

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: Δοκιμή σε ασύγχρονο κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα EDUTEC με βάση το πρότυπο IEC 60034-28

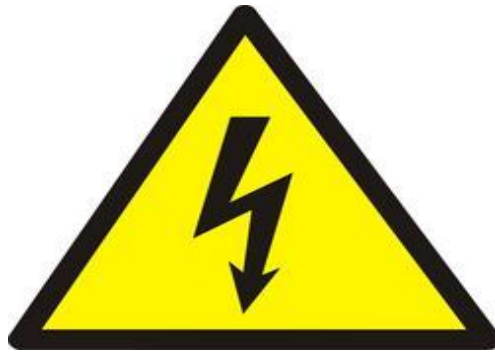
ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: Γαλιατσάτος Κωνσταντίνος

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Χαραλαμπάκος Βασίλης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	σελ.3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΚΛΩΒΟΥ	
1.1 Ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος	σελ.6
1.2 Σύγχρονες και ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές	σελ.7
1.3 Ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές	
1.3.1 Γενικά χαρακτηριστικά	σελ.7
1.3.2 Εφαρμογές Ασύγχρονων Ηλεκτρικών Μηχανών	σελ.10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
2.1 Η ανάπτυξη της επαγόμενης ροπής στους επαγωγικούς κινητήρες	σελ.12
2.2 Η ισχύς στους επαγωγικούς κινητήρες	σελ.14
2.3 Διάγραμμα ροής ισχύος	σελ.18
2.4 Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα	σελ.19
2.5 Το Ισοδύναμο Κύκλωμα του Μετασχηματιστή στο Ισοδύναμο Κύκλωμα του Επαγωγικού Κινητήρα	σελ.20
2.6 Ισοδύναμο Κύκλωμα του Δρομέα του Επαγωγικού Κινητήρα	σελ.21
2.7 Το Τελικό Ισοδύναμο Κύκλωμα	σελ.24
2.8 Εξαγωγή της σχέσης για την επαγόμενη ροπή ενός επαγωγικού κινητήρα ...	σελ.25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
Πειραματική διαδικασία.....	σελ.31
3.1 Προσδιορισμός των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος	σελ.32
3.2 Υπολογισμός απωλειών σιδήρου και μηχανικές απώλειες	σελ.34
3.3 Εύρεση του διαγράμματος ροπής-ταχύτητας	σελ.35
3.4 Εύρεση απωλειών χαλκού στον στάτη και στον ρότορα	σελ.41
3.5 Υπολογισμός ισχύος εισόδου και βαθμός απόδοσης	σελ.41
Βιβλιογραφία	σελ.42

ΕΙΣΑΓΩΓΗ



Τα τελευταία χρόνια οι διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες της σύγχρονης βιομηχανίας για όλο και πιο πολύπλοκες, ολοκληρωμένες και κεντρικά ελεγχόμενες διεργασίες οδήγησαν τη βιομηχανική επανάσταση σε μια νέα φάση. Κεντρική θέση στην εξέλιξη αυτή κατέχει ο τομέας της ηλεκτροκίνησης, ο οποίος παλιότερα είχε εφαρμογή σε λίγες μόνο περιοχές της τεχνολογίας, όπως τις εργαλειομηχανές και τη μεταλλουργία. Οι παντός είδους αυτοματισμοί λοιπόν που χρησιμοποιούνται όλο και πιο πολύ στις βιομηχανίες οδήγησαν σε σημαντική αύξηση των χρησιμοποιούμενων συστημάτων κίνησης, η οποία με την σειρά της διευκόλυνε την ευρεία διάδοση της χρήσης ηλεκτροκίνησης στην καθημερινή ζωή.



Η προτίμηση των ηλεκτροκινητήριων συστημάτων οφείλεται στα πλεονεκτήματά του, σε σχέση με άλλα συστήματα κίνησης (μηχανικά, υδραυλικά κτλ.). Η επιλογή αυτή οφείλεται στο ότι εμφανίζουν συγκριτικά πλεονεκτήματα και τα σημαντικότερα είναι τα εξής:

1. Έχουν υψηλή απόδοση και δυνατότητα προσωρινής υπερφόρτισης.
2. Δεν εκπέμπουν καυσαέρια.
3. Έχουν αθόρυβη λειτουργία.
4. Ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας μπορούν να απορροφούν ή να παρέχουν ενέργεια στην πηγή τροφοδοσίας.
5. Έχουν ευρεία περιοχή ισχύος: από ισχύ μικρότερη του 1W (ηλεκτρονικά ρολόγια) μέχρι ισχύ μεγαλύτερη των 100MW (αντλίες σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς).
6. Επίσης, ευρεία περιοχή ταχυτήτων: από μηδέν μέχρι 100.000ΣΑΛ (φυγόκεντρος) και ευρεία περιοχή ροπών από μηδέν μέχρι 1.000.000 Nm (για μύλους τσιμέντου).

7. Προσαρμόζονται σε διάφορες λειτουργικές καταστάσεις όπως κλειστά, χωρίς αερισμό, υγρά, εκρηκτικά, ραδιενεργά περιβάλλοντα.

Οι χαρακτηριστικές μόνιμης κατάστασης μπορούν να αλλάζουν, εάν χρειάζεται και έχουν καλή δυναμική επίδοση, η οποία επιτυγχάνεται με ηλεκτρονικό έλεγχο.

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

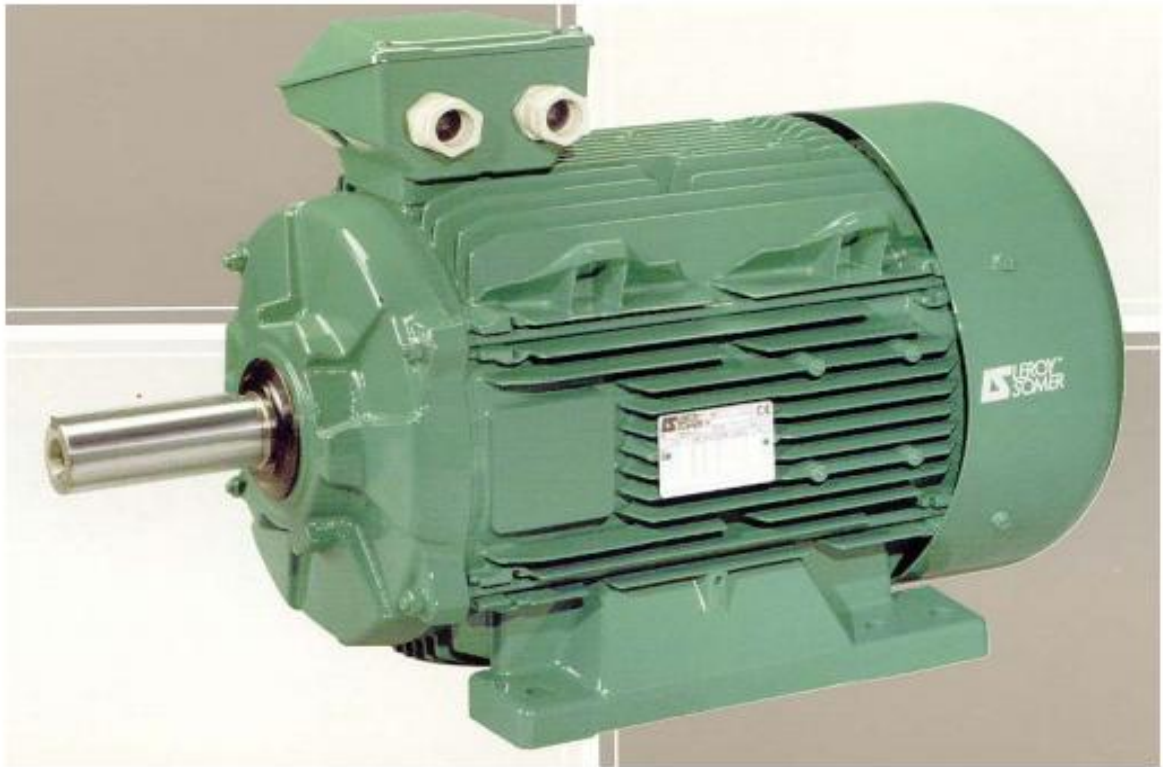


Οι επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ως κινητήρες, εξαιτίας των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν όταν λειτουργούν ως γεννήτριες. Για το λόγο αυτό οι επαγωγικές μηχανές αναφέρονται ως επαγωγικοί κινητήρες.

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

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

Οι κινητήρες αυτοί, αν και έχουν μεγαλύτερο κόστος από τους τυπικούς επαγωγικούς κινητήρες, αποκτούν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς. Μια τυπική μορφή ενός επαγωγικού κινητήρα υψηλής απόδοσης εικονίζεται παρακάτω:

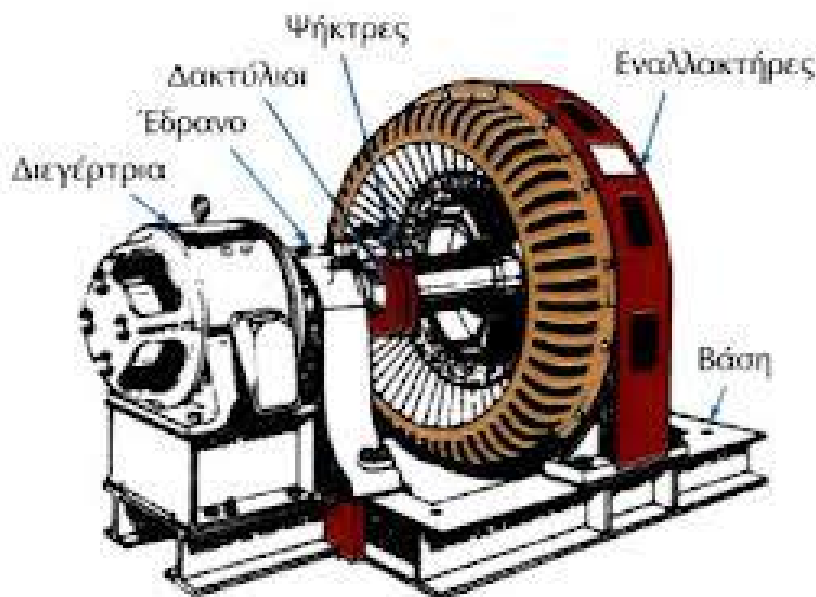


Σχ. 5.1 Τυπική εξωτερική δομή ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα υψηλής απόδοσης.
Ο εικονιζόμενος κινητήρας είναι κατασκευής της εταιρείας *Leroy-Somer*

ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ
ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΚΛΩΒΟΥ

1.1 Ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος

Η ηλεκτρική μηχανή της μελέτης μας είναι ένας ασύγχρονος (ή επαγωγικός) κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού (ή δρομέα). Μια τέτοια μηχανή εντάσσεται αρχικά στη γενική κατηγορία των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι γεννήτριες που μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική, και κινητήρες που μετατρέπουν εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Τα ρεύματα και οι τάσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό των μηχανών αυτών είναι εναλλασσόμενα. Βέβαια η τελευταία αυτή τους ιδιότητα δεν αποτελεί αποκλειστικό χαρακτηριστικό τους, μιας και η ανάπτυξη ρευμάτων και τάσεων, στο εσωτερικό της μηχανής, αποκλειστικά υπό εναλλασσόμενη μορφή, αποτελεί χαρακτηριστικό και των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Η ειδοποιός διαφορά όμως των μηχανών συνεχούς ρεύματος, από αυτές του εναλλασσόμενου, έγκειται στο γεγονός ότι οι πρώτες έχουν συνεχή έξοδο και είσοδο, λόγω του μηχανισμού μετατροπής των εσωτερικών εναλλασσόμενων τάσεων τους σε συνεχείς (μηχανές με συλλέκτη). Στις ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος το τύλιγμα του οπλισμού (armature winding) βρίσκεται, σε αντίθεση με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος, σχεδόν πάντα τοποθετημένο στο στάτη, ενώ το τύλιγμα διέγερσης τοποθετείται στο δρομέα. Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα μιας γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος επάγει τριφασικά εναλλασσόμενα ρεύματα στο τύλιγμα οπλισμού του στάτη της. Με εντελώς ανάλογο τρόπο, αν το τύλιγμα οπλισμού του στάτη ενός κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος τροφοδοτηθεί με ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων, στο εσωτερικό του αναπτύσσεται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο επιδρώντας στο πεδίο του δρομέα παράγει ροπή στον άξονά του.



1.2 Σύγχρονες και ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές

Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις σύγχρονες μηχανές και τις ασύγχρονες ή επαγωγικές μηχανές. Η βασική διαφορά των δύο αυτών κατηγοριών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, έγκειται στον τρόπο παραγωγής του ρεύματος διεγέρσεώς τους. Στις σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές το ρεύμα διεγέρσης παράγεται από ανεξάρτητες πηγές συνεχούς ρεύματος. Αντίθετα στις ασύγχρονες το ρεύμα διεγέρσης παράγεται επαγωγικά στα τυλίγματα διεγερσής τους (αρχή λειτουργίας μετασχηματιστή). Για αυτόν ακριβώς τον λόγο οι ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές αναφέρονται συχνά και ως επαγωγικές. Όσον αφορά τις εφαρμογές των δύο παραπάνω κατηγοριών ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η συντριπτική πλειοψηφία των εφαρμογών παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος παγκοσμίως, καλύπτεται με τη χρήση σύγχρονων γεννητριών. Αντίθετα οι ασύγχρονες μηχανές συναντώνται κυρίως ως ασύγχρονοι κινητήρες, με αποτέλεσμα να βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στις ηλεκτρικές κινήσεις, στις οποίες χρησιμοποιούνται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80%. Η λειτουργία των ασύγχρονων μηχανών ως γεννητριών είναι εφικτή, αλλά λόγω σημαντικών μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν σε αυτή τους τη λειτουργία, η χρήση ασύγχρονων γεννητριών είναι σπάνια. Η υπό μελέτη μηχανή ανήκει στην κατηγορία των ασύγχρονων ή επαγωγικών μηχανών και για την ακρίβεια είναι ένας επαγωγικός κινητήρας.

1.3 Ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές

1.3.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Σε μία ασύγχρονη (επαγωγική) ηλεκτρική μηχανή η τάση του δρομέα, η οποία με τη σειρά της παράγει το ρεύμα διεγέρσης και το πεδίο του δρομέα, αναπτύσσεται εξ επαγωγής στο κύκλωμα διεγέρσης, αντί να προσφέρεται σε αυτό με κάποια ηλεκτρική σύνδεση. Το ακίνητο μέρος της επαγωγικής μηχανής είναι ο στάτης και το περιστρεφόμενο ο δρομέας. Μεταξύ των δύο αυτών τμημάτων της μηχανής υπάρχει διάκενο μεγέθους της τάξεως κλασμάτων του χιλιοστού. Μόνο σε περιπτώσεις πολύ μεγάλων κινητήρων μπορεί το μέγεθος του διακένου να φτάσει στη τάξη μερικών χιλιοστών.



- Ενεργά μέρη ασύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής

Η ασύγχρονη ηλεκτρική μηχανή αποτελείται από τα ενεργά και τα μη ενεργά μέρη. Τα ενεργά μέρη είναι οι περιελίξεις του στάτη και του δρομέα (φορείς τάσης και ρεύματος) και οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα (φορείς της μαγνητικής ροής). Οι περιελίξεις τοποθετούνται στα αυλάκια που βρίσκονται στην εσωτερική περιφέρεια του πυρήνα του στάτη και στην εξωτερική περιφέρεια του πυρήνα του δρομέα. Οι πυρήνες αποτελούνται από πυριτιούχα δυναμοελάσματα, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω δινορρευμάτων. Τα δυναμοελάσματα αυτά στοιβάζονται σε πυρήνες που συμπιέζονται σε πρέσες και τοποθετούνται σφιχτά στο περίβλημα της μηχανής. Μια επαγωγική μηχανή έχει στάτη όμοιο με αυτόν μιας συνεχούς μηχανής. Διαφέρει όμως σημαντικά στη δομή του δρομέα της. Στα αυλάκια του στάτη τοποθετείται τριφασική περιέλιξη, τα έξι άκρα της οποίας καταλήγουν στους ισάριθμους ακροδέκτες του κιβωτίου άκρων.

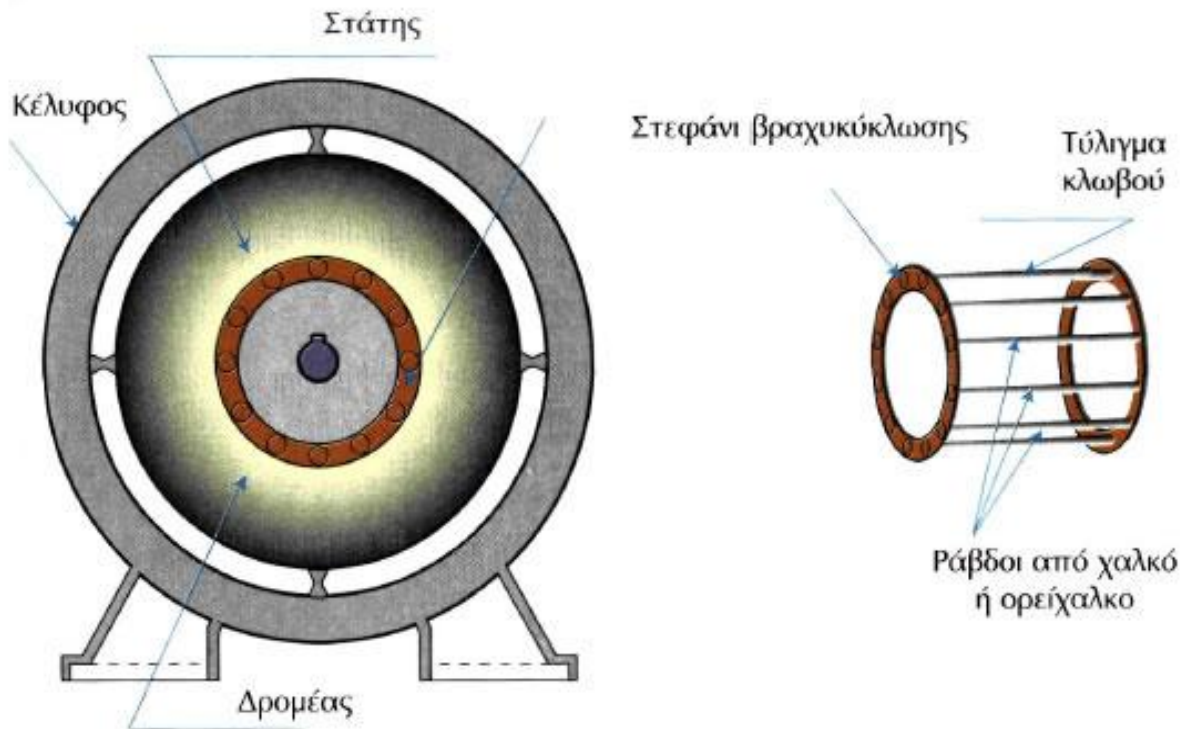
- Δρομέας ασύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής

Οι δρομείς που τοποθετούνται στο εσωτερικό του στάτη μιας επαγωγικής μηχανής είναι δύο τύπων: δρομείς βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel-cage rotor) και δακτυλιοφόροι δρομείς (wound rotor). Με βάση αυτούς τους δύο διαφορετικούς τύπους δρομέων, οι ασύγχρονες μηχανές χωρίζονται επίσης σε δύο τύπους: στις ασύγχρονες μηχανές βραχυκυκλωμένου κλωβού ή δρομέα, και στις ασύγχρονες μηχανές δακτυλιοφόρου δρομέα. Ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού αποτελείται από μια σειρά αγωγίων ράβδων (μπάρες) τοποθετημένων χωρίς μόνωση στα αυλάκια της επιφάνειας του δρομέα και βραχυκυκλωμένων στα δυο τους άκρα μέσω μεγάλων δακτυλίων (shorting rings). Το υλικό του κλωβού είναι χαλκός ή ορείχαλκος ή χυτό αλουμίνιο. Το τελευταίο χρησιμοποιείται σε μηχανές μικρής και μέσης ισχύος, μέχρι 500 KW. Ο δεύτερος τύπος δρομέα, ο δακτυλιοφόρος, διαθέτει ολοκληρωμένο τριφασικό τυλίγμα, τοποθετημένο με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελεί το κατοπτρικό είδωλο του τυλίγματος του στάτη. Οι τρεις φάσεις του τυλίγματος συνδέονται συνήθως σε αστέρα, ενώ τα άκρα των αγωγών συνδέονται σε δακτυλίους και βραχυκυκλώνονται μέσω ψηκτρών που εφάπτονται στους δακτυλίους. Έτσι καθίσταται δυνατή η μέτρηση (στις ψήκτρες) των ρευμάτων του δρομέα, καθώς και η σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμα διέγερσης. Η τελευταία αυτή δυνατότητα δίνει το πλεονέκτημα επεξεργασίας της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας της μηχανής δακτυλιοφόρου δρομέα. Συγκριτικά λοιπόν, ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού υστερεί του δακτυλιοφόρου δρομέα στο ότι δεν προσφέρει τη δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμά του. Η έλλειψη όμως αυτή των δακτυλίων ολίσθησης και ψηκτρών στους δρομείς βραχυκυκλωμένου κλωβού, η οποία ευθύνεται και για την αδυναμία σύνδεσης εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμά τους, περιορίζει τις τριβές και τις απαιτήσεις συντήρησής τους.



- Μη ενεργά μέρη ασύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής

Τα μη ενεργά μέρη μιας ασύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής είναι το περίβλημα, ο άξονας, τα έδρανα, τα πλέγματα, ο ανεμιστήρας και άλλα εξαρτήματα στήριξης, στερέωσης και μόνωσης. Το περίβλημα αποτελείται από τον μανδύα και τα πλευρικά καλύμματα, και κατασκευάζεται, στις περισσότερες μικρές μηχανές, από αλουμίνιο. Ο μανδύας έχει διαμήκη πετυγία ψύξης για την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας.



- Τα έδρανα των ασύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών

Τα έδρανα των ασύγχρονων μηχανών είναι τοποθετημένα στις φολιές των πλευρικών καλυμμάτων, ενώ στις πολύ μεγάλες μηχανές έχουν δική τους επιδαπέδια στήριξη. Τα έδρανα του άξονα της μηχανής διακρίνονται σε έδρανα κύλισης (ρουλεμάν) και σε έδρανα ολίσθησης (κουζινέτα). Τα πρώτα πλεονεκτούν των δεύτερων στην ευκολία τοποθέτησης, στο χαμηλότερο κόστος, στις λιγότερες απώλειες και στα ελάχιστα έξοδα συντήρησης. Από την άλλη μεριά όμως τα κουζινέτα είναι πιο αθόρυβα και αντέχουν σε μεγάλες φορτίσεις, γι' αυτό προτιμούνται σε πολύ μεγάλες μηχανές, αλλά και σε μικρές όταν η μείωση του θορύβου λειτουργίας τους είναι υψηλής σημασίας. Ανάλογα με τον τρόπο έδρασης και στήριξης των ασύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών υπάρχει μια σειρά κατασκευαστικών μορφών (ή απλά κατασκευών) σύμφωνα με τις προδιαγραφές DIN IEC 34.

- Είδη προστασίας των ασύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές DIN 40050 καθορίζονται τα είδη προστασίας των ασύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών έναντι του νερού και των εξωτερικών σωμάτων. Παραδείγματα αποτελούν οι προστασίες IP23 και IP44. Η πρώτη είναι προστασία ανοιχτού τύπου, δηλαδή ο εξωτερικός αέρας εισροφάται από τον ανεμιστήρα και ψύχει άμεσα τις περιελίξεις με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται καλύτερη ψύξη. Η προστασία όμως του κινητήρα, σε αυτήν την περίπτωση, δεν είναι ικανοποιητική. Αντίθετα η IP44 είναι προστασία κλειστού τύπου, οπότε η θερμότητα απάγεται από το περίβλημα της μηχανής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ψύξη της μηχανής να μην είναι επαρκής, και να είναι απαραίτητη η αύξηση της επιφάνειας απαγωγής της θερμότητας (δηλαδή της επιφάνειας του περιβλήματος). Η αύξηση της επιφάνειας απαγωγής όμως συνεπάγεται σε αύξηση του όγκου της μηχανής. Το πλεονέκτημα ωστόσο της προστασίας IP44, το οποίο την καθιστά και πιο διαδεδομένη, είναι η εξαιρετική προστασία που εξασφαλίζει στη μηχανή από το νερό και τα εξωτερικά σώματα. Συνήθως οι μηχανές με προστασία IP44 έχουν εξωτερικό ανεμιστήρα στο ένα άκρο του άξονά τους, ο οποίος με τη βοήθεια σταθερού καλύμματος δημιουργεί ρεύμα αέρα κατά μήκος των πτερυγίων ψύξεως του μανδύα, για την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας της μηχανής.

1.3.2 Εφαρμογές Ασύγχρονων Ηλεκτρικών Μηχανών

- Επαγωγικές γεννήτριες

Μια ασύγχρονη μηχανή κατά την αυτόνομη λειτουργία της ως γεννήτρια παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα σταθεροποίησης τάσης. Επειδή στερείται ξεχωριστού κυκλώματος διέγερσης, μια τέτοια γεννήτρια δεν μπορεί να παράγει άεργο ισχύ. Στην πραγματικότητα η ίδια καταναλώνει άεργο ισχύ και γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να συνδέεται σε κάποια εξωτερική πηγή άεργης ισχύος ώστε να διατηρείται το μαγνητικό πεδίο του στάτη της. Από την ίδια εξωτερική πηγή θα πρέπει να ρυθμίζεται και η τάση στα άκρα της. Το μοναδικό πλεονέκτημα μιας επαγωγικής γεννήτριας είναι η απλότητα της κατασκευής της, μιας και δεν απαιτείται ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης, ούτε και σταθερότητα στην ταχύτητα κίνησής της. Όσο μεγαλύτερη είναι η ροπή που εφαρμόζεται στον άξονά της, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ισχύς εξόδου της. Σε αυτήν την εφαρμοζόμενη από την κινητήριο μηχανή ροπή, καθορίζεται μία μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, πάνω από την οποία η γεννήτρια επιταχύνεται επικίνδυνα. Η μέγιστη αυτή ροπή ονομάζεται ροπή αναστροφής.

Λόγω της απλής κατασκευής και του μικρού μεγέθους τους ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος, οι ασύγχρονες γεννήτριες θεωρούνται καλή επιλογή για συστήματα ανεμόμυλων, για συστήματα ανάκτησης της θερμότητας και για άλλες παρόμοιες πηγές ισχύος που συνδέονται σε υπάρχοντα συστήματα. Σε τέτοιες εφαρμογές η διόρθωση του συντελεστή ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με πυκνωτές, ενώ η τάση εξόδου της γεννήτριας μπορεί να ελέγχεται από το εξωτερικό σύστημα ισχύος. Οι επαγωγικές γεννήτριες είναι συνήθως μικρές μηχανές, ενώ τα συστήματα ελέγχου τους και η συντήρησή τους απαιτούν πολύ μικρό κόστος.

- Επαγωγικοί κινητήρες και μετατροπείς συχνότητας

Στην πλειοψηφία λοιπόν των εφαρμογών τους, οι ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές συναντώνται ως επαγωγικοί κινητήρες. Πράγματι, όπως προαναφέρθηκε, επαγωγικοί είναι οι κινητήρες που καλύπτουν την συντριπτική πλειοψηφία των αναγκών σε ηλεκτρικές κινήσεις σε όλο τον κόσμο. Άλλη μια εφαρμογή των επαγωγικών κινητήρων είναι οι επαγωγικοί μετατροπείς συχνότητας. Αυτή η εφαρμογή υπήρξε ιδιαίτερα

διαδεδομένη πριν την εισαγωγή των συσκευών οδήγησης μεταβλητής συχνότητας με ηλεκτρονικούς διακόπτες. Πρόκειται για ηλεκτρικούς επαγωγικούς κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα, των οποίων η λειτουργία βασίζεται στο γεγονός ότι για δεδομένη ηλεκτρική συχνότητα στο στάτη η συχνότητα του δρομέα είναι δυνατό να μεταβάλλεται με την ταχύτητα περιστροφής, σύμφωνα με τη σχέση:

$$f_r = f_e - \frac{n_m P}{120}$$

Όπου:

f_r = η συχνότητα του δρομέα

f_e = η ηλεκτρική συχνότητα του στάτη

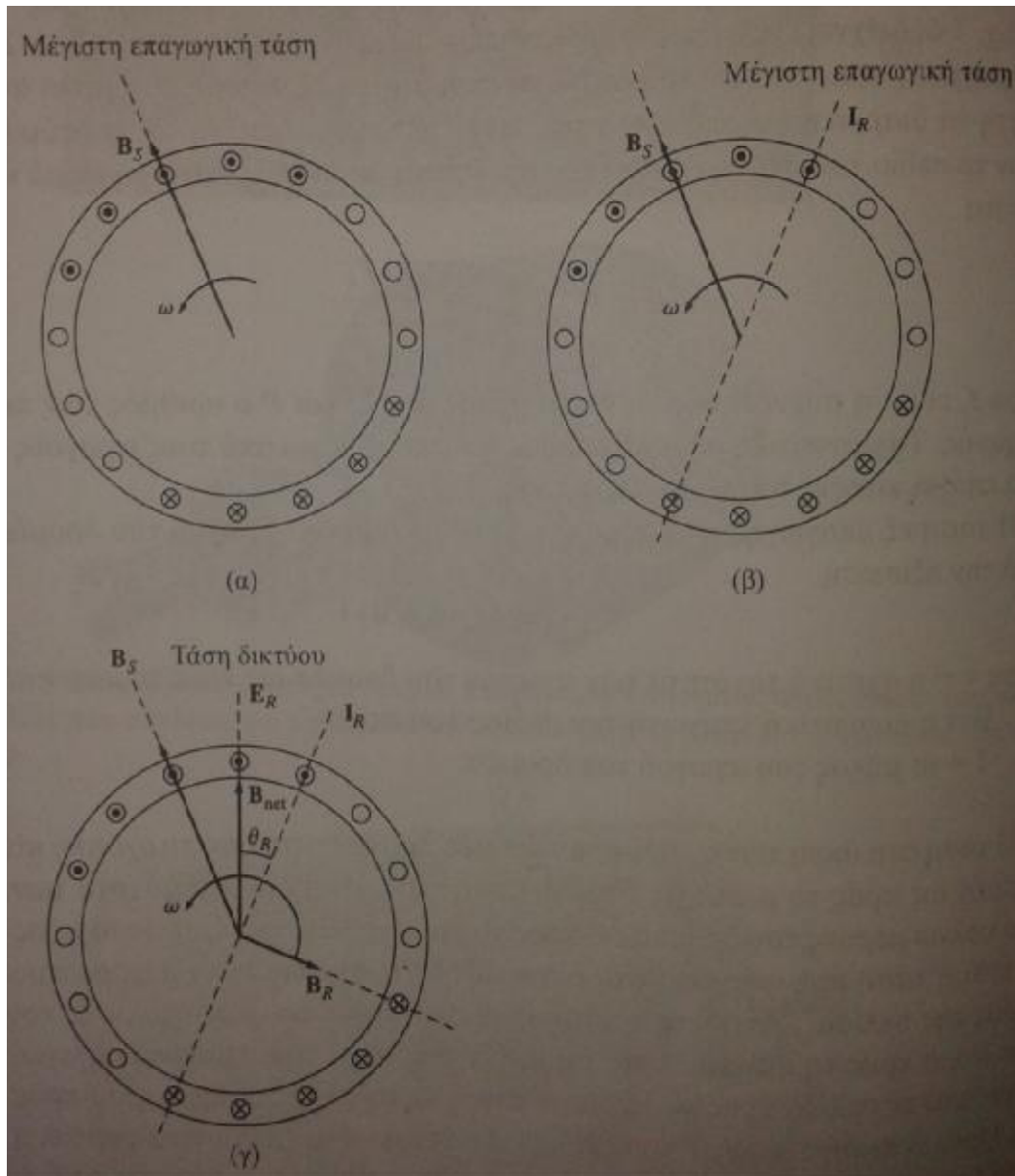
n_m = η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα

P = ο αριθμός των πόλων της μηχανής



2.1 Η ανάπτυξη της επαγόμενης ροπής στους επαγωγικούς κινητήρες

Στο σημείο αυτό θα περιγράψουμε αναλυτικά το φαινόμενο της επαγωγής ροπής στον επαγωγικό κινητήρα, με τη βοήθεια του σχήματος που ακολουθεί.



Εξαιτίας του τριφασικού συστήματος τάσεων που εφαρμόζονται στο στάτη του κινητήρα οι αγωγοί του στάτη διαρρέονται από τριφασικό σύστημα ρευμάτων. Τα ρεύματα αυτά παράγουν το πεδίο του στάτη B_s που περιστρέφεται με ανθρωπολογική φορά και με ταχύτητα:

$$n_{\text{sync}} = \frac{120f_e}{p} \quad (2.1)$$

όπου f_e είναι η συχνότητα του συστήματος σε Hz και p ο αριθμός των πόλων της μηχανής. Το μαγνητικό πεδίο B_s καθώς διέρχεται πάνω από τους αγωγούς του δρομέα επάγει κάποια τάση στα άκρα τους.

Η τάση εξ επαγωγής στα άκρα ενός συγκεκριμένου αγωγού του δρομέα θα είναι:

$$e_{\text{ind}} = (\mathbf{u} \cdot \mathbf{B}) \cdot l \quad (2.2)$$

Όπου:

u =σχετική ταχύτητα των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο

B =η μαγνητική επαγωγή του πεδίου του στάτη

l =το μήκος του αγωγού του δρομέα

Η τάση στα άκρα των αγωγών του δρομέα, το οποίο προκαλείται από τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη, επάγει ρεύμα στους αγωγούς του δρομέα. Το ρεύμα αυτό θα παρουσιάζει μια καθυστέρηση φάσης ως προς την τάση του δρομέα, μιας και οι αγωγοί του δρομέα συνθέτουν κάποιο επαγωγικό φορτίο.

Τελικά η επαγόμενη ροπή θα έχει ανθρωρολογιακή φορά, γεγονός που σημαίνει ότι ο δρομέας του κινητήρα θα επιταχύνεται κατά την ανθρωρολογιακή φορά, και θα δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{\text{ind}} = k \mathbf{B}_R \cdot \mathbf{B}_S \quad (2.3)$$

Η σταθερά k της σχέσης (2.3), προκύπτει από την έκφραση της ροπής σε αγωγίμο πλαίσιο:

$$\tau_{\text{ind}} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{H}_R \cdot \mathbf{B}_S \quad (2.4)$$

όπου K είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής. Επειδή η μαγνητική ένταση ισοδυναμεί με τον λόγο της αντίστοιχης μαγνητικής επαγωγής προς τη μαγνητική διαπερατότητα μ , η σχέση (2.4) γράφεται:

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{K}{\mu} \cdot \mathbf{B}_R \cdot \mathbf{B}_S \quad (2.5)$$

Θέτουμε $K/\mu = k$, και από την (2.5) εξάγεται η (2.4).

Είδαμε τη σημασία της σχετικής κίνησης του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία στην επαγωγή της τάσεως στους αγωγούς του δρομέα του κινητήρα. Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ πεδίων στάτη και δρομέα, τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση που αναπτύσσεται στο δρομέα της μηχανής. Η μεγαλύτερη σχετική κίνηση λοιπόν επιτυγχάνεται για ακίνητο δρομέα. Σ' αυτή την περίπτωση ο δρομέας ονομάζεται ακινητοποιημένος (blocked ή locked rotor) και η τάση που επάγεται στα τυλίγματά του είναι η

μέγιστη δυνατή. Η ελάχιστη τάση επάγεται στα τυλίγματα του δρομέα για ταχύτητα περιστροφής του ίση με αυτή του πεδίου του στάτη του κινητήρα, δηλαδή για μηδενική σχετική κίνηση.

- Η έννοια της ολίσθησης του δρομέα

Η σχετική κίνηση που προαναφέραμε περιγράφεται συνήθως από δύο μεγέθη: την ταχύτητα ολίσθησης και την ολίσθηση. Η ταχύτητα ολίσθησης (slip speed) ορίζεται ως η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα και δίνεται από τη σχέση:

$$n_{slip} = n_{sync} - n_m \quad (2.6)$$

Όπου:

n_{slip} = η ταχύτητα ολίσθησης της μηχανής

n_{sync} = η ταχύτητα των μαγνητικών πεδίων

n_m = η μηχανική ταχύτητα του άξονα της μηχανής

Η ολίσθηση (slip) είναι ουσιαστικά η σχετική ταχύτητα εκφρασμένη σε εκατοστιαία ή σε ανά μονάδα (per-unit) βάση και ορίζεται από τη σχέση:

$$S = \frac{n_{slip}}{n_{sync}} (100\%) \quad (2.7)$$

η οποία μπορεί να εκφραστεί και μέσω της γωνιακής ταχύτητας (rad/s):

$$S = \frac{\omega_{sync} - \omega_m}{\omega_{sync}} \quad (2.8)$$

Η τιμή της ολίσθησης κυμαίνεται μεταξύ των οριακών τιμών $s=0$, για την περίπτωση που ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, και $s=1$ για την περίπτωση που ο δρομέας είναι ακίνητος.

Τα παραπάνω μεγέθη δεν προσδιορίζουν μόνο την σχετική κίνηση πεδίων δρομέα - στάτη, αλλά και όλα τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την επαγωγική λειτουργία του κινητήρα, δηλαδή τα μεγέθη εκείνα που συνοδεύουν την περιστροφική κίνηση του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα. Τέτοια είναι η συχνότητα του δρομέα, η επαγόμενη τάση στο δρομέα, η αντίδραση του δρομέα, το ρεύμα του δρομέα κ.ά.

- Η ηλεκτρική συχνότητα του δρομέα

Η συχνότητα του δρομέα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $f_r=0$, για την περίπτωση που ο δρομέα περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, και $f_r=f_e$ για την περίπτωση ακίνητου δρομέα. Για οποιαδήποτε άλλη ενδιάμεση τιμή ταχύτητας περιστροφής του, ο δρομέας θα έχει συχνότητα που θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_r = S f_e \quad (2.9)$$

η οποία, λόγω των σχέσεων (2.1) και (2.7), δίνει:

$$f_r = \frac{p}{120} (n_{sync} - n_m) \quad (2.10)$$

2.2 Η ισχύς στους επαγωγικούς κινητήρες

- Ηλεκτρική ισχύς εισόδου του επαγωγικού κινητήρα

Η είσοδος ενός επαγωγικού κινητήρα είναι ένα τριφασικό σύστημα τάσεων και ρευμάτων. Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου του P_{in} θα έχει τη μορφή τριφασικού συστήματος τάσεων και ρευμάτων, ενώ θα δίνεται από τη σχέση:

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot V_T \cdot I_L \cdot \cos\varphi \quad (2.11)$$

Όπου:

V_T = η ονομαστική τάση του κινητήρα

I_L = το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα

$\cos\theta$ = ο συντελεστής ισχύος λειτουργίας του κινητήρα

- Μηχανική ισχύς εξόδου του επαγωγικού κινητήρα

Ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί ως στρεφόμενος μετασχηματιστής. Ενώ όμως σ' έναν κοινό μετασχηματιστή η ισχύς στο δευτερεύον τύλιγμα αποτελεί την ηλεκτρική ισχύ εξόδου, στον επαγωγικό κινητήρα δεν εμφανίζεται ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο του, καθώς το δευτερεύον τύλιγμα του επαγωγικού κινητήρα (δρομέας) είναι βραχυκυκλωμένο. Αντίθετα η ισχύς εξόδου του επαγωγικού κινητήρα είναι μηχανική.

Η μηχανική ισχύς εξόδου P_{out} του επαγωγικού κινητήρα είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με δύο τρόπους.

Ο πρώτος τρόπος προσδιορισμού της μηχανικής ισχύος εξόδου ενός επαγωγικού κινητήρα βασίζεται στη σχέση που συνδέει την μηχανική αυτή ισχύ με την ηλεκτρική ισχύ εισόδου και τις συνολικές απώλειες του κινητήρα. Έτσι αν γνωρίζουμε την ηλεκτρική ισχύ εισόδου και το σύνολο των απωλειών του κινητήρα (P_{ap}), μπορούμε να βρούμε την μηχανική ισχύ εξόδου από τη διαφορά

των δύο παραπάνω μεγεθών, δηλαδή:

$$P_{out} = P_{in} - P_{ap} \quad (2.12)$$

Ο δεύτερος τρόπος προσδιορισμού της μηχανικής ισχύος εξόδου του επαγωγικού κινητήρα προκύπτει από τη σχέση που συνδέει την παραπάνω ισχύ με την ροπή που ασκείται στον άξονα του δρομέα (tload) και τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (ω_m). Με τη γνώση των παραπάνω τιμών ροπής και γωνιακής ταχύτητας, βρίσκουμε την τιμή της ισχύος εξόδου του επαγωγικού κινητήρα σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$P_{out} = \tau_{load} \cdot \omega_m \quad (2.13)$$

- Απώλειες στον επαγωγικό κινητήρα

Οι κατηγορίες απωλειών σε έναν επαγωγικό κινητήρα είναι οι ακόλουθες:

1. Απώλειες χαλκού στο στάτη και στο δρομέα

2. Απώλειες πυρήνα ή απώλειες σιδήρου

3. Μηχανικές απώλειες

4. Κατανεμημένες απώλειες

• Οι απώλειες χαλκού είναι οι απώλειες θερμότητας στους αγωγούς του στάτη και του δρομέα της μηχανής.

Συγκεκριμένα οι απώλειες χαλκού στον τριφασικό στάτη (stator copper losses- SCL) ενός επαγωγικού στάτη δίνονται από τη σχέση:

$$P_{SCL} = 3 \cdot I_{st}^2 \cdot R_{st} \quad (2.14)$$

όπου:

R_{st} = η συνολική ωμική αντίσταση των αγωγών της κάθε φάσης του στάτη

I_{st} = το ρεύμα της κάθε φάσης του στάτη

Οι απώλειες χαλκού στο δρομέα (rotor copper losses- RCL) δίνονται από τη σχέση:

$$P_{RCL} = 3 \cdot I_R^2 \cdot R_R = S \cdot P_{AG} = \frac{s}{1-s} \cdot P_{conv} \quad (2.15)$$

όπου:

R_R = η συνολική ωμική αντίσταση των αγωγών της κάθε φάσης του δρομέα

I_R = το ρεύμα της κάθε φάσης του δρομέα

s = η ολίσθηση

P_{AG} = η ισχύς του διακένου

P_{conv} = η μετατρεπόμενη μηχανική ισχύς

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

• Οι απώλειες πυρήνα P_{core} (ή αλλιώς σιδήρου) οφείλονται στα φαινόμενα υστέρησης και

δινορρευμάτων που αναπτύσσονται στα σιδηρομαγνητικά υλικά των κινητήρων.

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

Οι απώλειες δινορρευμάτων (eddy current losses) $P_{core,e}$ αποτελούν μια ακόμα κατηγορία απωλειών προκαλούμενων από τις μεταβολές της επιβαλλόμενης μαγνητεγερτικής δύναμης σ' έναν πυρήνα. Οφείλονται στην ανάπτυξη δινορρευμάτων στον πυρήνα από τάσεις που επάγει μια χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή και είναι ουσιαστικά οι θερμικές απώλειες που καταναλώνονται στην αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα. Εξαρτώνται από τη γεωμετρία του πυρήνα, την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού του, την πυκνότητα του ρεύματος και το πάχος των δυναμοελασμάτων.

Πρακτικά ο διαχωρισμός των απωλειών πυρήνα σε απώλειες υστέρησης και απώλειες δινορρευμάτων είναι πολύ δύσκολος. Γι' αυτό το λόγο οι απώλειες υστέρησης και οι απώλειες δινορρευμάτων δεν υπολογίζονται ανεξάρτητα, αλλά δίνονται στο σύνολό τους από τη σχέση των απωλειών πυρήνα:

$$P_{core} = 3 \cdot E_1^2 \cdot G_c = \frac{3 \cdot E_1^2}{R_c} \quad (2.16)$$

όπου E_1 είναι η εσωτερική τάση του στάτη (δηλαδή η τάση που προκύπτει στο στάτη μετά την πτώση τάσης στην αντίσταση και την αντίδραση διαρροής της περιέλιξής του), και R_c και B_c η ισοδύναμη αντίσταση και αγωγιμότητα του πυρήνα αντίστοιχα.

Σύμφωνα με την τυποποίηση DIN 46400 οι απώλειες πυρήνα προσδιορίζονται για μαγνητική επαγωγή $B=1$ Tesla, συχνότητα $f=50$ Hertz και για διάφορα πάχη των δυναμοελασμάτων. Με βάση αυτήν την τυποποίηση μπορούν να βρεθούν οι απώλειες πυρήνα ανά μονάδα βάρους για οποιαδήποτε μαγνητική επαγωγή και συχνότητα σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_{core} = P_{1/50} \cdot B^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \quad (2.17)$$

Όπου:

$P_{1/50}$ = οι απώλειες πυρήνα ανά μονάδα βάρους για μαγνητική επαγωγή 1 Tesla και συχνότητα 50 Hertz, και

f = η συχνότητα λειτουργίας του κινητήρα

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

- Τέλος στις κατανεμημένες απώλειες P_{stray} περιλαμβάνονται όλες οι απώλειες που δεν μπορούν να υπολογιστούν σε καμία από τις προηγούμενες κατηγορίες και συνήθως οφείλονται στην αύξηση της μαγνητικής ροής σκέδασης κατά την αύξηση φορτίου και στις υψίσυχνες διακυμάνσεις της ροής αυτής (οι

διακυμάνσεις της ροής προέρχονται από την παραμόρφωση της ημιτονοειδούς ιδανικά κατανομής της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο, λόγω της κατανομής των αγωγών στα αυλάκια). Τέτοιες μη υπολογίσιμες απώλειες μπορεί να είναι:

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

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

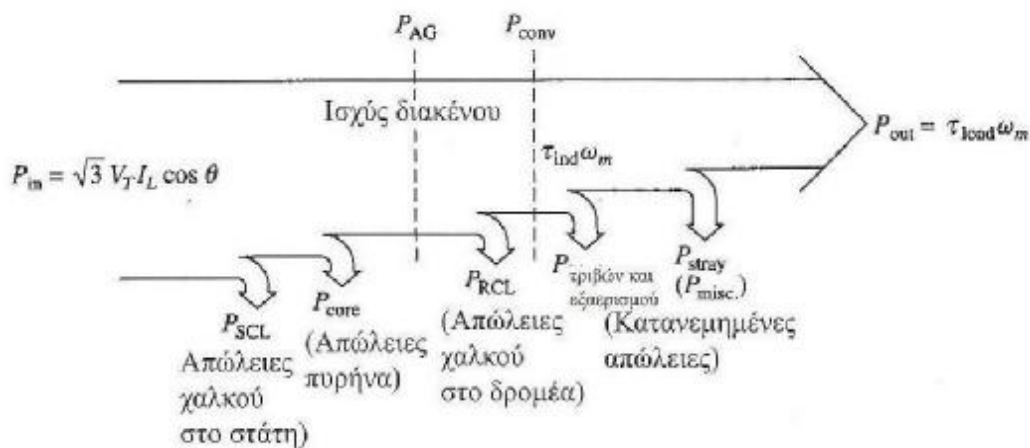
Η τιμή τους προσδιορίζεται συμβατικά ως το 1% επί της ισχύος εξόδου του κινητήρα κατά τη λειτουργία με πλήρες φορτίο.

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

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

2.3 Διάγραμμα ροής ισχύος

Η σχέση ανάμεσα στην ηλεκτρική ισχύ εισόδου, την μηχανική ισχύ εξόδου, καθώς και τις επιμέρους απώλειες του επαγωγικού κινητήρα αποδίδεται σχηματικά με το διάγραμμα ροής ισχύος



Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής ο κινητήρας τροφοδοτείται αρχικά με την ηλεκτρική ισχύ P_{in} . Οι πρώτες απώλειες της ισχύος εισόδου, εμφανίζονται στο τύλιγμα του στάτη του κινητήρα και είναι οι απώλειες χαλκού του στάτη. Στη συνέχεια χάνεται κάποιο ποσό ισχύος με την μορφή απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων στο στάτη (απώλειες πυρήνα). Η ισχύς που απομένει μεταφέρεται στο δρομέα του κινητήρα διαμέσου του διακένου, και γι' αυτό το λόγο ονομάζεται ισχύς διακένου (air-gap power) P_{AG} της

μηχανής. Ένα μέρος της ισχύος διακένου, δηλαδή της ισχύος που μεταφέρεται μέσω του διακένου στο δρομέα, χάνεται με τη μορφή θερμικών απωλειών στους αγωγούς του δρομέα (απώλειες χαλκού δρομέα).

Σε αυτό το σημείο, μετά δηλαδή από τις θερμικές απώλειες του δρομέα, η ισχύς που απομένει μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική (P_{conv}). Η ισχύς αυτή, που μερικές φορές ονομάζεται αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς, δίνεται από τις σχέσεις:

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \quad (2.18)$$

$$P_{conv} = \tau_{ind} \cdot \omega_m \quad (2.19)$$

όπου τ_{ind} είναι η ροπή που παράγεται κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος σε μηχανική. Αυτή η ροπή διαφέρει από εκείνη που είναι πραγματικά αξιοποιήσιμη στην έξοδο του κινητήρα, γεγονός που φαίνεται άλλωστε και από το διάγραμμα ροής ισχύος.

Πράγματι η P_{conv} μειώνεται από τις απώλειες τριβών και εξαιρισμού, δηλαδή τις μηχανικές απώλειες του κινητήρα (PF&W), ενώ στο τέλος αφαιρούνται και οι κατανεμημένες απώλειες (P_{stray}). Το ποσό της μηχανικής ισχύος που απομένει αποτελεί την αξιοποιήσιμη μηχανική ισχύ εξόδου της μηχανής (P_{out}).

Λόγω της φύσης τους, οι απώλειες πυρήνα τοποθετούνται στο διάγραμμα ροής ισχύος σχετικά αυθαίρετα. Στην πραγματικότητα οι συνολικές απώλειες του πυρήνα δεν προέρχονται μόνο από το κύκλωμα του στάτη (όπως υποδηλώνεται από το συγκεκριμένο διάγραμμα), αλλά προέρχονται και από το κύκλωμα του δρομέα. Θα μπορούσαν λοιπόν να τοποθετηθούν στο διάγραμμα μετά τις απώλειες χαλκού του δρομέα.

Ο λόγος για τον οποίο σ' ένα διάγραμμα ροής ισχύος οι συνολικές απώλειες πυρήνα συνήθως τοποθετούνται στο κύκλωμα του στάτη (όπως έγινε και στο διάγραμμα του σχήματος μας), είναι ότι οι απώλειες αυτές, τις περισσότερες φορές, προέρχονται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους από το στάτη. Κι αυτό διότι τις περισσότερες φορές ο κινητήρας περιστρέφεται με ταχύτητα πολύ κοντά στην σύγχρονη και κατά συνέπεια η σχετική ταχύτητα που αναπτύσσεται ανάμεσα στα μαγνητικά πεδία είναι πολύ μικρή. Έτσι οι απώλειες πυρήνα στο δρομέα είναι πολύ μικρές συγκριτικά με τις αντίστοιχες του στάτη.

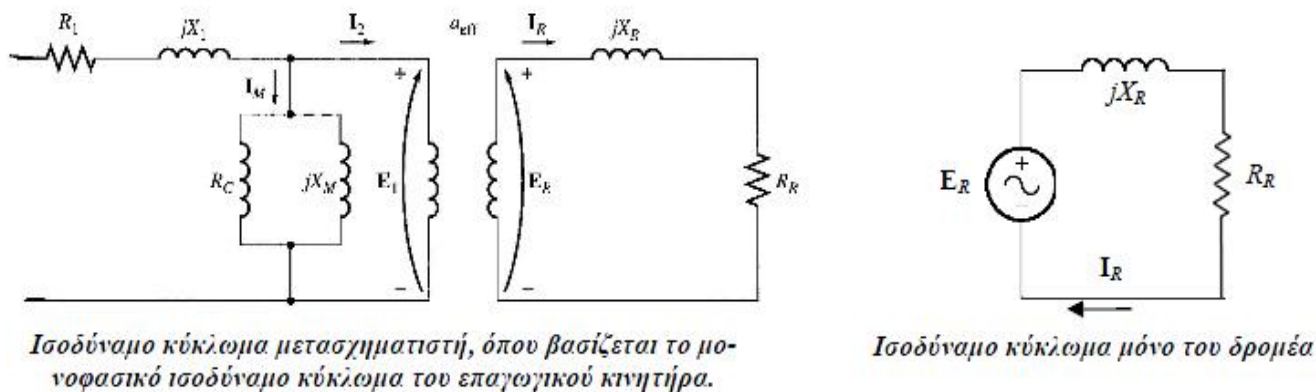
- Συντελεστής απόδοσης επαγωγικού κινητήρα

Ο συντελεστής απόδοσης ενός επαγωγικού κινητήρα είναι ίσος με το λόγο της ωφέλιμης μηχανικής ισχύος εξόδου του κινητήρα προς την ηλεκτρική ισχύ εισόδου του:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.20)$$

2.4 Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα

Στο σχήμα παρακάτω απεικονίζεται το ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή, όπου βασίζεται το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, και στα δεξιά το ισοδύναμο κύκλωμα μόνο του δρομέα:

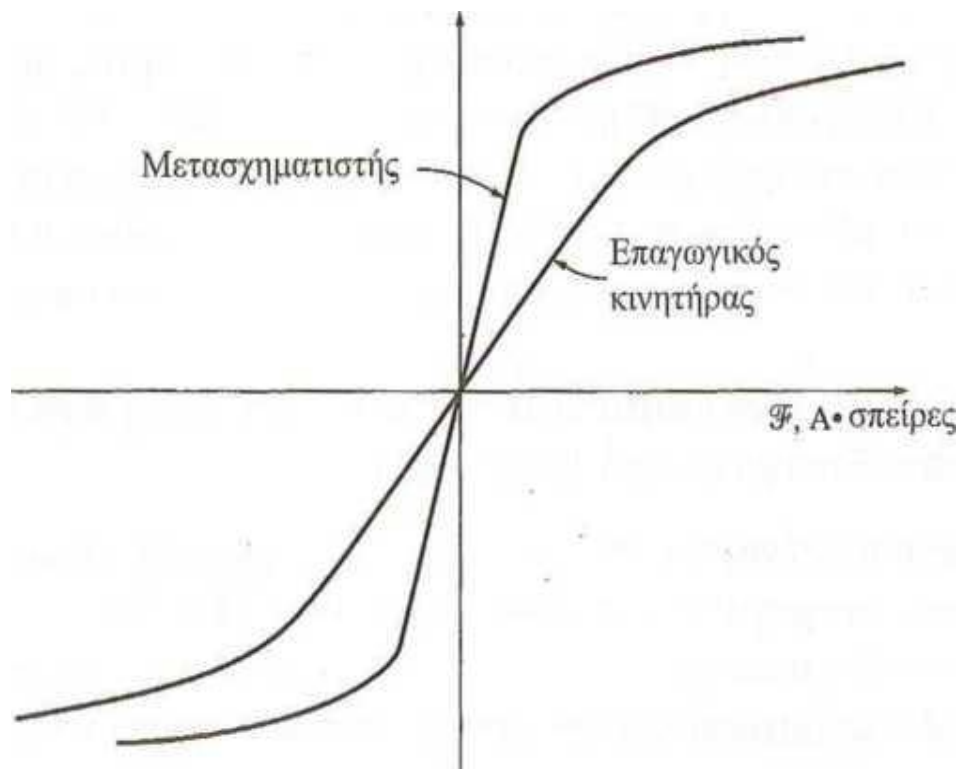


Σ. 1

Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα είναι δυνατό να εξαχθεί, αν είναι γνωστή η λειτουργία των μετασχηματιστών και οι κανόνες που διέπουν τη μεταβολή της συχνότητας στο δρομέα με τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής ενός επαγωγικού κινητήρα. Εδώ, η ανάπτυξη του ισοδύναμου κυκλώματος ενός επαγωγικού κινητήρα ξεκινά με το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή και κατόπιν λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της συχνότητας στο δρομέα και κάποια άλλα παραπλήσια φαινόμενα.

2.5 Το Ισοδύναμο Κύκλωμα του Μετασχηματιστή στο Ισοδύναμο Κύκλωμα του Επαγωγικού Κινητήρα

Επίσης, όπως σε κάθε μετασχηματιστή που διαθέτει σιδηρομαγνητικό πυρήνα, η μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής εξαρτάται από το ολοκλήρωμα της εφαρμοζόμενης τάσης E . Στο ακόλουθο σχήμα η γραφική παράσταση της μαγνητεργετικής δύναμης ως προς τη μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής (καμπύλη μαγνήτισης) συγκρίνεται με την αντίστοιχη καμπύλη ενός μετασχηματιστή ισχύος. Αποδεικνύεται καθαρά πως η κλίση της καμπύλης μαγνήτισης του επαγωγικού κινητήρα είναι πολύ λιγότερο απότομη απ' αυτή ενός καλά σχεδιασμένου μετασχηματιστή. Αυτό συμβαίνει, επειδή στη μηχανή υπάρχει κάποιο διάκενο που αυξάνει τη μαγνητική αντίσταση κατά τη διαδρομή της ροής, πράγμα που μειώνει τη σύζευξη μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Όσο μεγαλύτερη μαγνητική αντίσταση παρουσιάζει το διάκενο της μηχανής, τόσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα μαγνήτισης που απαιτείται για την εξασφάλιση μιας δεδομένης ροής. Έτσι, η αντίσταση μαγνήτισης X_M θα έχει πολύ μικρότερη τιμή ή διαφορετικά η επιδεκτικότητα B_M θα έχει πολύ μεγαλύτερη τιμή απ' αυτήν ενός συνηθισμένου μετασχηματιστή.



Σ. 2

Η εσωτερική τάση στο στάτη της μηχανής E_j συνδέεται με την τάση δευτερεύοντος E_L μέσω του μετασχηματιστή με κάποιον ενεργό λόγο μετασχηματισμού $a\{Γ$. Στον επαγωγικό κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα είναι εύκολος ο προσδιορισμός του λόγου μετασχηματισμού a .fr. Αυτός είναι ίσος με τον αριθμό των αγωγών ανά φάση του στάτη προς τον αριθμό των αγωγών ανά φάση του δρομέα επί τους συντελεστές βήματος και κατανομής. Όμως, στον κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού, του οποίου ο δρομέας δε διαθέτει συγκεκριμένο αριθμό αγωγών, είναι μάλλον δύσκολος ο ακριβής προσδιορισμός του a cf. Πάντως, και στις δύο περιπτώσεις ορίζεται ο λόγος μετασχηματισμού του κινητήρα.

Η τάση E που παράγεται στο δρομέα της μηχανής παράγει με τη σειρά της κάποιο ρεύμα στο βραχυκυκλωμένο κύκλωμα του δρομέα (δευτερεύον) της μηχανής. Οι σύνθετες αντιστάσεις πρωτεύοντος και το ρεύμα μαγνήτισης του επαγωγικού κινητήρα είναι σχεδόν όμοια μεγέθη με τα αντίστοιχα στο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή. Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα διαφέρει από το ισοδύναμο κύκλωμα πρωτεύοντος του μετασχηματιστή στις επιπτώσεις που έχει η μεταβολή της συχνότητας στο δρομέα πάνω στην τάση του δρομέα E και στις σύνθετες αντιστάσεις R_f και jX_R .

2.6 Ισοδύναμο Κύκλωμα του Δρομέα του Επαγωγικού Κινητήρα

Όταν στο στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα εφαρμοστεί μια τάση, στο δρομέα του αναπτύσσεται τάση εξ' επαγωγής. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ των πεδίων του στάτη και του δρομέα, τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση που αναπτύσσεται στο δρομέα της μηχανής.

Η μεγαλύτερη σχετική κίνηση μεταξύ των δυο παραπάνω πεδίων επιτυγχάνεται, όταν ο δρομέας της μηχανής είναι ακίνητος. Σ' αυτή την περίπτωση ο δρομέας ονομάζεται ο κινητοποιημένος (blocked ή locked rotor) και η τάση που επάγεται στα τυλίγματα του είναι η μέγιστη δυνατή. Η ελάχιστη τάση (0 V) επάγεται

στα τυλίγματα του δρομέα, όταν αυτός περιστρέφεται με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα περιστροφής του πεδίου του στάτη, όταν δηλαδή, δεν υφίσταται η σχετική κίνηση.

Για κάθε άλλη ενδιάμεση τιμή της ταχύτητας του δρομέα η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη της ολίσθησης. Έτσι, αν η επαγόμενη τάση, στην περίπτωση που ο κινητήρας λειτουργεί με ακινητοποιημένο δρομέα, συμβολιστεί με E_{R0} , η τιμή της επαγόμενης τάσης για οποιαδήποτε τιμή της ολίσθησης δίνεται από τη σχέση:

$$E_R = S E_{R0} \quad (2.21)$$

και η συχνότητα της επαγόμενης τάσης σε κάθε ολίσθηση δίνεται από την εξίσωση:

$$f_r = S f_e \quad (2.22)$$

Αυτή η τάση εμφανίζεται στο δρομέα, ο οποίος παρουσιάζει κάποια αντίσταση και κάποια αντίδραση. Η αντίσταση του δρομέα R_r είναι σταθερή, εκτός κι αν επηρεάζεται από το επιδερμικό φαινόμενο και ανεξάρτητη της ολίσθησης. Αντίθετα, η αντίδραση του δρομέα εξαρτάται με κάποιον πιο πολύπλοκο τρόπο από την ολίσθηση.

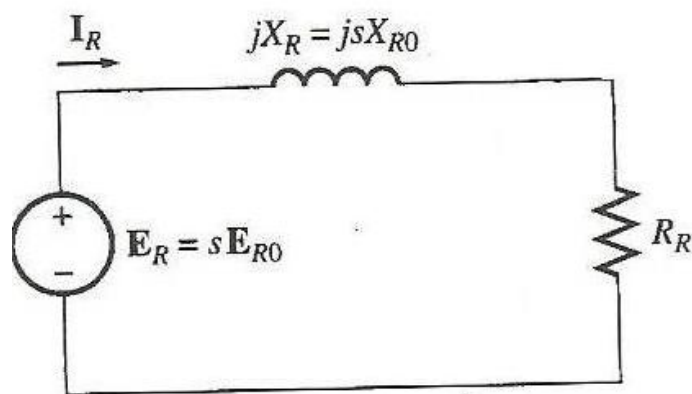
Πιο συγκεκριμένα η αντίδραση του δρομέα εξαρτάται από την αυτεπαγωγή του δρομέα και από τη συχνότητα της τάσης και του ρεύματος στο δρομέα. Αν η αυτεπαγωγή του δρομέα έχει τιμή L_R , η αντίδρασή του δίνεται από:

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R \quad (2.23)$$

Όμως από την εξ. (2.22) προκύπτει:

$$X_R = 2\pi S f_e L_R = S(2\pi f_e L_R) = S X_{R0} \quad (2.24)$$

όπου X_{R0} είναι η αντίδραση του ακινητοποιημένου δρομέα



Σ. 3

Το ισοδύναμο κύκλωμα που προκύπτει για το δρομέα της μηχανής, φαίνεται στο ανώτερο σχήμα. Το ρεύμα του δρομέα υπολογίζεται ως εξής:

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R}$$

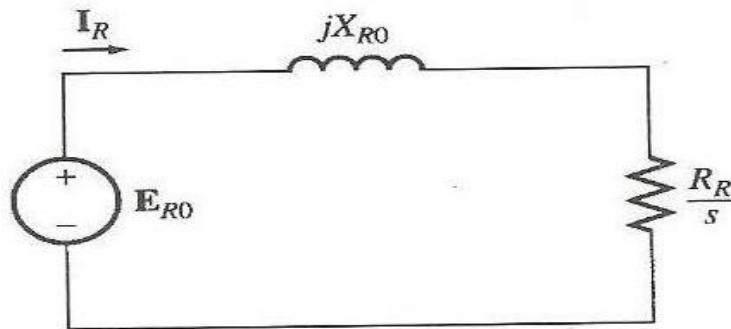
$$I_R = \frac{SE_{R0}}{R_R + jSX_{R0}} \quad (2.25)$$

$$I_R = \frac{E_{R0}}{R_R/s + jX_{R0}} \quad (2.26)$$

Η εξίσωση (2.26) δείχνει ότι όλα τα αποτελέσματα της μεταβολής στην ταχύτητα του δρομέα είναι δυνατό να εκφραστούν με μια μεταβλητή σύνθετη αντίσταση που τροφοδοτείται από μια πηγή σταθερής τάσης E_{R0} . Σύμφωνα μ' αυτή τη θεώρηση, η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του δρομέα θα είναι:

$$Z_{R,eq} = R_R/s + jX_{R0} \quad (2.27)$$

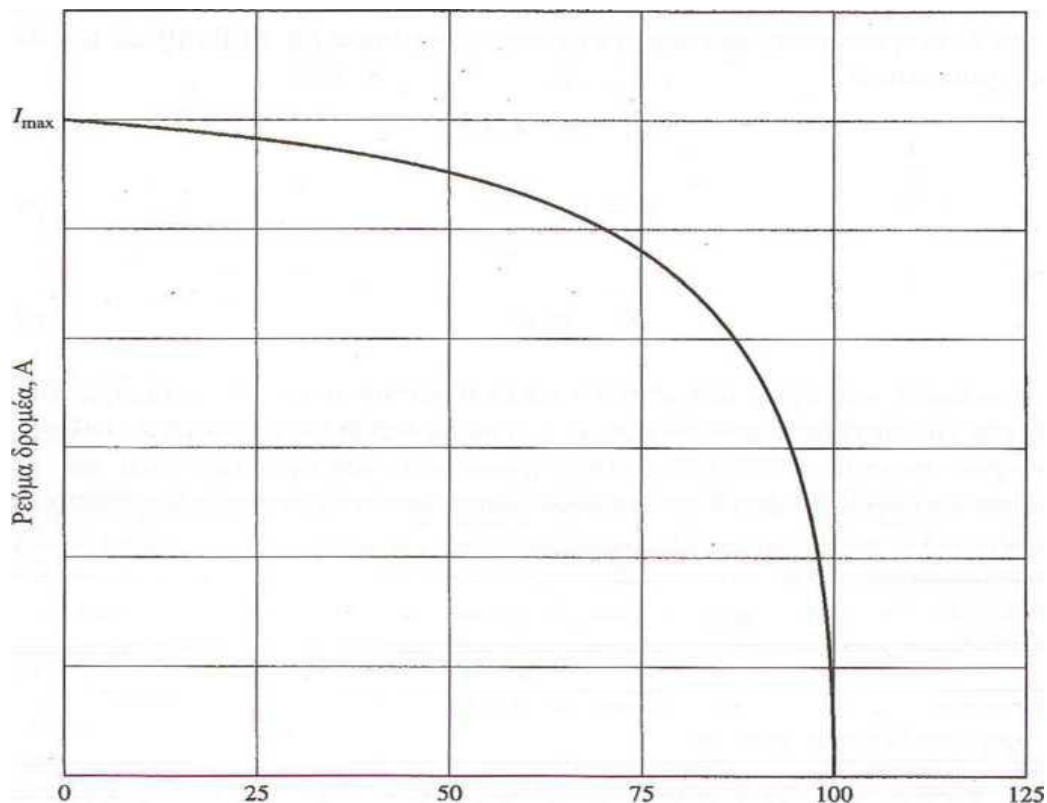
Το αντίστοιχο κύκλωμα του δρομέα σ' αυτή την περίπτωση φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα Σ.4. Στο κύκλωμα αυτό η τάση του δρομέα είναι σταθερή και ίση με E_{R0} V, ενώ η σύνθετη αντίσταση Z_R περιλαμβάνει όλες τις επιπτώσεις της μεταβολής στην ολίσθηση του δρομέα. Παρατίθεται η γραφική παράσταση του ρεύματος στο δρομέα:



Σ. 4

Το ισοδύναμο κύκλωμα του δρομέα, όπου όλες οι επιδράσεις της συχνότητας (ολίσθησης) έχουν συνδυαστεί στην αντίσταση R_r .

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται ρεύμα του δρομέα συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής:



Σ. 5

Ας σημειωθεί ότι για πολύ μικρές τιμές της ολίσθησης το ωμικό μέρος είναι:

$$\mathbf{R}_R/\mathbf{S} \gg \mathbf{X}_{R0}$$

οπότε η αντίσταση υπερिशχύνει και το ρεύμα μεταβάλλεται γραμμικά με την ολίσθηση. Αντίθετα για μεγάλες τιμές της ολίσθησης η \mathbf{X}_{R0} είναι πολύ μεγαλύτερη από την \mathbf{R}_R/\mathbf{S} , ενώ το ρεύμα του δρομέα προσεγγίζει μια σταθερή τιμή, καθώς η τιμή της ολίσθησης γίνεται πολύ μεγάλη.

2.7 Το Τελικό Ισοδύναμο Κύκλωμα

Στο τελικό ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα είναι απαραίτητη η μεταφορά του τμήματος του δρομέα στο επίπεδο τάσης του κυκλώματος του στάτη. Μετά κι απ' αυτή τη μεταφορά το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα είναι πλήρες. Το κύκλωμα του δρομέα που μεταφέρεται στο κύκλωμα του στάτη είναι αυτό του παραπάνω σχήματος.

Στη σύνθετη αντίστασή του έχουν περιληφθεί όλες οι επιπτώσεις της μεταβολής της ταχύτητας. Στο κανονικό μετασχηματιστή οι τάσεις, τα ρεύματα και οι σύνθετες αντιδράσεις του δευτερεύοντος, μεταφέρονται στο πρωτεύον με τη βοήθεια του λόγου μετασχηματισμού:

$$\mathbf{V}_P = \mathbf{V}'_S = \mathbf{aV}_S \quad (2.28)$$

$$\mathbf{I}_P = \mathbf{I}'_S = \frac{\mathbf{I}_S}{\mathbf{a}} \quad (2.29)$$

$$\mathbf{Z}'_S = \mathbf{a}^2\mathbf{Z}_S \quad (2.30)$$

όπου στο αριστερό μέρος των εξισώσεων βρίσκονται οι τιμές της τάσης, του ρεύματος και της σύνθετης αντίστασης που αναφέρονται στο πρωτεύον τύλιγμα. Ακριβώς οι ίδιες εξισώσεις μετασχηματισμού χρησιμοποιούνται και για το κύκλωμα του δρομέα στον επαγωγικό κινητήρα. Αν ο ενεργός λόγος μετασχηματισμού ενός επαγωγικού κινητήρα είναι a_{eff} η μετασχηματισμένη τάση του δρομέα του είναι:

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}'_R = a_{\text{eff}} \mathbf{E}_{R0} \quad (2.31)$$

Το ρεύμα του δρομέα γίνεται:

$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{I}_R}{a_{\text{eff}}} \quad (2.32)$$

και η σύνθετη αντίσταση:

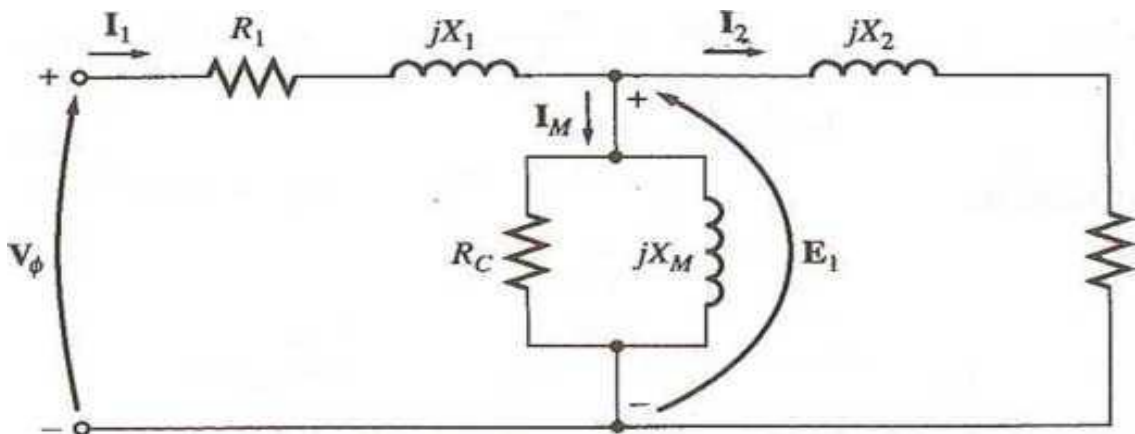
$$\mathbf{Z}_2 = a_{\text{eff}}^2 \left(\frac{\mathbf{R}_R}{s} + j\mathbf{X}_{R0} \right) \quad (2.33)$$

Με τους παρακάτω ορισμούς:

$$\mathbf{R}_2 = a_{\text{eff}}^2 \mathbf{R}_R \quad (2.34)$$

$$\mathbf{X}_2 = a_{\text{eff}}^2 \mathbf{X}_{R0} \quad (2.35)$$

το τελικό ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχ.6

2.8 Εξαγωγή της σχέσης για την επαγόμενη ροπή ενός επαγωγικού κινητήρα

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα και το διάγραμμα ροής ισχύος είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή της γενικής εξίσωσης που δίνει τη σχέση της επαγόμενης ροπής του κινητήρα με την ταχύτητα περιστροφής του. Η επαγόμενη ροπή του κινητήρα δίνεται από τις Εξ. (2.36) και (2.37).

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{conv}}}{\omega_m} \quad (2.36)$$

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{AG}}}{\omega_{\text{sync}}} \quad (2.37)$$

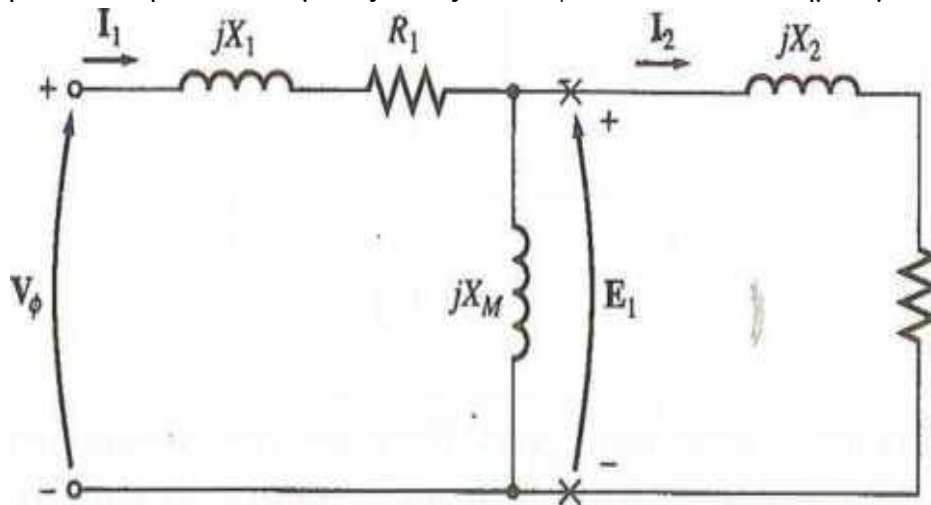
Η τελευταία εξίσωση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, αφού η σύγχρονη ταχύτητα είναι σταθερή για μια δεδομένη συχνότητα και για συγκεκριμένο αριθμό πόλων. Με την ω σταθερή, η επαγόμενη ροπή του κινητήρα υπολογίζεται, αν είναι γνωστή η ισχύς διακένου. Η ισχύς διακένου είναι η ισχύς που διέρχεται από το κύκλωμα του στάτη στο κύκλωμα του δρομέα μέσω του διακένου. Αυτή η ισχύς είναι ίση με την ισχύ που απορροφάται στην αντίσταση R_2/s . Έστω το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ. 7. Σ' αυτό το σχήμα η ισχύς διακένου που προσφέρεται στη μια φάση του κινητήρα θεωρείται ότι είναι:

$$P_{\text{AG},1\Phi} = I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.38)$$

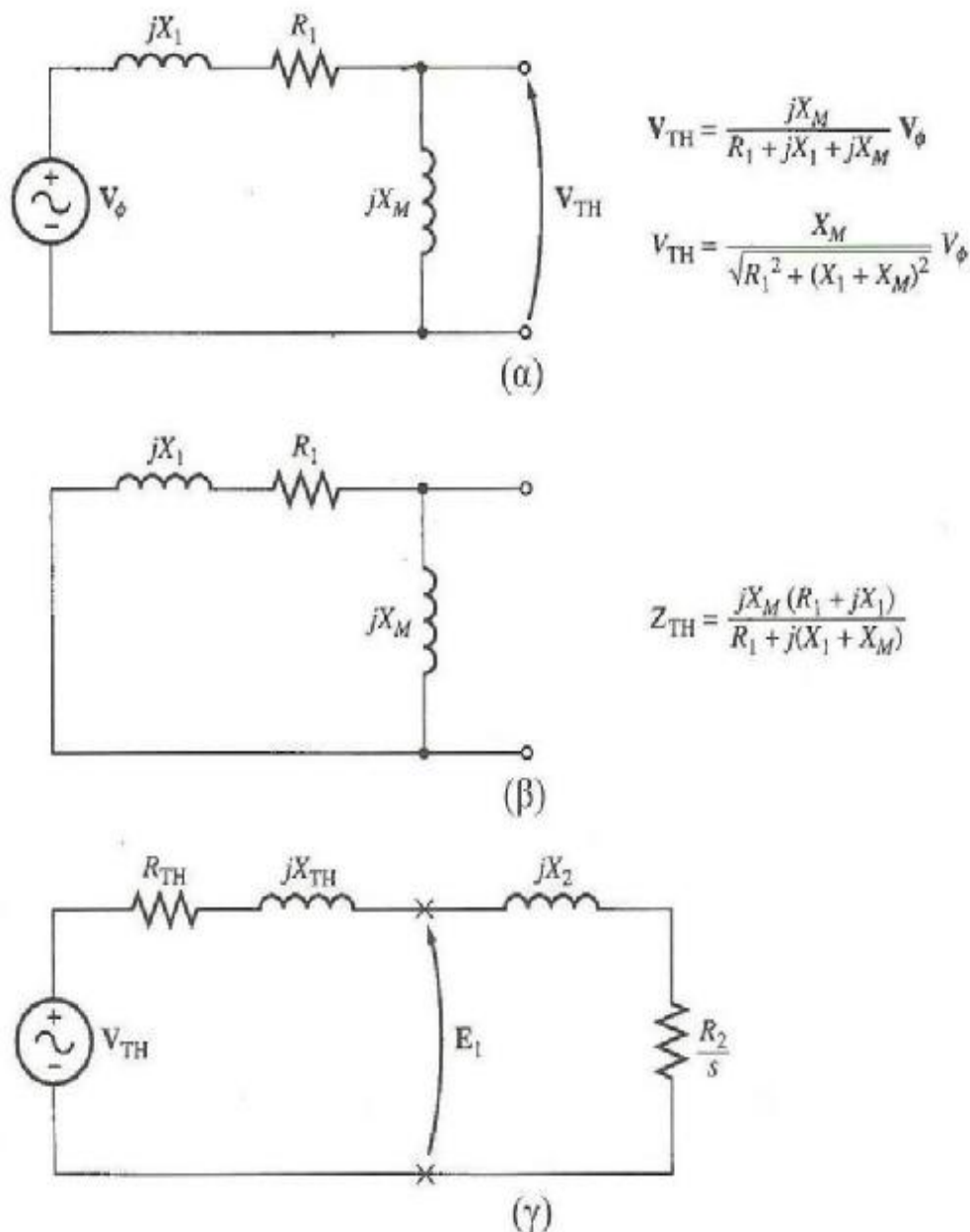
οπότε η συνολική ισχύς διακένου είναι:

$$P_{\text{AG}} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.39)$$

Αν προσδιοριστεί το ρεύμα I_2 , η ισχύς διακένου και η επαγόμενη ροπή θα έχουν προσδιοριστεί πλήρως. Αν και υπάρχουν αρκετοί τρόποι ανάλυσης του κυκλώματος του Σχ. 7 για τον υπολογισμό του ρεύματος I_2 , ο πιο εύκολος απ' αυτούς είναι μάλλον ο προσδιορισμός του ισοδύναμου Thevenin για το τμήμα του κυκλώματος που βρίσκεται αριστερά των σημείων που έχουν σημειωθεί με X στο σχήμα. Σύμφωνα με το θεώρημα Thevenin, κάθε γραμμικό κύκλωμα που μπορεί να χωριστεί σε δυο σημεία από το υπόλοιπο σύστημα, είναι δυνατό να αντικατασταθεί από μια πηγή τάσης σε σειρά με μια σύνθετη αντίσταση. Αν κάτι τέτοιο συνέβαινε στο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, το τελικό κύκλωμα θα ήταν ένας συνδυασμός ηλεκτρικών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά, όπως στο Σχ. 8γ. Για τον υπολογισμό του ισοδύναμου Thevenin της εισόδου ενός επαγωγικού κινητήρα, αρχικά τα σημεία που έχουν σημειωθεί με X παραμένουν ανοικτά και υπολογίζεται η τάση ανοιχτού κυκλώματος σ' αυτά τα σημεία. Για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης Thevenin νεκρώνεται η φασική τάση και προσδιορίζεται η Z_{eq} ως η αντίσταση του κυκλώματος, όπως αυτό «φαίνεται» από τα σημειωμένα άκρα του.



Σχ. 7 Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα.



Σχ. 8: (α) Η ισodύναμη τάση κατά Thevenin του κυκλώματος εισόδου ενός επαγωγικού κινητήρα, (β) Η ισodύναμη σύνθετη αντίσταση κατά Thevenin του κυκλώματος εισόδου και (γ) Το τελικό απλοποιημένο ισodύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα.

Στο Σχ. 8α, φαίνονται τα ανοικτά άκρα του κυκλώματος ως προς τα οποία υπολογίζεται η τάση Thevenin. Ο κανόνας του διαιρέτη τάσης δίνει τις εξισώσεις:

$$V_{TH} = V_\phi \frac{Z_M}{Z_M + Z_1} = V_\phi \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M} \quad (2.40)$$

Το μέτρο της τάσης Thevenin είναι:

$$V_{TH} = V_\phi \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \quad (2.41A)$$

Όμως, επειδή η αντίδραση μαγνήτισης είναι $X_M \gg X_1$ και $X_M \gg R_1$ η τάση Thevenin δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$V_{TH} \approx V_\phi \frac{X_M}{X_1 + X_M} \quad (2.41B)$$

Στο Σχ. 8β, φαίνεται το κύκλωμα εισόδου στο οποίο η τάση εισόδου είναι βραχύ κυκλωμένη. Οι δυο σύνθετες αντιδράσεις είναι συνδεδεμένες παράλληλα και η σύνθετη αντίσταση Thevenin δίνεται από τη σχέση:

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (2.42)$$

Όμως, επειδή $X_M \gg X_1$ και $X_M + X_1 \gg R_1$, η αντίσταση και η αντίδραση Thevenin δίνονται προσεγγιστικά από τις σχέσεις:

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 \quad (2.43)$$

$$X_{TH} \approx X_1 \quad (2.44)$$

Το τελικό ισodύναμο κύκλωμα φαίνεται στο Σχ. 8γ. Σ' αυτό το κύκλωμα το ρεύμα I_2 δίνεται από τη σχέση:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_2} \quad (2.45)$$

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_2/S + jX_{TH} + jX_2} \quad (2.46)$$

Το μέτρο του παραπάνω ρεύματος είναι:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2/S)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (2.47)$$

Έτσι η ισχύς διακένου δίνεται από τη σχέση:

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{S} \quad (2.48)$$

$$P_{AG} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/S}{(R_{TH} + R_2/S)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (2.49)$$

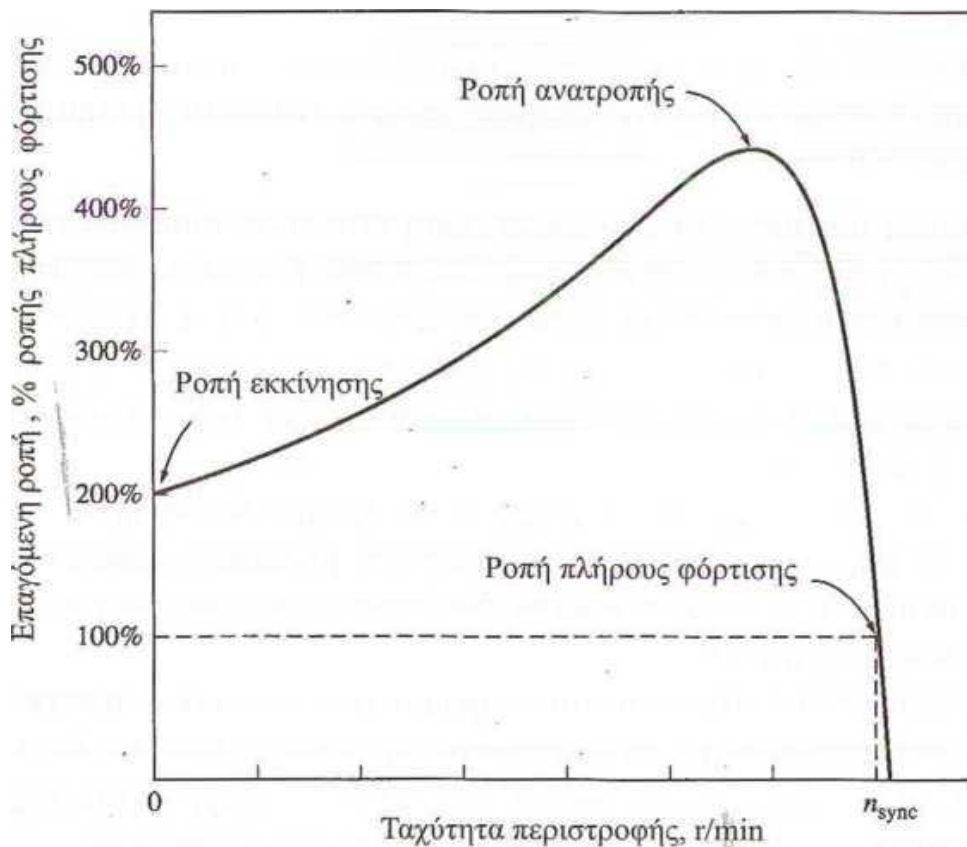
και η επαγόμενη ροπή δίνεται από τη σχέση:

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

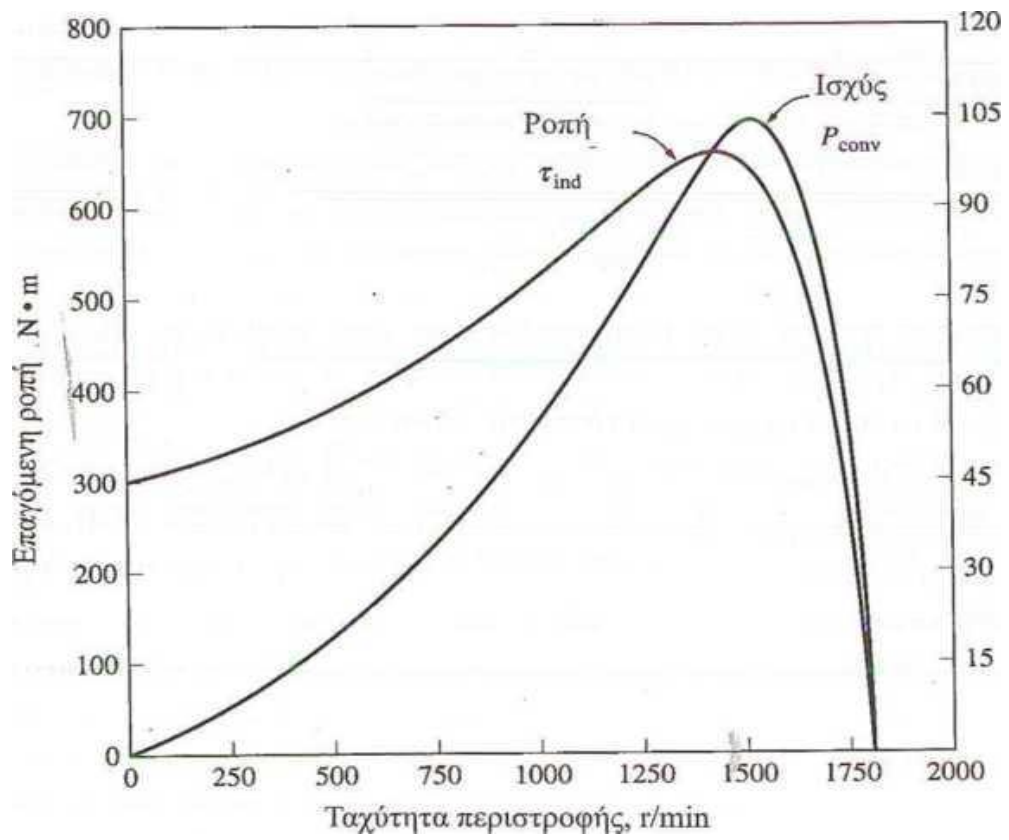
$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 R_2 / S}{\omega_{sync} [(R_{TH} + R_2 / S)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad (2.50)$$

Η καμπύλη ροπής - ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, που φαίνεται στο Σχ. 9, δίνει μερικές σημαντικές πληροφορίες για τη λειτουργία των επαγωγικών κινητήρων. Αυτά τα στοιχεία συνοψίζονται ως εξής:

- Η επαγόμενη ροπή του επαγωγικού κινητήρα είναι ίση με μηδέν στη σύγχρονη ταχύτητα.
- Μεταξύ των σημείων λειτουργίας χωρίς φορτίο και υπό πλήρες φορτίο η καμπύλη ροπής - ταχύτητας είναι σχεδόν γραμμική. Σ' αυτή την περιοχή η αντίσταση του δρομέα είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίδρασή του κι έτσι το ρεύμα του δρομέα, το μαγνητικό πεδίο του δρομέα και η επαγόμενη ροπή αυξάνονται γραμμικά με την αύξηση της ολίσθησης.



Σχ. 9: Η χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας του επαγωγικού Κινητήρα

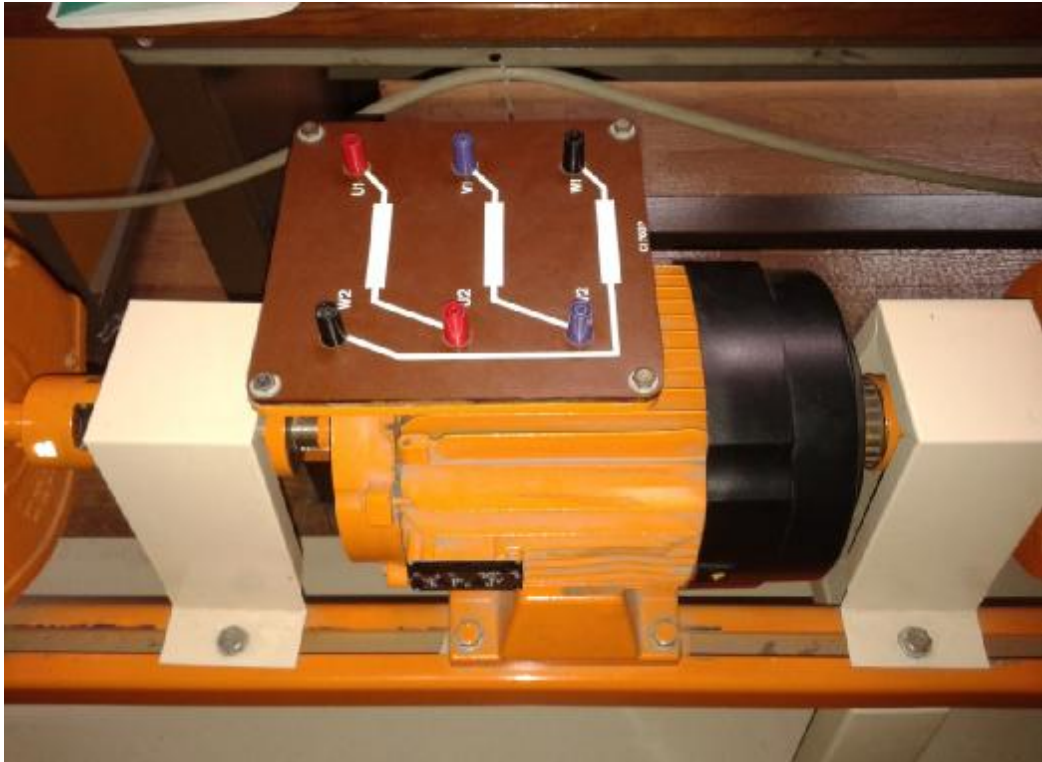


Σχ. 10: Γραφική παράσταση της επαγόμενης ροπής και της μετατρεπόμενης ισχύος ως προς την ταχύτητα (σε r/min) ενός τετραπολικού επαγωγικού κινητήρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πειραματική διαδικασία

Χρησιμοποιήσαμε τον παρακάτω κινητήρα με τα εξής χαρακτηριστικά:



3KW
10,9/6,3A Δ/Y
220/380V Δ/Y
Cosφ 0,85
$n_{sync}=1500rpm$
F=50Hz
$R_1=2,1\Omega$

Και η συνδεσμολογία των οργάνων μέτρησης είναι η παρακάτω (σε παρόμοιο πείραμα) :



Για το πείραμα χρησιμοποιήσαμε τα εξής όργανα:

- δύο όργανα μέτρησης συντελεστή ισχύος
- ένα βολτόμετρο
- ένα όργανο μέτρησης στροφών
- ένα αμπερόμετρο

Παροχή για τον κινητήρα μας πήραμε από ένα τροφοδοτικό εναλλασσόμενης τάσης.

3.1 Προσδιορισμός των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος

$$R_s = 2,1\Omega$$

a) Χωρίς φορτίο

$$P_{FE} = \frac{3U_\varphi^2}{R_{FE}} \Rightarrow R_{FE} = \frac{3U_\varphi^2}{P_{FE}} = \frac{3\left(\frac{380}{\sqrt{3}}\right)^2}{289,9} = 498\Omega$$

$$Z_{s \rightarrow 0} = \frac{U_\varphi}{I} = \frac{\left(\frac{380}{\sqrt{3}}\right)}{2,82} = 77,8\Omega$$

$$Z = \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2} \Rightarrow X_1 + X_m = \sqrt{Z^2 - R_1^2} \Rightarrow X_m = \left(\sqrt{Z^2 - R_1^2}\right) - X_1$$

Για $S \rightarrow 0$

$$R_{s \rightarrow 0} = Z_s \cos\varphi = 77,8 \cdot 0,26 \Rightarrow R_{s \rightarrow 0} = 20,228\Omega$$

$$X_{o\lambda} = \sqrt{Z_{s=0}^2 - R_{s=0}^2} = \sqrt{77,8^2 - 20,228^2} = 75,12\Omega$$

$$\text{Αφού } X_s = \frac{X_{o\lambda}}{2} = \frac{5,58}{2} = 2,79\Omega$$

$$X_{o\lambda} = X_s + X_m \Rightarrow X_m = X_{o\lambda} - X_s \Rightarrow X_m = 75,12 - 2,79 \Rightarrow X_m = 72,33$$

β) Με ακινητοποιημένο Δρομέα.

$$Z = \frac{U_\phi}{I \cdot \sqrt{3}} = \frac{74,2}{6,3 \cdot \sqrt{3}} = 6,79\Omega$$

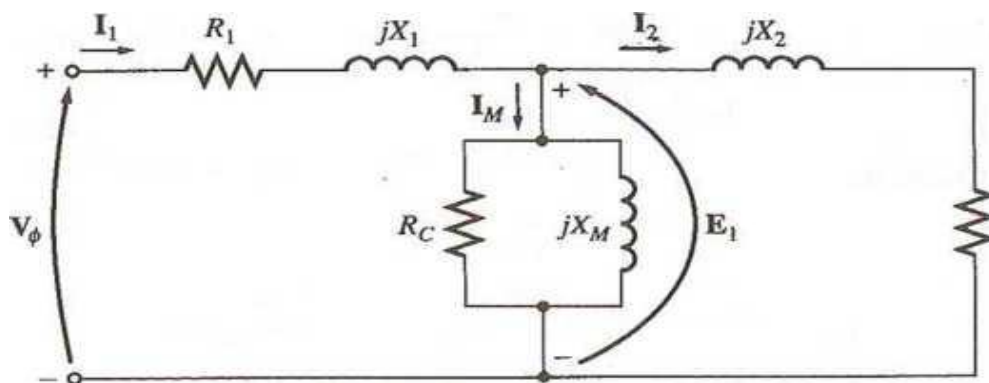
$$\cos \varphi = 0,57$$

$$R_{o\lambda} = Z \cdot \cos \varphi = 6,79 \cdot 0,57 \Rightarrow R_{o\lambda} = 3,87\Omega$$

$$X_{o\lambda} = \sqrt{Z^2 - R_{o\lambda}^2} = \sqrt{6,79^2 - 3,87^2} = 5,58\Omega$$

$$X_{o\lambda} = X_s + X_r \Rightarrow X_r = X_{o\lambda} - X_s \Rightarrow X_r = 5,58 - 2,79 \Rightarrow X_r = 2,79\Omega$$

$$R_{o\lambda} = R_s + R_r \Rightarrow R_r = R_{o\lambda} - R_s \Rightarrow R_r = 3,87 - 2,1 \Rightarrow R_r = 1,77\Omega$$



Αρχικά πραγματοποιήσαμε το πείραμα χωρίς φορτίο:

1. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΧΩΡΙΣ ΦΟΡΤΙΟ

V(V)	I(A)	P(W)	cosφ	n(rpm)
380	2,82	490	0,26	1495
340	2,56	460	0,32	1494
300	2,14	395	0,36	1493
260	1,96	375	0,43	1490
220	1,78	356	0,52	1487
180	1,66	338	0,66	1479

Έπειτα πήραμε μετρήσεις με ακινητοποιημένο το δρομέα:

2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΑΚΙΝΗΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΡΟΜΕΑ

V(V)	I(A)	P(W)	Cosφ
74,2	6,3	456	0,57
66,5	5,5	361,5	0,57
62,3	5	329	0,60
54,6	4,5	245	0,57
49	4	188,5	0,55
41,9	3,5	141,5	0,56
36,6	3	111	0,58
30,2	2,5	74	0,57
23,1	2	45	0,57
17,5	1,5	25,6	0,57
11,6	1	11,75	0,58
7,5	0,6	4,62	0,57

3.2 Υπολογισμός απωλειών σιδήρου και μηχανικές απώλειες:

$$P_k = P_{in} - 3I_s^2 \cdot R_s$$

$$P_k = 490 - 3(2,82)^2 \cdot 2,1 = 439,9w$$

$$P_k = 460 - 3(2,56)^2 \cdot 2,1 = 418,71w$$

$$P_k = 395 - 3(2,14)^2 \cdot 2,1 = 366,15w$$

$$P_k = 375 - 3(1,96)^2 \cdot 2,1 = 350,8w$$

$$P_k = 356 - 3(1,78)^2 \cdot 2,1 = 336,04w$$

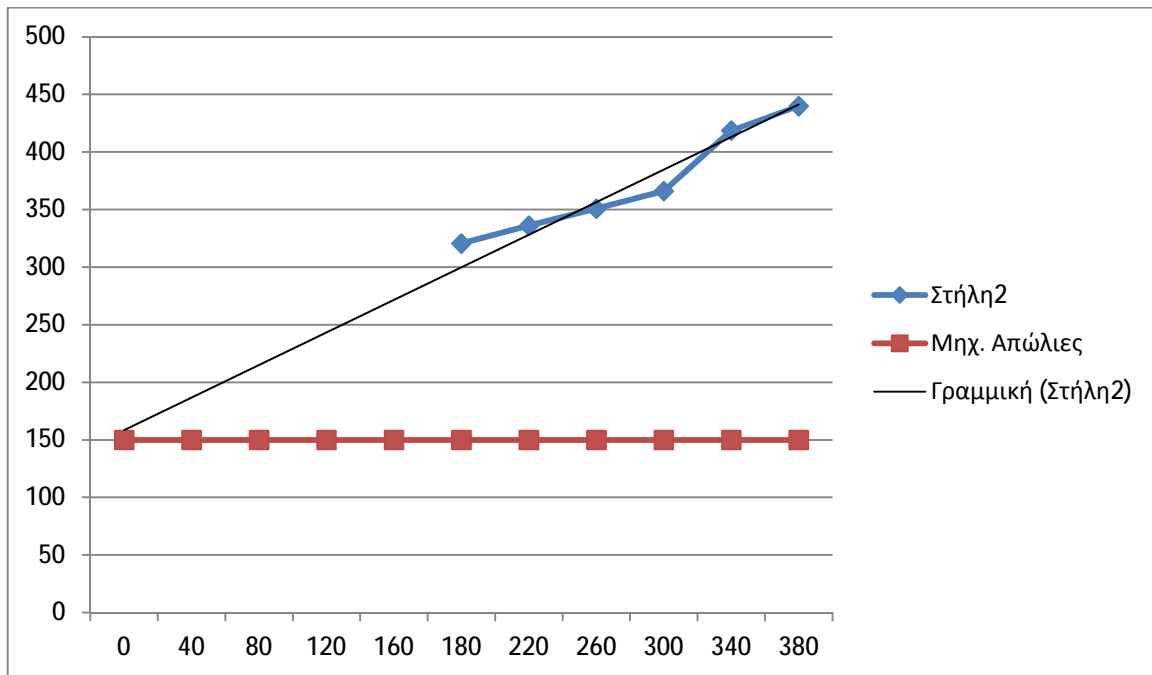
$$P_k = 338 - 3(1,66)^2 \cdot 2,1 = 320,64w$$

Από γραφική Σχ. 11 έχουμε:

$$P_{MHX} = 150w$$

Άρα η ισχύς σιδήρου είναι:

$$P_{FE} = 439,9 - 150 = 289,9w$$



Σχ. 11

3.3 Εύρεση του διαγράμματος ροπής-ταχύτητας:

$$R_{TH} = R_s \left(\frac{X_m}{X_s + X_m} \right)^2 = 2,1 \left(\frac{72,33}{2,79 + 72,33} \right)^2 \Rightarrow R_{TH} = 1,95 \Omega$$

$$X_{TH} = X_s = 2,79 \Omega$$

$$\vec{V}_{TH} = \frac{JX_m}{R_s + j(X_s + X_m)} \cdot \vec{V}_\phi, \quad |V_{TH}| = \frac{X_m}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X_m)^2}} \cdot V_\phi$$

$$|V_{TH}| = \frac{72,33 \cdot 220}{\sqrt{2,1^2 + (2,79 + 72,33)^2}} \Rightarrow |V_{TH}| = 211,74V$$

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{n_{sync}}{60} = 2\pi \cdot \frac{1500}{60} = 157 \frac{rad}{s}$$

$$S = \frac{n_s - n_m}{n_s} =$$

$$T_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 \cdot R_r / s}{\omega [(R_{TH} + R_r / s)^2 + (X_{TH} + X_r)^2]}$$

$$T_{max} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega [R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_r)^2}]} \Rightarrow$$

$$T_{max} = \frac{3 \cdot 211,74^2}{2 \cdot 157 \cdot [1,95 + \sqrt{1,95^2 + (2,79 + 2,79)^2}]} \Rightarrow$$

$$T_{max} = \frac{134501}{314 [1,95 + \sqrt{3,8 + 31,14}]} \Rightarrow$$

$$T_{max} = 54,5 \text{ NM}$$

$$\text{Για } S=1 \hat{a} T_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 \cdot Rr/s}{\omega [(R_{TH} + Rr/S)^2 + (X_{TH} + Xr)^2]}$$

$$T_{ind} = \frac{3 \cdot 211,74^2 \cdot 1,77/s}{157 [(1,95 + 1,77/S)^2 + (2,79 + 2,79)^2]}$$

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/s}{157 [(1,95 + 1,77/S)^2 + 31,1]}$$

έως εδώ η εξίσωση παραμένει ίδια για τις διαφορετικές τιμές του S, οπότε θα συνεχίσουμε την λύση της από εδώ και πέρα.

$$T_{ind} = \frac{238 \cdot 10^3}{157 (13,84 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 33,7 \text{ Nm}$$

$$\text{Για } S=0,95 \hat{a}$$

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,95}{157 [(1,95 + 1,77/0,95)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{250,6 \cdot 10^3}{157 (14,5 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 35 \text{ Nm}$$

$$\text{Για } S=0,9 \hat{a}$$

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,9}{157 [(1,95 + 1,77/0,9)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{264,5 \cdot 10^3}{157 (15,34 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 36,3 \text{ Nm}$$

$$\text{Για } S=0,85 \hat{a}$$

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,85}{157 [(1,95 + 1,77/0,85)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{280 \cdot 10^3}{157(16,26 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 37,6 Nm$$

Γ1α S=0,8 à

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,8}{157[(1,95 + 1,77/0,8)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{297 \cdot 10^3}{157(17,3 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 39,2 Nm$$

Γ1α S=0,75 à

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,75}{157[(1,95 + 1,77/0,75)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{317,42 \cdot 10^3}{157(18,6 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 40,7 Nm$$

Γ1α S=0,7 à

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,7}{157[(1,95 + 1,77/0,7)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{340 \cdot 10^3}{157(20 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 42,5 Nm$$

Γ1α S=0,65 à

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,65}{157[(1,95 + 1,77/0,65)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{366,3 \cdot 10^3}{157(21,8 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 44,1 Nm$$

Γ1α S=0,6 à

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,6}{157[(1,95 + 1,77/0,6)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{396,8 \cdot 10^3}{157(24 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 46,4 Nm$$

Γ1α S=0,55 à

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,55}{157[(1,95 + 1,77/0,55)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{432,8 \cdot 10^3}{157(26,7 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 47,8 Nm$$

Γ1α S=0,5 à

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,5}{157[(1,95 + 1,77/0,5)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{476,1 \cdot 10^3}{157(30,1 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 49,6 Nm$$

Γ1α S=0,45 à

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,45}{157[(1,95 + 1,77/0,45)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{529 \cdot 10^3}{157(34,6 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 51,4 Nm$$

Γ1α S=0,4 à

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,4}{157[(1,95 + 1,77/0,4)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{595,2 \cdot 10^3}{157(40,6 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 52,7 Nm$$

Γ1α S=0,35 à

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,35}{157[(1,95 + 1,77/0,35)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{680,2 \cdot 10^3}{157(49,1 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 53,9 Nm$$

Γ1α S=0,3 à

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,3}{157[(1,95 + 1,77/0,3)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{793,5 \cdot 10^3}{157(61,6 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 54,7 \text{ Nm}$$

Γ1α S=0,25 à

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,25}{157[(1,95 + 1,77/0,25)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{952,3 \cdot 10^3}{157(81,5 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 53,8 \text{ Nm}$$

Γ1α S=0,2 à

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,2}{157[(1,95 + 1,77/0,2)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{1190 \cdot 10^3}{157(116,6 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 51,3 \text{ Nm}$$

Γ1α S=0,15 à

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,15}{157[(1,95 + 1,77/0,15)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{1587 \cdot 10^3}{157(189,1 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 45,9 \text{ Nm}$$

Γ1α S=0,1 à

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,1}{157[(1,95 + 1,77/0,1)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{2380 \cdot 10^3}{157(386,1 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 36,3 \text{ Nm}$$

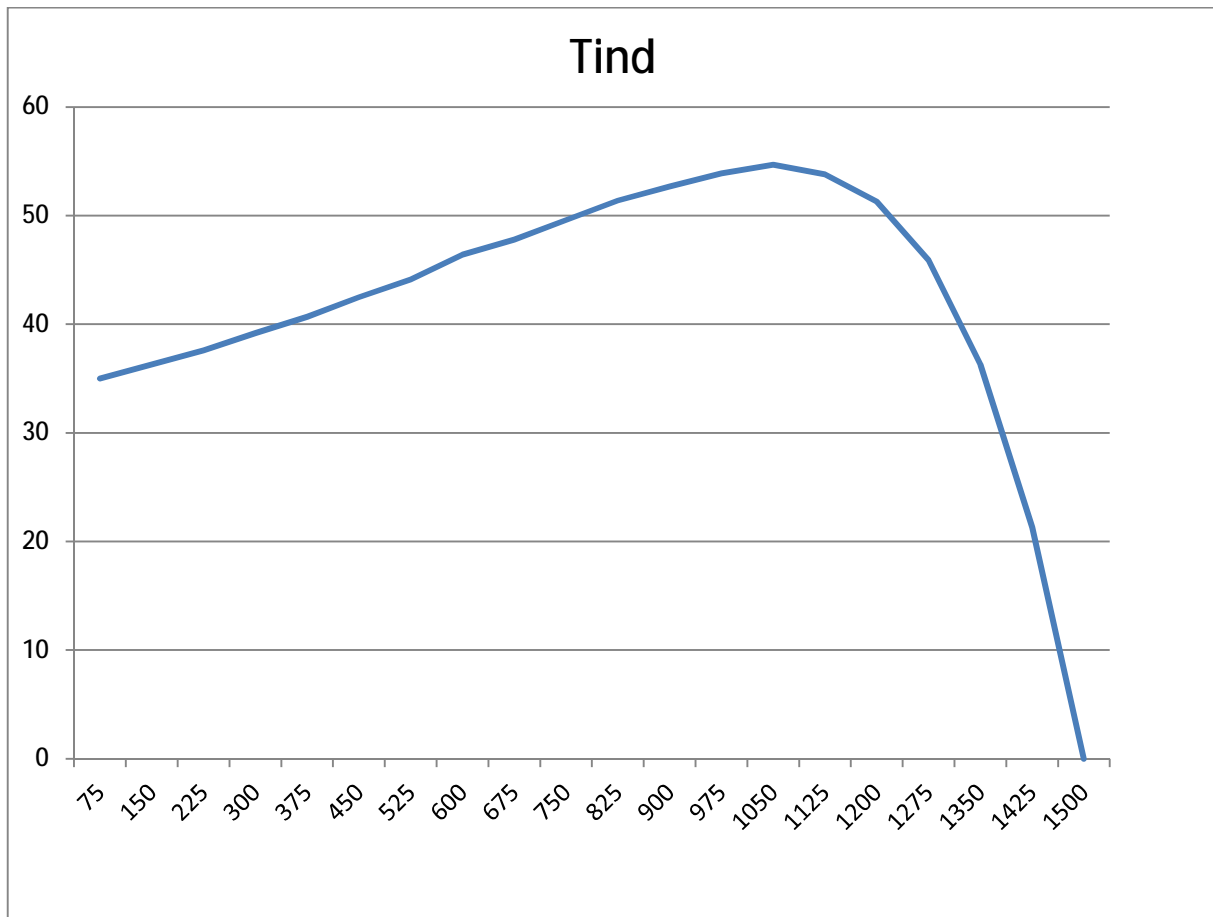
Γ1α S=0,05 à

$$T_{ind} = \frac{134,5 \cdot 10^3 \cdot 1,77/0,05}{157[(1,95 + 1,77/0,05)^2 + 31,1]}$$

$$T_{ind} = \frac{4761,3 \cdot 10^3}{157(1395 + 31,1)}$$

$$T_{ind} = 21,3 \text{ Nm}$$

S	T_{ind} (Nm)	n_m (rpm)
0,95	35	75
0,9	36,3	150
0,85	37,6	225
0,8	39,2	300
0,75	40,7	375
0,7	42,5	450
0,65	44,1	525
0,6	46,4	600
0,55	47,8	675
0,5	49,6	750
0,45	51,4	825
0,4	52,7	900
0,35	53,9	975
0,3	54,7	1050
0,25	53,8	1125
0,2	51,3	1200
0,15	45,9	1275
0,1	36,3	1350
0,05	21,3	1425



3.4 Εύρεση απωλειών χαλκού στον στάτη και στον ρότορα:

$$P_{SCL} = 3 \cdot I_{1ov}^2 \cdot R_1 \Rightarrow P_{SCL} = 3 \cdot 6,3^2 \cdot 2,1 \Rightarrow P_{SCL} = 250W$$

$$P_{AG} = P_{IN} - P_{CUS} - P_{Fe} \Rightarrow P_{AG} = 3000 - 250 - 289,1 = 2460,1$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_{ov}}{n_{sync}} \Rightarrow s = \frac{1500 - 1430}{1500} \Rightarrow s = 0,046$$

$$P_{RCL} = s \cdot P_{AG} \Rightarrow P_{RCL} = 0,046 \cdot 2460,1 \Rightarrow P_{RCL} = 113,16$$

Υπολογισμός ισχύος εισόδου:

$$P_{in} = P_{out} + P_{FE} + P_{SCL} + P_{RCL} + P_{μηχ} = 3000 + 289,9 + 250 + 113,16 + 150 = 3803W$$

Άρα βαθμός απόδοσης:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{3000}{3803} = 0,79 \cdot 100\% = 79\%$$

Βιβλιογραφία

1. STEPHEN J. CHARMAN, <<ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ>>, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ

2. ΠΑΝΤΕΛΗΣ ΜΑΛΑΤΕΣΤΑΣ << ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ>> ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ

3. ΠΡΟΤΥΠΟ ΙΕC 60034-28