



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« Μελέτη και Σχεδίαση DC Κινητήρα »



Φοιτητής:

Δημήτριος Περδίκης 7406

Επιβλέπων Καθηγητής:

Βασίλειος – Νεκτάριος Χαραλαμπίκος

Πάτρα, 2023

« Μελέτη και Σχεδίαση DC Κινητήρα »

Περίληψη

Στην εποχή μας, γενικότερα οι μηχανές ρεύματος και ειδικότερα οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας καθώς βρίσκονται σε κάθε έκφανση της ζωής μας. Αποτελούν σπουδαίο μέρος του τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας και τις συναντούμε με ποικίλους τρόπους εφαρμογής, οι οποίες συντελούν στην διευκόλυνση της διαδικασίας της μετατροπής ενέργειας που απαιτείται. Η παρούσα πτυχιακή εργασία, έχει ως στόχο να αναδείξει τα είδη των μηχανών ρεύματος με έμφαση στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC). Αναλυτικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις κατηγορίες μηχανών ρεύματος και περιγράφονται τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους. Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύεται λεπτομερώς η κατηγορία των κινητήρων συνεχούς ρεύματος, ενώ στο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η μελέτη ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης.

Λέξεις – Κλειδιά: μηχανές ρεύματος, κινητήρες, γεννήτριες, αρχή λειτουργίας, ισοδύναμο κύκλωμα

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της πτυχιακής μου εργασίας, δεν θα ήταν εφικτή χωρίς το ενδιαφέρον και τη στήριξη του κ. Βασίλειου Χαραλαμπίκου, επίκουρου καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου που εδρεύει στην Πάτρα. Τον ευχαριστώ εγκάρδια για την επίβλεψη αλλά και τη καθοδήγησή του, καθώς μου παρείχε τις συμβουλές και τις γνώσεις του. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την ανιδιοτελή στήριξή της όλα αυτά τα χρόνια πασχίζοντας για τη καλύτερη δυνατή μόρφωσή μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Ευχαριστίες.....	4
Κεφάλαιο 1: Ηλεκτρικές Μηχανές.....	6
1.1 Μαγνητικό Πεδίο.....	7
1.2 Μετασχηματιστές.....	8
1.3 Ηλεκτρικές Μηχανές DC.....	12
1.4 Ηλεκτρικές Μηχανές AC.....	24
Κεφάλαιο 2: Ηλεκτρικοί Κινητήρες DC	35
2.1 Βασικές Αρχές των Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος.....	36
2.2 Δομή Μηχανών DC.....	39
2.3 Ισοδύναμο Κύκλωμα Κινητήρα DC.....	42
2.4 Βασικές Κατηγορίες Κινητήρων DC.....	43
2.5 Διακύμανση Ταχύτητας	50
2.6 Διάγραμμα Ροής Ισχύος και Απώλειες στις Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος.....	51
2.7 Η διαδικασία της μεταγωγής και η δομή του οπλισμού στις πραγματικές μηχανές συνεχούς ρεύματος.....	54
Κεφάλαιο 3: Παράδειγμα Μελέτης & Σχεδίασης DC Κινητήρα Παράλληλης Διέγερσης.....	55
Βιβλιογραφία	89

Κεφάλαιο 1: Ηλεκτρικές Μηχανές

Ηλεκτρικές μηχανές αποτελούν οι συσκευές που δύνανται να μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντιστρόφως. Τέτοιου είδους συσκευές, όταν χρησιμοποιούνται για την μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ονομάζονται *γεννήτριες*. Στην περίπτωση που οι συσκευές μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ονομάζονται *κινητήρες*. Με αυτή τη λογική, επειδή οποιαδήποτε ηλεκτρική μηχανή δύναται να μετατρέψει ενέργεια και προς τις δύο κατευθύνσεις, είναι δυνατό κάθε τέτοια μηχανή να χρησιμοποιηθεί είτε ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας – ανάλογα με τη φορά ροής της ισχύος –. Έτσι, σχεδόν όλες οι υπάρχουσες γεννήτριες και κινητήρες μετατρέπουν ενέργεια από τη μία μορφή στην άλλη μέσω της δράσης ενός μαγνητικού πεδίου (Charman, 2012).

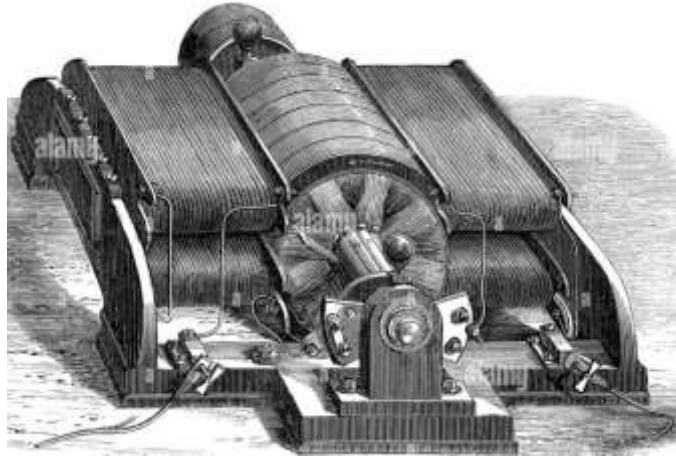
Πιο αναλυτικά, η κατασκευή των μηχανών συνεχούς ρεύματος προηγήθηκε των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, λόγω του ότι οι ερευνητές του 19ου αιώνα πάσχιζαν να δημιουργήσουν μια μηχανή η οποία θα μπορούσε να παράγει συνεχές ρεύμα.

- Το 1832 ο γνωστός σε όλους Hippolyte Pixii, κατασκεύασε την πρώτη μηχανή Συνεχούς Ρεύματος ως γεννήτρια ενώ το ίδιο έτος κατασκεύασε ακόμα μια απλή γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος. Η συγκεκριμένη εφεύρεση μηχανικά αποτελείτο από συλλέκτη δύο τομέων (για την ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης που παραγόταν στους αγωγούς).
- Το 1856 ο εξίσου γνωστός Werner Von Siemens, δημιούργησε τη πρώτη μηχανή συνεχούς ρεύματος που άνοιξε τον δρόμο για τις σημερινές μηχανές, με περιέλιξη¹ τυμπάνου, τοποθετημένη μέσα στα λούκια του δρομέα και με συλλέκτη δύο τομέων.
- Το 1860, ο Pacinotti κατασκεύασε τη μηχανή με τον επαγωγικό δακτύλιο και συλλέκτη με πολλούς τομείς.
- Το 1870, ο Gramme κατασκεύασε μηχανή με μικρή κυμάτωση της ανορθωμένης τάσης. Πολύ σύντομα όμως, το συγκεκριμένο είδος μηχανής σταμάτησε να εξελίσσεται, εξαιτίας των υπέρογκων τεχνικοοικονομικών μειονεκτημάτων της δακτυλιοειδούς της περιέλιξης (Γαντζούδης, Λαγουδάκος & Μπινιάρος, 2004).

Είναι κοινώς αποδεκτό, πως και οι τρεις κατηγορίες ηλεκτρικών συσκευών που αναφέραμε (κινητήρας, γεννήτρια, μετασχηματιστής) υπάρχουν σε κάθε έκφανση της ζωής μας. Αν καταγράφαμε κάθε συσκευή στην οποία τις συναντάμε θα χρειαζόμασταν πολλές σελίδες καταγραφής, καθώς κάθε σύγχρονο σπίτι αποτελείται από συσκευές των οποίων οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι το βασικό τους εξάρτημα (π.χ. ψυγεία, καταψύκτες, πλυντήρια, μίξερ, κλιματιστικά κ.ο.κ). Ο λόγος, όμως, που οι ηλεκτρικές

¹ Περιέλιξη: ([ειδικότερα](#)) περιστροφή ειδικού μονωμένου σύρματος ώστε να δημιουργηθούν [σπείρες](#)

μηχανές είναι τόσο συνηθισμένες είναι απλός. Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μια καθαρή, αλλά και πολύ αποτελεσματική μορφή ενέργειας (Charman, 2012).



Εικόνα 1 Ηλεκτρική Γεννήτρια - Δυναμό, κατασκευασμένη από τη Siemens & Halske, Γερμανία 19ος αιώνας.

1.1 Μαγνητικό Πεδίο

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε τη δράση του μαγνητικού πεδίου. Πιο συγκεκριμένα, η δράση των μαγνητικών πεδίων αποτελεί το βασικό μηχανισμό μετατροπής ενέργειας στους κινητήρες, στις γεννήτριες και στους μετασχηματιστές (δηλ. σε κάθε είδος ηλεκτρικών μηχανών). Οι τέσσερις βασικές αρχές σύμφωνα με τις οποίες δρουν τα μαγνητικά πεδία είναι:

1. Ένας ρευματοφόρος αγωγός παράγει γύρω του μαγνητικό πεδίο.
2. Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο του οποίου οι δυναμικές γραμμές διέρχονται μέσα από κάποιο πηνίο (αγωγός σε σπείρες), επάγει τάση στα άκρα του πηνίου – σ' αυτή την αρχή βασίζεται η λειτουργία του μετασχηματιστή –.
3. Σ' ένα ρευματοφόρο αγωγό που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο εξασκείται μια δύναμη εξ επαγωγής – αρχή λειτουργίας του κινητήρα –.
4. Στα άκρα ενός αγωγού που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο επάγεται κάποια τάση – αρχή λειτουργίας της γεννήτριας – (Charman, 2012).

Το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται γύρω από ένα ρευματοφόρο αγωγό διέπεται από το νόμο του Ampere:

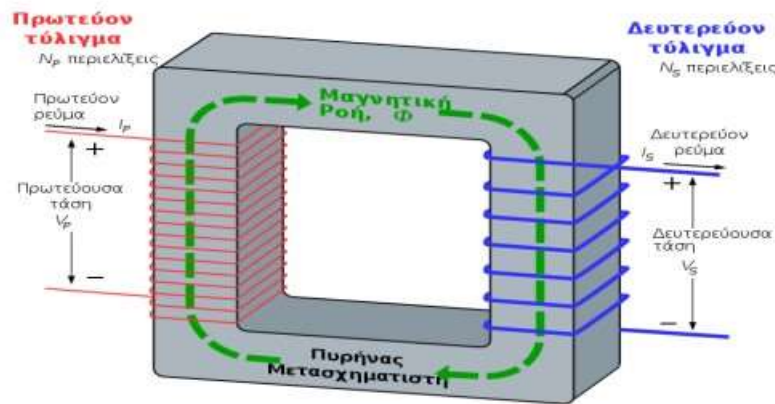
$$\mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{\text{net}}$$

όπου \mathbf{H} είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου η οποία παράγεται από το ρεύμα I_{net} .

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} είναι κατά μια έννοια ένα μέτρο της «προσπάθειας» που καταβάλλει το ρεύμα για τη δημιουργία του πεδίου. Το μέγεθος της μαγνητικής ροής του πεδίου στον πυρήνα εξαρτάται από το υλικό που είναι κατασκευασμένος. Η

σχέση που υπάρχει μεταξύ της έντασης του πεδίου \mathbf{H} και της μαγνητικής επαγωγής στο εσωτερικό του υλικού δίνεται από την εξίσωση:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$$



Εικόνα 2 Σιδηρομαγνητικός Πυρήνας

1.2 Μετασχηματιστές



Εικόνα 3 Μονοφασικός Μετασχηματιστής Ανοιχτού Τύπου

Μετασχηματιστές είναι οι συσκευές που μετατρέπουν εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια με συγκεκριμένο πλάτος τάσης σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια με διαφορετικό πλάτος τάσης. Οι μετασχηματιστές μελετώνται συνήθως μαζί με τις ηλεκτρικές μηχανές καθότι έχουν τις ίδιες αρχές λειτουργίας. Ακόμα, η δράση ενός μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του είναι η βασική αρχή της λειτουργίας τους. Επίσης, οι μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται ακόμα και για μια μεγάλη ποικιλία

εφαρμογών, όπως η μέτρηση τάσης ή ρεύματος, ο μετασχηματισμός σύνθετων αντιστάσεων κ.ά. (Charman, 2012).

Πιο συγκεκριμένα, οι μετασχηματιστές αφορούν ηλεκτρικές συσκευές που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα πηνία σύρματος που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Ο λόγος για το μετασχηματισμό της τάσης σε πολύ υψηλότερο επίπεδο είναι ότι οι υψηλότερες τάσεις διανομής συνεπάγονται χαμηλότερα ρεύματα για την ίδια ισχύ και επομένως χαμηλότερες θερμικές απώλειες $I^2 \times R$ κατά την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι υψηλότερες τάσεις μπορούν εν συνεχεία να μειωθούν σε ένα πολύ χαμηλότερο, ασφαλέστερο και χρησιμοποιήσιμο επίπεδο τάσης, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη χρήση του ηλεκτρικού εξοπλισμού στα σπίτια και τους χώρους εργασίας μας, και όλα αυτά είναι δυνατά χάρη στα βασικά στοιχεία του μετασχηματιστή τάσης.

Ειδικότερα, ο μετασχηματιστής τάσης μπορεί να θεωρηθεί περισσότερο ως ηλεκτρικό εξάρτημα παρά ως ηλεκτρονικό εξάρτημα. Ένας μετασχηματιστής είναι βασικά μια πολύ απλή στατική (ή σταθερή) ηλεκτρομαγνητική παθητική ηλεκτρική συσκευή που λειτουργεί με βάση την αρχή του νόμου επαγωγής του Faraday² μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια από μια τιμή σε άλλη (electronics-tutorials.ws).



Εικόνα 4 Τυπικός Μετασχηματιστής Τάσης

Αναλυτικότερα, όσον αφορά τη δράση ενός μετασχηματιστή, το πρώτο τύλιγμα ονομάζεται πρωτεύον τύλιγμα ή τύλιγμα εισόδου και το δεύτερο ονομάζεται δευτερεύον ή τύλιγμα εξόδου. Στην περίπτωση που υπάρχει και τρίτο τύλιγμα, αυτό ονομάζεται τριτεύον (Charman, 2012).

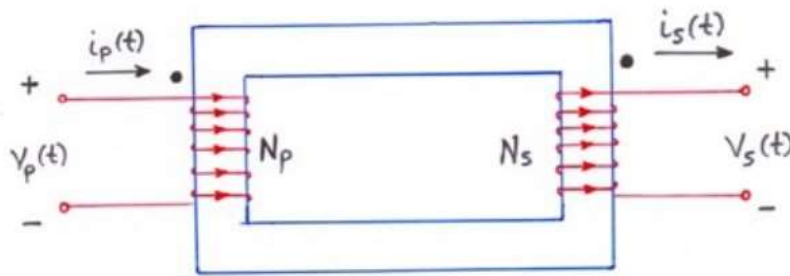
² Νόμος Faraday: Αν μέσα από μια σπείρα ενός πηνίου διέρχεται μαγνητική ροή, τότε στα άκρα της επάγεται μια τάση e_{ind} που είναι ανάλογη προς το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής ως προς το χρόνο (Charman, 2012).

Βασικά Είδη Μετασχηματιστών:

Ιδανικός Μετασχηματιστής: Αφορά τη διάταξη που δεν παρουσιάζει απώλειες και διαθέτει μια περιέλιξη εισόδου και μια περιέλιξη εξόδου. Οι σχέσεις μεταξύ των τάσεων εισόδου και εξόδου δίνονται από δύο απλές σχέσεις. Το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή, διαθέτει N_P σπείρες και το δευτερεύον του N_S σπείρες. Η εξίσωση που δίνει τη σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης τάσης στο πρωτεύον τύλιγμα $v_p(t)$ και της τάσης στα άκρα του δευτερεύοντος $v_s(t)$ είναι η

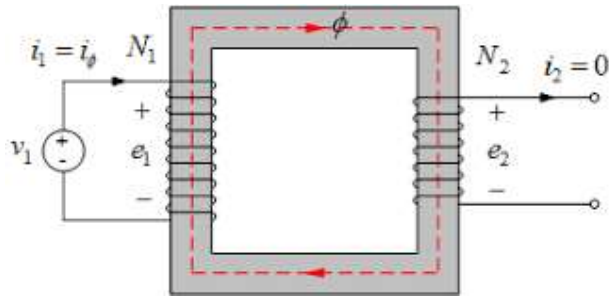
$$\frac{V_P(t)}{V_S(t)} = \frac{N_P}{N_S} = a$$

όπου a : ο λόγος μετασχηματισμού



Εικόνα 5 Διάγραμμα ενός Ιδανικού Μετασχηματιστή

Πραγματικός Μετασχηματιστής: Ο ιδανικός μετασχηματιστής στον οποίο αναφερθήκαμε προηγουμένως προφανώς και είναι μη υλοποιήσιμος. Εν αντιθέσει, ο πραγματικός μετασχηματιστής είναι υλοποιήσιμος. Πιο συγκεκριμένα, κατασκευάζεται απλά με δύο ή περισσότερα πηνία τυλιγμένα γύρω από κάποιον σιδηρομαγνητικό πυρήνα.



Εικόνα 6 Διάγραμμα ενός Πραγματικού Μετασχηματιστή χωρίς φορτίο

Γενικότερα, υπάρχει ποικιλία ειδών μετασχηματιστών που διαφοροποιούνται αναλόγως με τον τρόπο κατασκευής και την δράση χρησιμότητάς τους.

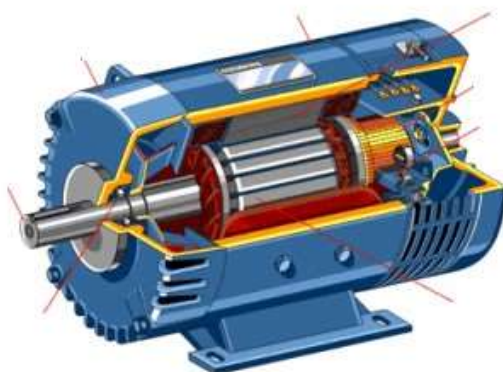
Αρχή Λειτουργίας ενός Μετασχηματιστή:

Η αρχή λειτουργίας τους είναι απλή. Ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα δημιουργεί ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει μεταβαλλόμενη τάση στο δευτερεύον τύλιγμα. Σε περίπτωση, δηλαδή, που ένας ηλεκτρικός καταναλωτής είναι συνδεδεμένος στο δευτερεύον κύκλωμα, τότε θα υπάρξει ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή. Εν συνεχεία, το φορτίο αυτό θα μεταφέρει ενέργεια από το πρωτεύον κύκλωμα, στον καταναλωτή που είναι συνδεδεμένος στο δευτερεύον κύκλωμα. Η επαγόμενη τάση V_s (s:secondary) στο δευτερεύον ενός ιδανικού μετασχηματιστή, είναι ανάλογη της τάσης V_p (p:primary) στο πρωτεύον κατά ένα συντελεστή ίσο με το λόγο του αριθμού N των περιελίξεων του σύρματος στα αντίστοιχα τυλίγματα, δηλαδή:

$$\frac{V_p(t)}{V_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a$$

(McLyman, 2004)

1.3 Ηλεκτρικές Μηχανές DC



Εικόνα 7 Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος

Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος (DC) αποτελούν γεννήτριες οι οποίες μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή συνεχούς ρεύματος και κινητήρες που μετατρέπουν τη συνεχή ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Οι περισσότερες μηχανές συνεχούς ρεύματος μοιάζουν με τις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, αφού και στις δύο κατηγορίες τα ρεύματα και οι τάσεις στο εσωτερικό των μηχανών είναι εναλλασσόμενα. Μια μικρή διαφορά θα μπορούσαμε να πούμε πως έγκειται στο ότι οι μηχανές συνεχούς ρεύματος έχουν συνεχή έξοδο μόνο επειδή υπάρχει ένας μηχανισμός που μετατρέπει τις εσωτερικές εναλλασσόμενες τάσεις σε συνεχείς. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται συλλέκτης και οι μηχανές συνεχούς ρεύματος ονομάζονται μηχανές με συλλέκτη.

Οι βασικές αρχές λειτουργίας των μηχανών συνεχούς ρεύματος είναι πολύ απλές, όμως δυστυχώς εξαιτίας της πολυπλοκότητας στη δομή των πραγματικών μηχανών τις κάνει μερικές φορές λίγο δυσνόητες (Charman, 2012).

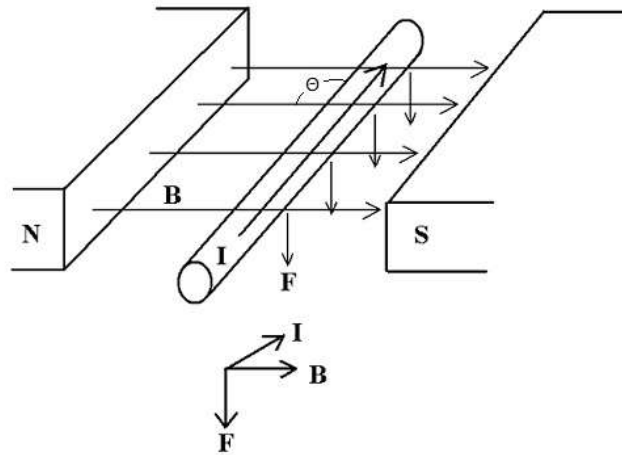
Η Αρχή Λειτουργίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος βασίζεται στον νόμο του Laplace. Σύμφωνα με το νόμο αυτό, όταν ένας αγωγός μήκους L βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο έντασης B και διαρρέεται από ρεύμα έντασης I , τότε στον αγωγό αυτό ασκείται (από το πεδίο) δύναμη F η οποία τείνει να τον μετακινήσει. Το μέγεθος της δύναμης αυτής – που καλείται και δύναμη Laplace – δίνεται από τη σχέση:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \eta \mu \theta$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι η αναπτυσσόμενη δύναμη Laplace είναι ανάλογη:

- της μαγνητικής επαγωγής (B) του πεδίου (σε T)
- της έντασης του ρεύματος (I), που διαρρέει τον αγωγό (σε A)

- του μήκους του αγωγού (l), ο οποίος βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο (ενεργό μήκος σε m)
- τη γωνία (θ), την οποία σχηματίζουν οι διευθύνσεις του αγωγού και του πεδίου (Doetsch, 2012).



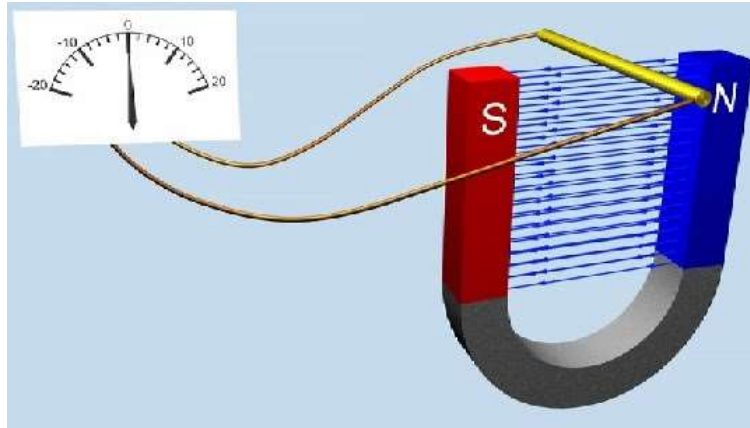
Εικόνα 8 Ρευματοφόρος αγωγός ενός σταθερού μαγνητικού πεδίου

Η Αρχή Λειτουργίας των γεννητριών συνεχούς ρεύματος βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Έτσι, με αυτό το φαινόμενο, όταν ένας αγωγός κινείται μέσα σ' ένα μαγνητικό πεδίο με σκοπό να κόβει τις μαγνητικές γραμμές, τότε στον αγωγό αυτό αναπτύσσεται ηλεκτρερρεγτική δύναμη (ΗΕΔ) από επαγωγή. Σύμφωνα με το νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, η αναπτυσσόμενη ΗΕΔ στα άκρα του αγωγού δίνεται από τη σχέση:

$$E = B \cdot U \cdot l$$

Αν η διεύθυνση της ταχύτητας του αγωγού σχηματίζει γωνία θ με τις μαγνητικές γραμμές, τότε η αντίστοιχη σχέση της επαγόμενης ΗΕΔ θα είναι:

$$E = B \cdot U \cdot l \cdot \eta \mu \theta$$

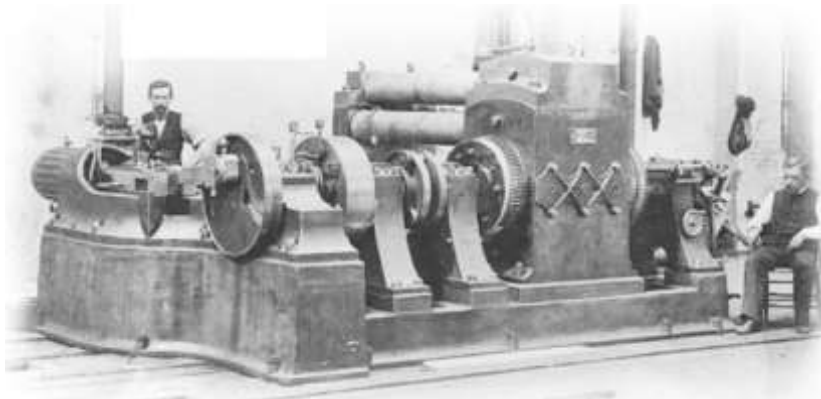


Εικόνα 9 Αγωγός ενός σταθερού μαγνητικού πεδίου

(Bayerl, et. al., 2014)

Κύριες Κατηγορίες DC Γεννητριών

Αξίζει να αναφέρουμε, ιστορικά, πως οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιήθηκαν αρχικά από τον Thomas Edison, ο οποίος ως εφευρέτης τους, δημιούργησε το πρώτο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, στη Νέα Υόρκη, το 1882. Η δράση του συστήματος αυτού τροφοδοτούσε 59 καταναλωτές και συνολικά 3.000 λαμπτήρες. Το παρόν σύστημα λειτουργούσε με μια συγκεκριμένη τάση, γεγονός που έκανε οικονομική τη χρήση του μόνο σε μια μικρή περιοχή γύρω από το εργοστάσιο παραγωγής. Όμως, η ανακάλυψη του μετασχηματιστή έδωσε ώθηση στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτό, είχε ως αποτέλεσμα οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος από το 1895 να σταματήσουν να χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ενώ όσες συνέχισαν χρησιμοποιούνταν μόνο σε ειδικές εφαρμογές.



Εικόνα 10 Μία από τις έξι δυναμογεννήτριες που παρήγαγαν συνεχές ρεύμα στο σταθμό του Thomas Edison στη Νέα Υόρκη

Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, αφορούν μηχανές συνεχούς ρεύματος οι οποίες εργάζονται ως γεννήτριες. Δεν έγκειται αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ των γεννητριών και των κινητήρων συνεχούς ρεύματος παρά μόνο στη κατεύθυνση ροής της ισχύος τους. Οι κυριότερες κατηγορίες γεννητριών συνεχούς ρεύματος, των οποίων ο διαχωρισμός έχει γίνει σύμφωνα με τον τρόπο παραγωγής του κύριου μαγνητικού πεδίου τους είναι οι εξής:

1. Γεννήτριες Ανεξάρτητης Διέγερσης: Στον συγκεκριμένο τύπο γεννητριών, το κύκλωμα που παράγει το κύριο πεδίο – κύκλωμα διέγερσης – τροφοδοτείται από μια ξεχωριστή πηγή, ανεξάρτητη από τη γεννήτρια.
2. Γεννήτριες Παράλληλης Διέγερσης: Το κύκλωμα διέγερσης σε αυτές τις γεννήτριες τροφοδοτείται από την ίδια την γεννήτρια, καθώς συνδέεται παράλληλα με τους ακροδέκτες της.
3. Γεννήτριες Διέγερσης Σειράς: Σ' αυτές τις γεννήτριες, το κύκλωμα διέγερσης τροφοδοτείται και πάλι από την ίδια την γεννήτρια, καθώς συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του οπλισμού της γεννήτριας.
4. Γεννήτριες με Αθροιστική Σύνθετη Διέγερση: Σ' αυτόν τον τύπο γεννητριών υφίσταται τόσο η παράλληλη διέγερση όσο και η διέγερση σειράς, και τα αποτελέσματα των δύο διεγέρσεων προστίθενται.
5. Γεννήτριες με Διαφορική Σύνθετη Διέγερση: Τέλος, σε αυτές τις γεννήτριες επίσης συνυπάρχουν μια διέγερση σειράς και μια παράλληλη διέγερση, των οποίων τα αποτελέσματα αφαιρούνται αυτή τη φορά μεταξύ τους.



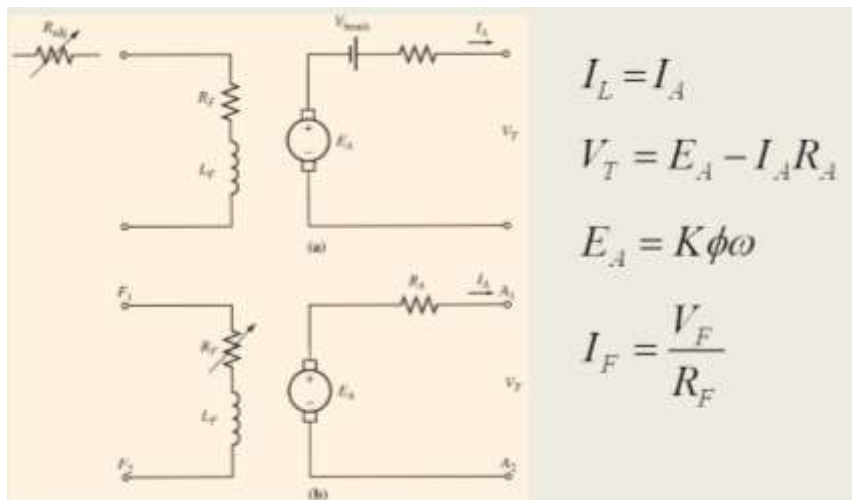
Εικόνα 11 Γεννήτρια Συνεχούς Ρεύματος

Αναφορικά με τον κύριο τρόπο σύγκρισής τους αλλά και διαχωρισμού τους, γίνεται σύμφωνα με τις τάσεις στα άκρα τους, την ονομαστική ισχύ τους, την απόδοσή τους και τη διακύμανση της τάσης τους. Αναλυτικότερα, η διακύμανση τάσης μιας γεννήτριας ορίζεται από τη σχέση:

$$VR = \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} 100\%$$

Επεξηγηματικά, όπου V_{nl} και V_{fl} είναι οι τάσεις που αναπτύσσονται στα άκρα της γεννήτριας κατά τη λειτουργία χωρίς φορτίο και κατά τη λειτουργία με πλήρες φορτίο αντίστοιχα. Συμπερασματικά, η διακύμανση τάσης δίνει μια πρόχειρη εκτίμηση του σχήματος της χαρακτηριστικής τάσης – ρεύματος μιας γεννήτριας (Charman, 2012).

Γεννήτριες Ανεξάρτητης Διέγερσης:



Εικόνα 12 Ισοδύναμο Κύκλωμα Γεννήτριας DC Ανεξάρτητης Διέγερσης

Το κύκλωμα διέγερσης μιας γεννήτριας ανεξάρτητης διέγερσης, τροφοδοτείται από μια εξωτερική πηγή συνεχούς τάσης. Στο ισοδύναμο κύκλωμα όπως φαίνεται παραπάνω, η τάση V_T είναι αυτή που εμφανίζεται στα άκρα της γεννήτριας, ενώ το ρεύμα I_L – το οποίο αφορά το ρεύμα φορτίου – είναι το ρεύμα των γραμμών που συνδέονται στα άκρα της. Η τάση η οποία παράγεται στο εσωτερικό της μηχανής, είναι η E_A και το ρεύμα οπλισμού της είναι το I_A . Ως γνωστόν, σε κάθε γεννήτρια τέτοιου τύπου το ρεύμα φορτίου ισούται με το ρεύμα οπλισμού, δηλαδή $I_A = I_L$.

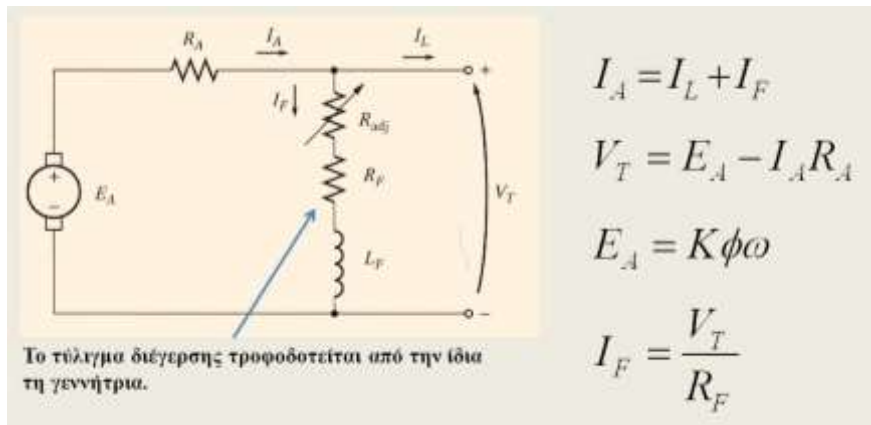
Τρόποι Ελέγχου της τάσης στα άκρα της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης:

Η τάση στα άκρα μιας γεννήτριας συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης, δύναται να ελέγχεται μέσω της εσωτερικής τάσης E_A της μηχανής. Ο νόμος των τάσεων του Kirchhoff³ ($V_T = E_A - I_A R_A$), δείχνει ότι η αύξηση της E_A προκαλεί αύξηση της V_T , ενώ η μείωση E_A ελαττώνει την τιμή της V_T .

Επομένως, η τάση που παράγεται στο εσωτερικό της μηχανής δίνεται από τον τύπο $E_A = K\phi\omega$. Δηλαδή, δύο είναι οι δυνατοί τρόποι ελέγχου της τάσης εξόδου αυτής της γεννήτριας:

1. Μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής: Η αύξηση της ω προκαλεί αντίστοιχη αύξηση στην E_A και τελικά η V_T αυξάνεται.
2. Μεταβολή του ρεύματος διέγερσης: Η μείωση της R_F προκαλεί αύξηση του ρεύματος διέγερσης I_F . Με αυτό το τρόπο αυξάνεται η μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής. Αυτή η αύξηση έχει ως αποτέλεσμα την αντίστοιχη αύξηση στη τιμή της E_A και της V_T . (Charman, 2012),(Dou, et. al., 2010).

Γεννήτριες Παράλληλης Διέγερσης:



Εικόνα 13 Ισοδύναμο Κύκλωμα Γεννήτριας DC παράλληλης διέγερσης

Η γεννήτρια συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης, αποτελεί μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος της οποίας το κύκλωμα διέγερσης συνδέεται στα άκρα της και τροφοδοτείται από την τάση εξόδου της μηχανής. Στο ισοδύναμο κύκλωμα όπως φαίνεται παραπάνω, το ρεύμα σπλισμού της μηχανής τροφοδοτεί τόσο το κύκλωμα διέγερσης όσο και το φορτίο που είναι συνδεδεμένο στην έξοδό της.

³ Νόμος των τάσεων του Kirchhoff: Το αλγεβρικό άθροισμα όλων των τάσεων σε κάθε βρόγχο ενός κυκλώματος είναι ίσο με μηδέν. (<https://learnelectronics.gr>)

$$I_A = I_F + I_L$$

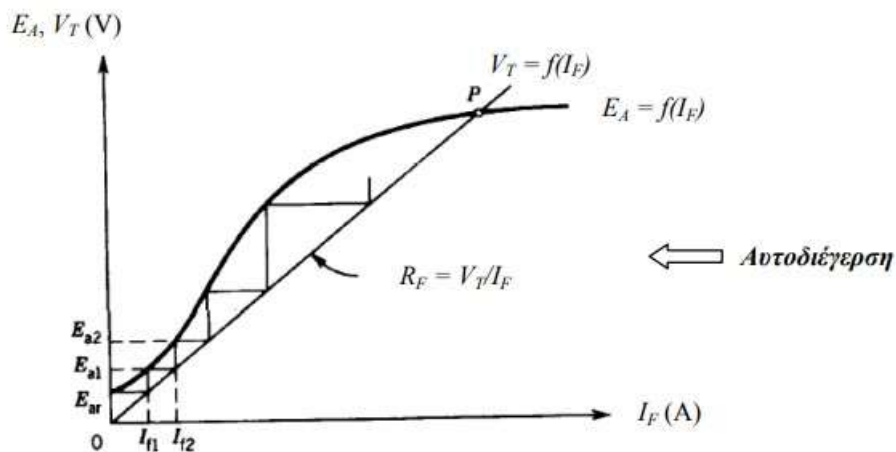
Ο νόμος των τάσεων του Kirchhoff για το κύκλωμα οπλισμού της μηχανής είναι ο εξής:

$$V_T = E_A - I_A R_A$$

Σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του είδους γεννητριών έναντι στις γεννήτριες ανεξάρτητης διέγερσης που αναφέραμε παραπάνω, είναι το γεγονός πως δεν απαιτείται εξωτερική πηγή για τη τροφοδοσία του κυκλώματος διέγερσης. Εύλογο ερώτημα θα μπορούσε να αποτελεί πως αφού η γεννήτρια παράλληλης διέγερσης παράγει από μόνη της το ρεύμα διέγερσής της, πώς αποκτά την αρχική μαγνητική ροή διέγερσης, όταν ακριβώς αρχίζει να περιστρέφεται; Στο ερώτημα αυτό, απάντηση αποτελεί η αυτοδιέγερση, μιας γεννήτριας παράλληλης διέγερσης. Συνοπτικά, να αναφέρουμε πως η αυτοδιέγερση μιας γεννήτριας συνεχούς ρεύματος, οφείλεται στο φαινόμενο του παραμένουτος μαγνητισμού στους πόλους μηχανής. Όταν αυτή αρχίζει να περιστρέφεται, στο εσωτερικό της αναπτύσσεται τάση που δίνεται από τη σχέση:

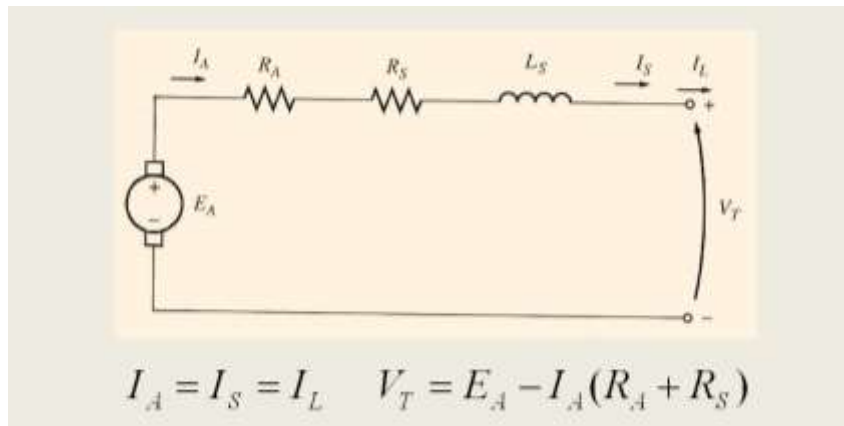
$$E_A = K \phi_{res} \omega_m$$

Όπου ϕ_{res} η παραμένουσα μαγνητική ροή. (Chapman, 2012)



Εικόνα 14 Αυτοδιέγερση κατά την εκκίνηση μιας γεννήτριας DC παράλληλης διέγερσης

Γεννήτριες Συνεχούς Ρεύματος με Διέγερση Σειράς:



Εικόνα 15 Ισοδύναμο Κύκλωμα Γεννήτριας DC με διέγερση σειράς

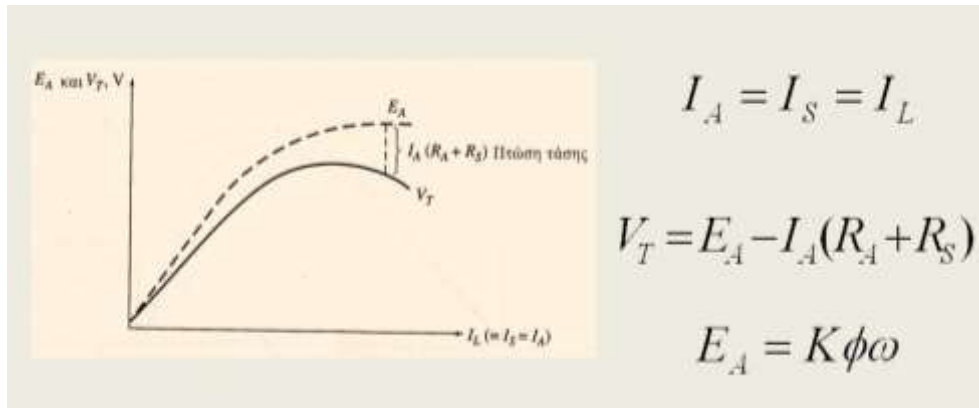
Σε μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς, το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα οπλισμού. Είναι προφανές, πως το ρεύμα οπλισμού στις γεννήτριες είναι πολύ μεγαλύτερο από το ρεύμα διέγερσης των γεννητριών παράλληλης διέγερσης. Έτσι, το τύλιγμα στο στάτη μιας τέτοιας γεννήτριας, διαθέτει πολύ μικρό αριθμό σπειρών και ακόμη ο αγωγός που χρησιμοποιείται σε αυτό το τύλιγμα είναι πιο χοντρός από αυτόν ενός τυλίγματος παράλληλης διέγερσης. Λόγω του ότι η μαγνητογεωμετρική δύναμη δίνεται από την εξίσωση $F=NI$, το υψηλό ρεύμα διέγερσης σε συνδυασμό με το μικρό αριθμό σπειρών παράγει την ίδια μαγνητογεωμετρική δύναμη με ένα μικρό ρεύμα που διέρχεται από έναν μεγάλο αριθμό σπειρών. Επιπλέον, το τύλιγμα διέγερσης σχεδιάζεται με τρόπο έτσι ώστε να παρουσιάζει τη μικρότερη δυνατή αντίσταση, καθώς χρειάζεται να «αντέχει» στο υψηλό ρεύμα κατά τη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο. Όπως φαίνεται στο παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα, τα ρεύματα οπλισμού, διέγερσης και φορτίου έχουν την ίδια τιμή. Ο νόμος των τάσεων του Kirchhoff παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$V_T = E_A - I_A (R_A + R_S)$$

Χαρακτηριστική φορτίου μιας γεννήτριας με διέγερσης σειράς:

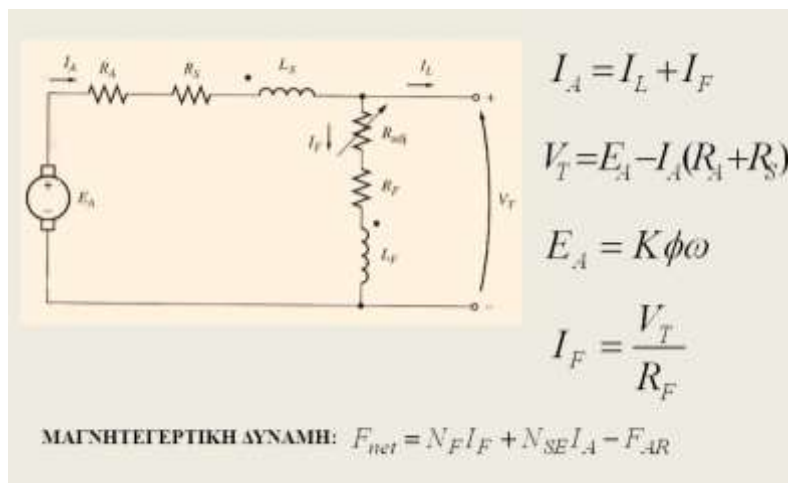
Η καμπύλη μαγνήτισης μιας γεννήτριας με διέγερση σειράς, μοιάζει με τις αντίστοιχες καμπύλες όλων των άλλων γεννητριών. Όμως, στη λειτουργία χωρίς φορτίο το ρεύμα διέγερσης είναι μηδενικό και η τάση στα άκρα της γεννήτριας περιορίζεται σε μια μικρή τιμή που δίνεται από την παραμένουσα μαγνήτιση. Με την αύξηση του φορτίου το ρεύμα διέγερσης παίρνει μεγαλύτερες τιμές και η E_A αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό. Αυτή η αύξηση της E_A αρχικά είναι πιο μεγάλη από την αύξηση της

πτώσης τάσης $I_A (R_A + R_S)$, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της V_T . Κατόπιν, όταν η μηχανή πλησιάζει τον κορεσμό, η E_A γίνεται σχεδόν σταθερή. Στο σημείο αυτό, η πτώση τάσης $I_A (R_A + R_S)$ αρχίζει να γίνεται μεγαλύτερη από την E_A (σε απόλυτη τιμή) και έτσι η V_T αρχίζει να ελαττώνεται. Όπως φαίνεται η χαρακτηριστική στο παρακάτω σχήμα, μια τέτοια μηχανή δε δύναται να χρησιμοποιηθεί ως πηγή σταθερής τάσης. Άλλωστε, η διακύμανση τάσης έχει εδώ μεγάλη αρνητική τιμή (Charman, 2012).



Εικόνα 16 Υπολογισμός της Χαρακτηριστικής Φορτίου μιας γεννήτριας DC με διέγερση σειράς

Γεννήτριες με Αθροιστική Σύνθετη Διέγερση:



Εικόνα 17 Ισοδύναμο Κύκλωμα Γεννήτριας DC αθροιστικής σύνθετης διέγερσης

Οι γεννήτριες αθροιστικής σύνθετης διέγερσης αφορούν γεννήτριες συνεχούς ρεύματος οι οποίες διαθέτουν ταυτόχρονα τύλιγμα διέγερσης σειράς και παράλληλο

τύλιγμα διέγερσης, τα οποία είναι συνδεδεμένα έτσι ώστε οι μαγνητεγερτικές δυνάμεις των δύο τυλιγμάτων να προστίθενται μεταξύ τους. Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας τέτοιας γεννήτριας, όπως φαίνεται παραπάνω, οι τελείες των αυτεπαγωγών πάνω στο σχήμα συμβολίζουν ότι και σε έναν μετασχηματιστή. Το ρεύμα με φορά προς την τελεία παράγει θετική μαγνητεγερτική δύναμη. Το ρεύμα σπλισμού, έχει φορά προς το σημειωμένο άκρο του τυλίγματος διέγερσης σειράς, ενώ το παράλληλο ρεύμα διέγερσης (I_F) έχει φορά προς το σημειωμένο άκρο του παράλληλου τυλίγματος διέγερσης. Έτσι, η συνολική μαγνητεγερτική δύναμη στο εσωτερικό της μηχανής έχει τιμή:

$$F_{\text{net}} = F_F + F_{\text{SE}} - F_{\text{AR}}$$

Το ισοδύναμο ενεργό ρεύμα παράλληλης διέγερσης μηχανής, δίνεται από τη σχέση:

$$N_F I_F^* = N_F I_F + N_{\text{SE}} I_A - F_{\text{AR}}$$

$$I_F^* = I_F + (N_{\text{SE}} / N_F) \times I_A - (F_{\text{AR}} / N_F)$$

Οι υπόλοιπες σχέσεις των ρευμάτων και των τάσεων της γεννήτριας είναι οι εξής:

$$I_A = I_F + I_L$$

$$V_T = E_A - I_A (R_A + R_S)$$

$$I_F = V_T / R_F$$

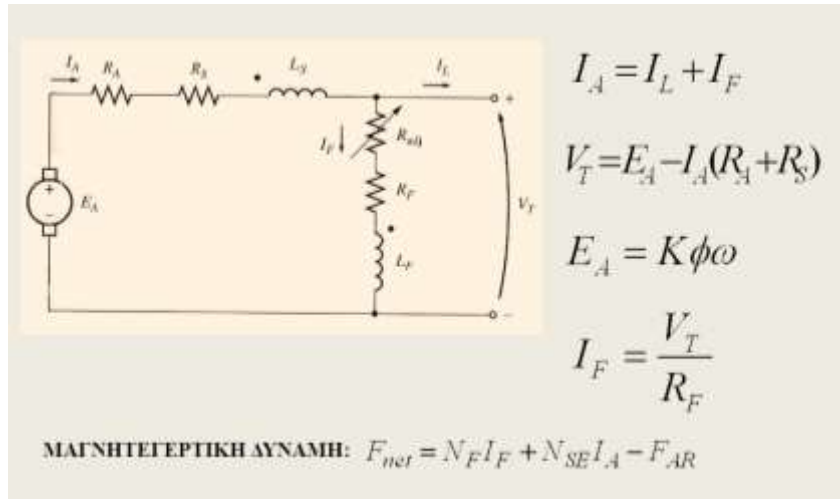
Έλεγχος της τάσης εξόδου μιας γεννήτριας συνεχούς ρεύματος με αθροιστική σύνθετη διέγερση:

Οι διαθέσιμες τεχνικές ελέγχου της τάσης στα άκρα μιας γεννήτριας αθροιστικής σύνθετης διέγερσης είναι ακριβώς οι ίδιες με τις γεννήτριες παράλληλης διέγερσης.

1. Μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής: Η αύξηση της ταχύτητας ω αυξάνει την E_A και η τάση V_T αυξάνεται.
2. Μεταβολή του ρεύματος παράλληλης διέγερσης: Η μείωση της R_F προκαλεί αύξηση του I_F το οποίο με τη σειρά του αυξάνει τη συνολική μαγνητεγερτική δύναμη στη γεννήτρια. Αυτή η αύξηση της F_{tot} προκαλεί αύξηση της

μαγνητικής ροής ϕ στο εσωτερικό της μηχανής και η E_A αυξάνεται. Το τελικό αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η αύξηση της V_T (Charman, 2012).

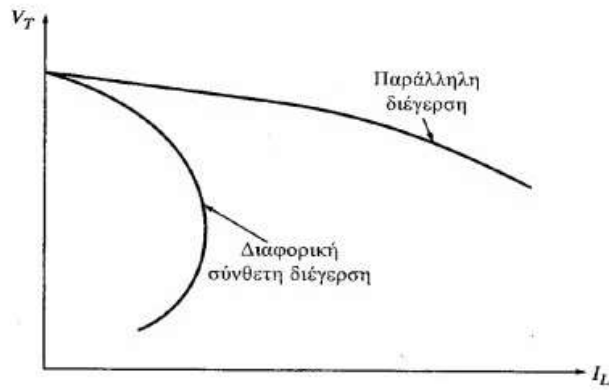
Γεννήτριες Συνεχούς Ρεύματος Διαφορικής Σύνθετης Διέγερσης:



Εικόνα 18 Ισοδύναμο Κύκλωμα DC Γεννήτριας Διαφορικής Σύνθετης Διέγερσης

Όπως και στις γεννήτριες αθροιστικής σύνθετης διέγερσης που αναφέραμε παραπάνω, έτσι και στις γεννήτριες DC διαφορικής σύνθετης διέγερσης εμφανίζονται πάλι τα φαινόμενα που συζητήθηκαν προηγουμένως. Στην παρούσα περίπτωση όμως, αυτά δρουν προς την ίδια κατεύθυνση. Πιο συγκεκριμένα:

1. Η άνοδος του I_A προκαλεί αύξηση της πτώσης τάσης $I_A (R_A + R_S)$. Αυτό το γεγονός τείνει να μειώσει την τάση στα άκρα της γεννήτριας.
2. Η άνοδος του I_A προκαλεί αύξηση της μαγνητεγερτικής δύναμης του τυλίγματος σειράς. Αυτή η αύξηση ελαττώνει τη συνολική μαγνητεγερτική δύναμη της γεννήτριας, η οποία με τη σειρά της ελαττώνει τη συνολική μαγνητική ροή στη γεννήτρια. Τελικά, η E_A μειώνεται και μαζί με αυτή μειώνεται η τάση εξόδου V_T .



Εικόνα 19 Χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας DC διαφορικής σύνθετης διέγερσης

Έλεγχος της τάσης εξόδου μιας γεννήτριας συνεχούς ρεύματος διαφορικής σύνθετης διέγερσης:

Αν και η χαρακτηριστική φορτίου μιας τέτοιου είδους γεννήτριας είναι πολύ κακή ώστε να χρησιμοποιηθεί σε κάποιες εφαρμογές, είναι και εδώ δυνατή η μεταβολή της τάσης στα άκρα της όταν το φορτίο της παραμένει σταθερό. Οι διαθέσιμες τεχνικές μεταβολής της τάσης εξόδου είναι ακριβώς οι ίδιες με αυτές των γεννητριών παράλληλης ή αθροιστικής σύνθετης διέγερσης:

1. Μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής ω_m
2. Μεταβολή του ρεύματος διέγερσης I_F (Chapman, 2012).

1.4 Ηλεκτρικές Μηχανές AC



Εικόνα 20 Γεννήτρια Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος αφορούν γεννήτριες οι οποίες μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και κινητήρες, που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Οι βασικές αρχές λειτουργίας των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος είναι πολύ απλές, αλλά δυστυχώς επισκιάζονται από την περίπλοκη κατασκευή των πραγματικών μηχανών. Υφίστανται δύο βασικές κατηγορίες ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, οι σύγχρονες κι οι επαγωγικές. Οι σύγχρονες γεννήτριες ονομάζονται και εναλλακτικές και η διαφορά τους μεταξύ των γεννητριών συνεχούς ρεύματος είναι:

- Και οι δύο τύποι γεννήτριας λειτουργούν με την ίδια φυσική αρχή, αλλά ο τρόπος με τον οποίο το στοιχείο παραγωγής ρεύματος είναι συνδεδεμένο με το εξωτερικό κύκλωμα αλλάζει τον τρόπο με τον οποίο περνά το ρεύμα μέσω του κυκλώματος.
- Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος δεν έχουν μεταγωγείς, αλλά έχουν να αντισταθούν στην επίδραση της αλλαγής των πολικών ιδιοτήτων.
- Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πολύ υψηλών τάσεων, ενώ οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία σχετικά χαμηλών τάσεων (Charman, 2012).



Εικόνα 21 Κινητήρας Εναλλασσόμενου Ρεύματος

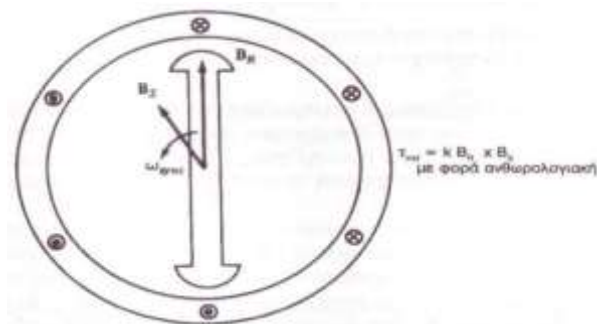
Αντίστοιχα, οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος ανάλογα με την κατασκευή και τη λειτουργία τους, χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, σύγχρονους κι ασύγχρονους ή επαγωγικούς. Σύγχρονοι κινητήρες, ονομάζονται οι κινητήρες όπου ο δρομέας τους περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή τη συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης. Στο στάτη της μηχανής εφαρμόζεται ένα τριφασικό σύστημα ρεύματων, το οποίο παράγει στο εσωτερικό της περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Εν συνεχεία, τροφοδοτούμε το δρομέα με συνεχές ρεύμα διέγερσης κι έτσι αναπτύσσεται στο εσωτερικό του ομογενές μαγνητικό πεδίο. Στο εσωτερικό του κινητήρα υφίστανται δύο πεδία που τείνουν να ευθυγραμμιστούν (δύναμη Laplace). Καθώς όμως, το πεδίο του στάτη περιστρέφεται συνεχώς, το πεδίο του δρομέα αλλά κι ο ίδιος ο δρομέας προσπαθεί συνεχώς να τον ακολουθεί στρεφόμενος με τη σύγχρονη ταχύτητα. Ασύγχρονοι ή επαγωγικοί κινητήρες, ονομάζονται οι κινητήρες που δεν κινούνται με τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής αλλά με διαφορετική ταχύτητα (χαμηλότερη). Η κύρια διαφορά τους με τους σύγχρονους κινητήρες, είναι ότι το ρεύμα που κινεί το δρομέα αναπτύσσεται από επαγωγή, γι' αυτό ονομάζονται και επαγωγικοί κινητήρες. Η κίνηση στους επαγωγικούς κινητήρες, επιτυγχάνεται από τα επαγωγικά ρεύματα που αναπτύσσονται στο δρομέα τους, τα οποία δημιουργούνται από τη σχετική διαφορά της ταχύτητας μεταξύ του στρεφόμενου πεδίου του στάτη και του δρομέα (Charman, 2012).

Σύγχρονοι κινητήρες



Εικόνα 22 Σύγχρονος Κινητήρας

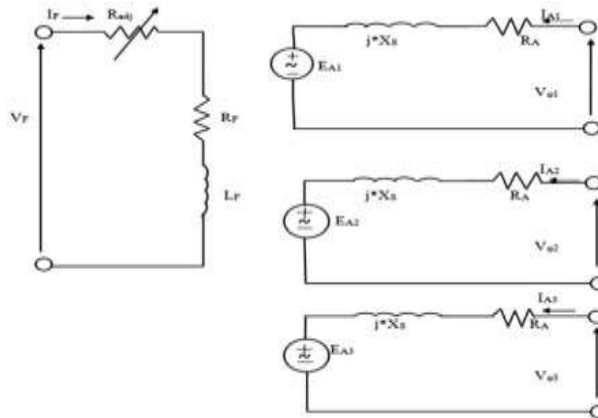
Αρχή λειτουργίας:



Εικόνα 23 Σύγχρονος Κινητήρας δύο πόλων

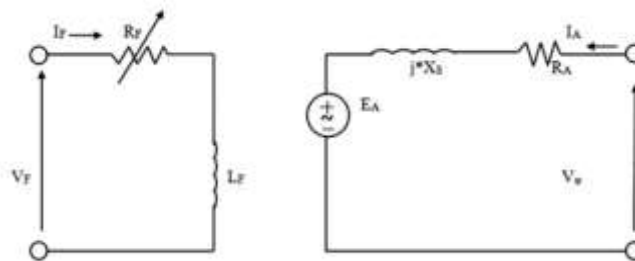
Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ένας σύγχρονος κινητήρας δύο πόλων, όπου το μαγνητικό πεδίο του δρομέα (B_R) παράγεται από το ρεύμα διέγερσης I_F . Στο στάτη της μηχανής εφαρμόζεται ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων το οποίο, παράγει στο εσωτερικό της ένα στρεφόμενο ομογενές μαγνητικό B_S . Όπως αναφερθήκαμε νωρίτερα, στο εσωτερικό του κινητήρα υφίστανται δύο πεδία που τείνουν να ευθυγραμμιστούν, όπως ακριβώς δύο μαγνητικοί ράβδοι. Επειδή όμως, το πεδίο του στάτη περιστρέφεται συνεχώς, το πεδίο του δρομέα – και ο ίδιος ο δρομέας – προσπαθεί συνέχεια να το ακολουθήσει. Όσο μεγαλύτερη είναι και η γωνία μεταξύ των δύο πεδίων τόσο μεγαλύτερη είναι η ροπή που ασκεί στο δρομέα το μαγνητικό του πεδίο. Αυτή ακριβώς είναι η αρχή λειτουργίας ενός σύγχρονου κινητήρα, δηλαδή το μαγνητικό πεδίο του δρομέα «κυνηγεί» συνεχώς το πεδίο του στάτη, χωρίς ποτέ να καταφέρνει να το φτάσει (Αντωνιάδης, 2022),(Charman, 2012).

Ισοδύναμο κύκλωμα:



Εικόνα 24 Πλήρες Τριφασικό Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονου Κινητήρα

Η βασική διαφορά μεταξύ μιας σύγχρονης γεννήτριας κι ενός σύγχρονου κινητήρα βρίσκεται στη φορά ροής της ισχύος τους. Καθώς η ροή της ισχύος στο σύγχρονο κινητήρα αντιστρέφεται, το αποτέλεσμα είναι ότι και το ρεύμα στο στάτη του αντιστρέφεται. Έτσι, η μοναδική διαφορά που παρουσιάζει το ισοδύναμο κύκλωμα του σύγχρονου κινητήρα με αυτό της σύγχρονης γεννήτριας, είναι στη φορά ρεύματος του στάτη I_A που αντιστρέφεται. Ακόμη, είναι γνωστό ότι το τύλιγμα του στάτη ενός σύγχρονου κινητήρα είναι δυνατό να συνδέεται σε αστέρα ή σε τρίγωνο, όπως και το αντίστοιχο τύλιγμα μιας σύγχρονης γεννήτριας. Τέλος, λόγω της αντιστροφής του ρεύματος οπλισμού, στις σχέσεις που εκφράζουν το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα (Νόμος του Kirchhoff), το ρεύμα εμφανίζεται με το αντίθετο πρόσημο. Πιο συγκεκριμένα, στο παρακάτω σχήμα ισχύει:



Εικόνα 25 Ισοδύναμο Κύκλωμα Ανά Φάση Σύγχρονου Κινητήρα

$$V_{\phi} = E_A + jX_s I_A + R_A I_A$$

ή

$$E_A = V_{\phi} - jX_s I_A - R_A I_A$$

Αντίστοιχα, στην εξίσωση της σύγχρονης γεννήτριας απλά αντιστρέφεται το πρόσημο του ρεύματος οπλισμού (Δημολίκας, 2013).

Μεθόδους για την ασφαλή εκκίνηση σύγχρονου κινητήρα:

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ασφαλή εκκίνηση ενός σύγχρονου κινητήρα είναι οι εξής:

1. Η μείωση της ταχύτητας περιστροφής του πεδίου στάτη σε τέτοια τιμή, ώστε το πεδίο του δρομέα να συγχρονιστεί μ' αυτή σε λιγότερο χρόνο από τη μισή περίοδο του πεδίου του στάτη. Αυτό φυσικά μπορεί να συμβεί με τη μείωση της συχνότητας της εφαρμοζόμενης τάσης.
2. Η σύνδεση κινητήριας μηχανής στο δρομέα του κινητήρα, ώστε αυτός να αρχίσει να περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Κατόπιν, η μηχανή παραλληλίζεται στο δίκτυο ισχύος ως γεννήτρια και τελικά, με την αποσύνδεση της κινητήριας μηχανής, η μηχανή λειτουργεί πλέον ως κινητήρας.
3. Η χρήση τυλιγμάτων απόσβεσης.

Επί της παρούσης, μεγαλύτερη έμφαση θα δοθεί στη πιο διαδεδομένη μέθοδο εκκίνησης ενός σύγχρονου κινητήρα, η οποία είναι η εισαγωγή στο δρομέα των «τυλιγμάτων απόσβεσης» (Δημολίκας, 2013),(Charman, 2012).



Εικόνα 26 Δρομέας Σύγχρονης Μηχανής με κατανεμημένο τύλιγμα και τύλιγμα απόσβεσης

Συνοπτικά, η διαδικασία για τη μέθοδο έχει ως εξής:

1. Το τύλιγμα διέγερσης αποσυνδέεται από τη συνεχή τροφοδοσία του και τα άκρα του βραχυκυκλώνονται.
2. Τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται στη τριφασική πηγή τάσης κι ο δρομέας αρχίζει να επιταχύνεται. Επειδή ο κινητήρας δε φορτίζεται, η ταχύτητά του πλησιάζει πάρα πολύ κοντά τη σύγχρονη ταχύτητα.

3. Η πηγή συνεχούς τάσης συνδέεται στο τύλιγμα διέγερσης και τα δύο πεδία στο εσωτερικό της μηχανής συγχρονίζονται. Τότε, είναι δυνατή η σύνδεση φορτίου στον άξονα του κινητήρα και η λειτουργία του κινητήρα σε κανονικές συνθήκες.

Αξίζει να σημειωθεί πως η εισαγωγή τυλιγμάτων απόσβεσης σ' έναν σύγχρονο κινητήρα γίνεται με σκοπό την ασφαλή και σίγουρη εκκίνηση του κινητήρα, αλλά ταυτόχρονα επιδρά και στη βελτίωση της ευστάθειας της μηχανής. Πιο συγκεκριμένα, το πεδίο του στάτη ενός σύγχρονου κινητήρα περιστρέφεται πάντα με τη σύγχρονη ταχύτητα n_{sync} εκτός από την περίπτωση όπου η συχνότητα της τροφοδοσίας του μεταβάλλεται. Πιο απλά, η παρουσία των τυλιγμάτων απόσβεσης επιταχύνει τις «αργές» μηχανές και επιβραδύνει τις «γρήγορες». Τέλος, μόνο τα τυλίγματα απόσβεσης μπορούν να μειώσουν δραστικά τα πολύ ισχυρά προμεταβατικά ρεύματα σε μια σύγχρονη μηχανή κι ακόμη να προστατέψουν μια γεννήτρια από τα πολύ σημαντικά μεταβατικά φαινόμενα κατά τη βραχυκύκλωσή της (Αντωνιάδης,2022),(Charman, 2012).

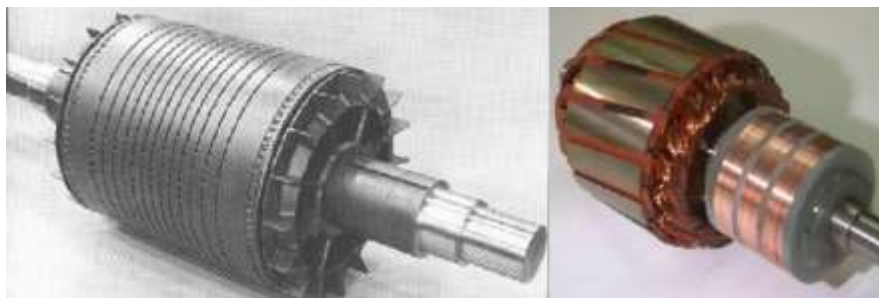
Επαγωγικοί κινητήρες



Εικόνα 27 Επαγωγικός Κινητήρας

Ένας επαγωγικός κινητήρας έχει τον ίδιο στάτη με μια σύγχρονη μηχανή, ενώ ο δρομέας του έχει διαφορετική δομή. Οι τύποι των δρομέων που τοποθετούνται στο εσωτερικό του στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα είναι δύο. Ο ένας ονομάζεται δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού κι ο άλλος δακτυλιοφόρου δρομέα. Ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού αποτελείται από μια σειρά αγώγιμων ράβδων που είναι τοποθετημένες σε αυλάκια της επιφάνειας του δρομέα και βραχυκυκλωμένες στα δύο άκρα τους μέσω μεγάλων δακτυλίων βραχυκύκλωσης. Ο άλλος τύπος δρομέα είναι ο δακτυλιοφόρος δρομέας, που διαθέτει ολοκληρωμένο τριφασικό τύλιγμα, το οποίο είναι τοποθετημένο, ώστε να αποτελεί το κατοπτρικό είδωλο του τυλίγματος του στάτη. Οι τρεις φάσεις ενός τέτοιου τυλίγματος συνδέονται συνήθως σε αστέρα, ενώ τα άκρα

των αγωγών συνδέονται σε δακτύλιους. Οι αγωγοί του δρομέα βραχυκυκλώνονται μέσω ψηκτρών που εφάπτονται στους δακτύλιους. Έτσι, τα ρεύματα στο δακτυλιοφόρο δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα μπορούν να μετρηθούν στις ψήκτρες και ακόμη είναι δυνατή η σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμα της διέγερσης. Η τελευταία δυνατότητα δίνει το πλεονέκτημα επεξεργασίας της χαρακτηριστικής ροπής – ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα – (Charman, 2012).

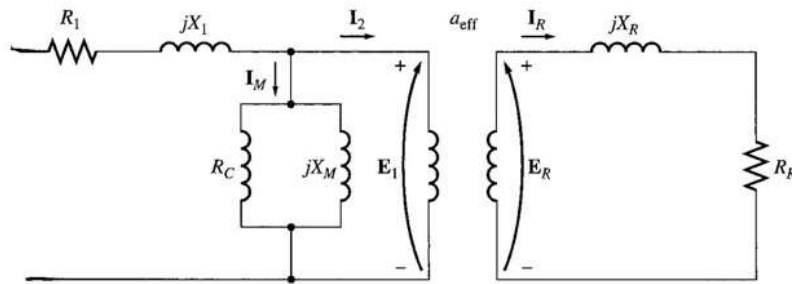


*Εικόνα 28 Ρότορας Κινητήρα Βραχυκυκλωμένου Κλωβού (αριστερά)
Ρότορας Κινητήρα Δακτυλιοφόρου Δρομέα (δεξιά)*

Αρχή Λειτουργίας:

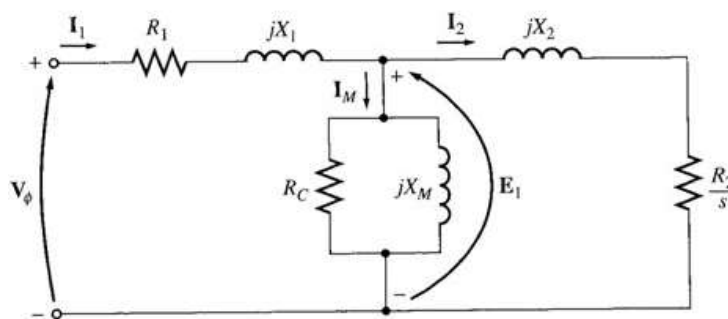
Το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτείται με συμμετρικά τριφασικά εναλλασσόμενα ρεύματα. Στο στάτη δημιουργείται περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο με τη σειρά του εμπλέκει τα τυλίγματα του δρομέα. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής μέσα στα τυλίγματα του δρομέα επάγει σε αυτά ρεύματα τα οποία έχουν την ίδια συχνότητα αρχικά όταν ο δρομέας είναι ακίνητος. Στη συνέχεια, ο δρομέας αναπτύσσει περιστρεφόμενο κύμα ΜΕΔ που αλληλεπιδρά με τον στάτη και παράγεται ροπή στον άξονα της μηχανής. Όταν ο δρομέας αρχίζει να περιστρέφεται, τα τυλίγματα του δρομέα αναπτύσσουν ρεύματα εξ επαγωγής σε συχνότητα διαφορετική από την συχνότητα του στάτη. Πιο συγκεκριμένα, στην συχνότητα που αντιστοιχεί στην διαφορά ανάμεσα στη σύγχρονη ταχύτητα και την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (ταχύτητα ολισθήσεως s). Έτσι, το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που παράγουν τα ρεύματα εξ επαγωγής περιστρέφεται ως προς τον δρομέα με την ταχύτητα ολισθήσεως και έχει τελικά την ίδια ταχύτητα περιστροφής με το πεδίο του στάτη. Τα δύο πεδία παραμένουν λοιπόν ακίνητα, το ένα ως προς το άλλο και μπορεί να αναπτυχθεί πλέον σταθερή ροπή (Charman, 2012).

Ισοδύναμο Κύκλωμα:



Εικόνα 29 Ισοδύναμο Κύκλωμα Επαγωγικού Κινητήρα

Η λειτουργία του κινητήρα βασίζεται στις τάσεις και τα ρεύματα που παράγονται εξ επαγωγής στο δρομέα και οφείλονται στο παγνητικό πεδίο του στάτη. Επειδή, κατά την παραγωγή των τάσεων και των ρευμάτων ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί όμοια μ' έναν μετασχηματιστή, το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα μοιάζει αρκετά μ' αυτό του μετασχηματιστή. Ο επαγωγικός κινητήρας ονομάζεται και μηχανή απλής διέγερσης, επειδή τροφοδοτείται με ισχύ μόνο το κύκλωμα του στάτη του. Επειδή ο επαγωγικός κινητήρας δε διαθέτει ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης, στο ισοδύναμο κύκλωμά του δεν υπάρχει εσωτερική πηγή τάσης όμοια με την εσωτερική τάση E_A των σύγχρονων μηχανών. Έτσι, το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα είναι δυνατό να εξαχθεί, αν είναι γνωστή η λειτουργία των μετασχηματιστών και οι κανόνες που διαθέτουν τη μεταβολή της συχνότητας στο δρομέα με τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής ενός επαγωγικού κινητήρα (Charman,2012).



Εικόνα 30 Ισοδύναμο Κύκλωμα Ανά Φάση Επαγωγικού Κινητήρα

$$E_R = S e_{R0}$$

$$f_r = s f_e$$

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R$$

$$X_R = 2\pi s f_e L_R = s(2\pi f_e L_R) = S_{X_{R0}}$$

$$E_1 = E_R = \alpha_{\text{eff}} E_{R0}$$

$$I_2 = I_R / \alpha_{\text{eff}}$$

$$Z^2 = \alpha_{\text{eff}}^2 (R_R/s + J_{X_{R0}})$$

$$R_2 = \alpha_{\text{eff}}^2 R_R$$

$$X_2 = \alpha_{\text{eff}}^2 X_{R0}$$

Εκκίνηση Επαγωγικών Κινητήρων:

Οι επαγωγικοί κινητήρες δε παρουσιάζουν κατά την εκκίνησή τους τα προβλήματα των σύγχρονων κινητήρων. Σε πολλές περιπτώσεις, η εκκίνηση των επαγωγικών κινητήρων επιτυγχάνεται απλά με τη σύνδεσή τους στο δίκτυο ισχύος. Όμως, πολλές φορές υπάρχουν σοβαροί λόγοι για να μη γίνεται κάτι τέτοιο. Για παράδειγμα, μπορεί το ρεύμα εκκίνησης που απαιτείται, να προκαλεί τέτοια πτώση τάσης στο δίκτυο ισχύος, που να κάνει ανεπίτρεπτη την απλή εκκίνηση με απευθείας σύνδεση στη γραμμή. Στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα, η εκκίνηση μπορεί να επιτευχθεί με σχετικά μικρά ρεύματα εκκίνησης με τη σύνδεση εξωτερικής αντίστασης στο δρομέα. Αυτή η ξεχωριστή αντίσταση δεν αυξάνει μόνο τη ροπή εκκίνησης, αλλά παράλληλα μειώνει και το ρεύμα εκκίνησης. Αντίστοιχα, στους κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, το ρεύμα εκκίνησης παίρνει μεγάλο εύρος τιμών και εξαρτάται κυρίως από την ονομαστική ισχύ του κινητήρα και από την ενεργό αντίσταση του δρομέα στις συνθήκες εκκίνησης. Για τον προσδιορισμό του ρεύματος στις συνθήκες εκκίνησης όλοι οι κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού χαρακτηρίζονται με κάποιο κωδικό γράμμα που βρίσκεται στις πινακίδες τους. Το κωδικό γράμμα θέτει τα όρια της έντασης του ρεύματος με την οποία μπορεί να λειτουργήσει ο κινητήρας κατά την εκκίνηση. Για τον προσδιορισμό του ρεύματος εκκίνησης ενός επαγωγικού κινητήρα, δίνεται από τη σχέση:

$$I_L = S_{\text{start}} / (\sqrt{3} \times V_T)$$

όπου S_{start} : ονομαστική ιπποδύναμη (συντελεστής του κωδικού γράμματος)

Βασικές έννοιες των Επαγωγικών Κινητήρων:

- Σύγχρονη ταχύτητα:

Η σύγχρονη ταχύτητα του επαγωγικού κινητήρα, δίνεται από τη σχέση:

$$n_{\text{sync}} = (120 \times f_e) / P$$

Οι μόνοι τρόποι μεταβολής της σύγχρονης ταχύτητας, είναι:

1. Η ρύθμιση της ηλεκτρικής συχνότητας
2. Η μεταβολή του αριθμού των πόλων της μηχανής.

Ο έλεγχος της ολίσθησης πραγματοποιείται με μεταβολή της αντίστασης του δρομέα είτε της τάσης εισόδου στον κινητήρα.

- Ολίσθηση του Δρομέα:

Η τάση που επάγεται σε κάποιον από τους αγωγούς του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα, εξαρτάται από τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία. Τα μεγέθη που περιγράφουν τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία, είναι δύο:

1. Η ταχύτητα ολίσθησης, που ορίζεται ως η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή:

$$n_{\text{slip}} = n_{\text{sync}} - n_m$$

2. Η ολίσθηση, πρόκειται για τη σχετική ταχύτητα ολίσθησης εκφρασμένη σε εκατοιστιαία ή σε ανά μονάδα βάση, δηλαδή:

$$s = n_{\text{slip}} / n_{\text{sync}} (\times 100\%)$$

$$s = (n_{\text{sync}} - n_m) / n_{\text{sync}} (\times 100\%)$$

Επίσης, μέσω της γωνιακής ταχύτητας (rad/s):

$$s = (\omega_{\text{sync}} - \omega_m) / \omega_{\text{sync}} (\times 100\%)$$

Τέλος, η ταχύτητα περιστροφής του άξονα της μηχανής, μπορεί να εκφραστεί μέσω της ολίσθησης και της σύγχρονης ταχύτητας, δηλαδή:

$$n_m = (1-s) n_{sync}$$

ή

$$\omega_m = (1-s) \omega_{sync}$$

- Ηλεκτρική Συχνότητα στον Δρομέα:

Αν ο δρομέας της μηχανής είναι ακίνητος, τότε η συχνότητά του είναι ίση με τη συχνότητα του στάτη. Όμως, αν ο δρομέας κινείται με τη σύγχρονη ταχύτητα, η συχνότητα της τάσης στο δρομέα είναι μηδενική. Επειδή, η ολίσθηση ορίζεται από την εξίσωση:

$$s = (n_{sync} - n_m) / n_{sync}$$

τότε η συχνότητα στο δρομέα, μπορεί να διατυπωθεί ως:

$$f_{re} = s f_{se}$$

και μετά από τις διάφορες και χρήσιμες μορφές που μπορεί να παρεί η παραπάνω εξίσωση, καταλήγουμε:

$$f_{re} = \frac{P}{120} (n_{sync} - n_m)$$

(Chapman, 2012).

Κεφάλαιο 2: Ηλεκτρικοί Κινητήρες DC



Εικόνα 31 Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος

Τα πρώτα συστήματα ισχύος που αναπτύχθηκαν στις ΗΠΑ αποτελούσαν συστήματα συνεχούς ρεύματος αλλά από το 1890 ακόμη, τα συστήματα ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος ήταν αυτά που κυριάρχησαν στις εφαρμογές. Ανεξάρτητα από αυτό το γεγονός, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος συνέχισαν να κατέχουν μεγάλο ποσοστό των ετήσιων πωλήσεων ηλεκτρικών μηχανών έως και τη δεκαετία του 1960. Στις μέρες μας, υπάρχουν μερικοί λόγοι που κάνουν αρκετά δημοφιλείς τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Ένας από αυτούς, είναι το γεγονός ότι τα συστήματα συνεχούς ρεύματος είναι ακόμη αντικατάστατα στα επιβατικά αυτοκίνητα, στα φορτηγά και στα αεροπλάνα. Αυτοί οι κινητήρες, εμφανίζονται συχνά σε εφαρμογές που απαιτούνται μεγάλες μεταβολές στη ταχύτητα περιστροφής. Στις μέρες μας, οι επαγωγικοί κινητήρες με ηλεκτρονικά κυκλώματα οδήγησης είναι η επιλογή που προτιμάται σε σύγκριση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος για τις περισσότερες εφαρμογές. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμη ορισμένες εφαρμογές, στις οποίες προτιμώνται οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Τέλος, οι πέντε βασικές κατηγορίες των κινητήρων συνεχούς ρεύματος είναι:

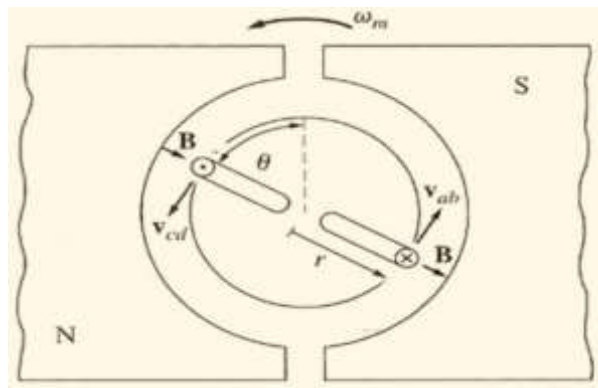
1. Κινητήρας συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης
2. Κινητήρας συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης
3. Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με μόνιμο μαγνήτη
4. Κινητήρας συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς
5. Κινητήρας συνεχούς ρεύματος σύνθετης διέγερσης

2.1 Βασικές Αρχές των Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος

Τάση εξ Επαγωγής στα άκρα του Περιστρεφόμενου Πλαισίου:

Όταν ο δρομέας της μηχανής αρχίζει να περιστρέφεται, στα άκρα του εμφανίζεται μια τάση εξ επαγωγής. Το πλαίσιο είναι ορθογώνιο με τις πλευρές ab και ac κάθετες στο επίπεδο της σελίδας και τις bc και da παράλληλες σ' αυτό. Το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο και σταθερό σε οπουδήποτε σημείο της κυλινδρικής επιφάνειας που σχηματίζει το πλαίσιο εκτός από την περιοχή των άκρων της επιφάνειας των πόλων, όπου το πεδίο μηδενίζεται. Για τον καθορισμό της συνολικής τάσης e_{tot} στα άκρα του πλαισίου, αυτό χωρίζεται σε τμήματα (τις πλευρές του), των οποίων η τάση εξετάζεται χωριστά και τελικά προστίθενται τα μερικά αποτελέσματα. Η τάση στα άκρα του κάθε τμήματος υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{I}$$



Εικόνα 32 Προσδιορισμός των εξισώσεων για τις τάσεις που επάγονται στο πλαίσιο

Η μαγνητική επαγωγή B , είναι σταθερή σε κάθε σημείο του διακένου κάτω από τους πόλους κι έτσι η μαγνητική ροή κάτω από τον κάθε πόλο δίνεται από το γινόμενο του εμβαδού της επιφάνειας του πόλου με τη μαγνητική επαγωγή, δηλαδή:

$$\varphi = A_p B$$

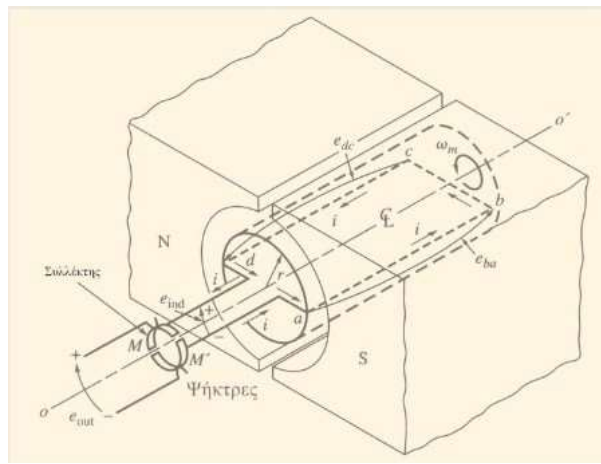
Μετά από περαιτέρω υπολογισμούς και μετασχηματισμούς των εξισώσεων των πλευρών ab , bc , ac και da καταλήγουμε στην τελική εξίσωση της τάσης, η οποία είναι:

$$e_{\text{ind}} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} A_p B \omega & \text{κάτω από τους πόλους} \\ 0 & \text{έξω από την επιφάνεια των πόλων} \end{cases}$$

Αυτή η εξίσωση εκφράζει το ότι η τάση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της μηχανής, δίνεται από το γινόμενο της ροής του πεδίου της μηχανής με την ταχύτητα περιστροφής επί κάποιον παράγοντα που εκφράζει κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής. Γενικεύοντας τα παραπάνω, η τάση κάθε πραγματικής μηχανής, εξαρτάται από τους παρακάτω τρεις παράγοντες:

1. Τη μαγνητική ροή του πεδίου της μηχανής
2. Την ταχύτητα περιστροφής της
3. Μια σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής

Συνεχής Τάση στα άκρα του Περιστρεφόμενου Πλαισίου:

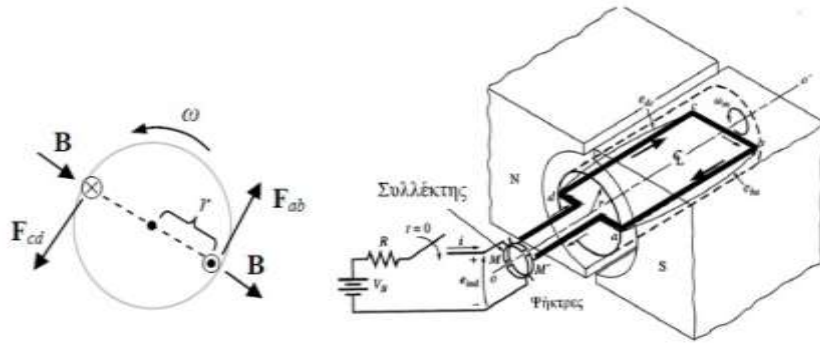


Εικόνα 33 Απεικόνιση παραγωγής συνεχής τάσης από το πλαίσιο με συλλέκτη και ψήκτρες

Ένας τρόπος για να παραχθεί συνεχής τάση αντί για εναλλασσόμενη από μια συγκεκριμένη μηχανή, φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Στα άκρα του πλαισίου, έχουν προστεθεί δύο ημικυκλικά αγωγικά τμήματα, ενώ δύο σταθεροί ακροδέκτες σχηματίζουν μεταξύ τους τέτοια γωνία, ώστε, όταν η τάση του πλαισίου είναι μηδενική, να ανταλλάσσουν μεταξύ τους τα αγωγικά τμήματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, κάθε φορά που η τάση αλλάζει πρόσημο, οι ακροδέκτες να μεταβάλλουν τη σύνδεσή τους

κι έτσι η τάση των ακροδεκτών να έχει σταθερό πρόσημο. Αυτή η συνεχής αλλαγή στις συνδέσεις των ακροδεκτών, ονομάζεται *μεταγωγή*. Τα ημικυκλικά περιστρεφόμενα τμήματα, ονομάζονται τομείς του συλλέκτη, ενώ οι σταθεροί ακροδέκτες λέγονται ψήκτρες.

Επαγόμενη Ροπή στο Περιστρεφόμενο Πλαίσιο:



Εικόνα 34 Εξαγωγή της εξίσωσης για την επαγόμενη ροπή στο πλαίσιο. Για περισσότερη απλότητα, ο δρομέας του πυρήνα έχει παραλειφθεί

Η εξέταση του πλαισίου, γίνεται τμηματικά και στο τέλος προστίθενται τα μερικά αποτελέσματα. Η επαγόμενη δύναμη στην κάθε πλευρά του πλαισίου, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F = i (I \times B)$$

και η αντίστοιχη ροπή από την:

$$\tau = rF \sin\theta$$

όπου θ είναι η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων r και F . Φυσικά, η ροπή μηδενίζεται, όταν ο βρόχος βρίσκεται έξω από τα άκρα των πόλων. Όταν, όμως, βρίσκεται κάτω από την επιφάνειά τους, η ροπή υπολογίζεται μέσω των πλευρών ab , bc , cd και da και καταλήγουμε στην τελική μορφή της επαγόμενης ροπής που ασκείται στο πλαίσιο, η οποία θα είναι:

$$\tau_{ind} = \tau_{ab} + \tau_{bc} + \tau_{cd} + \tau_{da}$$

όπου σε δύο από τις τέσσερις πλευρές, η ροπή είναι μηδενική.

Γενικά, η ροπή σε κάθε πραγματική μηχανή, εξαρτάται από τους εξής τρεις παράγοντες:

1. Τη μαγνητική ροή του πεδίου της μηχανής
2. Το ρεύμα στο δρομέα της μηχανής
3. Μια σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής

2.2 Δομή Μηχανών DC



Εικόνα 35 Εξωτερική Όψη Μηχανής DC με τα Βασικά της Μέρη

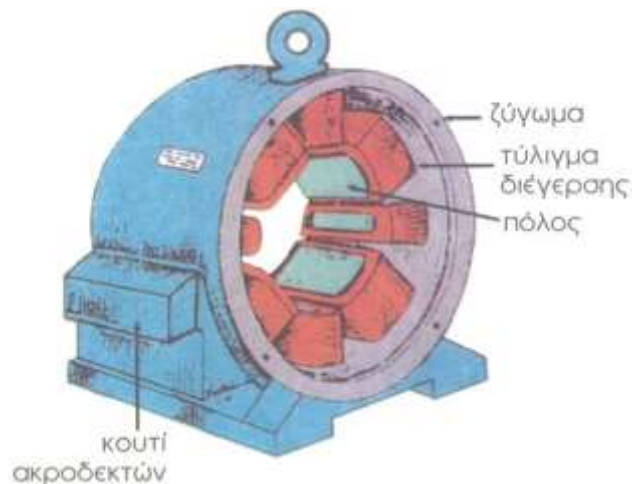
Κάθε μηχανή συνεχούς ρεύματος, αποτελείται από το ακίνητο μέρος, το οποίο ονομάζεται «στάτης» και από το κινητό μέρος, το οποίο ονομάζεται «δρομέας».

Ο *στάτης*, είναι το συγκρότημα των ακίνητων τμημάτων της μηχανής και ως κύριο προορισμό του, έχει τη δημιουργία καθορισμένης μαγνητικής ροής. Έτσι, αποτελείται από:

- Το ζύγωμα, που αποτελεί το κορμό της μηχανής και κατασκευάζεται από χυτοχάλυβα ή ελατό σίδηρο. Μετά το ζύγωμα, κλείνει το μαγνητικό κύκλωμα.
- Τους μαγνητικούς πόλους, που στερεώνονται στο ζύγωμα και κατασκευάζονται από ελατό σίδηρο, εφ' όσον ανήκουν σε δυναμογεννήτρια. Δηλαδή, σε γεννήτρια που έχει τύλιγμα στους πόλους. Προορισμός των πόλων, είναι να εξασφαλίσουν τη μαγνητική ροή που γεννιέται από τα τυλίγματα, τα οποία περιβάλλουν τους πόλους. Το ρεύμα με το οποίο τροφοδοτούνται οι πόλοι, καλείται ρεύμα διέγερσης. Κάθε πόλος, αποτελείται από τον πυρήνα και το τύλιγμά του που μεταξύ τους παρεμβάλλεται μόνωση.
- Τα πεδία των πόλων, είναι το πλατύτερο μέρος του πόλου και βρίσκονται πλησιέστερα στο επαγωγικό τύμπανο. Αποτελούν συνήθως ξεχωριστή κατασκευή και βιδώνονται στερεότατα κάτω από τους πόλους. Σκοπός του

πεδίου, είναι να διαχέει τη ροή σε ένα μεγαλύτερο μέρος της περιφέρειας του δρομέα, απ' όσο καλύπτει ο κορμός του πυρήνα και να υποβαστάζει το τύλιγμα του πόλου.

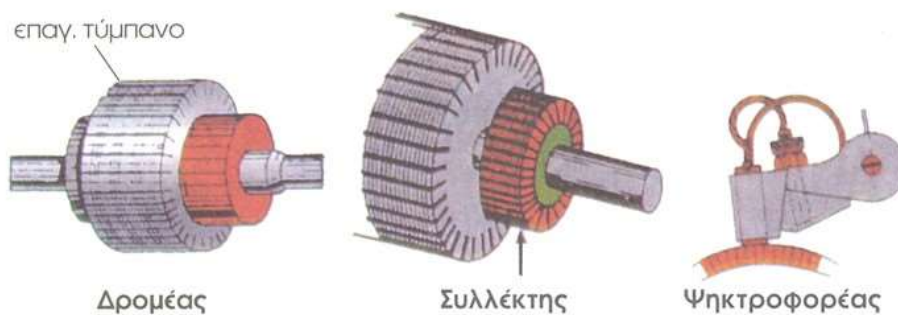
- Τα τυλίγματα των πόλων, τα οποία αποτελούνται από πολλές σπείρες χάλκινου μονωμένου σύρματος, οι οποίες αφού λάβουν με τη βοήθεια καλουπιού τη μορφή του πυρήνα, τυλίγονται με βαμβακερή ταινία και βαφτίζονται σε μονωτικό βερνίκι. Τα άκρα του τυλίγματος, μένουν ελεύθερα για την ηλεκτρική του σύνδεση και το σύνολο των τυλιγμάτων των μαγνητικών πόλων, ονομάζεται τύλιγμα διέγερσης της μηχανής.
- Τα καλύμματα (καπάκια), στερεώνονται με κοχλίες στο ζύγωμα και χρησιμεύουν για να στηρίζουν τον άξονα του δρομέα και τον ψηκτροφορέα και να προφυλάσσουν το εσωτερικό της μηχανής. Τα καλύμματα, φέρουν ενσωματωμένο και από ένα έδρανο μέσω του οποίου στρέφεται ο άξονας του δρομέα.
- Τον ψηκτροφορέα, που είναι το σύστημα στο οποίο στερεώνονται οι ψηκτροθήκες. Ο ψηκτροφορέας, στερεώνεται στο κάλυμμα της μηχανής το οποίο βρίσκεται από την πλευρά του συλλέκτη. Ο ψηκτροφορέας, αποτελείται από ένα σιδερένιο δακτύλιο, τους βραχίονες των ψηκτροθηκών και τις ψηκτροθήκες. Στο σιδερένιο δακτύλιο, στερεώνονται οι βραχίονες υποστήριξης των ψηκτροθηκών και στους βραχίονες, στηρίζονται οι ψηκτροθήκες, δηλαδή μεταλλικές θήκες μέσα στις οποίες τοποθετούνται οι ψήκτρες.
- Τις ψήκτρες, που είναι συνήθως τεμάχια από σκληρό άνθρακα ή γραφίτη ή από ένα μίγμα άνθρακα και χαλκού. Τοποθετούνται μέσα στις ψηκτροθήκες και πιέζονται από ελατήριο, ώστε να επιτυγχάνεται καλή επαφή με την επιφάνεια του συλλέκτη. Τα ελατήρια αυτά ρυθμίζονται έτσι, ώστε η πίεση που ασκεί η ψήκτρα στο συλλέκτη να μην είναι ούτε πολύ μεγάλη, ούτε πολύ μικρή (Γαντζούδης, κ.ά., 2004).



Εικόνα 36 Στάτης Μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

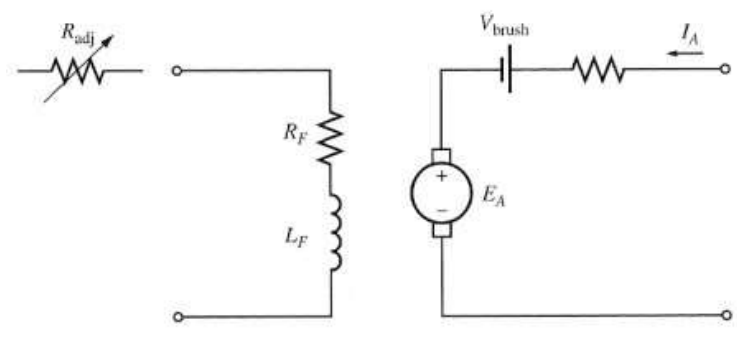
Ο δρομέας, είναι το συγκρότημα των κινητών τμημάτων της μηχανής και αποτελείται από:

- Τον άξονα, που φέρει το επαγωγικό τύμπανο, το συλλέκτη και τον ανεμιστήρα και στρέφεται πάντοτε μαζί με αυτό.
- Τον πυρήνα του επαγωγικού τυμπάνου, ο οποίος παρέχει μια οδό μικρής μαγνητικής αντίστασης για τη δίοδο των μαγνητικών γραμμών των πόλων και φέρει σε αυτό, το τύλιγμα του τυμπάνου. Κατασκευάζονται από πολλά μαγνητικά ελάσματα, τα οποία κάμπτονται σε ειδικές πρέσες. Τα μαγνητικά ελάσματα είναι μονωμένα μεταξύ τους, για να μειωθούν οι απώλειες λόγω δινορρευμάτων.
- Το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου, το οποίο κατασκευάζεται από μονωμένο χάλκινο αγωγό κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής. Ο αγωγός κυκλικής διατομής χρησιμοποιείται κύριως στις μηχανές μικρής ισχύος ή στις μηχανές υψηλής τάσης. Σ' όλες τις άλλες περιπτώσεις, προτιμάται ο αγωγός ορθογωνικής διάταξης, επειδή μ' αυτόν κατασκευάζονται σπείρες μεγαλύτερης αντοχής και γίνεται μεγαλύτερη εκμετάλλευση του χώρου των οδοντώσεων.
- Το συλλέκτη, που κατασκευάζεται από πολλά χάλκινα ελάσματα, τα οποία ονομάζονται τομείς του συλλέκτη. Ο σκοπός του συλλέκτη, είναι να παίρνει ή να μεταβιβάζει το ρεύμα (περίπτωση κινητήρα ή γεννήτριας).
- Τον ανεμιστήρα, που στερεώνεται στον άξονα και δημιουργεί κατά την περιστροφή του ρεύμα αέρα, που εισέρχεται στη μηχανή από το άνοιγμα του ενός καλύμματος και εξέρχεται από το άνοιγμα του άλλου καλύμματος.
- Την πλήμνη, που χρησιμοποιείται στις μηχανές μεγάλης σχετικά ισχύος, για να μειώσουμε το βάρος των μαγνητικών ελασμάτων, που στοιχίζουν ακριβά, αλλά και για να διευκολύνουμε την ψύξη του πυρήνα (Γαντζούδης, κ.ά., 2004).

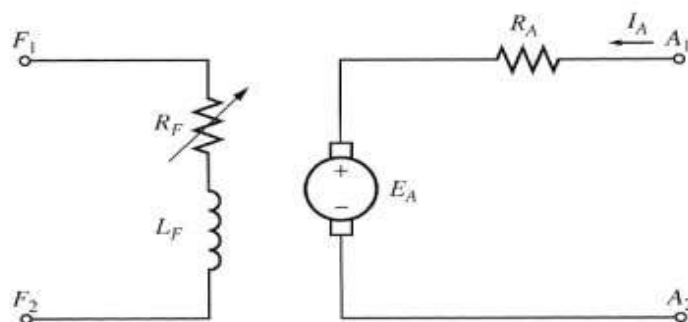


Εικόνα 37 Δρομέας Μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

2.3 Ισοδύναμο Κύκλωμα Κινητήρα DC



Εικόνα 38 Ισοδύναμο Κύκλωμα Ενός Κινητήρα DC



Εικόνα 39 Απλοποιημένο Ισοδύναμο Κύκλωμα Ενός Κινητήρα DC

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα DC, το κύκλωμα σπλισμού παριστάνεται με μια ιδανική πηγή τάσης E_A και με μια αντίσταση R_A . Στην ουσία, πρόκειται για το ισοδύναμο Thevenin της συνολικής δομής του δρομέα, που περιλαμβάνει τους αγωγούς, το δρομέα, τους βοηθητικούς πόλους και το τυλίγμα αντιστάθμισης, αν υπάρχει. Η πτώση τάσης V_Ψ στις ψήκτρες παρουσιάζεται με μια μικρή πηγή συνεχούς τάσης που έχει πολικότητα αντίθετη προς το ρεύμα του δρομέα της μηχανής. Τα τυλίγματα της διέγερσης, που παράγουν την κύρια μαγνητική ροή του κινητήρα παρουσιάζονται με την αυτεπαγωγή L_F και την αντίσταση R_F . Η αντίσταση R_{adj} παρουσιάζει την εξωτερική μεταβλητή αντίσταση που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της ποσότητας του ρεύματος της διέγερσης. Η τάση εξ επαγωγής που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της μηχανής, δίνεται από την εξίσωση:

$$E_A = K\phi\omega_m$$

ενώ η επαγόμενη ροπή στον άξονά της, δίνεται από την:

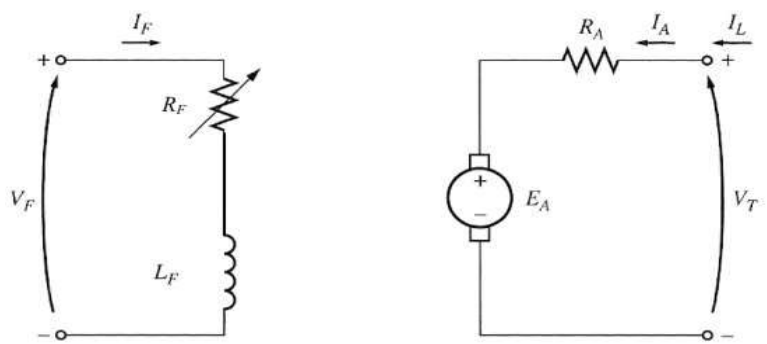
$$\tau_{\text{ind}} = K\phi I_A$$

Οι δύο παραπάνω εξισώσεις, ο νόμος των τάσεων του Kirchhoff για το κύκλωμα οπλισμού και η καμπύλη μαγνήτισης της μηχανής, αποτελούν τα απαραίτητα εργαλεία για την ανάλυση της συμπεριφορά ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος (Charman, 2012).

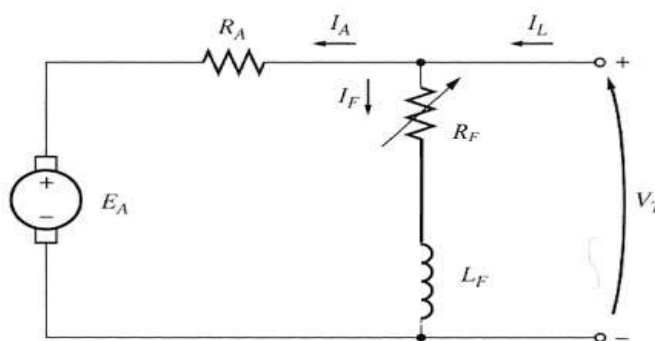
2.4 Βασικές Κατηγορίες Κινητήρων DC

Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος Ανεξάρτητης και Παράλληλης Διέγερσης

Ισοδύναμο Κύκλωμα:



Εικόνα 40 Ισοδύναμο Κύκλωμα ενός Κινητήρα DC Ανεξάρτητης Διέγερσης



Εικόνα 41 Ισοδύναμο Κύκλωμα ενός Κινητήρα DC Παράλληλης Διέγερσης

Το κύκλωμα διέγερσης ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης, τροφοδοτείται από μια ανεξάρτητη πηγή συνεχούς τάσης, ενώ το αντίστοιχο κύκλωμα ενός κινητήρα παράλληλης διέγερσης τροφοδοτείται από το κύκλωμα οπλισμού του. Αν θεωρηθεί πως η τάση τροφοδοσίας ενός κινητήρα παραμένει

σταθερή, δεν υπάρχει καμιά πρακτική διαφορά ανάμεσα σε αυτούς τους δύο τύπους κινητήρων. Ο νόμος των τάσεων του Kirchhoff για το κύκλωμα δρομέα αυτών των κινητήρων παίρνει την μορφή:

$$V_T = E_A + I_A R_A$$

Χαρακτηριστική Φορτίου ενός Κινητήρα Παράλληλης Διέγερσης:

Χαρακτηριστική φορτίου μιας μηχανής, ονομάζεται η *γραφική παράσταση* μεταξύ των ποσοτήτων εξόδου της μηχανής αυτής. Επειδή τα μεγέθη εξόδου ενός κινητήρα είναι η ροπή στον άξονά του και η ταχύτητα περιστροφής του, η χαρακτηριστική φορτίου του κινητήρα, είναι το διάγραμμα της ροπής εξόδου ως προς την ταχύτητά του. Η χαρακτηριστική εξόδου ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης, εξάγεται από τις εξισώσεις της επαγόμενης τάσης και της ροπής στον κινητήρα, καθώς και από το νόμο των τάσεων του Kirchhoff. Επομένως, ισχύουν τα παρακάτω:

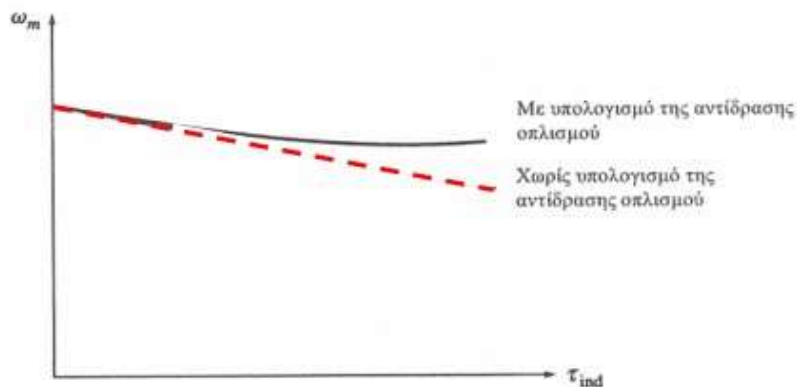
$$V_T = E_A + I_A R_A$$

$$V_T = K\phi\omega_m + I_A R_A$$

$$I_A = \tau_{ind} / K\phi, \text{ λόγω: } \tau_{ind} = K\phi I_A$$

$$V_T = K\phi\omega_m + (\tau_{ind} / K\phi) R_A$$

$$\omega_m = (V_T / K\phi) - [R_A / (K\phi)^2] \tau_{ind}$$



Εικόνα 42 Χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας του κινητήρα που παρουσιάζει αντίδραση σπλισμού

Έλεγχος της Ταχύτητας στους Κινητήρες Παράλληλης Διέγερσης:

Για τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής στους κινητήρες παράλληλης διέγερσης, υπάρχουν οι δύο πιο διαδεδομένες μέθοδοι ελέγχου, που είναι οι εξής:

1. Μεταβολή της αντίστασης διέγερσης (R_F): Αν αυξηθεί η αντίσταση διέγερσης, το ρεύμα διέγερσης (I_F) μειώνεται και μαζί με αυτό μειώνεται και η μαγνητική ροή Φ στο εσωτερικό του κινητήρα. Αυτή η μείωση της μαγνητικής ροής προκαλεί στιγμιαία ελάττωση στην τάση E_A που παράγεται στο εσωτερικό του κινητήρα, λόγω της:

$$I_A = (V_T - E_A) / R_A$$

η μείωση της E_A έχει σαν αποτέλεσμα μια μεγάλη αύξηση στη τιμή του ρεύματος οπλισμού με αποτέλεσμα η ταχύτητα να αυξάνεται.

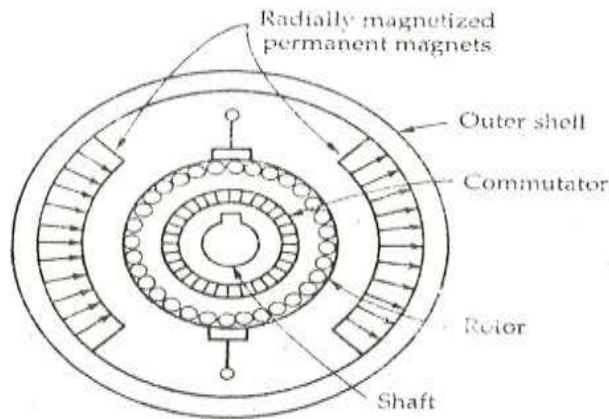
2. Μεταβολή της τάσης που εφαρμόζεται στον οπλισμό του κινητήρα: Σε αυτή την περίπτωση, μεταβάλλεται η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του οπλισμού, χωρίς όμως να μεταβάλλεται η τάση στα άκρα του κυκλώματος διέγερσης. Αυτό σημαίνει, ότι ο κινητήρας που χρησιμοποιεί για τον έλεγχο της ταχύτητάς του τη μέθοδο μεταβολής της τάσης οπλισμού του, είναι ο κινητήρας ανεξάρτητης διέγερσης. Συνοπτικά, η διαδικασία αιτίας – αποτελέσματος σε αυτή τη μέθοδο ελέγχου της ταχύτητας είναι η εξής:

1. Η αύξηση της V_A προκαλεί αύξηση του I_A .
2. Το γεγονός αυτό αυξάνει την τ_{ind} .
3. Η αύξηση της ω_m αυξάνει την E_A .
4. Η αύξηση της E_A προκαλεί μείωση του I_A .
5. Το γεγονός αυτό προκαλεί ελάττωση της τ_{ind} μέχρι να ισχύει η $\tau_{ind} = \tau_{load}$ σε μια νέα ταχύτητα μεγαλύτερη από την αρχική

Υπάρχει και μία τρίτη, αλλά λιγότερο διαδεδομένη μέθοδο ελέγχου της ταχύτητας, η οποείναι:

3. Η σύνδεση μιας αντίστασης σε σειρά με το κύκλωμα οπλισμού: Αν συνδεθεί μια αντίσταση σε σειρά με το κύκλωμα οπλισμού του κινητήρα, τότε η κλίση της χαρακτηριστικής ροπής – ταχύτητας αυξάνεται σημαντικά κάνοντάς τον να περιστρέφεται πιο αργά κατά τη φόρτισή του. Αυτή η μέθοδος, έχει δαπάνες γιατί οι απώλειες πάνω στην αντίσταση που εισάγεται είναι τεράστιες. Γι' αυτό το λόγο εφαρμόζεται σπάνια.

Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος με Μόνιμο Μαγνήτη



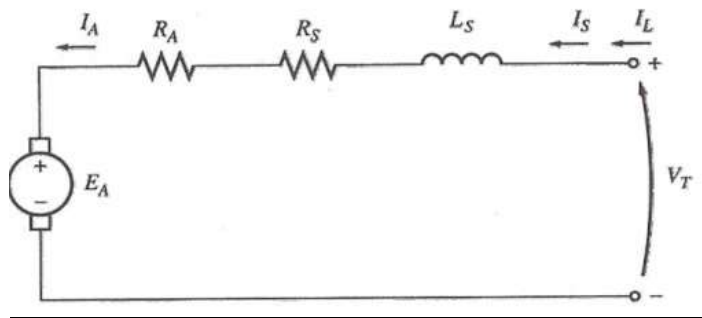
Εικόνα 43 Εγκάρσια τομή διπολικού Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη

Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες, διαθέτει κύριους πόλους κατασκευασμένους από μόνιμους μαγνήτες. Τέτοιου είδους κινητήρες σε μερικές εφαρμογές παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τους κινητήρες παράλληλης διέγερσης. Πιο συγκεκριμένα, οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη λειτουργούν μαγνητικό πεδίο χωρίς ρεύμα διέγερσης, επομένως δε παρουσιάζουν απώλειες χαλκού στο τύλιγμα της διέγερσης, όπως οι κινητήρες παράλληλης διέγερσης. Τέτοιου τύπου κινητήρες, συναντάμε συχνά σε μικρά μεγέθη με ονομαστική ισχύ ίση με κλάσμα του ίππου, όπου το κόστος και ο χώρος για ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης δεν μπορεί να εξασφαλιστεί. Απ' την άλλη όμως, αυτοί οι κινητήρες παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα. Οι μόνιμοι μαγνήτες δεν είναι δυνατό να παράγουν τόσο μεγάλη μαγνητική επαγωγή, όσο ένα ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης κι έτσι ο κινητήρας με μόνιμους μαγνήτες παρουσιάζει μικρότερη επαγόμενη ροπή (τ_{ind}) ανά μονάδα ρεύματος οπλισμού (I_A) από τον κινητήρα παράλληλης διέγερσης που έχει το ίδιο μέγεθος και την ίδια δομή. Ακόμη, τέτοιοι κινητήρες παρουσιάζουν και κίνδυνο απομαγνήτισης. Τέτοιου είδους κινητήρων μόνιμου μαγνήτη, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, όπως: σε αυτοκίνητα, σε δίσκους υπολογιστών, σε βιομηχανίες παιχνιδιών, σε κάποιες ηλεκτρικές συσκευές (π.χ. φορητές ηλεκτρικές σκούπες), σε φορητό ηλεκτρικό εργαλείο (π.χ. μηχανές διάτρησης) (Charman, 2012) (Γαντζούδης, κ.ά., 2004).

Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος Διέγερσης Σειράς

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς, είναι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, των οποίων τα τυλίγματα διέγερσης διαθέτουν σχετικά λίγες σπείρες συνδεδεμένες στην σειρά με το κύκλωμα σπλισμού.

Ισοδύναμο Κύκλωμα:



Εικόνα 44 Ισοδύναμο Κύκλωμα ενός Κινητήρα DC με Διέγερση Σειράς

Το ρεύμα σπλισμού, το ρεύμα διέγερσης και το ρεύμα εισόδου σε κινητήρες τέτοιου τύπου, έχουν την ίδια τιμή.

$$I_A = I_S = I_L$$

Αντίστοιχα, ο νόμος των τάσεων του Kirchhoff σε αυτούς τους κινητήρες, παίρνει την μορφή:

$$V_T = E_A + I_A (R_A + R_S)$$

Επαγόμενη Ροπή:

Το βασικό χαρακτηριστικό ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς, είναι το γεγονός ότι η μαγνητική ροή στο εσωτερικό του είναι ανάλογη του ρεύματος σπλισμού, πριν φυσικά την εμφάνιση κορεσμού. Η αύξηση του ρεύματος εισόδου προκαλεί αύξηση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του κινητήρα. Η επαγόμενη ροπή, δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{\text{ind}} = K\phi I_A$$

Η μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής, είναι ανάλογη προς το ρεύμα οπλισμού της, δηλαδή αυτή η μαγνητική ροή μπορεί να οριστεί ως:

$$\phi = cI_A$$

όπου c είναι ένας σταθερός συντελεστής αναλογίας. Η επαγόμενη ροπή στον κινητήρα, δίνεται από την:

$$\tau_{\text{ind}} = K\phi I_A = KcI_A^2$$

Σαν συμπέρασμα, η ροπή του κινητήρα είναι ανάλογη με το τετράγωνο του ρεύματος οπλισμού του. Είναι προφανές από τη σχέση, ότι ο κινητήρας διέγερσης σειράς δίνει τη μεγαλύτερη ροπή ανά μονάδα ρεύματος από οποιοδήποτε άλλο κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές, όπου απαιτείται πολύ μεγάλη ροπή. Κάποιες εφαρμογές είναι: κινητήρες εκκίνησης (μίζες) αυτοκινήτων, κινητήρες ανελκυστήρων και των μηχανών έλξης στην ηλεκτροκίνηση (Charman, 2012),(Γαντζούδης, κ.ά., 2004).

Έλεγχος της Ταχύτητας:

Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς, υπάρχει μόνο μια αποδοτική μέθοδος για την μεταβολή της ταχύτητάς τους. Σ' αυτή την μέθοδο ρυθμίζεται η τάση εισόδου στον κινητήρα. Όταν αυξάνεται η τάση εισόδου, αυξάνεται ο πρώτος όρος της παρακάτω εξίσωσης, κι έτσι ο κινητήρας περιστρέφεται γρηγορότερα για οποιαδήποτε δεδομένη ροπή.

$$\omega_m = \frac{V_T}{\sqrt{Kc}} \frac{1}{\sqrt{\tau_{\text{ind}}}} - \frac{R_A + R_S}{Kc}$$

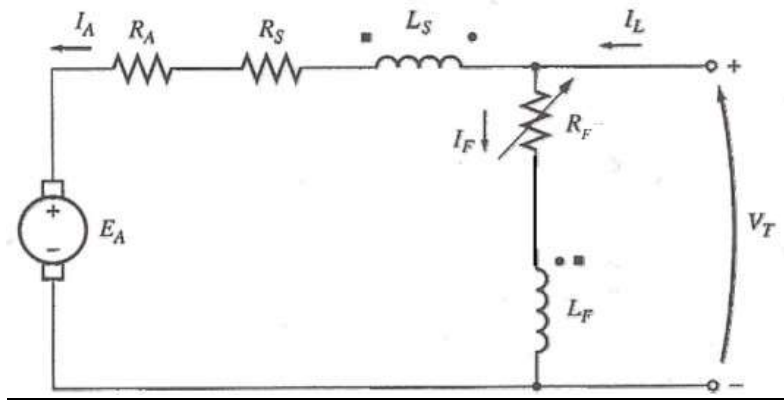
Εικόνα 45 Σχέση Ροπής – Ταχύτητας

Η ταχύτητα των κινητήρων αυτών, μπορεί να μεταβάλλεται με την εισαγωγή μιας αντίστασης σε σειρά με το κύκλωμα του κινητήρα αλλά αυτή η μέθοδος είναι αρκετά δαπανηρή κι έτσι χρησιμοποιείται μόνο στις ενδιάμεσες περιόδους της εκκίνησης ορισμένων κινητήρων (Charman, 2012),(Γαντζούδης, κ.ά., 2004).

Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος Σύνθετης Διέγερσης

Η διέγερση ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος σύνθετης διέγερσης, αποτελείται από ένα τύλιγμα σειράς κι ένα παράλληλο τύλιγμα. Η φορά των μαγνητεργετικών δυνάμεων στο εσωτερικό του δίνεται με τη γνωστή σύμβαση: Το ρεύμα που κατευθύνεται προς το σημειωμένο άκρο του τυλίγματος παράγει θετική μαγνητεργετική δύναμη, ενώ το ρεύμα που απομακρύνεται από το σημειωμένο άκρο του τυλίγματος παράγει αρνητική μαγνητεργετική δύναμη.

Ισοδύναμο Κύκλωμα:



Εικόνα 46 Ισοδύναμο Κύκλωμα ενός Κινητήρα DC Σύνθετης Διέγερσης

Ο νόμος των τάσεων του Kirchhoff σε αυτούς τους κινητήρες, δίνεται από τη σχέση:

$$V_T = E_A + I_A (R_A + R_S)$$

Τα ρεύματα στο εσωτερικό του κινητήρα, συνδέονται μεταξύ τους με τις σχέσεις:

$$I_A = I_L - I_F$$

$$I_F = V_T / R_F$$

Τέλος, η συνισταμένη μαγνητεργετική δύναμη και το ισοδύναμο ενεργό ρεύμα παράλληλης διέγερσης του κινητήρα αυτού, δίνονται από τις εξισώσεις:

$$F_{\text{net}} = F_F \pm F_{SE} - F_{AR}$$

$$I^*_F = I_F \pm (N_{SE} / N_F) \times I_A - (F_{AR} / N_F)$$

όπου το θετικό πρόσημο των εξισώσεων αντιστοιχεί στον κινητήρα αθροιστικής σύνθετης διέγερσης και το αρνητικό στον κινητήρα διαφορικής σύνθετης διέγερσης.

Έλεγχος της Ταχύτητας:

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την μεταβολή ταχύτητας ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος αθροιστικής σύνθετης διέγερσης είναι οι ίδιες με αυτές που αναφερθήκαμε και στους κινητήρες παράλληλης διέγερσης, δηλαδή:

1. Μεταβολή της αντίστασης διέγερσης (R_F).
2. Μεταβολή της τάσης στα άκρα του οπλισμού (V_T).
3. Μεταβολή της αντίστασης οπλισμού (R_A).

2.5 Διακύμανση Ταχύτητας

Η διακύμανση ταχύτητας, βοηθάει στη σύγκριση μεταξύ κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Η εξίσωση ορισμού της διακύμανση ταχύτητας, είναι:

$$SR = \frac{\omega_{NL} - \omega_{FL}}{\omega_{FL}} \times 100\%$$

Η διακύμανση ταχύτητας δίνει μια πρόχειρη εικόνα για τη μορφή της χαρακτηριστικής ροπής – ταχύτητας ενός κινητήρα. Θετική τιμή της διακύμανσης, σημαίνει μείωση της ταχύτητας του κινητήρα κατά την αύξηση του φορτίου του, ενώ αρνητική τιμή σημαίνει αύξηση της ταχύτητας κατά την αύξηση του φορτίου. Η απόλυτη τιμή της διακύμανσης ταχύτητας δείχνει προσεγγιστικά το πόσο απότομη είναι η κλίση της καμπύλης ροπής – ταχύτητας (Chapman, 2012).

2.6 Διάγραμμα Ροής Ισχύος και Απώλειες στις Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος μετατρέπουν τη μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική, ενώ οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος μετατρέπουν την ηλεκτρική ισχύ σε μηχανική. Και στις δύο περιπτώσεις η ισχύς εισόδου δε μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε χρήσιμη μορφή ισχύος στην έξοδο της μηχανής. Πάντα, κατά τη διαδικασία της μετατροπής της ισχύος εμφανίζονται κάποιες απώλειες. Ο συντελεστής απόδοσης μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος, ορίζεται ως εξής:

$$\eta = (P_{\text{out}} / P_{\text{in}}) \times 100\%$$

Η διαφορά μεταξύ της ισχύος εισόδου και της ισχύος εξόδου, είναι οι απώλειες της μηχανής. Επομένως:

$$\eta = [(P_{\text{out}} - P_{\text{loss}}) / P_{\text{in}}] \times 100\%$$

Απώλειες στις μηχανές συνεχούς ρεύματος:

Οι απώλειες που εμφανίζονται στις μηχανές συνεχούς ρεύματος, χωρίζονται σε πέντε βασικές κατηγορίες:

1. Απώλειες Χαλκού: Εμφανίζονται στα τυλίγματα του οπλισμού και της διέγερσης και προσδιορίζονται ως εξής:
 - Απώλειες τυλίγματος οπλισμού: $P_A = I_A^2 R_A$
 - Απώλειες τυλίγματος διέγερσης: $P_F = I_F^2 R_F$

όπου: P_A : απώλειες οπλισμού

P_F : απώλειες διέγερσης

I_A : ρεύμα οπλισμού

I_F : ρεύμα στα τυλίγματα του πεδίου

R_A : αντίσταση των τυλιγμάτων οπλισμού

R_F : αντίσταση των τυλιγμάτων διέγερσης

2. Απώλειες Ψηκτρών: Πρόκειται για τις απώλειες που οφείλονται στην τάση επαφής των ψηκτρών της μηχανής και δίνονται από τη σχέση:

$$P_{BD} = V_{BD}I_A$$

όπου: P_{BD} : απώλειες ψηκτρών

V_{BD} : πτώση τάσης στις ψήκτρες

I_A : ρεύμα σπλισμού

3. Απώλειες Πυρήνα: Πρόκειται για μια κατηγορία που περιλαμβάνει τις απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων του μετάλλου της μηχανής.
4. Μηχανικές Απώλειες: Είναι αυτές που σχετίζονται με τα μηχανικά φαινόμενα. Οι δύο βασικοί τύποι μηχανικών απωλειών είναι οι: α) απώλειες τριβών που οφείλονται στα ρουλεμάν της μηχανής και β) απώλειες εξαερισμού που οφείλονται στην τριβή των κινητών μερών της μηχανής με τον αέρα. Οι απώλειες αυτής της κατηγορίας μεταβάλλονται με τον κύβο της ταχύτητας περιστροφή της μηχανής.
5. Κατανεμημένες απώλειες: Εδώ περιλαμβάνονται απώλειες που δεν είναι δυνατό να ενταχθούν σε μια από τις παραπάνω κατηγορίες. Όσο προσεκτικά κι αν υπολογιστούν οι απώλειες της μηχανής, ένα ποσοστό τους ξεφεύγει από τους υπολογισμούς. Αυτό το ποσοστό, αντιπροσωπεύεται στους υπολογισμούς με τις καταναμεμημένες απώλειες, οι οποίες στις περισσότερες μηχανές θεωρείται ότι είναι το 1% της ισχύος εξόδου κατά τη λειτουργία με πλήρες φορτίο (Charman, 2012).

Διάγραμμα ροής ισχύος στις μηχανές συνεχούς ρεύματος:

Μία από τις πιο εύχρηστες μεθόδους παράστασης των απωλειών ισχύος στις μηχανές είναι το διάγραμμα ροής ισχύος. Σ' αυτό εμφανίζεται η μηχανική ισχύς εισόδου από την οποία αφαιρούνται διαδοχικά οι κατανεμημένες απώλειες, οι μηχανικές απώλειες και τέλος οι απώλειες πυρήνα. Το ποσοστό της ισχύος που απομένει θεωρείται ότι μετατρέπεται (ιδανικά) από μηχανική σε ηλεκτρική ισχύ (P_{conv}). Η μηχανική ισχύς που μετατρέπεται, είναι:

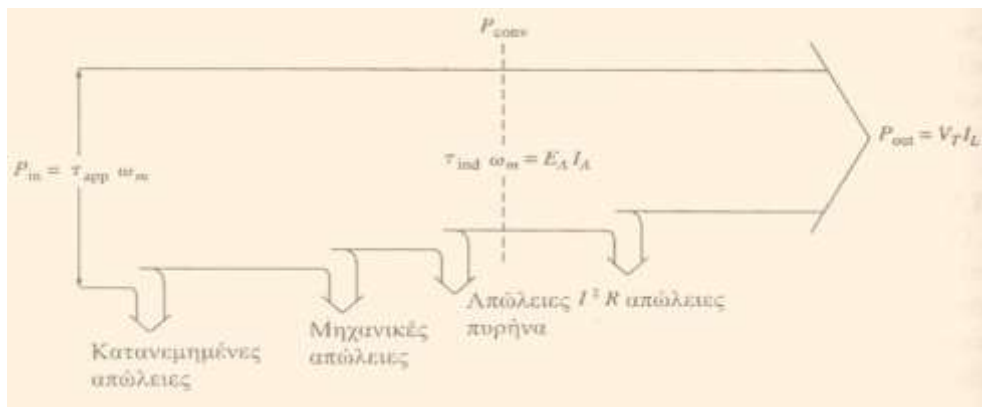
$$P_{conv} = \tau_{ind}\omega_m$$

και η ηλεκτρική ισχύς που προκύπτει, δίνεται από τη σχέση:

$$P_{\text{conv}} = E_A I_A$$

Όμως, αυτή δεν είναι η ισχύς που εμφανίζεται στα άκρα της μηχανής. Πρέπει, πρώτα να αφαιρεθούν οι απώλειες χαλκού και ψηκτρών. Στην περίπτωση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος, το διάγραμμα ροής ισχύος απλώς αντιστρέφεται.

Ακολουθούν τα διαγράμματα ροής και για κινητήρα και για γεννήτρια συνεχούς ρεύματος:



Εικόνα 47 Διάγραμμα Ροής Ισχύος Γεννήτριας DC



Εικόνα 48 Διάγραμμα Ροής Ισχύος Κινητήρα DC

2.7 Η διαδικασία της μεταγωγής και η δομή του οπλισμού στις πραγματικές μηχανές συνεχούς ρεύματος

Στις πραγματικές μηχανές συνεχούς ρεύματος, απαντώνται αρκετοί διαφορετικοί τρόποι συνδέσεως των πλαισίων του δρομέα, ο οποίος ονομάζεται και οπλισμός ή και τύμπανο της μηχανής, με τους τομείς του συλλέκτη. Αυτοί οι διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης, προσδιορίζουν τον αριθμό των παράλληλων κλάδων ρεύματος στο δρομέα, την τάση εξόδου, τον αριθμό και τη θέση των ψηκτρών. Πρακτικά, η διαδικασία της μεταγωγής δεν είναι τόσο απλή όσο φαίνεται θεωρητικά. Στην πραγματικότητα, εμφανίζονται δύο σοβαρά προβλήματα, τα οποία είναι:

1. Η αντίδραση οπλισμού
2. Οι υπερτάσεις $L (di/dt)$

Μία συνοπτική αναφορά παρατίθεται παρακάτω:

Αντίδραση οπλισμού: Καθώς ο δρομέας μιας μηχανής περιστρέφεται κάτω απ' την επίδραση κάποιας εξωτερικής δύναμης, στους αγωγούς του επάγεται τάση. Αυτή μεταβιβάζεται στην έξοδο της μηχανής, αφού ανορθωθεί με τη βοήθεια του συλλέκτη. Με τη σύνδεση ενός φορτίου στα άκρα της μηχανής, εμφανίζεται στο τύλιγμα του οπλισμού κάποιο ρεύμα. Αυτό το ρεύμα, δημιουργεί με τη σειρά του ένα άλλο μαγνητικό πεδίο, το οποίο παραμορφώνει το αρχικό πεδίο των πόλων της μηχανής. Η παραμόρφωση της μαγνητικής ροής κατά την αύξηση του φορτίου της μηχανής, ονομάζεται αντίδραση οπλισμού και είναι η αιτία της εμφάνισης δύο σοβαρών προβλημάτων, τα οποία είναι:

1. Η μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης της μηχανής
2. Εξασθένηση της μαγνητικής ροής

Υπερτάσεις $L (di/dt)$: Αυτό το πρόβλημα το οποίο ονομάζεται και επαγωγική κρουστική τάση, γεννιέται όταν οι ψηκτρες βραχυκυκλώνουν τομείς του συλλέκτη.

Τέλος, για την μερική ή την ολική αντιμετώπιση των προβλημάτων της αντίδρασης οπλισμού και των υπερτάσεων $L (di/dt)$, αναφέρουμε ονομαστικά τρεις βασικές μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί:

1. Μετακίνηση των ψηκτρών
2. Εισαγωγή βοηθητικών ή εσωτερικών πόλων
3. Εισαγωγή τυλιγμάτων απόσβεσης

Κεφάλαιο 3: Παράδειγμα Μελέτης & Σχεδίασης DC Κινητήρα Παράλληλης Διέγερσης

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει εκτενέστερη αναφορά και ανάλυση στη σχεδίαση Κινητήρα DC Παράλληλης Διέγερσης, ο οποίος διέπεται από τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Ισχύς: 15 kW
- Ονομαστική Τάση: 440 V
- Ονομαστική Ταχύτητα: 1500 στρ/λ
- Βαθμός Απόδοσης: 0,88 ή 88%
- Πόλοι: 4

3.1 Υπολογισμός Μεγεθών D (Διάμετρος σε mm) και L (Μήκος σε mm) οπλισμού

$$\text{Είσοδος στη μηχανή} = \frac{\text{ισχύς εξόδου}}{\text{βαθμός απόδοσης}} \Rightarrow$$

$$\text{Είσοδος στη μηχανή} = \frac{15}{0,88} \Rightarrow$$

$$\text{Είσοδος στη μηχανή} = 17 \text{ kW}$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{17000}{440} = 38,63 \text{ A}$$

Στο συνεχές ρεύμα η μέση πυκνότητα της μαγνητικής ροής B_{av} παίρνει τιμές από 0,65 έως 0,75. Εάν τροφοδοτείται μέσω θυρίστορ σημαίνει πως είναι χαμηλότερη. Εμείς επιλέγουμε τη μαγνητική ροή για τιμή: $B_{av} = 0,5 \text{ Wb/m}^2$.

Το ειδικό ηλεκτρικό φορτίο q παίρνει τιμές από 30.000 έως 45.000. Εάν τροφοδοτείται μέσω θυρίστορ είναι συνήθως χαμηλότερη, οπότε σε αυτή τη περίπτωση το παίρνουμε $q: 25.000$.

$$P = \pi^2 \cdot D^2 \cdot L \cdot B_{av} \cdot \frac{Q \cdot N}{60} \cdot 10^{-3} = 3,14^2 \cdot D^2 \cdot L \cdot 0,5 \cdot \frac{25000 \cdot 1500}{60} \cdot 10^{-3} \Rightarrow$$

$$P = 3,14^2 \cdot D^2 \cdot L \cdot 0,5 \cdot 625000 \cdot 10^{-3} \text{ kW}$$

$$D^2 \cdot L = \frac{P}{\pi^2 \cdot \frac{Q \cdot N}{60} \cdot B_{av} \cdot 10^{-3}} = \frac{17000}{3,14^2 \cdot 625000 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 0,00551 \text{ ή } 5,51 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3$$

$$D = 190 \text{ mm}$$

Οπότε:

$$L = \frac{D^2 \cdot L}{D^2} = \frac{5,51 \cdot 10^6}{190^2} = 153 \approx 155 \text{ mm}$$

$$\text{Άρα } L = 155 \text{ mm}$$

όπου D και L είναι η διάμετρος και μήκος αντίστοιχα του σπλισμού.

Παίρνουμε άνοιγμα εξαερισμού πλάτους 10 mm. Έτσι, το μήκος του σπλισμού είναι:

$$L = 155 - 10 = 145 \text{ mm.}$$

Ο σπλισμός είναι φτιαγμένος από πυκνό σφυρηλατημένο μέταλλο με βαθμό σκληρότητας 0,95.

Περιφερειακή Ταχύτητα:

$$v = \pi \cdot D \cdot \frac{N}{60} = 3,14 \cdot 0,190 \cdot \frac{1500}{60} = 14,92 \text{ m/s}$$

Τάση ανά σπείρα:

$$B_{av} \cdot L \cdot v = 0,5 \cdot 0,155 \cdot 14,92 = 1,15 \text{ V}$$

Τάση 440 V, διπλό παράλληλο τύλιγμα. Οπότε ο αριθμός αγωγών (για ένα τύλιγμα) είναι:

$$Z_c = \frac{V}{v} = \frac{440}{1,15} = 382 \text{ αγωγοί}$$

Και οι αγωγοί του σπλισμού, είναι:

$$Z = 382 \cdot 2 = 764 \text{ αγωγοί}$$

3.2 Κατασκευή σπλισμού

Βήμα πόλου (4 πόλοι):

$$\frac{\pi \cdot D}{p} = \frac{3,14 \cdot 0,190}{4} = 0,1492 \text{ ή } 149,2 \text{ mm}$$

Ροή ανά πόλο:

$$\varphi = \text{βήμα πόλου} \cdot B_{av} \cdot L = 0,1492 \cdot 0,5 \cdot 0,155 = 11,56 \text{ mW}$$

Βρίσκουμε τον αριθμό των αγωγών, με τον τύπο:

$$E = \varphi \cdot Z \cdot \frac{N}{60} \cdot \frac{P}{\alpha}$$

$\alpha = 2$ αριθμός των τυλιγμάτων

E: Ηλεκτρεγερτική δύναμη χωρίς φορτίο

$$440 = 11,56 \cdot 10^{-3} \cdot Z \cdot \frac{1500}{60} \cdot \frac{4}{2} \Rightarrow Z = 761 \text{ αγωγοί}$$

Επιλέγουμε 3 αγωγούς με 3 περιστροφές. Επομένως, έχουμε: $3 \cdot 3 \cdot 2 = 18$ αγωγούς ανά αυλάκι.

$$\text{Αριθμός αυλακίων} = \frac{Z}{\text{αγωγούς ανά αυλάκι}} = \frac{761}{18} = 42$$

Ο αριθμός των αυλακίων, πρέπει να είναι περιττός αριθμός:

$$Z = 41 \cdot 18 = 737 \text{ αγωγοί}$$

Διορθώνουμε την μαγνητική ροή:

$$\varphi = v \cdot \frac{761}{737} = 11,56 \cdot 1,032 = 11,9 \text{ mWb}$$

Αριθμός αυλακίων = 41

Αγωγοί: $Z = 737$

Μαγνητική ροή: $\Phi = 11,9 \text{ mWb}$

Κάνουμε 3 στροφές το πηνίο. Άρα, ο αριθμός των τμημάτων του συλλέκτη είναι:

$$\text{αριθμός αυλακίων} \cdot \text{στροφές στο πηνίο} = 41 \cdot 3 = 123$$

Για απλό κυματούλιγμα, ισχύει:

$$\frac{P}{2} \cdot y_c \pm 1 = c$$

Το βήμα του συλλέκτη, είναι:

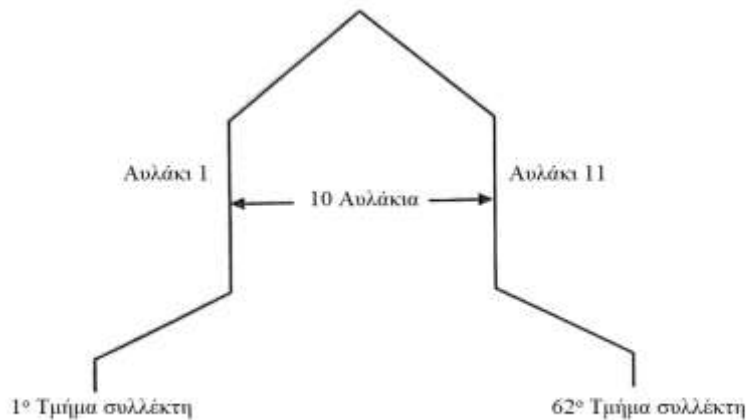
$$y_c = \frac{123 - 1}{2} = 61$$

ή οι συνδέσεις είναι από 1 έως 62.

Η απόσταση μεταξύ των πλευρών του τυλίγματος, είναι:

$$\frac{\text{Βήμα συλλέκτη}}{p} = \frac{41}{4} = 10,25 = 10 \text{ αυλάκια}$$

Και η απόσταση αυτή είναι 1 έω 11.



Σχ.3.1: Απόσταση μεταξύ πλευρών του πηνίου και οι συνδέσεις

Μέγεθος αγωγού του σπλισμού (κυματοτύλιγμα):

$$I = \frac{P}{V} = \frac{17000}{440} = 38,63 \text{ A}$$

Ρεύμα σε κάθε αγωγό:

$$\frac{38,63}{2} = 19,32 \text{ A}$$

Η πυκνότητα του ρεύματος είναι:

$$\delta = 6,5 \text{ A/mm}^2$$

Ο χώρος που καταλαμβάνει ο αγωγός είναι:

$$\frac{19,32}{6,5} = 2,97 \text{ mm}^2 \approx 3 \text{ mm}^2$$

Επιλέγουμε 2 αγωγούς παράλληλα από 1,4 mm ο καθένας και ο χώρος που καταλαμβάνουν, είναι:

$$\frac{\pi}{4} \cdot 1,4^2 \cdot 2 = 3,08 \text{ mm}^2$$

3.3 Κατασκευή αυλακίου

Ο χώρος που απαιτείται για τους αγωγούς σε ένα αυλάκι, είναι:

$$18 \cdot 3,08 = 55 \text{ mm}^2$$

Ο χώρος αυτός, προαυξάνεται κατά ένα συντελεστή 0,45.

Ο χώρος που απαιτείται για το αυλάκι, είναι:

$$\frac{55}{0,45} = 122 \text{ mm}^2$$

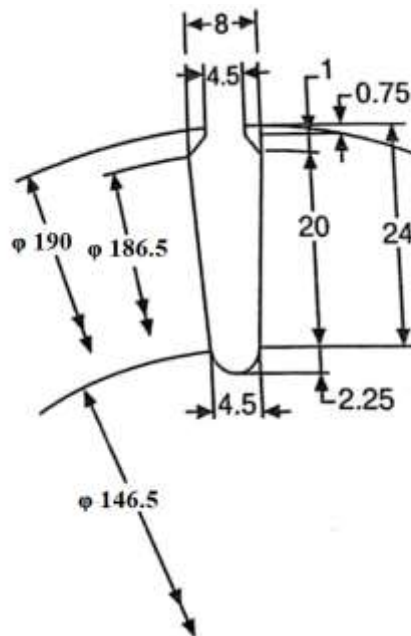
Εμπειρικά οι διαστάσεις του αυλακίου, επιλέγονται: άνοιγμα: 4,5 mm, χείλος: 0,75 mm

Ύψος σφήνας: 1 mm, πλάτος του αυλακίου στη σφήνα: 8 mm

Ύψος του αυλακίου: χαμηλότερο πλάτος κώνου σε βάθος: 20 mm = 4,5 mm

Το χαμηλότερο κομμάτι που είναι το ημικύκλιο, έχει 4,5 mm διάμετρο.

Το συνολικό βάθος του αυλακίου, είναι: 24 mm.



Σχ.3.2: Μέγεθος και διαστάσεις αυλακίου του σπλισμού

Χώρος του αυλακίου για την υποδοχή αγωγών:

$$\frac{8 + 45}{2} \cdot 20 + \frac{\pi}{4} \cdot 4,5^2 \cdot \frac{1}{2} = 125 + 8 = 133 \text{ mm}^2$$

Αυτό είναι παραπάνω από 122 mm² και επομένως αποδεκτό.

Είναι απαραίτητο, να υπολογίσουμε την πυκνότητα ροής στο δόντι και να σιγουρευτούμε, ότι είναι επιτρεπτό όριο ώστε να μην έχουμε κορεσμό ή μεγάλες απώλειες σιδήρου.

Βήμα σχισμής:

$$\frac{(190 - 2 \cdot 1,75) \cdot \pi}{41} = 14,3 \text{ mm}$$

Βήμα σχισμής σε 20 mm βάθος από αυτό το σημείο.

Διάμετρος:

$$186,5 - 2 \cdot 20 = 146,5 \text{ mm}$$

Βήμα σχισμής σε 20 mm βάθος:

$$\frac{146,5 \cdot \pi}{41} = 11,22 \text{ mm}$$

Πλάτος δοντιού σύμφωνα με τα παραπάνω:

$$14,3 - 0,8 = 6,3 \text{ m}$$

και

$$11,22 - 4,5 = 6,72 \text{ m}$$

Μέσο πλάτος δοντιού:

$$\frac{6,3 + 6,72}{2} = \frac{13,02}{2} = 6,51 \text{ mm}$$

Χώρος δοντιού: 6,51 mm · 145 mm (μήκος πυρήνα σπλισμού: 155 – 10 mm = 145 mm)

Μέγιστη πυκνότητα ροής στο δόντι.

Πυκνότητα ροής στο δόντι:

$$B_t = \sqrt{2} \cdot \frac{\varphi \cdot 10^{-3} \cdot p}{\text{σχιισμέξ}} \cdot \frac{1}{\frac{\text{μέσο πλάτος δοντιού}}{1000} \cdot \frac{\text{μήκος σπλισμού πυρήνα} \cdot \text{βαθμός σκληρότητας}}{1000}} \rightarrow$$

$$B_t = \sqrt{2} \cdot \frac{11,9 \cdot 10^{-3} \cdot 4}{41} \cdot \frac{1}{\frac{6,51}{1000} \cdot \frac{145 \cdot 0,95}{1000}} \Rightarrow$$

$$B_t = 1,8 \text{ Wb/m}^2$$

Ελέγχουμε τη τάση μεταξύ των γειτονικών τμημάτων του συλλέκτη. Χρησιμοποιούνται 4 ψήκτρες στον συλλέκτη.

Η τάση μεταξύ των γειτονικών τμημάτων του συλλέκτη, είναι:

$$\frac{V \cdot \Psi \text{ήκτρες}}{\text{Αριθμός τμημάτων του συλλέκτη}} = \frac{440 \cdot 4}{123} = 14,3 \text{ V}$$

Η οποία είναι μικρότερη από 15 V και μέσα στα επιτρεπτά όρια.

3.4 Αντίσταση τυλίγματος σπλισμού

Βήμα πόλου: 149,2 mm

Το τόξο του πόλου:

$$\text{Βήμα Πόλου} \cdot 0,65 = 149,2 \cdot 0,65 = 97 \text{ mm}$$

Το μέγιστο μήκος του αγωγού του σπλισμού, είναι:

Το μέσο μήκος του αγωγού, είναι: $L + I_f = 155 + 225 = 380 \text{ mm}$.

Για το μέγεθος του αγωγού, επιλέγουμε αντίσταση στους 20 °C: $R = 0,01120 \ \Omega$.

Έχουμε ένα πλαίσιο με δύο αγωγούς παράλληλους μεταξύ τους, οπότε η αντίσταση είναι:

$$R = \frac{0,01120}{2} = 5,6 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Η αντίσταση του σπλισμού, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R_{\alpha} = \rho \cdot \frac{l_{\alpha}}{R_{\alpha}} \cdot \frac{Z}{\alpha^2}$$

Αντίσταση:

$$R_{75} = \frac{R \cdot \text{μέσο μήκος αγωγού} \cdot Z \cdot 1,215}{(2)^2} = \frac{0,056 \cdot 0,38 \cdot 737 \cdot 1,215}{(2)^2} = 0,475 \Omega$$

3.5 Σχεδιασμός συλλέκτη

Ο αριθμός των τμημάτων του συλλέκτη, είναι:

$$c = 41 \cdot 3 = 123$$

Θεωρούμε, ότι το βήμα της μπάρας του συλλέκτη, είναι: 4 mm.

Η διάμετρος του συλλέκτη, είναι:

$$\frac{\text{περίμετρος}}{\pi} = \frac{4 \cdot 123}{3,14} = 156 \text{ mm} \approx 155 \text{ mm}$$

Παίρνουμε διάμετρο συλλέκτη: $D_C = 155 \text{ m}$

Η διάμετρος σπλισμού, είναι: 190 mm.

Η διάμετρος του συλλέκτη, είναι περίπου το 75% με 80% της διαμέτρου του σπλισμού.

$$D_C = 190 \cdot 0,8 = 152 \text{ mm} \approx 155 \text{ mm}$$

Περιφερειακή ταχύτητα συλλέκτη:

$$\pi \cdot D_C \cdot \frac{N}{60} = 3,14 \cdot 0,155 \cdot \frac{1500}{60} = 12,17 \text{ m/s}$$

Αυτή είναι μικρότερη από 15 m/s.

Το βήμα του συλλέκτη, είναι:

$$\frac{\pi \cdot D_C}{\text{αριθμός τμημάτων συλλέκτη}} = \frac{3,14 \cdot 0,155}{123} = 4 \text{ mm}$$

Ένταση ανά ψήκτρα:

Παίρνουμε πυκνότητα μαγνητικής ροής για την ψήκτρα: 0,06 A/mm²

Διατομή της ψήκτρας:

$$\frac{\text{Ένταση της ψήκτρας}}{\text{πυκνότητα ροής ψήκτρας}} = \frac{19,3}{0,06} = 323 \text{ mm}^2$$

Χώρος που καταλαμβάνει η ψήκτρα: 12,5 mm · 25 mm

Αριθμός ψηκτρών: 4

Τάση μεταξύ των τμημάτων του συλλέκτη:

$$\frac{V}{\frac{123}{2}} = \frac{440}{\frac{123}{4}} = 14,3 \text{ V}$$

Πάχος ψήκτρας: 12,5 mm.

Αριθμός τμημάτων που καλύπτεται:

$$\frac{\text{πάχος της ψήκτρας}}{\text{αριθμός ψήκτρας}} = \frac{12,5}{4} \approx 3$$

Μήκος ψήκτρας: 25 mm

Το μήκος του συλλέκτη, είναι: $25 + 6 + \text{μη καλυπτόμενο μήκος } 50 = 81 \text{ mm}$.

Οπότε, το μήκος του συλλέκτη είναι: 81 mm.

3.6 Απώλειες συλλέκτη

Απώλειες τριβών ψηκτρών:

Πίεση από ελατήριο ανά ψήκτρα:

$$1200 \text{ kg/m}^2 \text{ ή } 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mm}^2$$

Επιφάνεια της ψήκτρας:

$$312,5 \cdot 4 \text{ mm}^2 \text{ για } 4 \text{ ψήκτρες}$$

Πίεση από ελατήρια στην ψήκτρα:

$$1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 312,5 \cdot 4 = 1,5 \text{ kg}$$

Ο συντελεστής τριβής είναι 0,22 για ψήκτρα κατασκευασμένη από ανθρακόνημα μέσης σκληρότητας.

Απώλειες ισχύος ψήκτρας λόγω τριβών:

$$\begin{aligned} & \text{Συντελεστής τριβής} \cdot \text{πίεση στην ψήκτρα} \cdot \text{περιφερειακή ταχύτητα συλλέκτη} \cdot 981 \cdot 10^{-3} = \\ & = 0,22 \cdot 1,5 \cdot 6,51 \cdot 12,17 \cdot 981 \cdot 10^{-2} = 40 \text{ W} \end{aligned}$$

Απώλειες επαφής της ψήκτρας:

$$2 \text{ volts} \cdot I = 2 \cdot 38,63 = 77,26 \text{ W}$$

Απώλειες συλλέκτη:

$$\begin{aligned} \text{Απώλειες επαφής της ψήκτρας} & \text{ απώλειες ισχύος ψήκτρας λόγω} = \\ & = 77,26 + 40 = 117,26 \text{ W} \end{aligned}$$

Επιφάνεια συλλέκτη:

$$\begin{aligned} \pi \cdot L \cdot \text{μῆκος του συλλέκτη} & = \\ = 3,14 \cdot 155 \cdot 81 & = 39442 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Απώλεια ανά επιφάνεια cm²:

$$\frac{\text{Απώλειες συλλέκτη}}{\text{Επιφάνεια συλλέκτη}} = \frac{117,26}{394,42} = 0,297 \text{ W/cm}^2$$

Απώλειες τριβών και ανεμισμού = 1 % για έξοδο : 0,15 kW.

Απώλειες χαλκού σπλισμού:

$$I_{\alpha}^2 \cdot r_{\alpha} = 38,63^2 \cdot 0,475 = 709 \text{ W}$$

3.7 Κατασκευή πόλου

Το μήκος του πόλου, το παίρνουμε ελαφρώς μικρότερο από το μήκος του πυρήνα του σπλισμού και ίσο με 145 mm.

Ροή ανά πόλο:

$$\lambda \cdot \varphi = 1,2 \cdot 11,9 \cdot 10^{-3} = 14,28 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

Θεωρούμε πυκνότητα μαγνητικής ροής ανά πόλο: $B_p = 1,6 \text{ Wb/m}^2$.

Επιφάνεια που καταλαμβάνει ο μαγνητικός πόλος:

$$\frac{\text{ροή στον πόλο}}{B_p} = \frac{14,28 \cdot 10^{-3}}{1,6} = 0,0089 \text{ mm}^2$$

$$\text{Μήκος} = 0,145 \text{ m}$$

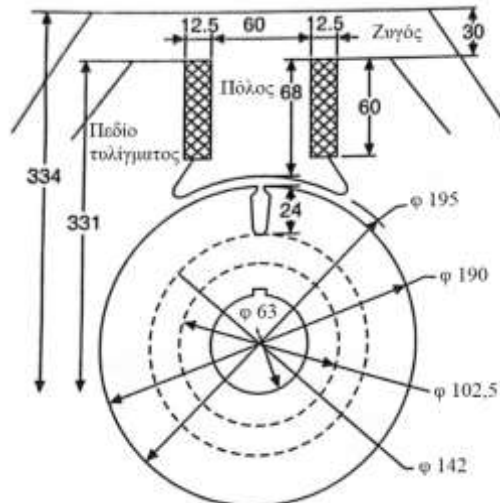
$$\text{Πλάτος} = \frac{\text{Επιφάνεια που καταλαμβάνει ο πόλος}}{\text{μήκος}} =$$

$$= \frac{0,0089}{0,145} = 0,061 \approx 60 \text{ mm}$$

Ο πόλος είναι κατασκευασμένος από CRCA ελάσματα, όπου το κάθε ένα έχει πάχος 1,25 mm.

Τόξο πόλου: $0,65 \cdot 149,1 = 97 \text{ mm}$

Παίρνουμε διάκενο με επένδυση 2,5 mm. Χωρίς επένδυση 1 mm. Το μέσο μήκος διακένου είναι 1,75 mm. Παίρνουμε ύψος μαγνητικού πόλου: 60mm. Η προβολή του πόλου σε κάθε πλευρά είναι 12,5 mm.



Σχ.3.3: Διαστάσεις πόλου και ζυγού κινητήρα DC

3.8 Σχεδιασμός ζυγού

Ο ζυγός είναι κατασκευασμένος από ελάσματα CIRCA πάχους 1,25 mm. Φτιάχεται οκταγωνικός αντί για κυκλικός ζυγός για να έχει περισσότερο σίδηρο, καθώς και χώρο για το τύλιγμα πεδίου.

Ροή στον ζυγό:

$$\frac{\lambda \cdot \varphi}{2} = \frac{18,28 \cdot 10^{-3}}{2} = 7,14 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

Θεωρούμε πυκνότητα μαγνητικής ροής για τον ζυγό: 1,2 Wb/m²

Χώρος που καταλαμβάνει ο ζυγός:

$$\frac{\text{Ροή στον ζυγό}}{\text{Πυκνότητα ροής στον ζυγό}} \cdot 10^{-6} = \frac{7,14 \cdot 10^{-3}}{1,2} \cdot 10^{-6} = 6000 \text{ mm}^2$$

Παίρνουμε το μήκος του ζυγού μεγαλύτερο από το μήκος του πόλου, περίπου 55 mm.

Το συνολικό μήκος του ζυγού, είναι: 144 + 55 = 200 mm.

Το πάχος του ζυγού είναι:

$$\frac{\text{Χώρος που καταλαμβάνει ο αγωγός}}{\text{μήκος του ζυγού}} = \frac{6000}{200} = 30 \text{ mm}$$

Η διάμετρος στο κέντρο του πόλου είναι:

$$D + (2 \cdot 2,5) = 190 + (2 \cdot 2,5) = 195 \text{ mm}$$

όπου 2,5 mm είναι το διάκενο.

Η διάμετρος στην κορυφή του πόλου:

$$\text{διάμετρος στο κέντρο του πόλου} + (2 \cdot 68) = 331 \text{ mm}$$

Εξωτερική διάμετρος ζυγού:

$$\begin{aligned} \text{διάμετρος στην κορυφή του πόλου} + (2 \cdot 68) &= 331 + (30 + 2) = \\ &= 331 + (30 + 2) = 331 + (30 \cdot 2) = 391 \text{ mm} \end{aligned}$$

3.9 Πυρήνας σπλισμού

Η διάμετρος του άξονα: 63 mm

Η διάμετρος στη βάση των αυλακίων του πυρήνα:

$$D + (24 \cdot 2) = 190 - (24 \cdot 2) = 142 \text{ mm}$$

Βάθος πυρήνα σπλισμού:

$$\begin{aligned} \frac{\text{διάμετρος στη βάση αυλακίων} - \text{διάμετρος του άξονα}}{2} = \\ = \frac{142 - 63}{2} = 39,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

Μήκος πυρήνα σπλισμού:

$$L - \text{άνοιγμα εξαερισμού} = 155 - 10 = 145 \text{ mm}$$

Πυκνότητα μαγνητικής ροής στον πυρήνα:

$$\begin{aligned} B_c &= \frac{\varphi}{2} \cdot \frac{1}{\text{βάθος πυρήνα σπλισμού} \cdot \text{διάμετρος στη βάση αυλακίων} \cdot \text{βαθμός σκληρότητας}} = \\ &= \frac{11,9 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{1}{0,0395 \cdot 0,145 \cdot 0,95} = 1,09 \text{ Wb/m}^2 \end{aligned}$$

Μέση διάμετρος πυρήνα:

$$\frac{\text{διάμετρος στην αυλακίων} + \text{διάμετρος του άξονα}}{2} = \frac{142 + 63}{2} = 102,5 \text{ mm}$$

Μέσο μήκος διαδρομής μαγνητικού πεδίου:

$$\frac{\pi \cdot \text{μέση διάμετρος πυρήνα}}{4} = \frac{3,14 \cdot 102,5}{4} = 80,5 \text{ mm}$$

Μέσο μήκος διαδρομής μαγνητικού πεδίου στον πόλο: 68 mm

Μέση διάμετρος ζυγού:

$$\text{διάμετρος στην κορυφή του πόλου} + 30 = 331 + 30 = 361 \text{ mm}$$

Μέσο μήκος διαδρομής μαγνητικού πεδίου στο ζυγό:

$$\frac{\pi \cdot \text{μέση διάμετρο ζυγού}}{4} = \frac{3,14 \cdot 361}{4} = 285 \text{ mm}$$

3.10 Αμπερελίγματα ανά πόλο

$$\text{Διάκενο αέρα: } \frac{\text{άνοιγμα}}{\text{διάκενο}} = \frac{4,5}{2,5} = 1,8$$

Από καμπύλη: $K_0 = 0,3$

$$y'_s = y_s - K_0 \cdot w_0 = 14,56 - 0,3 \cdot 4,5 = 13,21 \text{ mm}$$

Αριθμός δοντιών κάτω από το τόξο πόλου:

$$\frac{\text{Τόξο πόλου}}{y_s} = \frac{97}{14,56} = 6,66$$

Αποτελεσματικό τόξο πόλου:

$$y_s' \cdot \text{Αριθμός δοντιών κάτω από το τόξο πόλου} = 13,21 \cdot 6,66 = 88 \text{ mm}$$

$$\frac{W_d}{I_g} = \frac{10}{2,5} = 4, \text{ από καμπύλη: } K_d = 0,53, \text{ πλάτος αγωγού: } 10 \text{ mm}$$

Ενεργό μήκος πυρήνα:

$$L' = L - (K_d \cdot \text{πλάτος αγωγού}) = 155 - (0,53 \cdot 10) = 149,7 \text{ mm}$$

Ενεργός περιοχή διακένου:

$$\begin{aligned} & \text{Αποτελεσματικό τόξο πόλου} \cdot \text{Αποτελεσματικό μήκος πυρήνα} = \\ & = 0,088 \cdot 0,1497 = 0,0132 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Πυκνότητα μαγνητικής ροής διακένου:

$$B_s = \frac{\varphi}{\text{αποτελεσματικό διάκενο}} = \frac{11,9 \cdot 10^{-3}}{0,0132} = 0,9 \text{ Wb/m}^2$$

$$\begin{aligned} AT_{air} &= 0,8 \cdot 10^6 \cdot \text{πυκνότητα ροής διακένου} \cdot 0,0025 = \\ &= 0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,9 \cdot 0,0025 = 1800 \end{aligned}$$

για διάκενο 2,5 mm και:

$$\begin{aligned} AT_{air} &= 0,8 \cdot 10^6 \cdot \text{πυκνότητα ροής διακένου} \cdot 0,001 = \\ &= 0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,9 \cdot 0,001 = 720 \end{aligned}$$

για διάκενο 1 mm.

Εάν είναι 2 mm, το παίρνουμε $AT_{air} = 1440$.

Οι πυκνότητες μαγνητικής ροής και τα μέσα μήκη της μαγνητικής διαδρομής, υπολογίζονται για το μαγνητικό κύκλωμα, δηλαδή δόντια, πυρήνα σπλισμού και πόλο του ζυγού. Τα αμπερελίγματα ανά πόλο συνολικά, υπολογίζονται από τα αμπερελίγματα για κάθε κομμάτι.

Μέρος	Ροή (mWb)	Πυκνότητα ροής (Wb/m ²)	Μήκος (mm)	at/m	AT	Απώλειες (W/kg)
Δόντια σπλισμού	11,9	1,8	24,00	3600	87	12
Πυρήνας σπλισμού	$\frac{11,9}{2}$	1,09	80,05	160	13	3,4
Διάκενο	11,9	0,9	2,00	-	1440	
Πόλος	14,28	1,6	68	5000	340	
Ζυγός	$\frac{14,28}{2}$	1,2	285	1000	285	

Πίνακας 3.1: Υπολογισμός μαγνητικού κυκλώματος για αμπερελίγματα ανά πόλο

AT ανά πόλο = 2165

Παίρνουμε κατά προσέγγιση 2200 αμπερελίγματα ανά πόλο

Αμπερελίγματα ανά πόλο:

$$\frac{I_a \cdot Z_a}{2 \cdot p \cdot a} = \frac{38,63 \cdot 737}{2 \cdot 4 \cdot 2} = 1782$$

Αναλογία αμπερελίγματα ανά πόλο στο πεδίο προς τα αμπερελίγματα ανά πόλο:

$$\frac{\text{κατά προσέγγιση αμπερελίγματα ανά πόλο}}{\text{αμπερελίγματα ανά πόλο}} = \frac{2200}{1782} = 1,23$$

Βάρος σιδήρου των δοντιών του οπλισμού:

$$\begin{aligned} & \text{μήκος} \cdot 0,0065 \cdot \text{μήκος πυρήνα οπλισμού} \cdot \text{βαθμός σκληρότητας} \cdot \text{αριθμός αυλακίων} \cdot 7,78 \cdot 1000 = \\ & = 0,024 \cdot 0,0065 \cdot 0,145 \cdot 0,95 \cdot 41 \cdot 7,78 \cdot 1000 = 6,9 \text{ kg} \end{aligned}$$

Βάρος σιδηροπυρήνα:

$$\frac{\pi}{4} \cdot \left[\left(\frac{142}{1000} \right)^2 - \left(\frac{63}{1000} \right)^2 \right] \cdot 0,145 \cdot 0,95 \cdot 7,78 \cdot 1000 = 12,65 \text{ kg}$$

Απώλειες σιδήρου στα δόντια του οπλισμού:

$$\begin{aligned} & \text{Βάρος σιδήρου των δοντιών οπλισμού} \cdot \text{απώλειες δοντιών οπλισμού} = \\ & = 6,9 \cdot 12 = 83 \text{ W} \end{aligned}$$

Απώλειες σιδήρου στον πυρήνα οπλισμού:

$$\begin{aligned} & \text{Βάρος σιδήρου πυρήνα} \cdot \text{απώλειες πυρήνα οπλισμού} = \\ & = 12,65 \cdot 3,4 = 43 \text{ W} \end{aligned}$$

Συνολικές απώλειες σιδήρου στην βασική συχνότητα:

$$\begin{aligned} & \text{Απώλειες σιδήρου στα δόντια του οπλισμού} + \text{απώλειες σιδήρου στον πυρήνα οπλισμού} = \\ & = 84 \cdot 43 = 126 \text{ W} \end{aligned}$$

Απώλειες σιδήρου:

Οι απώλειες σιδήρου που υπολογίστηκαν παραπάνω, πολλαπλασιάζονται επί δύο για να λάβουμε υπόψη τις επιπρόσθετες απώλειες που δημιουργούνται απ' την διακύμανση της μαγνητικής ροής στα δόντια του οπλισμού: $2 \cdot 126 = 252 \text{ W}$

3.11 Βάρος χαλκού στον σπλισμό

Βάρος χαλκού στον σπλισμό:

$$\begin{aligned} & \text{Μέσο μήκος αγωγού} \cdot \text{χώρος που καταλαμβάνει ο αγωγός} \cdot \text{αριθμό αγωγών σπλισμού} \cdot \\ & \quad \cdot 1000 \cdot 8,89 = \\ & = 0,380 \cdot (2 \cdot 1,53) \cdot 10^{-6} \cdot 737 \cdot 1000 \cdot 8,89 = 7,63 \text{ kg} \end{aligned}$$

3.12 Σχεδιασμός τυλίγματος παράλληλης διέγερσης

Αμπερελίγματα ανά πόλο: 2200

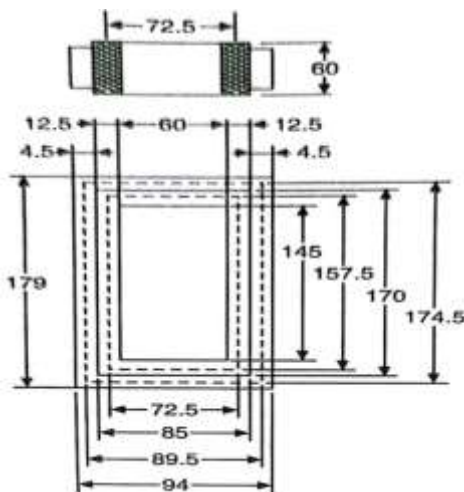
Αν πάρουμε το ρεύμα του παράλληλου πεδίου 2 A, ο αριθμός των τυλιγμάτων ανά πόλο για το πεδίο του παράλληλου τυλίγματος, είναι:

$$\frac{\text{Αμπερελίγματα ανά πόλο}}{2} = \frac{2200}{2} = 1100$$

Παίρνουμε πυκνότητα ρεύματος για το πεδίο τυλίγματος: 4 A/mm²

Μέγεθος αγωγού για το πεδίο τυλίγματος: $\frac{2}{4} = 0,5 \text{ mm}^2$

Επιλέγουμε εμαγιέ (στρογγυλά χάλκινα τυλίγματα) αγωγό με μεσαίο κάλυμμα διαμέτρου: 0,8 mm².



Σχ.3.4: Τυλίγμα παράλληλης διέγερσης, τυλίγμα αντιστάθμισης

Περιοχή κάλυψης αγωγού: $\frac{\pi}{4} \cdot 0,8^2 = 0,5025 \text{ mm}^2$

Το μέσο μήκος του τυλίγματος του παράλληλου πεδίου, μπορεί να βρεθεί από τις παρακάτω διαστάσεις.

Στο σχήμα 3.4 του βασικού πόλου, είναι ορθογώνιο με πλάτος: 60 mm και μήκος: 145 mm. Το πλάτος του παράλληλου τυλίγματος, είναι 12,5 mm. Έτσι, οι εξωτερικές διαστάσεις του πεδίου του παράλληλου τυλίγματος, είναι: 85 mm · 170 mm. Και το μέσο μήκος του τυλίγματος, είναι: $2 \cdot (145 + 12,5 + 60 + 12,5) = 460 \text{ mm}$

Επιφάνεια που καταλαμβάνει το παράλληλο τύλιγμα: $12,5 \cdot 60 = 750 \text{ mm}^2$

Επιφάνεια που καταλαμβάνουν οι αγωγοί: $1100 \cdot 0,5 = 550 \text{ mm}^2$

Αν πάρουμε συντελεστή χώρου για το τύλιγμα 0,8 ο καθαρός διαθέσιμος χώρος, είναι:

$$750 \cdot 0,8 = 600 \text{ mm}^2$$

Επομένως, είναι δυνατόν ο χώρος αυτός να χωρέσει 1100 στροφές σύρματος διαμέτρου 0,8 mm².

Αντίσταση ανά μέτρο συρμάτινου αγωγού διαμέτρου 0,8 mm: 0,03430 στους 20 °C.

Αντίσταση του πεδίου του παράλληλου τυλίγματος στους 75 °C. Δίνεται απ' τον τύπο:

$$\begin{aligned} R_f &= \text{τυλίγματα} \cdot M.L.T. \cdot 0,03430 \cdot 1,215 \cdot \text{αριθμό σπειρών} = \\ &= 1100 \cdot 460 \cdot 0,03430 \cdot 1,215 \cdot 4 = 84,35 \Omega \end{aligned}$$

Απώλειες χαλκού πεδίου: $I_f^2 \cdot R_f = 2^2 \cdot 84,35 = 338 \text{ W}$

Οπότε, η τάση διέγερσης είναι: $I_f \cdot R_f = 2 \cdot 84,35 = 170 \text{ V}$

3.13 Τύλιγμα αντιστάθμισης

Το τύλιγμα αυτό, τοποθετείται σε σειρά με τον οπλισμό για να εξουδετερώσει την αντίδραση οπλισμού λόγω του φορτίου. Τα τυλίγματα είναι σε σειρά και τοποθετούνται πάνω από το παράλληλο τύλιγμα. Το τύλιγμα έχει λίγες σπείρες και είναι ικανό να μεταφέρει το ρεύμα το οπλισμού.

Για τον υπολογισμό των αμπερελιγμάτων του τυλίγματος αντιστάθμισης, παίρνουμε τυπικά το 8% των συνολικών αμπερελιγμάτων, οπότε: $2200 \cdot 8\% = 176$ αμπερελίγματα ανά πόλο.

Ρεύμα: $I_f = 38,63 \text{ A}$

Επομένως, τα τυλίγματα είναι:

$$\frac{\text{αμπερελίγματα ανά πόλο}}{I_f} = \frac{176}{38,63} = 4,56 \approx 5$$

Παίρνουμε πυκνότητα ρεύματος: $\delta = 4 \text{ A/mm}^2$

Η επιφάνεια του αγωγού: $\frac{38,63}{4} = 9,65 \text{ A/mm}^2$

Παίρνουμε ορθογώνιο αγωγό διαστάσεων: $4 \text{ mm} \cdot 2,5 \text{ mm}$, επιφάνεια που καταλαμβάνει: $9,451 \text{ m}^2$

Συνολικά αμπερελίγματα για το τύλιγμα αντιστάθμισης:

$$I_f \cdot \text{τυλίγματα} \cdot 4 = 38,63 \cdot 5 \cdot 4 = 772$$

Το μέσο μήκος του τυλίγματος αντιστάθμισης, μπορούμε να το δούμε απ' το Σχήμα 3.4. Το τύλιγμα βρίσκεται πάνω απ' το πεδίο του παράλληλου τυλίγματος.

Το μέσο μήκος του τυλίγματος: $(170 + 55 + 85 + 5,5) \cdot 2 = 532 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} \text{Αντίσταση} &= \frac{\frac{\text{Αντίσταση ανά μέτρο συρμάτινου αγωγού}}{2} \cdot \text{μέσο μήκος του τυλίγματος}}{\text{χώρος που καταλαμβάνει ο αγωγός}} = \\ &= \frac{0,017421 \cdot 0,532}{9,451} = 0,236 \Omega \end{aligned}$$

3.14 Σχεδίαση βοηθητικών πόλων

Το μέγεθος του αγωγού των βοηθητικών πόλων, είναι το ίδιο με αυτό του πεδίου του τυλίγματος αντιστάθμισης.

Πυκνότητα ρεύματος: $\delta = 4 \text{ A/mm}^2$

Επιφάνεια αγωγού: $\frac{38,63}{4} = 9,65 \text{ A/mm}^2$

Παίρνουμε τετράγωνο αγωγό διαστάσεων: $4 \text{ mm} \cdot 2,5 \text{ mm}$, επιφάνεια που καταλαμβάνει: $9,451 \text{ mm}^2$

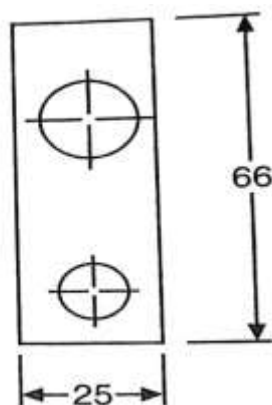
Πλάτος βοηθητικού πόλου:

$$W_i = [\text{πάχος της ψήκτρας} + (\text{αριθμός σπειρών ανά στρώση} - 1) \cdot \frac{D_\alpha}{D_C}] \cdot \frac{D_\alpha}{D_C} =$$

$$= [12,5 + (3 - 1) \cdot 4] \cdot \frac{190}{155} = 25 \text{ mm}$$

Το διάκενο κάτω από τον βοηθητικό πόλο, είναι μεγαλύτερο από το διάκενο των κύριων πόλων.

Παίρνουμε το μικρότερο: 3mm και προσαρμόζουμε 8 επενδύσεις πάχους 0,375 mm η κάθε μία. Φτιάχνεται μέγιστο διάκενο 6 mm. Παίρνουμε το μέσο 4,5 mm.



Σχ.3.5: Βοηθητικός πόλος

Ύψος βοηθητικού πόλου: $\frac{331 - (190 + 4,5 \cdot 2)}{2} = 65 \text{ mm}$

Ο βοηθητικός πόλος, είναι φτιαγμένος από CRCA ελάσματα πάχους 1,25 mm.

3.15 Πυκνότητα μαγνητικής ροής στον βοηθητικό πόλο (B_{cp})

Για να βρούμε την πυκνότητα της μαγνητικής ροής στον βοηθητικό πόλο, είναι απαραίτητο να βρούμε την μαγνητική διαπερατότητα λόγω του αυλακιού, του άκρου του δοντιού και της διαρροής.

Από το σχήμα 3.2, παίρνουμε τις διαστάσεις και τις καμπύλες του αυλακιού για να υπολογίσουμε την μαγνητική διαπερατότητα.

$$\frac{W_{s1}}{W_{s2}} = \frac{8}{4,5} = 1,77, \quad \frac{h_1}{W_{s2}} = \frac{20}{4,5}, \quad F = 0,75$$

Η διαπερατότητα για τη σχισμή του σχήματος 3.2:

$$\lambda_{s_1} = \frac{F}{W_{s_2}} + \frac{2 \cdot 1}{W_{s_2} + W_{s_1}} + F = \frac{0,75}{4,5} + \frac{2 \cdot 1}{4,5 + 8} + 0,75 =$$

$$= 0,166 + 0,16 + 0,75 \Rightarrow \lambda_{s_1} = 1,076$$

$$\lambda_s = 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \cdot \lambda_{s_1} = 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \cdot 1,076 = 1,35 \cdot 10^{-6}$$

$$\lambda_{II} = 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \cdot \frac{h_{sp}}{6 \cdot l_{sp}} = 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \cdot \frac{25}{6 \cdot 4,5} = 1,16 \cdot 10^{-6}$$

όπου:

b_{cp} : πλάτος πόλου συλλεκτή

l_{cp} : μήκος διάκενου στον συλλέκτη

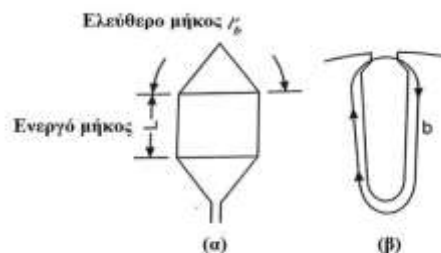
Στο σχήμα 3.6 α) φαίνονται το ενεργό και το ελεύθερο μήκος του αγωγού του σπλισμού και στο σχήμα 3.6 β) φαίνεται το μήκος των συνδέσεων της μαγνητικής ροής γύρω από το τμήμα του αγωγού στη σχισμή. Αυτό το συμβολίζουμε με «b», το ενεργό μήκος με «L» και το ελεύθερο μήκος με «l_{fr}».

Από το σχήμα, φαίνεται ότι: L = 155 mm, l_{fr} = 255 mm και b = (8 + 4,5 + 20 + 20) ≈ 54 mm = 60 mm

$$\lambda_{\theta} = \frac{l'_{fr}}{L} \cdot (0,23 \cdot \log \frac{l'_{fr}}{b} + 0,07) \cdot 10^{-6} =$$

$$= \frac{255}{155} \cdot (0,23 \cdot \log \frac{255}{60} + 0,07) \cdot 10^{-6} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \lambda_{\theta} = 0,293 \cdot 10^{-6}$$



Σχ.3.6: α) Ενεργό μήκος "L" και ελεύθερο μήκος "l_{fr}" προεξοχής του αγωγού σπλισμού, β) μήκος συνδέσεων της ροής "b" γύρω από το τμήμα του αγωγού στο αυλάκι

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_{H'} + \lambda_{\theta} = (1,35 + 1,16 + 0,293) \cdot 10^{-6} = 2,803 \cdot 10^{-6}$$

Αμπεροαγωγοί ανά αυλάκι: $I_a \cdot Z_a = 38,63 \cdot 18 = 695$

και

$$B_{cp} = \frac{L}{L_{cp}} \cdot \frac{2 \cdot I_a \cdot Z_a \cdot \lambda}{W_l} = \frac{1}{0,6} \cdot \frac{2 \cdot 695 \cdot 2,803 \cdot 10^{-6}}{0,025} = 0,26 \text{ Wb/m}^2$$

όπου:

L_{cp} : μήκος του βοηθητικού πόλου, το οποίο παίρνουμε 0,6 φορές το μήκος του κυρίως πόλου. (Δηλαδή: $0,6 \cdot 145 = 87 \text{ mm}$)

Για να βρούμε τα αμπερελίγματα ανά πόλο για τον βοηθητικό πόλο, προσθέτουμε τα αμπερελίγματα της αντίδρασης του επαγωγικού τυμπάνου F_a με τα αμπερελίγματα του διακένου του βοηθητικού πόλου.

Αμπερελίγματα της αντίδρασης του σπλισμού:

$$F_a = \frac{I_a \cdot Z_a}{2 \cdot p \cdot \alpha} = \frac{38,63 \cdot 737}{2 \cdot 4 \cdot 2} = 1782$$

Συντελεστής του Carter για το διάκενο του βοηθητικού πόλου:

$$\frac{\text{άνοιγμα σχισμής}}{\text{διάκενο}} = \frac{4,5}{4,5} = 1$$

Από καμπύλη: $K_{\theta} = 0,15$

$$y'_s = y_s - K_{\theta} \cdot w_{\theta} = 14,56 - 0,15 \cdot 4,5 = 13,885 \text{ mm}$$

Συντελεστής του Carter:

$$K_g = \frac{y_g}{y_g'} = \frac{14,56}{13,885} = 1,05$$

Αμπερελίγματα για το διάκενο του βοηθητικού πόλου:

$$0,8 \cdot K_g \cdot B_{cp} \cdot L_{cp} \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 1,05 \cdot 0,25 \cdot 0,0045 \cdot 10^6 = 983$$

Συνολικά αμπερελίγματα ανά πόλο για τον βοηθητικό πόλο:

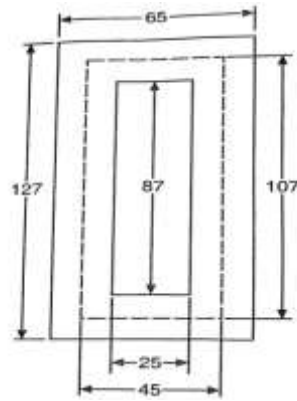
$$\begin{aligned} F_\alpha + \text{Αμπερελίγματα για το διάκενο του πόλου μεταγωγής} &= \\ &= 1782 + 983 = 2765 \end{aligned}$$

$$I = 38,63 \text{ A}$$

Τυλίγματα ανά πόλο μεταγωγής:

$$\frac{\text{Συνολικά αμπερελίγματα ανά πόλο}}{I} = \frac{2765}{38,63} = 71$$

Το τύλιγμα του βοηθητικού πόλου, μπορεί να χωριστεί σε 4 με 5 στρώσεις. Το πλάτος του, είναι περίπου 20 mm. Στο σχήμα 3.7, φαίνεται η γενική συμπεριφορά του τυλίγματος για να βρούμε το μέσο μήκος κάθε τυλίγματος.



Σχ.3.7: Πεδίο του τυλίγματος του βοηθητικού πόλου

Μέσο μήκος τυλίγματος: $(25 + 20 + 87 + 20) \cdot 2 = 304 \text{ mm}$

Επιφάνεια που καταλαμβάνει: $9,451 \text{ mm}^2$

Αντίσταση 4 τυλιγμάτων του βοηθητικού πόλου:

$$\frac{0,017241}{9,451} \cdot 1,251 \cdot 71 \cdot 4 \cdot 0,304 = 0,192 \ \Omega$$

Απώλειες στο τύλιγμα αντιστάθμισης:

$$I_a^2 \cdot \text{αντίσταση} = 38,63^2 \cdot 0,0236 = 35 \text{ W}$$

Απώλειες στο τύλιγμα του βοηθητικού πόλου:

$$I_a^2 \cdot \text{αντίσταση} = 10,22^2 \cdot 0,192 = 287 \text{ W}$$

Απώλειες στο τύλιγμα αντιστάθμισης και στο τύλιγμα του βοηθητικού πόλου:

$$35 + 287 = 322 \text{ W}$$

3.16 Απώλειες και βαθμός απόδοσης

Οι διάφοροι τύποι απωλειών σε έναν κινητήρα είναι:

- Απώλειες χαλκού οπλισμού,
- Απώλειες συλλέκτη,
- Απώλειες σιδήρου,
- Απώλειες τριβής και ανεμισμού,
- Απώλειες δινορρευμάτων και φορτίου,
- Απώλειες στο τύλιγμα αντιστάθμισης σειράς και
- Απώλειες τυλίγματος βοηθητικού πόλου

$$\text{Βαθμός απόδοσης} = \frac{\text{ισχύς εξόδου}}{\text{ισχύς εξόδου} + \text{απώλειες}} \cdot 100\% = \frac{15000}{15000 + 2038} \cdot 100\% = 88 \%$$

Ισχύς εξόδου κινητήρα: 15 kW

Οι απώλειες υπολογίζονται παρακάτω:

Απώλειες χαλκού οπλισμού: 709 W

Απώλειες συλλέκτη: 117 W

Απώλειες σιδήρου: 252 W

Απώλειες τριβής και ανεμισμού: 150 W

Απώλειες δινορρευμάτων και φορτίου: 150 W

Απώλειες χαλκού παράλληλου πεδίου: 338 W

Απώλειες στο τύλιγμα αντιστάθμισης και στο τύλιγμα του βοηθητικού πόλου: 322 W

Σύνολο: 2038 W

3.17 Περίληψη κατασκευής και λειτουργίας

3.17.1 Προδιαγραφές

Ισχύς: 15 kW

Τάση: 440 V

Ταχύτητα περιστροφής: 1500 rpm

Αριθμός πόλων: 4

Βαθμός απόδοσης: 88%

Συγκεκριμένο ηλεκτρικό φορτίο: 25000 A ανά μέτρο αγωγών

Συγκεκριμένο μαγνητικό φορτίο: 0,5 Wb/m²

Οπλισμός

Πυρήνας:

Υλικό κατασκευής special Iohys πάχους: 0,5 mm

Εξωτερική διάμετρος: 190 mm

Μήκος: 155 mm

Κενό εξαερισμού: 10 mm

Διάμετρος άξονα: 63 mm

Αριθμός αυλακίων: 41, είδος αυλακίου: ανοιχτού βάθους 24 mm και απεικονίζονται στο Σχήμα 3.2

Βήμα σχισμής: 14,6 mm

Μέσος πλάτος δοντιού: 6,51 mm

3.17.2 Τύλιγμα οπλισμού

Γωνιακή ταχύτητα: 14,92 m/s

Τάση ανά στροφή: 1,15 V

Βήμα πόλου: 149,2 mm

Ροή ανά πόλο: 11,9 mWb

Αριθμός πόλων: 4

Αριθμός αγωγών: 737

Απλό κυματοειδές τύλιγμα 6 αγωγοί ανά σχισμή με 3 στροφές στο πηνίο.

Αριθμός αγωγών ανά αυλάκι: 18

Η απόσταση μεταξύ πλευρών του πηνίου είναι: 10 αυλάκια

2 αγωγοί εν παράλληλου μεγέθους 1,4 mm ο καθένας.

Επιφάνεια που καταλαμβάνει ο αγωγός: 3,08 mm²

Πυκνότητα ρεύματος: 6,5 A/mm²

Ρεύμα οπλισμού: 38,63 A

Μέσο μήκος αγωγού: 380 mm

Πόλος

Φτιαγμένος από ελάσματα υλικού CRCA πλάτους 1,25 mm το κάθε ένα.

Πλάτος πόλου: 60 mm

Μήκος πόλου: 146 mm

Ύψος πόλου: 60 mm, μαζί με το πέλμα του πόλου 68 mm

Τόξο πόλου: 97 mm

Ροή ανά πόλο: 14,8 mWb

Διάκενο: 1 mm + 4 επενδύσεις 0,375 mm πάχος η κάθε μία

Άρα μέγιστο διάκενο: 2,5 mm

Ζυγός

Φτιαγμένο από ελάσματα υλικού CRCA πάχους 1,25 το κάθε ένα.

Σχήμα: οκταγωνικό, 391 mm το τετράγωνο

Ροή στο ζυγό: 7,14 mWb

Μήκος ζυγού: 200 mm

Πάχος ζυγού: 30 mm

3.17.3 Συλλέκτης

Αριθμός των τομέων συλλέκτη: 123

Βήμα μπάρας συλλέκτη: 4 mm

Διάμετρος συλλέκτη: 155 mm

Γωνιακή ταχύτητα συλλέκτη: 12,17 m/s

Τάση μεταξύ των τμημάτων του συλλέκτη: 14,3 V

Αριθμός ψηκτρών: 4

Ένταση ανά ψήκτρα: 19,3 A

Πυκνότητα ροής για την ψήκτρα: 0,06 A/mm²

Μέγεθος ψήκτρας: 12,5 mm × 25 mm

Μήκος συλλέκτη: 84 mm

Το βήμα του συλλέκτη είναι: $y_c = 61$

Οι συνδέσεις είναι από 1 έως 62

3.17.4 Πυκνότητες μαγνητικής ροής

Δόντια οπλισμού: $1,8 \text{ Wb/m}^2$

Πυρήνας οπλισμού: $1,09 \text{ Wb/m}^2$

Πόλος: $1,6 \text{ Wb/m}^2$

Ζυγός: $1,09 \text{ Wb/m}^2$

Διάκενο B_g : $0,9 \text{ Wb/m}^2$

3.17.5 Τύλιγμα παράλληλης διέγερσης

Αμπερελίγματα ανά πόλο: 2200

Ρεύμα τυλίγματος παράλληλης διέγερσης: 2 A

Αριθμός τυλιγμάτων ανά πόλο: 1100

Πυκνότητα ρεύματος: 4 A/mm^2

Εμαγιέ αγωγός με μεσσαίο κάλυμμα διαμέτρου 0,8 mm

Μέσο μήκος τυλίγματος: 460 mm

Αριθμός πηνίων πεδίου: 4

3.17.6 Τύλιγμα σειράς για αντιστάθμιση

Αμπερελίγματα για τύλιγμα σειράς: 772

Ρεύμα: 38,63 A

Πυκνότητα ρεύματος: 4 A/mm^2

Μέγεθος αγωγού: ορθογώνιος, $4 \text{ mm} \times 2,5 \text{ mm}$

Μέσο μήκος τυλίγματος: 532 mm

Τυλίγματα ανά πόλο: 5

3.17.7 Βοηθητικός πόλος

Φτιαγμένος από ελάσματα υλικού CRCA πάχους 1,25 το κάθε ένα.

Πλάτος βοηθητικού πόλου: 25 mm

Μήκος βοηθητικού πόλου: 114 mm

Ύψος βοηθητικού πόλου: 66 mm

Πυκνότητα ροής: 0,26 Wb/m²

Αμπερελίγματα ανά βοηθητικό πόλο: 2765

Ρεύμα: 38,63 A

Πυκνότητα ρεύματος: 4 A/mm²

Τύλιγμα ανά πόλο: 71

Μέγεθος αγωγού: ορθογώνιος, 4 mm × 2,5 mm

Διάκενο κάτω από τον βοηθητικό πόλο: 3 mm + 8 επενδύσεις 0,375 η κάθε μία.

Άρα μέγιστο διάκενο: 6 mm

Μέσο διάκενο: 4,5 mm

Μέσο μήκος τυλίγματος: 304 mm

3.17.8 Αντίσταση και απώλειες

Η αντίσταση του οπλισμού στους 75 °C: $R_{75} = 0,475 \Omega$

Απώλειες ισχύος ψήκτρας λόγω τριβής: 40 W

Απώλειες επαφής της ψήκτρας: 77,26 W

Βάρος χαλκού στον οπλισμό: 7,63 kg

Βάρος σιδήρου των δοντιών του οπλισμού: 6,9 kg

Βάρος σιδήρου πυρήνα: 12,65 kg

Απώλειες σιδήρου: 252 W

Αντίσταση του πεδίου παράλληλου τυλίγματος στους 75 °C: 84,35 Ω

Απώλειες χαλκού παράλληλου πεδίου: 338 W

Αντίσταση τυλίγματος σειρά για αντιστάθμιση: 0,236 Ω

Αντίσταση 4 τυλιγμάτων του πόλου μεταγωγής: 0,192 Ω

Απώλειες στο τύλιγμα αντιστάθμισης και στο τύλιγμα του βοηθητικού πόλου: 322 W

Απώλειες χαλκού οπλισμού: 709 W

Απώλειες τριβής και ανεμισμού: 150 W

Απώλειες δινορρευμάτων και φορτίου: 150 W

Συνολικές απώλειες: 2038 W

3.17.9 Βαθμός απόδοσης

Λειτουργία

Πραγματική ισχύς κινητήρα: 15000 W

Σύνολο απωλειών: 2038 W

Βαθμός απόδοσης: 88 %

Ταχύτητα περιστροφής: 1500 rpm

Τροφοδοσία διέγερσης: 170 V, 2 A

Ψύξη σε ανεμιστήρα

Θερμοκρασία περιβάλλοντος: 40 °C, κλάσης B αύξησης θερμοκρασίας, για το παράλληλο πεδίο και τον πόλο μεταγωγής καθώς και για τον συλλέκτη.

Βιβλιογραφία

Αντωνιάδης, Ν. (2022). Συστήματα ελέγχου σύγχρονων κινητήρων μόνιμων μαγνητών τραπεζοειδούς μαγνητικής ροής.

Γαντζούδης, Σ., Λαγουδάκος, Μ. & Μπινιάρος, Μ., (2004), Ηλεκτρικές Μηχανές, Έκδοση 5 η , Εκδόσεις ΟΕΔΒ, Αθήνα

Δημολίκας, Κ. Σ. (2013). *Θερμική ανάλυση σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών* (Bachelor's thesis).

Bayerl, T., Duhovic, M., Mitschang, P., & Bhattacharyya, D. (2014). The heating of polymer composites by electromagnetic induction—A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 57, 27-40.

Chapman, S. J. (2012). *Electric machinery fundamentals* fourth edition.

Chapman, S. J. (2012). *Electric machinery fundamentals* fifth edition.

Doetsch, G. (2012). *Introduction to the Theory and Application of the Laplace Transformation*. Springer Science & Business Media.

Dou, C. X., Zhang, X. Z., Guo, S. L., & Mao, C. C. (2010). Delay-independent excitation control for uncertain large power systems using wide-area measurement signals. *International journal of electrical power & energy systems*, 32(3), 210-217.

McLyman, C. W. T. (2004). *Transformer and inductor design handbook*. CRC press.

<https://www.electronics-tutorials.ws/transformer/transformer-basics.html>

ethw.org (2017). Engineering and Technology History Wiki. *Pearl Street Station*http://ethw.org/Pearl_Street_Station

<https://learnelectronics.gr/%CE%BF%CE%B9-%CE%BD%CF%8C%CE%BC%CE%BF%CE%B9-%CF%84%CE%BF%CF%85-kirchhoff/>

