία, τα οποία απαιτούν μεγάλη ροπή σε μικρές ταχύτητες. Επιπλέον, η δυναμική συμπεριφορά του κινητήρα είναι εξαιρετική.



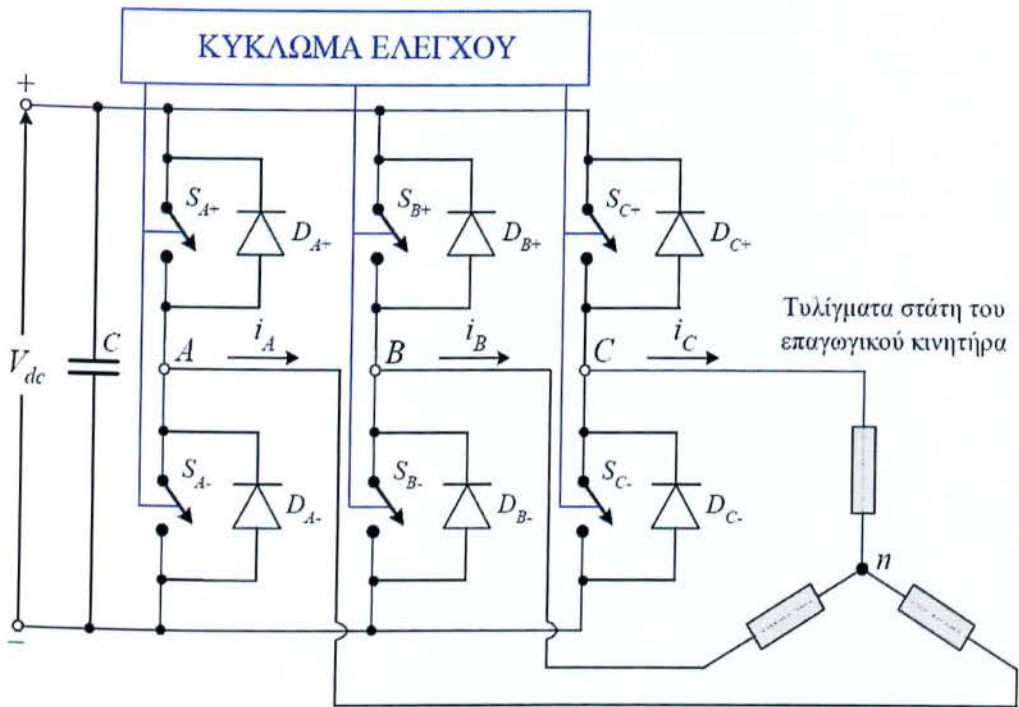
Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με τη μεταβολή της συχνότητας σε τιμές μικρότερες από τη βασική, με σταθερή τη μαγνητική ροή

Στην ονομαστική ταχύτητα, ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση και τη βασική συχνότητα. Για την αύξηση της ταχύτητας, σε τιμές πέρα από την ονομαστική, η συχνότητα γίνεται μεγαλύτερη από τη βασική. Όμως, η τάση τροφοδοσίας διατηρείται σταθερή στην ονομαστική τιμή, για την προστασία της μόνωσης των τυλιγμάτων. Επειδή η τάση δεν ακολουθεί την αύξηση της συχνότητας, η μαγνητική ροή μειώνεται καθώς η συχνότητα αυξάνει. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της μέγιστης ροπής ανατροπής με το τετράγωνο της συχνότητας, όπως εικονίζεται στο σχήμα.



Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με τη μεταβολή της συχνότητας σε τιμές μεγαλύτερες από τη βασική, με σταθερή την τάση

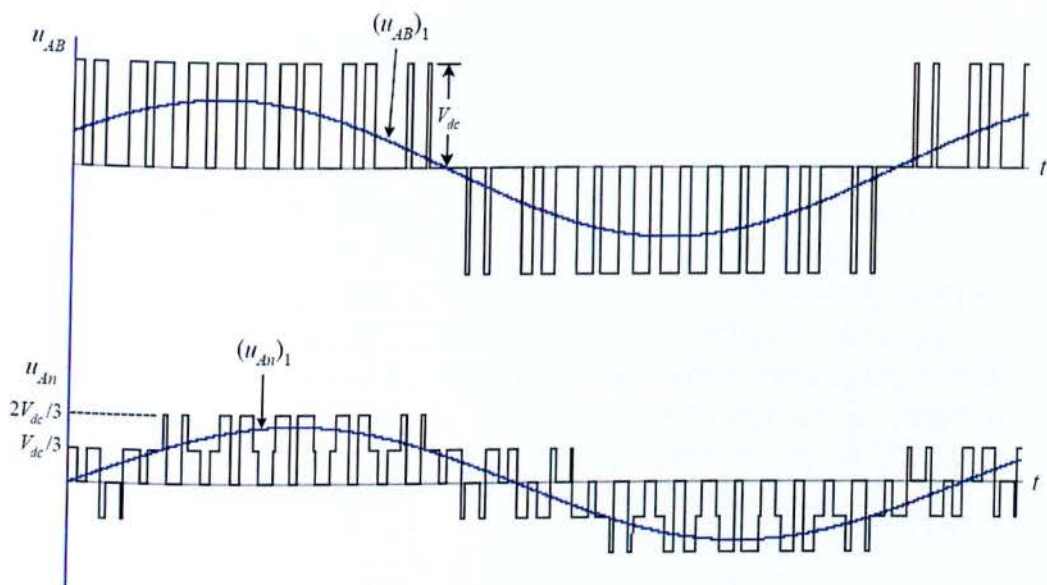
Αν και η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη ρύθμιση της συχνότητας προσφέρει πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας απ' όλες τις άλλες μεθόδους, η χρήση της έχει γενικευτεί μόλις τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται στην κατασκευή των κατάλληλων μετατροπέων ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται *αντιστροφείς (inverters)*, με λογικό κόστος και υψηλή αξιοπιστία. Στο σχήμα εικονίζεται η δομή του *τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης*.



Κυκλωματική δομή του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης

Ο αντιστροφέας ονομάζεται πηγής τάσης, επειδή τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς τάσης. Η συνεχής τάση εισόδου του αντιστροφέα V_{dc} , προέρχεται από την ανόρθωση της τάσης του δικτύου, την οποία εξομαλύνει ο πυκνωτής C . Οι αντιστροφείς που τροφοδοτούνται από πηγές συνεχούς ρεύματος ονομάζονται *αντιστροφείς πηγής ρεύματος* και χρησιμοποιούνται στον έλεγχο κινητήρων μεγάλης ισχύος. Οι έξι διακόπτες του αντιστροφέα πηγής τάσης, είναι συνήθως *MOSFET* ισχύος (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) ή *IGBT* (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Αντιπαράλληλα με κάθε διακόπτη συνδέετε μια διόδος, η οποία εξασφαλίζει την αμφίδρομη ροή της ισχύος μεταξύ της dc εισόδου και της ac εξόδου. Οι διακόπτες οδηγούνται από το κύκλωμα ελέγχου, με κάποια από τις πολλές τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμού *PWM* (*Pulse Width Modulation*).

Το χαρακτηριστικό όλων των τεχνικών *PWM* είναι η ρύθμιση εκτός από τη συχνότητα και της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα. Όμως, οι διακόπτες του αντιστροφέα λειτουργούν με μια συχνότητα f_s , η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από τη θεμελιώδη f_e . Η συχνότητα f_s ονομάζεται *συχνότητα μετάβασης (switching frequency)*. Στο σχήμα παρουσιάζεται ενδεικτικά η κυματομορφή της πολικής και της φασικής τάσης στον κινητήρα, όταν τροφοδοτείται από ένα *PWM* αντιστροφέα. Ο κινητήρας εξαιτίας της επαγωγικής συμπεριφοράς του, φιλτράρει τις συνιστώσες υψηλής συχνότητας των ρευμάτων και ανταποκρίνεται μόνο στη θεμελιώδη συνιστώσα τους. Τα μικρά αρμονικά ρεύματα αυξάνουν τις απώλειες χαλκού και σιδήρου του κινητήρα.



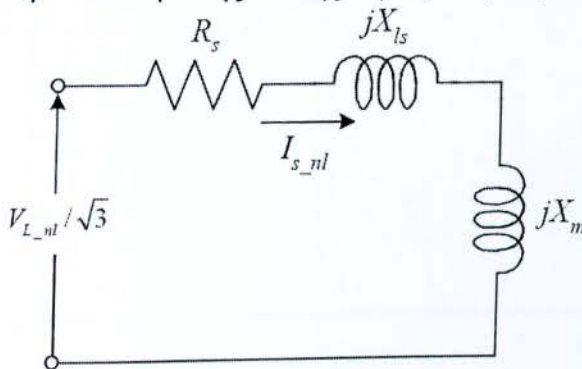
Κυματομορφές της πολικής και της φασικής τάσης στον κινητήρα. Διακρίνεται ακόμη η θεμελιώδης συνιστώσα των τάσεων, με συχνότητα f_e .

1.12 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος του επαγωγικού κινητήρα, πραγματοποιούνται τρία πειράματα. Οι ακριβείς συνθήκες των πειραμάτων αυτών περιγράφονται στην τυποποίηση 112 της IEEE. Αντίστοιχες τυποποιήσεις έχουν εκδώσει και άλλοι οργανισμοί.

1.12.1 Δοκιμή Κενού Φορτίου

Το πείραμα κενού (*no-load test*) χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της αντίδρασης μαγνήτισης X_m , των απωλειών του κινητήρα χωρίς φορτίο και της καμπύλης μαγνήτισης. Ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση και λειτουργεί χωρίς φορτίο. Επομένως, η ισχύς που απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο είναι ίση με την ισχύ απωλειών, καθώς το φορτίο είναι μηδενικό. Η τριφασική ισχύς εισόδου, τα ρεύματα γραμμής I_s και η πολική τάση V_L μετρούνται με τα κατάλληλα όργανα. Επειδή ο κινητήρας λειτουργεί στο κενό, η ολίσθηση και το ρεύμα του δρομέα είναι σχεδόν μηδενικά. Έτσι, το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα αποκτά την απλοποιημένη μορφή του σχήματος. Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης εισόδου του κινητήρα είναι ίσο με το λόγο της τάσης προς το ρεύμα.



Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα στο πείραμα κενού

Οι απώλειες χαλκού του δρομέα είναι αμελητέες επειδή το ρεύμα I_2 είναι υπερβολικά μικρό. Οι απώλειες χαλκού του στάτη είναι:

$$P_{SCL} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \quad (1.50)$$

Οπότε η ισχύς εισόδου είναι:

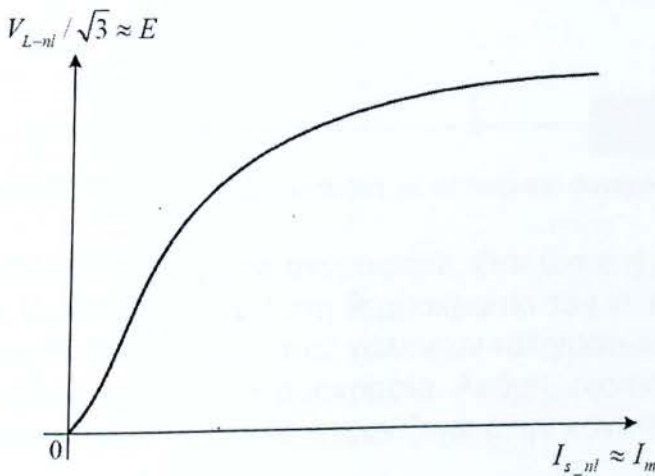
$$P_{in,nl} = P_{SCL} + P_{core} + P_{mech} + P_{stray} \Rightarrow P_{in,nl} = P_{SCL} + P_{rot} \quad (1.51)$$

Όπου P_{rot} = οι περιστροφικές απώλειες του κινητήρα.

$$P_{rot} = P_{core} + P_{mech} + P_{stray} \quad (1.52)$$

Το μέτρο της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης εισόδου στη δοκιμή κενού φορτίου είναι:

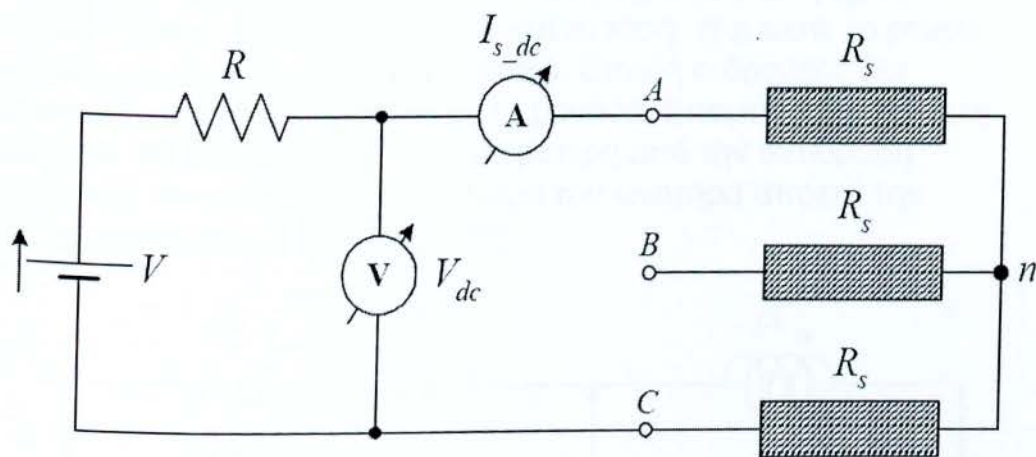
$$Z_{nl} = \frac{V_{\Phi}}{I_{1,nl}} \approx X_1 + X_M \quad (1.53)$$



Καμπύλη μαγνήτισης του επαγωγικού κινητήρα από το πείραμα κενού φορτίου

1.12.2 Δοκιμή Συνεχούς Ρεύματος

Στον προσδιορισμό της ωμικής αντίστασης του στάτη R_s , χρησιμοποιείται το πείραμα συνεχούς ρεύματος (*dc test*). Η διάταξη μέτρησης εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα. Τα τυλίγματα του στάτη είναι συνδεδεμένα σε αστέρα και τροφοδοτούνται από μια πηγή συνεχούς τάσης. Η τάση της πηγής ρυθμίζεται έτσι ώστε, το ρεύμα I_{DC} να είναι ίσο με το ονομαστικό. Εξαιτίας της συνεχούς τάσης τροφοδοσίας, δεν επάγονται ρεύματα στο δρομέα και η αντίδραση του στάτη είναι μηδενική. Επομένως, η τιμή του ρεύματος περιορίζεται μόνο από την ωμική αντίσταση των δύο τυλιγμάτων του στάτη, σε σύνδεση σειράς.



Διάταξη μέτρησης της αντίστασης του στάτη, με το πείραμα συνεχούς ρεύματος

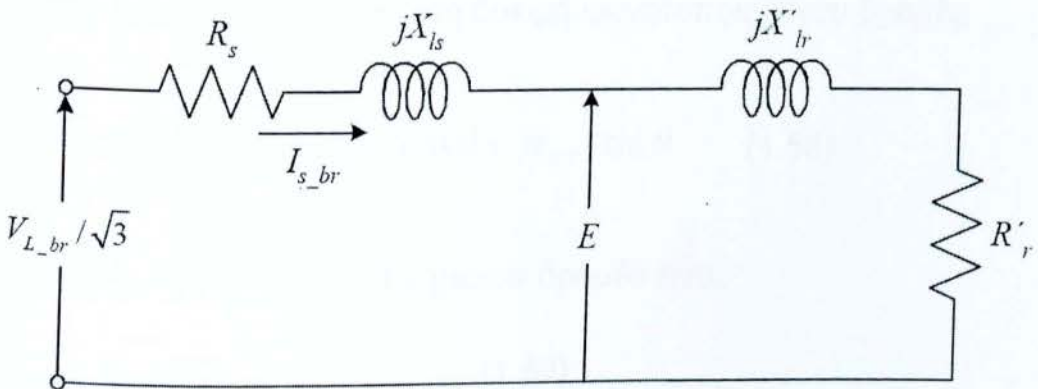
Το ρεύμα επιλέγεται ίσο με το ονομαστικό, έτσι ώστε η μέτρηση της αντίστασης R_1 να αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του κινητήρα με το ονομαστικό φορτίο. Η αντίσταση των χάλκινων τυλιγμάτων των κινητήρων μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Ακόμη, εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου, το οποίο εμφανίζεται στην κανονική

Λειτουργία με εναλλασσόμενη τάση, η αντίσταση που προσδιορίζεται από το πείραμα συνεχούς ρεύματος είναι ελαφρά μικρότερη από την πραγματική.

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2 \cdot I_{DC}} \quad (1.54)$$

1.12.3 Δοκιμή Ακίνητοποιημένου Δρομέα

Με το πείραμα ακίνητου δρομέα (*blocked rotor test*), υπολογίζονται και οι υπόλοιπες παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος. Στο πείραμα αυτό ο δρομέας διατηρείται ακίνητος, ενώ ο κινητήρας τροφοδοτείται με την κατάλληλη μειωμένη τάση, έτσι ώστε το ρεύμα του στάτη να είναι ίσο με το ονομαστικό. Επειδή ο δρομέας δεν στρέφεται, η ολίσθηση είναι ίση με τη μονάδα. Επομένως, η σύνθετη αντίσταση του δρομέα είναι πολύ μικρότερη από την αντίδραση μαγνήτισης και το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα αποκτά την απλοποιημένη μορφή του σχήματος.



Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, στο πείραμα ακίνητοποιημένου δρομέα

Η ισχύς εισόδου του κινητήρα είναι:

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot V_T \cdot I_L \cdot \cos\theta \quad (1.55)$$

Οπότε ο συντελεστής ισχύος του ακινητοποιημένου δρομέα είναι:

$$\cos\theta = \frac{P_{in}}{\sqrt{3} \cdot V_T \cdot I_L} \quad (1.56)$$

Όπου θ είναι η γωνία σύνθετης αντίστασης Z_{LR} .

Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης Z_{LR} στη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα είναι:

$$Z_{LR} = \frac{V_{\Phi}}{I_1} \quad (1.57)$$

Έτσι η σύνθετη αντίσταση στη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα είναι:

$$Z_{LR} = R_{LR} + jX_{LR} = Z_{LR} \cdot \cos\theta + jI_{LR} \cdot \sin\theta \quad (1.58)$$

Η αντίσταση του ακινητοποιημένου δρομέα είναι:

$$R_{LR} = R_1 + R_2 \quad (1.59)$$

Η επαγωγική αντίδραση του ακινητοποιημένου δρομέα:

$$X_{LR} = X_1 + X_2 \quad (1.60)$$

X_1 και X_2 οι επαγωγικές αντιδράσεις στάτη και δρομέα αντίστοιχα
Η αντίσταση του δρομέα υπολογίζεται ως εξής:

$$R_2 = R_{LR} + R_1 \quad (1.61)$$

ενώ η R_1 έχει προσδιοριστεί από τη δοκιμή συνεχούς ρεύματος

Η συνολική ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση στην ονομαστική συχνότητα λειτουργίας είναι:

$$X_{LR} = \frac{f_{rated}}{f_{test}} \cdot X_{LR} = X_1 + X_2 \quad (1.62)$$

Επειδή δεν υπάρχει κάποια απλή μέθοδος για τον ανεξάρτητο καθορισμό των επιμέρους αντιδράσεων, έχει προκύψει εμπειρικά ο παρακάτω πίνακας υπολογισμού, ανάλογα με το είδος και την κλάση σχεδίασης του κινητήρα.

Σχεδίαση Δρομέα	X_1	X_2
Τυλιγμένος Δρομέας	$0,5X_{LR}$	$0,5X_{LR}$
NEMA A	$0,5X_{LR}$	$0,5X_{LR}$
NEMA B	$0,4X_{LR}$	$0,6X_{LR}$
NEMA C	$0,3X_{LR}$	$0,7X_{LR}$
NEMA D	$0,5X_{LR}$	$0,5X_{LR}$

Η αντίσταση του δρομέα υπολογίζεται αν αφαιρέσουμε από την ολική αντίσταση, την αντίσταση του στάτη από το πείραμα συνεχούς

ρεύματος. Όμως, η ενεργός αντίσταση του δρομέα στους κινητήρες κλάσης B και C, εξαρτάται από τη συχνότητα των ρευμάτων στο δρομέα. Στο πείραμα ακίνητου δρομέα, η συχνότητα των ρευμάτων στο δρομέα είναι ίση με τη συχνότητα του στάτη. Επομένως, για τον ακριβή καθορισμό της αντίστασης του δρομέα στους κινητήρες αυτούς, η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα V_{L_br} πρέπει να είναι πολύ μικρότερη από τη συχνότητα του δικτύου.

1.13 Η ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ ΩΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

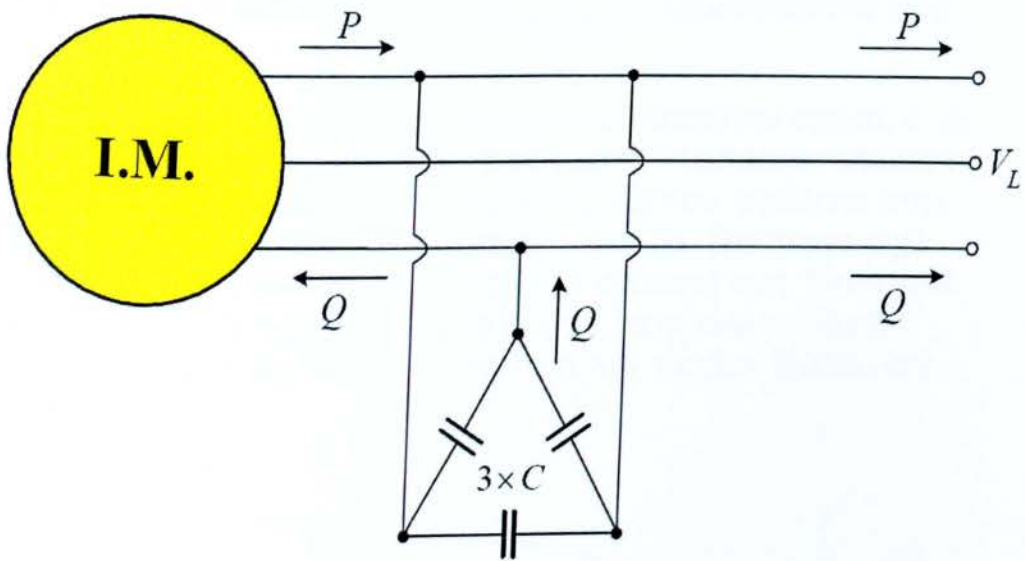
Η επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, όταν στρέφεται από μια κινητήρια μηχανή με ταχύτητα μεγαλύτερη της σύγχρονης. Η τριφασική ισχύς που παράγει η επαγωγική γεννήτρια, εξαρτάται από τη ροπή που εφαρμόζει η κινητήρια μηχανή. Η ροπή αυτή πρέπει να είναι μικρότερη από μια μέγιστη τιμή, η οποία ονομάζεται *ροπή αναστροφής* (*push over torque*). Η ροπή αναστροφής είναι μεγαλύτερη από τη ροπή ανατροπής. Η ταχύτητα της γεννήτριας αυξάνεται υπερβολικά, όταν η επίβαλλόμενη ροπή γίνει μεγαλύτερη από τη ροπή αναστροφής.

Το μεγάλο μειονέκτημα της επαγωγικής γεννήτριας είναι ότι δεν παράγει άεργο ισχύ. Επιπλέον, για την ανάπτυξη του μαγνητικού πεδίου πρέπει να καταναλώσει άεργο ισχύ. Για το λόγο αυτό, οι επαγωγικές γεννήτριες σπάνια χρησιμοποιούνται αυτόνομα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο, το οποίο τις τροφοδοτεί με την αναγκαία άεργο ισχύ και ρυθμίζει την τάση εξόδου τους. Η κυριότερη εφαρμογή τους είναι στις ανεμογεννήτριες, οι οποίες συνδέονται στο υπάρχον ισχυρό ηλεκτρικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, η επαγωγική μηχανή

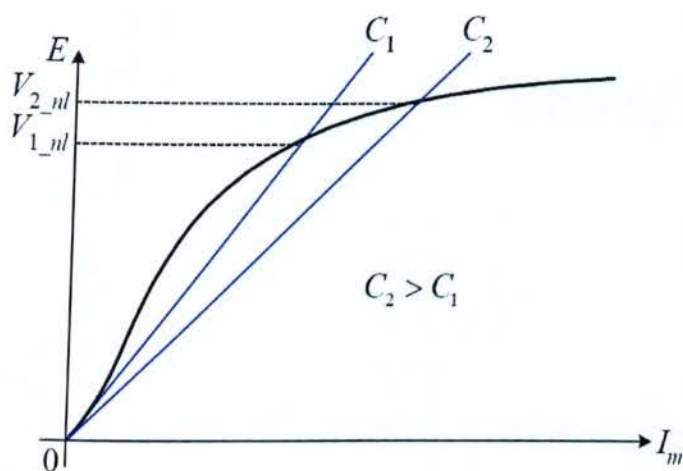
προσφέρει απλή κατασκευή και τη δυνατότητα περιστροφής της με ταχύτητα η οποία μπορεί να μεταβάλλεται.

Για την αυτόνομη λειτουργία της επαγωγικής γεννήτριας απαιτείται η σύνδεση πυκνωτών, όπως εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.

Οι πυκνωτές παρέχουν την άεργο ισχύ που απαιτεί η γεννήτρια και το φορτίο. Η τάση εξόδου της γεννήτριας στη λειτουργία χωρίς φορτίο, ορίζεται από το σημείο τομής της καμπύλης μαγνήτισης και της χαρακτηριστικής τάσης – ρεύματος των πυκνωτών. Η αυτοδιέγερση της επαγωγικής γεννήτριας, όπως και στις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, οφείλεται στον παραμένον μαγνητισμό.

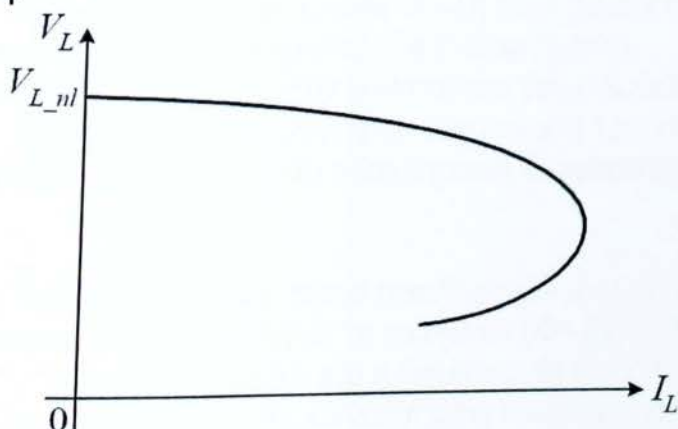


Αυτόνομη λειτουργία της τριφασικής επαγωγικής γεννήτριας, με τη σύνδεση πυκνωτών για την παροχή της άεργου ισχύος



Καθορισμός της τάσης εξόδου της επαγωγικής γεννήτριας, η οποία λειτουργεί αυτόνομα, από την τομή της καμπύλης μαγνήτισης και της χαρακτηριστικής τάσης-ρεύματος των πυκνωτών

Η χαρακτηριστική φορτίου εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα, όταν η γεννήτρια τροφοδοτεί ένα επαγωγικό φορτίο. Η απότομη πτώση της τάσης εξόδου με την αύξηση του ρεύματος φορτίου, οφείλεται στην αύξηση της άεργου ισχύος που απαιτεί το φορτίο. Την άεργο ισχύ παρέχουν αποκλειστικά οι πυκνωτές C , με σταθερή τιμή. Εκτός από τη μεταβολή της τάσης εξόδου με το φορτίο, μεταβάλλεται και η ταχύτητα του κινητήρα. Έτσι, η συχνότητα των τάσεων εξόδου δεν είναι σταθερή.



Χαρακτηριστική φορτίου της επαγωγικής γεννήτριας, όταν τροφοδοτεί ένα επαγωγικό φορτίο με σταθερό συντελεστή ισχύος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ Matlab/Simulink

Το Simulink είναι τμήμα του πακέτου λογισμικού Matlab που επικεντρώνεται στην προσομοίωση συνεχών συστημάτων. Είναι ένας ψηφιακός προσομοιωτής που βασίζεται όμως στις αρχές της αναλογικής προσομοίωσης.

Η αναπαράσταση συνεχών συστημάτων με τη βοήθειά της αναλογικής προσομοίωσης είναι πιο απλή και κατανοητή για το χρήστη.

Ο αναλογικός υπολογισμός συνίσταται στην αναπαράσταση των μεγεθών ενός συστήματος με τάσεις που αναλογούν στις μαθηματικές τιμές των μεγεθών αυτών. Η όλη ιδέα βασίζεται στις δυνατότητες που προσφέρουν ηλεκτρονικά εξαρτήματα, κυρίως οι τελεστικοί ενισχυτές, στην υλοποίηση θεμελιωδών μαθηματικών πράξεων. Είναι η μοντέρνα υλοποίηση του «διαφορικού αναλυτή», δηλαδή ενός αυτόματου ολοκληρωτή διαφορικών εξισώσεων.

Οι βασικές πράξεις στον αναλογικό υπολογισμό είναι η άθροιση, ο πολλαπλασιασμός επί μια σταθερά, το γινόμενο δυο μεταβλητών, και η ολοκλήρωση. Επιπλέον υπάρχει και η δημιουργία σημάτων σταθερής στάθμης. Μη γραμμικές συναρτήσεις υλοποιούνται με ειδικό τρόπο σύνθεσης.

Στο Simulink το μόνο που απέμεινε είναι τα σύμβολα που λειτουργούν σαν διασύνδεση. Η εσωτερική αναπαράσταση και όλες οι πράξεις γίνονται σε καθαρά ψηφιακή βάση. Διατίθεται μια πληθώρα από έτοιμες συναρτήσεις, απεικονίσεις, και άλλες ευκολίες.

Στο Simulink ο χρήστης μπορεί να συνθέσει ένα σύστημα χρησιμοποιώντας τα εργαλεία τα οποία στηρίζονται στις ιδιότητες της γλώσσας προγραμματισμού G. Δηλαδή το Simulink δίνει εργαλεία σε γραφικό περιβάλλον και με ευκολία στις ρυθμίσεις μπορεί να κάνει τη σύνθεση ενός συστήματος αποφεύγοντας έτσι τις εντολές η τον προγραμματισμό που χρησιμοποιούμε στον editor του Matlab.

2.2 Εξισώσεις Τριφασικής Ασύγχρονης Μηχανής

Το μοντέλο υλοποιεί τις ακόλουθες εξισώσεις εκφρασμένες στο αυθαίρετο πλαίσιο αναφοράς dq0:

$$\begin{aligned} \psi_{qs} &= \omega_b / p [u_{qs} - (\omega / \omega_b) * \psi_{ds} + (r_s / X_{ls}) * (\psi_{mq} - \psi_{qs})] \\ \psi_{ds} &= \omega_b / p [u_{ds} - (\omega / \omega_b) * \psi_{qs} + (r_s / X_{ls}) * (\psi_{md} - \psi_{ds})] \\ \psi_{0s} &= \omega_b / p [u_{0s} - (r_s / X_{ls}) * \psi_{0s}] \\ \psi'_{qr} &= \omega_b / p [u'_{qr} - ((\omega - \omega_r) / \omega_b) * \psi'_{dr} + (r'_r / X'_{lr}) * (\psi_{mq} - \psi'_{qr})] \\ \psi'_{dr} &= \omega_b / p [u'_{dr} - ((\omega - \omega_r) / \omega_b) * \psi'_{qr} + (r'_r / X'_{lr}) * (\psi_{md} - \psi'_{dr})] \\ \psi'_{0r} &= \omega_b / p [u'_{0r} - (r'_r / X'_{lr}) * \psi'_{0r}] \end{aligned}$$

Το μοντέλο χρησιμοποιεί τις εξισώσεις για το στατό πλαίσιο αναφοράς $\omega=0$.

Η προσομοίωση με το MATLAB του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα γίνεται σε τρεις καταστάσεις λειτουργίας του κινητήρα :

- ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΧΩΡΙΣ ΦΟΡΤΙΟ
- ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΜΕ ΦΟΡΤΙΟ
- ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑ

2.3 Αρχείο Matlab

Το αρχείο m όπου έχει γραφτεί το πρόγραμμα για το μοντέλο φαίνεται παρακάτω:

```
% M-file on induction machine
% It sets up the motor parameters, initial conditions, and
% mechanical loading in the MATLAB workspace for simulation,
% and plots the results of the simulation.
% Load three-phase induction motor parameters
p1hp % load 1 hp motor parameters from p1hp.m
% initialize to start from standstill with machine unexcited
Psiqso = 0; % stator q-axis total flux linkage
Psiqro = 0; % rotor q-axis total flux linkage
Psidso = 0; % stator d-axis total flux linkage
Psidro = 0; % rotor d-axis total flux linkage
wrbywbo = 0; % pu rotor speed
tstop = 2; % use 2 sec simultion time for Fig. in text

% Transfer to keyboard for simulation
disp('Perform simulation then type return for plots');
keyboard
clf;
subplot(7,1,1)
```



```
plot(y(:,1),y(:,2),'-')
ylabel('vag in V')
title('stator phase to neutral voltage')
subplot(7,1,2)
plot(y(:,1),y(:,3),'-')
ylabel('ias in A')
axis([-inf inf -25 25]);
title('stator current')
subplot(7,1,3)
plot(y(:,1),y(:,5),'-')
ylabel('Tem in Nm')
title('developed torque')
subplot(7,1,4)
plot(y(:,1),y(:,4),'-')
axis([-inf inf 0 1.2]);
ylabel('wr/wb')
title('pu rotor speed')
subplot(7,1,5)
plot(y(:,1),y(:,6),'-')
ylabel('idr in A')
title('d-current')
xlabel('time in sec')
subplot(7,1,6)
plot(y(:,1),y(:,7),'-')
ylabel('v0s in V')
title('v0s voltage')
subplot(7,1,7)
plot(y(:,1),y(:,8),'-')
ylabel('i0s in A')
title('0-current')
xlabel('time in sec')
```

Το αρχείο m όπου έχει γραφτεί για τα στοιχεία του κινητήρα φαίνεται παρακάτω:

% Parameters of machine

$S_b = 750;$ % rating in VA

$P_{rated} = 750;$ % output power in W

$V_{rated} = 200;$ % rated line to line voltage in V

$pf = 0.8;$

$I_{rated} = S_b / (\sqrt{3} * V_{rated} * pf);$ % rated rms current

$P = 4;$ % number of poles

$f_{rated} = 60;$ % rated frequency in Hz

$\omega_b = 2 * \pi * f_{rated};$ % base electrical frequency

$\omega_e = \omega_b;$

$\omega_{bm} = 2 * \omega_b / P;$ % base mechanical frequency

$T_b = S_b / \omega_{bm};$ % base torque

$Z_b = V_{rated} * V_{rated} / S_b;$ % base impedance in ohms

$V_m = V_{rated} * \sqrt{2/3};$ % magnitude of phase voltage

$V_b = V_m;$ % base voltage

$T_{factor} = (3 * P) / (4 * \omega_b);$ % factor for torque expression

$r_s = 3.35;$ % stator wdg resistance in ohms

$x_{ls} = 6.94e-3 * \omega_b;$ % stator leakage reactance in ohms

$x_{plr} = x_{ls};$ % rotor leakage reactance

$x_m = 163.73e-3 * \omega_b;$ % stator magnetizing reactance

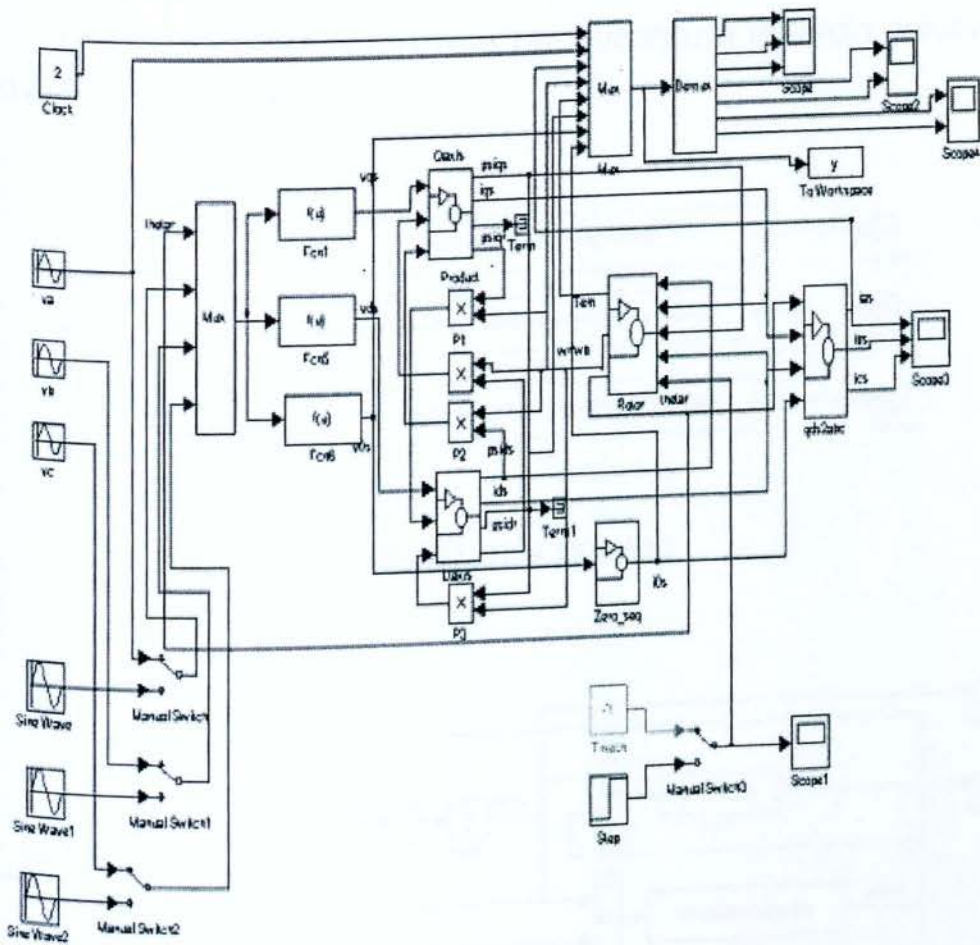
$r_{pr} = 1.99;$ % referred rotor wdg resistance in ohms

$x_M = 1 / (1/x_m + 1/x_{ls} + 1/x_{plr});$

$J = 0.1;$ % rotor inertia in kg m²

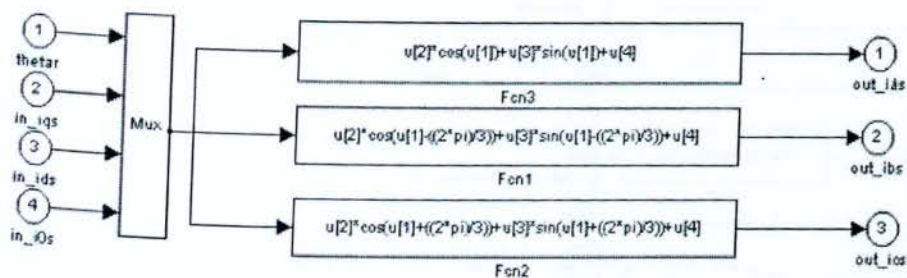
$H = J * \omega_{bm} * \omega_{bm} / (2 * S_b);$ % rotor inertia constant in secs.

$\text{Domega} = 0;$ % rotor damping coefficient

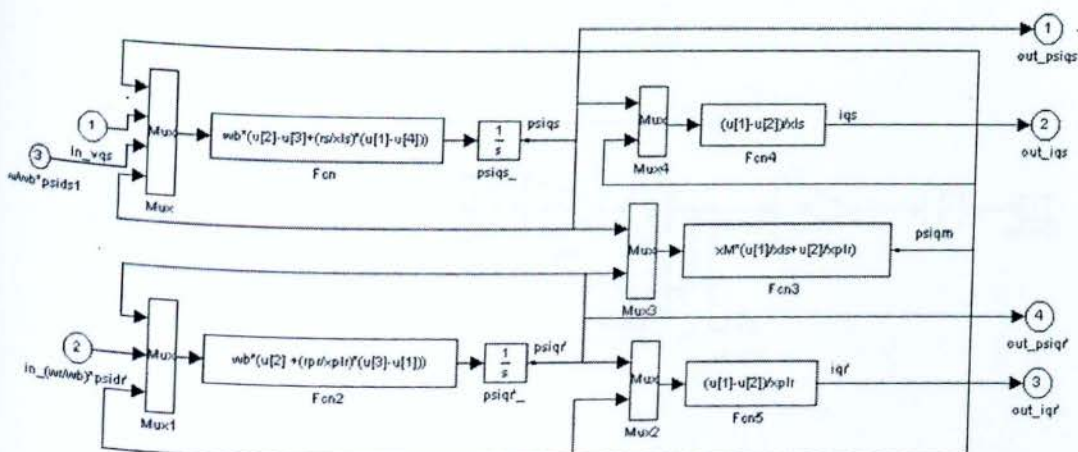


Μοντέλο προσομείωσης ασύγχρονου κινητήρα

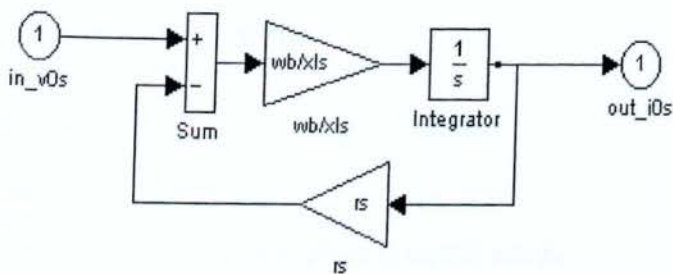
Το μοντέλο περιέχει μπλοκ με υποσυστήματα τα οποία φαίνονται αναλυτικά παρακάτω.



SUBSYSTEM QD0-ABC



SUBSYSTEM Q-AXIS



SUBSYSTEM ZEPO EQ

2.6 Γραφικές Παραστάσεις

Η μελέτη του κινητήρα γίνεται σε τρεις καταστάσεις λειτουργίας

- Εκκίνηση κινητήρα χωρίς φορτίο
- Εκκίνηση κινητήρα με φορτίο
- Βραχυκύκλωμα

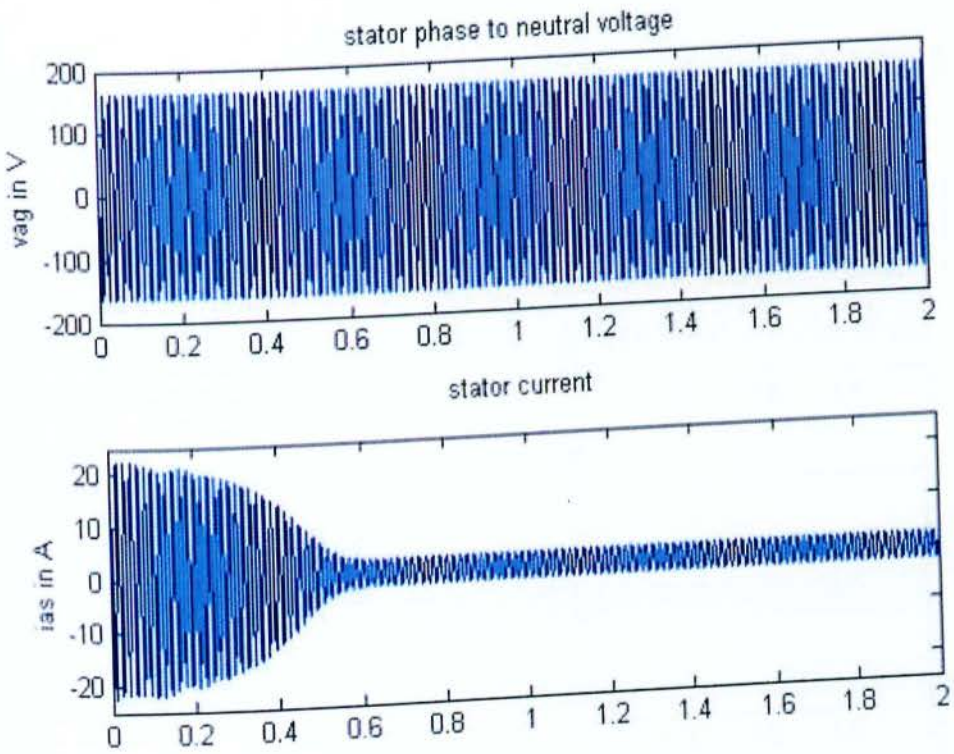
καταγράφοντας ταυτόχρονα την μεταβολή πέντε μεγεθών συναρτήσει του χρόνου . Τα πέντε αυτά μεγέθη είναι:

- V_{as} φασική τάση στο ανά μονάδα σύστημα του στάτη
- i_{as} ρεύμα του στάτη
- ω_m/ω_b
- T_{em} ηλεκτρομαγνητική ροπή
- i_{dr} ρεύμα στο dq0 σύστημα

Στην κατάσταση βραχυκύκλωσης παρατηρούμε άλλα δύο μεγέθη τα οποία παρουσιάζονται λόγω ασυμμετρίας φορτίου

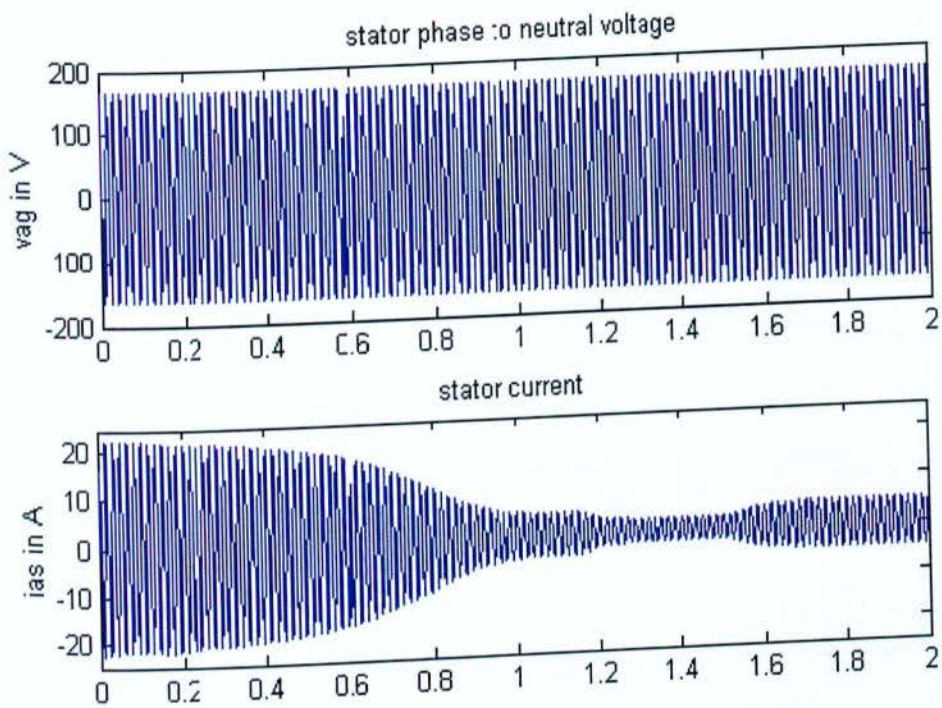
- v_0 s τάση 0 στο dq0 σύστημα
- i_0 s ρεύμα 0 στο dq0 σύστημα

2.6.1 Εκκίνηση Χωρίς Φορτίο



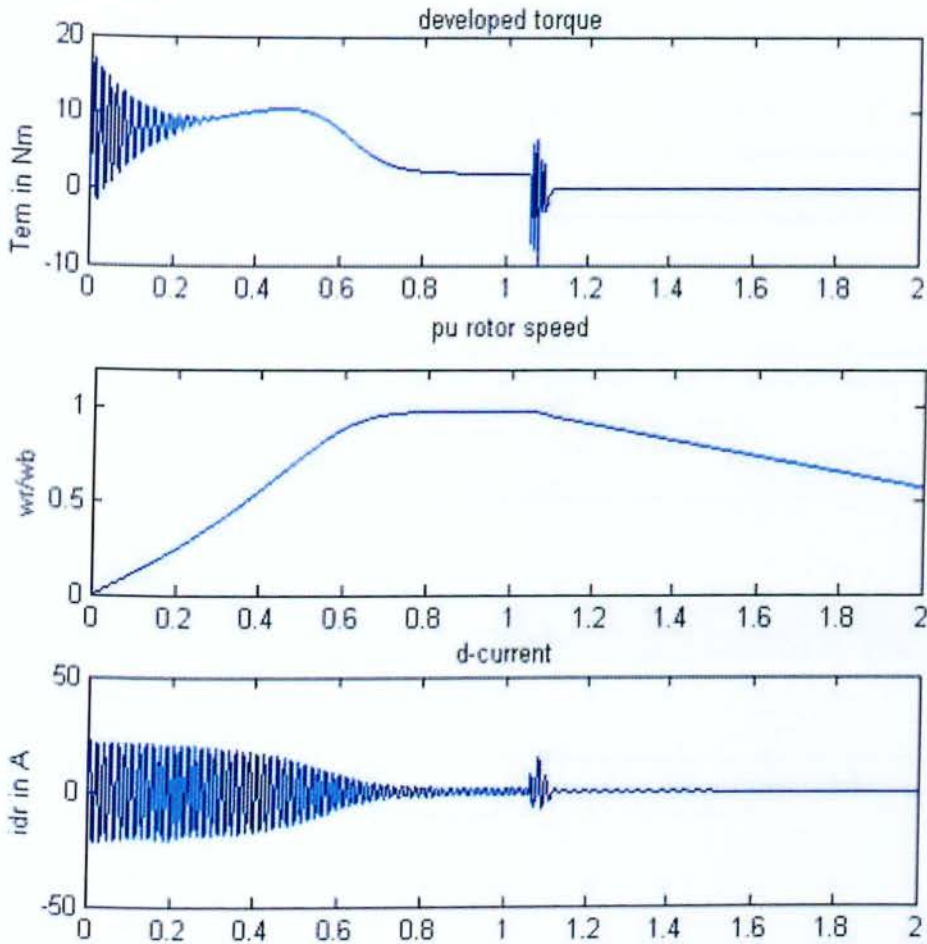
2.6.1.1 Εκκίνηση Υπό Φορτίο

Στην εκκίνηση υπό φορτίο εφαρμόζω μια βηματική μεταβολή μετά από 1,5sec στην μηχανική ροπή



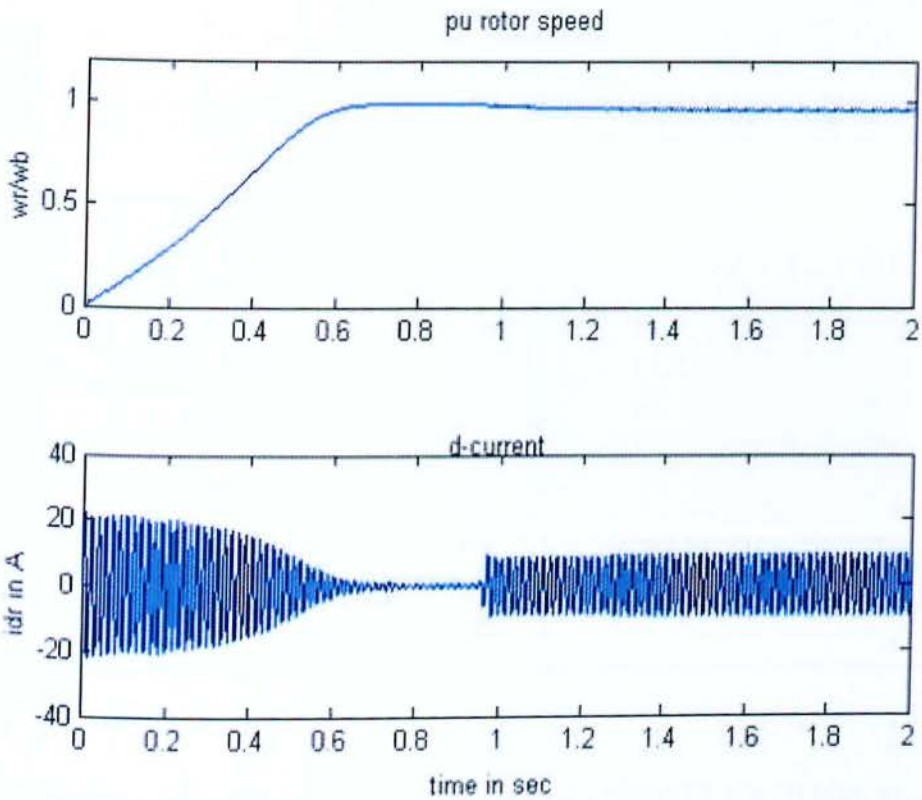
2.6.2 Τριφασικό Βραχυκύκλωμα

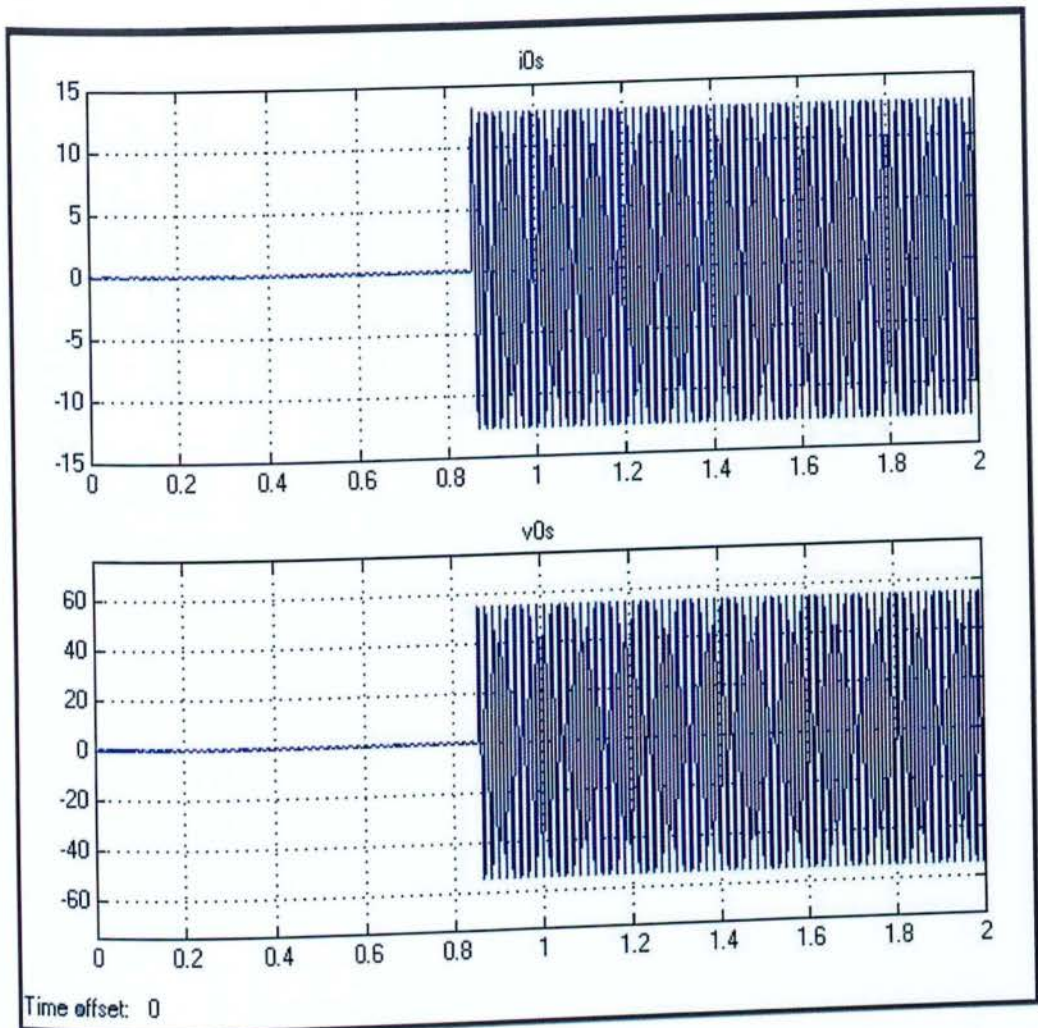
Η λειτουργία του κινητήρα είναι υπό φορτίο και τη χρονική στιγμή $t = 1,05 \text{ sec}$ εξομοιώνουμε το βραχυκύκλωμα μηδενίζοντας την τάση.



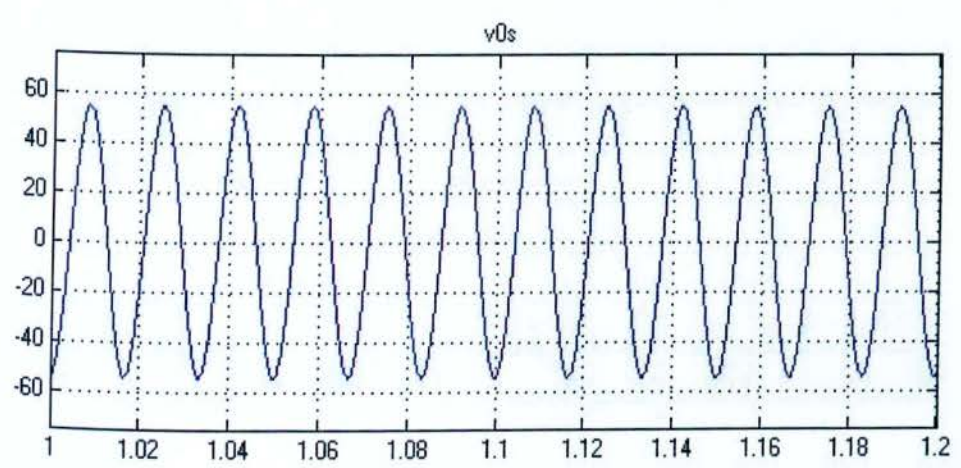
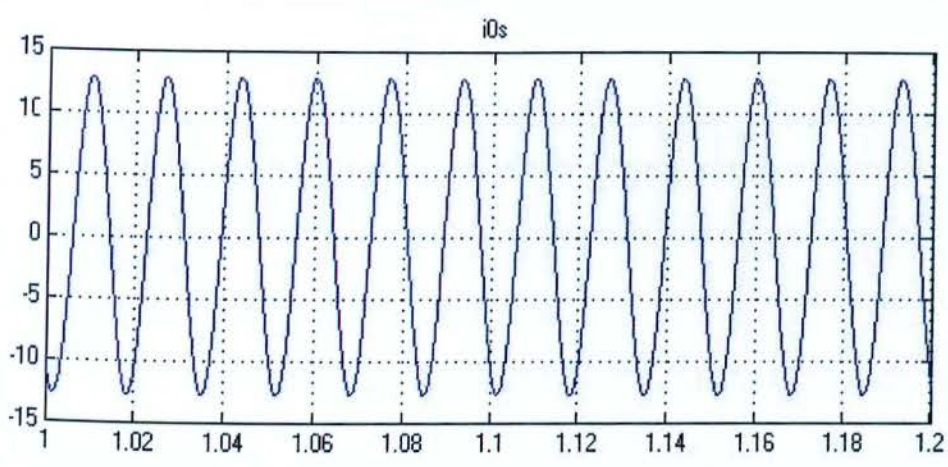
2.6.2.1 Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα

Η λειτουργία του κινητήρα είναι υπό φορτίο και τη χρονική στιγμή $t = 0,9 \text{ sec}$ εξομοιώνουμε το βραχυκύκλωμα μηδενίζοντας την τάση.

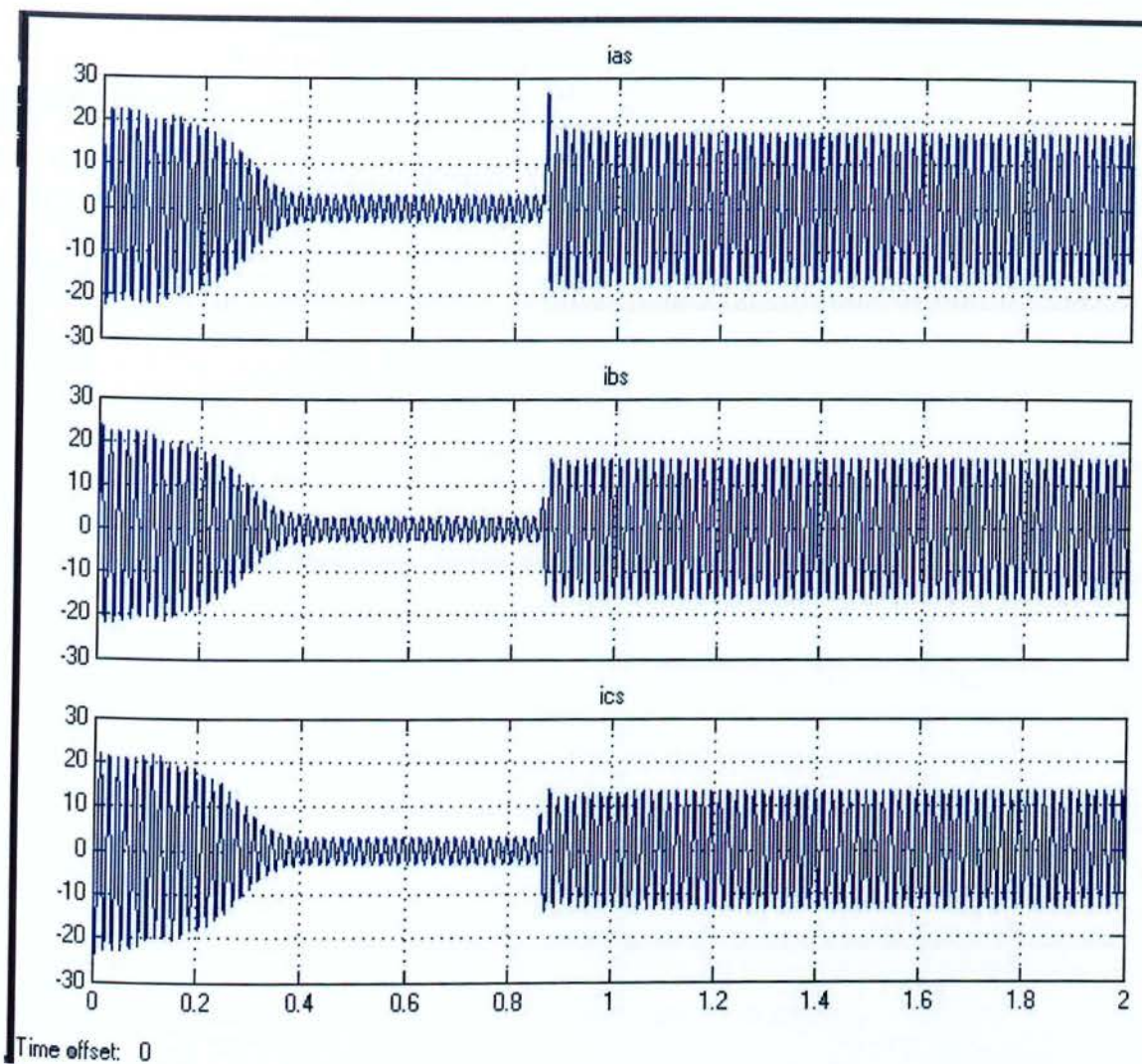




Οι παρακάτω κυματομορφές είναι μια μεγέθυνση της περιοχής του βραχυκυκλώματος στα μεγέθη v_0s και i_0s όπου λόγω της ασυμμετρίας εμφανίζεται και τάση και ρεύμα

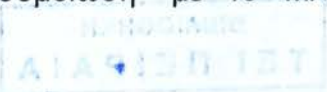


Time offset: 0



Στις παραπάνω καμπύλες φαίνεται η διαφορά φόρτισης στα ρεύματα των τυλιγμάτων του στάτη

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Stephen J. Chapman, Ηλεκτρικές Μηχανές DC-AC, Εκδόσεις Τζιόλα 2003
2. Σημειώσεις Ηλεκτρικών Μηχανών II Τμήματος Ηλεκτρολογίας ΤΕΙ Πειραιά 2007
3. Ι. Α. Τεγόπουλος, "Ηλεκτρικές Μηχανές", Μέρος Β, Εκδόσεις Συμμετρία
4. Καραϊσάς Πέτρος "Προσομοίωση με το MATLAB Του Ασύγχρονου Τριφασικού Κινητήρα"

5. The Math Works. "SimPower Systems User's Guide"
6. Nyein Nyein Soe, Thet Thet Han Yee and Soe Sandar "Dynamic Modeling and Simulation of Three phase Small Power Induction Motor"
7. Ευάγγελος Β. Χατζίκος Matlab 7 Για Μηχανικούς