

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ -ΑΓΡΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΑΘΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 4: ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ Σ.Ρ.

ΣΚΟΠΟΣ:

1. Να διατυπώνετε την αρχή λειτουργίας των κινητήρων Σ.Ρ.
2. Να μπορείτε να διακρίνετε τα βασικά είδη των κινητήρων Σ.Ρ.
3. Να περιγράφετε τα βασικά μέρη των κινητήρων Σ.Ρ.
4. Να σχεδιάζετε και να ερμηνεύετε τις χαρακτηριστικές ταχύτητας- ροπής

ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΕΣ: ΤΣΙΡΟΠΟΥΛΟΣ ΖΗΣΗΣ
ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΑΡΑΝΙΚΑΣ

ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Ε.ΔΙ.Π

ΜΕΡΟΣ Α

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος που εξετάσαμε ως γεννήτριες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως κινητήρες, αν τροφοδοτήσουμε το τύλιγμα του οπλισμού με συνεχή τάση. Όταν

το τύλιγμα του δρομέα, ευρισκόμενο εντός του κύριου πεδίου του στάτη, διαρρέεται από ρεύμα, αναπτύσσεται ροπή η οποία τείνει να στρέψει το δρομέα. Επομένως, η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια εισόδου σε μηχανική.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι ακόμη και σήμερα αρκετά διαδεδομένοι. **Ο κύριος λόγος που καθιστά τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος δημοφιλείς, είναι η ευκολία στον έλεγχο της ταχύτητάς τους μέχρι το μηδέν και η εξαιρετική δυναμική τους συμπεριφορά.** Έτσι, υπάρχουν εφαρμογές πολύ υψηλών απαιτήσεων στις οποίες οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι αναντικατάστατοι.

Η συμπεριφορά των κινητήρων περιγράφεται από τη χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής. Αυτή περιγράφει τη μεταβολή της ταχύτητας του κινητήρα, καθώς μεταβάλλεται η ροπή του φορτίου που εφαρμόζεται στον άξονά του.

Shaft and bearings with high overload capacity (for belts transmission). Roller bearings may be used in the drive end shield for very high radial loads.

Ρουλεμάν με υψηλή αντοχή σε υπερφορτίσεις

Άξονας

Marking on shaft extension indicating the balancing class.

Compact design with high power / weight ratio.

Πρόσθετο σύστημα εξαναγκασμένης ψύξης για εφαρμογές ελέγχου της ταχύτητας

Forced ventilation :
• multiposition -
• multivoltage -
• multifrequency
• ensures good thermal reserve
• sound screen in option

Large number of possible options.

Δακτύλιος Ανύψωσης

Removable lifting rings.

Brush holders fitted in option with wear limit microswitches.

Ψηκτροφόρας με τις ψήκτρες

Θύρα επιθεώρησης των ψηκτρών

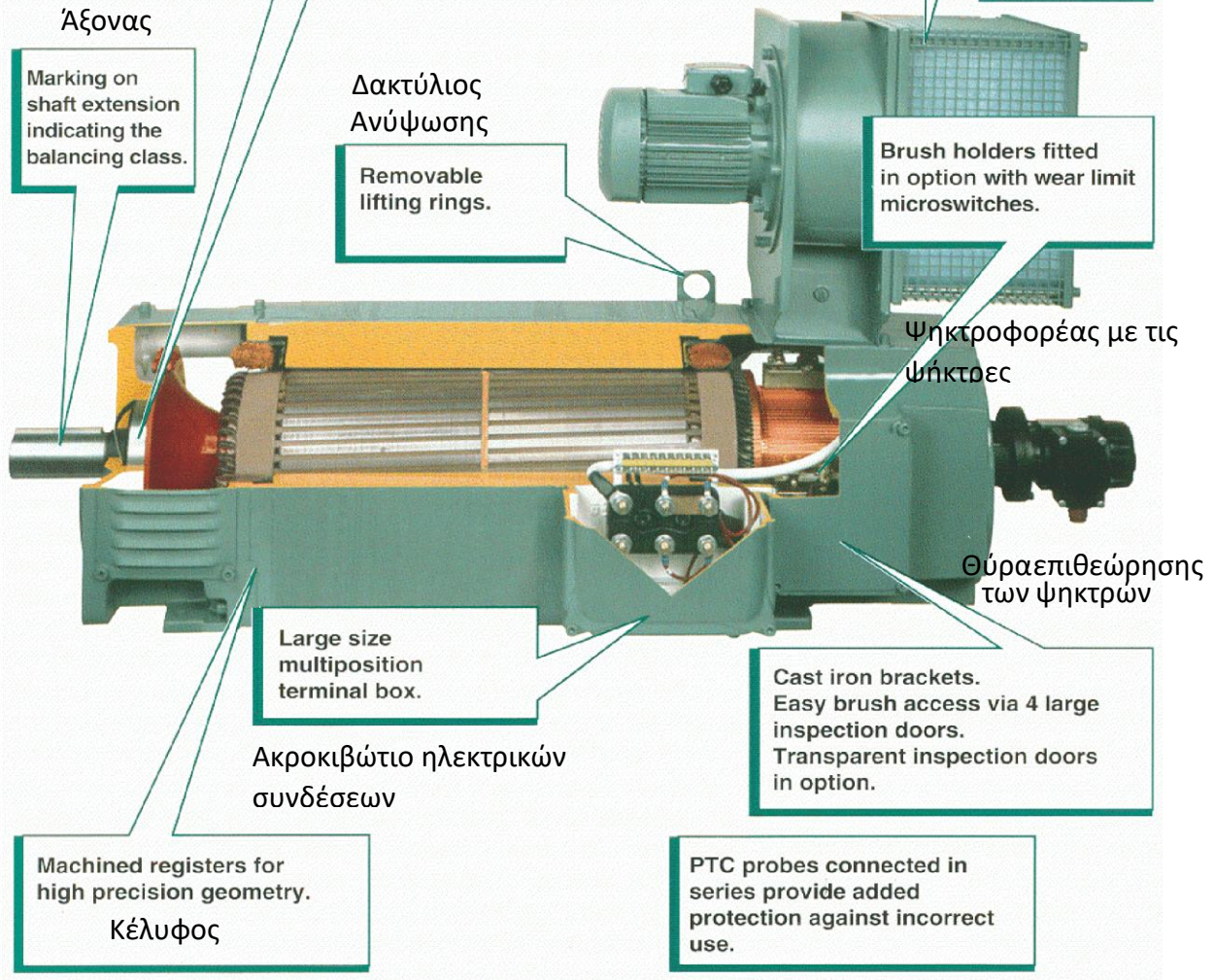
Large size multiposition terminal box.

Ακροκιβώτιο ηλεκτρικών συνδέσεων

Machined registers for high precision geometry.
Κέλυφος

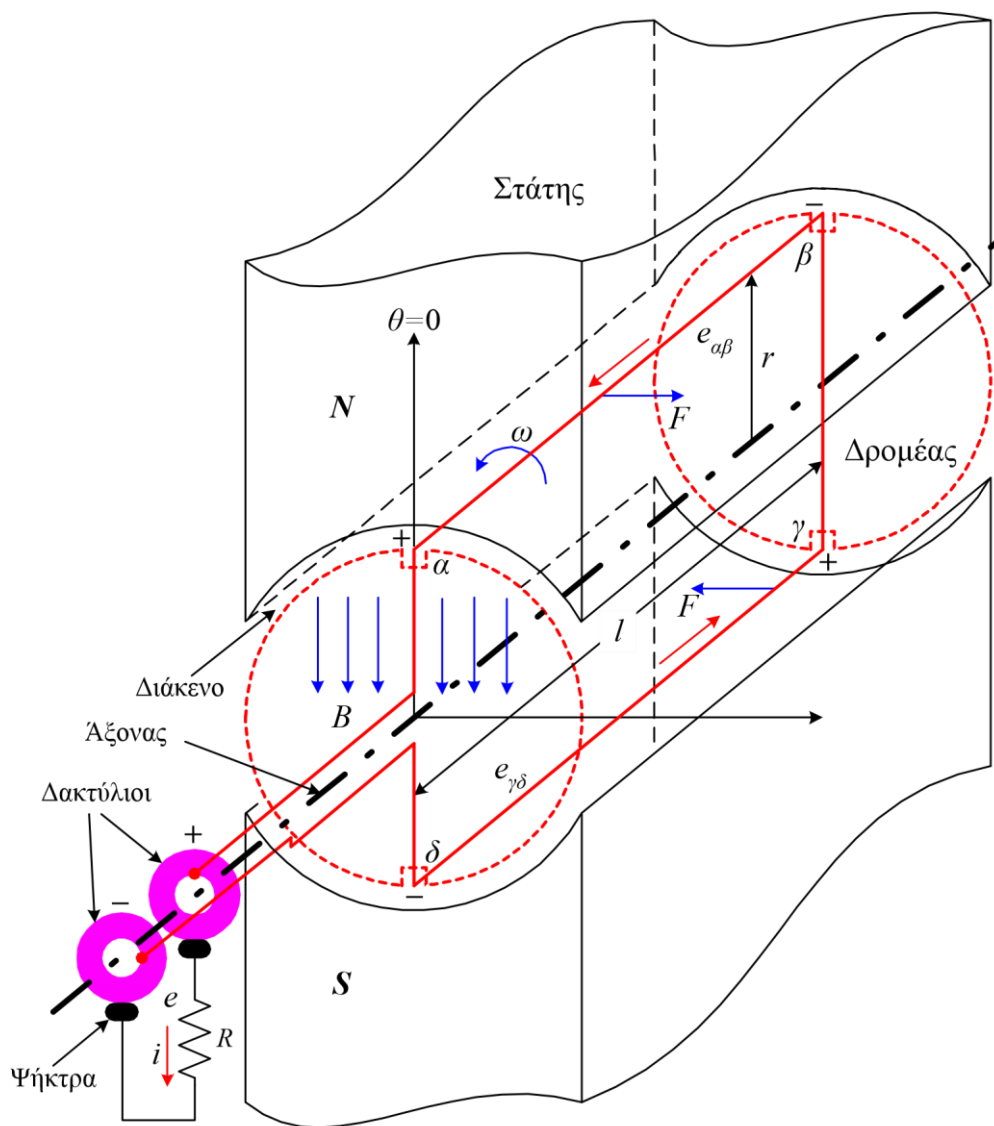
Cast iron brackets. Easy brush access via 4 large inspection doors. Transparent inspection doors in option.

PTC probes connected in series provide added protection against incorrect use.



4.1.1.ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

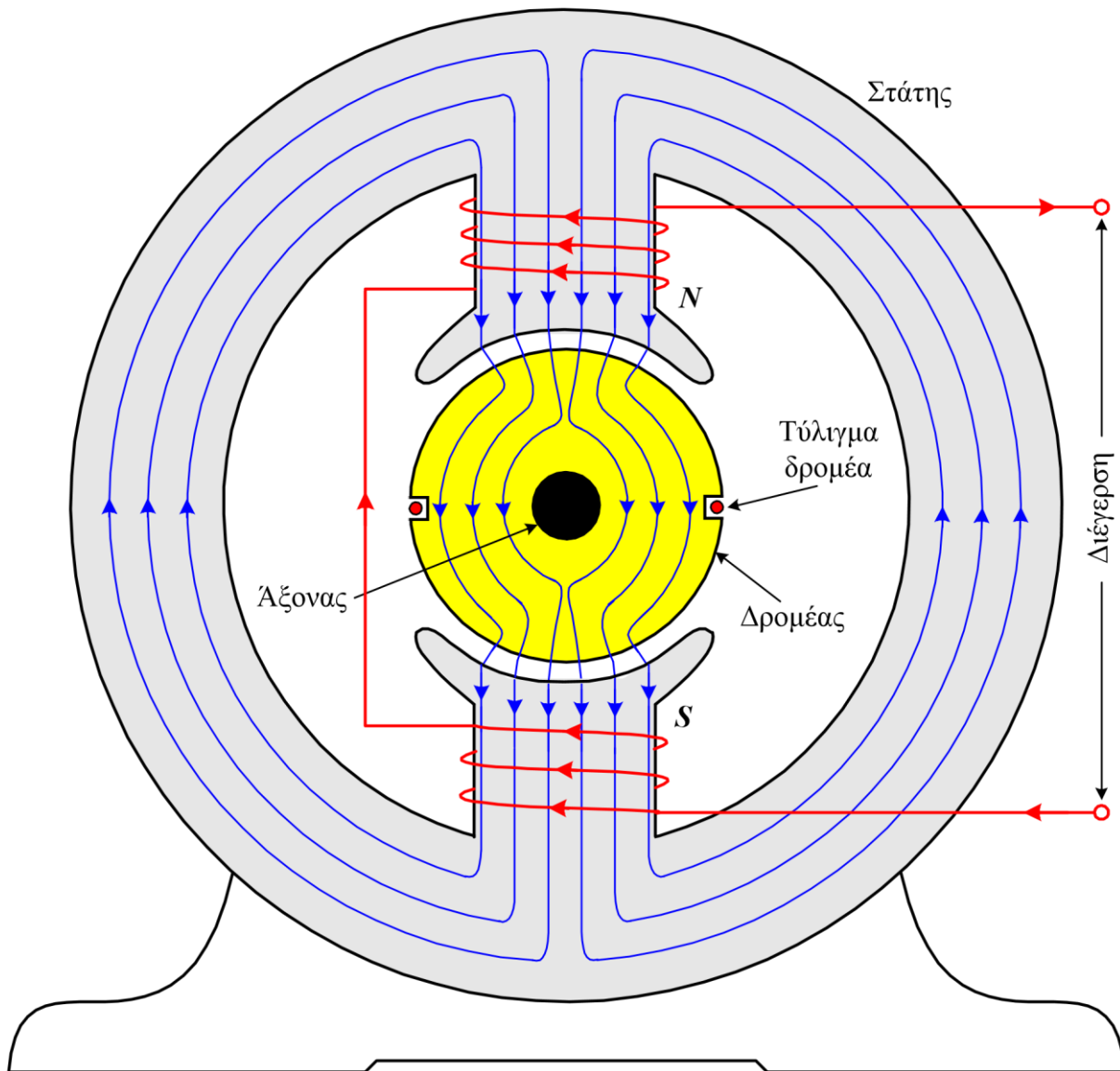
Κάθε ηλεκτρική μηχανή αποτελείται από δύο κύρια τμήματα. Τα ακίνητο τμήμα της μηχανής ονομάζεται **στάτης (stator)** και το στρεφόμενο τμήμα **δρομέας (rotor)**. Στο Σχ. 1.1 εικονίζεται η δομή μιας στοιχειώδους ηλεκτρικής μηχανής. Η αρχή λειτουργίας όλων των ηλεκτρικών μηχανών στηρίζεται σ' αυτή τη στοιχειώδη μηχανή. Ο στάτης της μηχανής αποτελείται από ένα ηλεκτρομαγνήτη με δύο πόλους, το βόρειο και το νότιο, ο οποίος παράγει το μαγνητικό πεδίο B . Ο δρομέας αποτελείται από ένα κύλινδρο κατασκευασμένο από σιδηρομαγνητικό υλικό, ο οποίος μπορεί να στραφεί γύρω από τον άξονα.



Σχήμα 1.1 Δομή στοιχειώδους ηλεκτρικής μηχανής

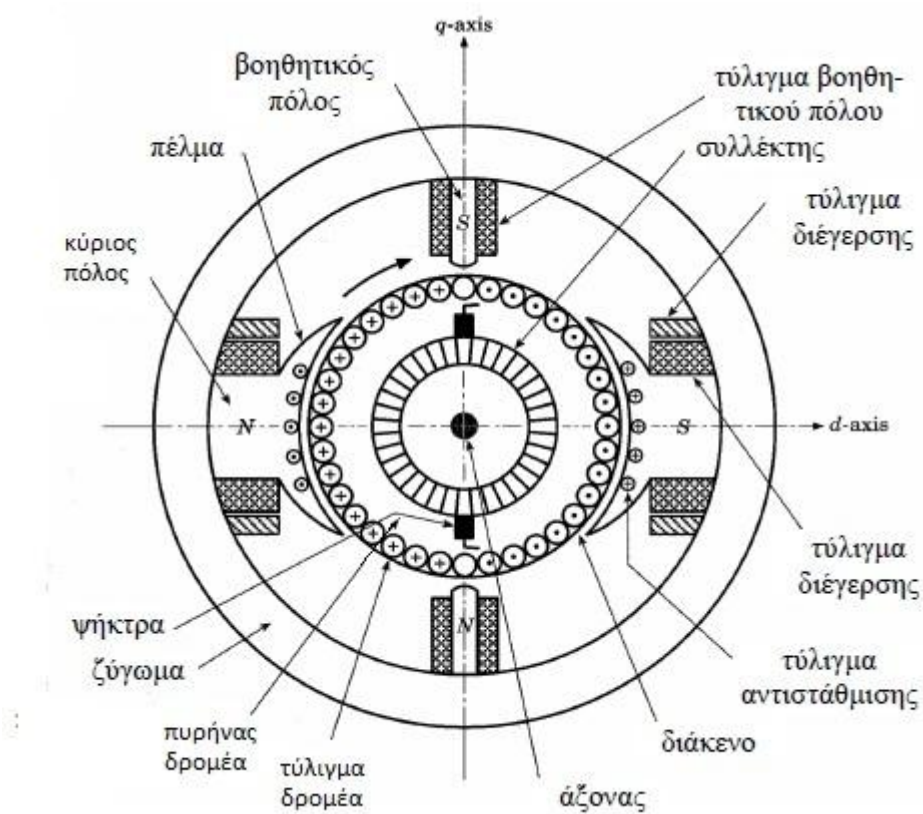
Σε δύο αυλακώσεις στην επιφάνεια του κυλίνδρου, είναι συμμετρικά τοποθετημένοι οι αγωγοί ενός πλαισίου. Το πλαίσιο αυτό ονομάζεται, *τύλιγμα του δρομέα*. Θα δούμε στη συνέχεια ότι το τύλιγμα του δρομέα στις πρακτικές μηχανές συνεχούς ρεύματος, έχει πολύ πιο σύνθετη δομή από αυτή του απλού πλαισίου. Τα άκρα του τυλίγματος του δρομέα συνδέονται σε δύο δακτυλίδες, με τους οποίους εφάπτονται οι *ψήκτρες (brushes)*. Μέσω των δακτυλίων και των ψηκτρών το τύλιγμα του δρομέα είναι διαθέσιμο στο στάτη.

Μεταξύ των πόλων του στάτη και του κυλινδρικού δρομέα, υπάρχει ένα διάκενο αέρα με σταθερό πλάτος. Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου του στάτη, στη διαδρομή τους από το βόρειο προς το νότιο πόλο, διέρχονται μέσω του δρομέα και του διακένου. Επειδή η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα είναι πολύ μικρότερη από εκείνη του δρομέα, οι δυναμικές γραμμές είναι κάθετες στην επιφάνεια του δρομέα (Σχ. 1.2). Έτσι, η διαδρομή της μαγνητικής ροής στο διάκενο με τη μεγάλη μαγνητική αντίσταση είναι ελάχιστη. Επιπλέον, η μαγνητική ροή που διέρχεται από το τύλιγμα του δρομέα μεταβάλλεται περίπου γραμμικά, καθώς ο δρομέας στρέφεται.



Σχ. 1.2 Δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου στη στοιχειώδη ηλεκτρική μηχανή, όπου διακρίνεται πλήρως ο στάτης. Οι μαγνητικές γραμμές είναι κάθετες στην επιφάνεια του δρομέα

4.1.2 Κατασκευαστικά μέρη κινητήρα -γεννήτριας Σ.Ρ.



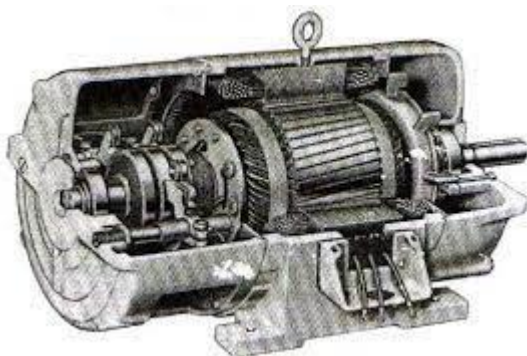
A) Στάτης

- **Στάτης:** αποτελεί το ακίνητο (στατικό) τμήμα της μηχανής, με στόχο τη δημιουργία συγκεκριμένης μαγνητικής ροής. Περιλαμβάνει:
- **Ζύγωμα:** αποτελεί τον κορμό της μηχανής. Χρησιμεύει και για το “κλείσιμο” του μαγνητικού κυκλώματος. Κατασκευάζεται από συμπαγή σίδηρο, με εξαίρεση τις μηχανές με ταχείες μεταβολές του πεδίου διέγερσης.
- **Κύριοι πόλοι:** Τα πέλματά τους έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια από τον πυρήνα, για την κατανομή της μαγνητικής ροής σε μεγάλο μέρος της επιφάνειας του δρομέα. Το διάκενο είναι η απόσταση ανάμεσα στα πέλματα και το δρομέα.
- **Τύλιγμα διέγερσης:** τοποθετείται στους κύριους πόλους και παράγει το κύριο μαγνητικό πεδίο της μηχανής.
- **Βοηθητικοί πόλοι :** είναι ισάριθμοι με τους κύριους.
- **Τύλιγμα αντιστάθμισης:** τοποθετείται σε αυλάκια στα πέλματα των πόλων μεγάλων μηχανών.
- **Ψύκτρες:** τοποθετούνται στους ψηκτροφορείς και είναι ισάριθμες με τους πόλους. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη αγωγιμότητα και μικρό συντελεστή τριβής (αφού πρέπει να εφάπτονται πάνω στο συλλέκτη).

B) Ρότορας

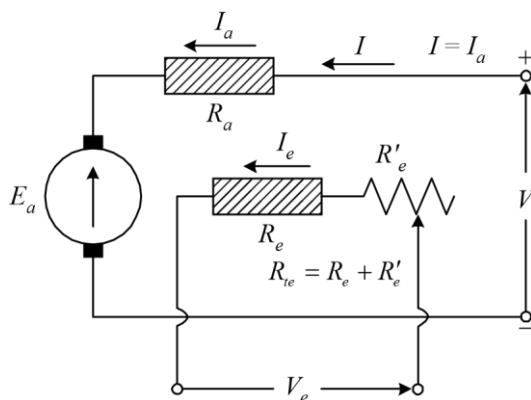
(ρότορας): αποτελεί το στρεφόμενο τμήμα της μηχανής (γνωστό και ως επαγωγικό τύμπανο). Περιλαμβάνει:

- **Πυρήνα:** κατασκευάζεται από σιδηροελάσματα. Διαθέτει αυλάκια για την τοποθέτηση των αγωγών.
- **Περιέλιξη του δρομέα (επαγωγικό τύλιγμα):** πάνω σ’ αυτήν επάγεται η τάση.
- **Συλλέκτη :** αποτελείται από χάλκινους τομείς που είναι μονωμένοι μεταξύ τους και ολισθαίνει πάνω στις ακίνητες ψήκτρες. Στους τομείς καταλήγουν τα άκρα των αγωγών του τυλίγματος.



4.2 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΕ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ

Το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση, είναι αντίστοιχο μ' εκείνο της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος και εικονίζεται στο Σχ. 4.1. Στο Σχ. 4.1 με E_a συμβολίζεται η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (ΑΗΕΔ) του κινητήρα. Η ΑΗΕΔ είναι η τάση που αναπτύσσεται στο τύλιγμα του οπλισμού καθώς αυτός στρέφεται μέσα στο κύριο μαγνητικό πεδίο του στάτη.



Σχ. 4.1 Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση

Επομένως, το φαινόμενο της γεννήτριας εκδηλώνεται και στον κινητήρα, με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Έτσι, η ΑΗΕΔ στους κινητήρες E_a υπολογίζεται από την ίδια σχέση, που ορίζεται η ηλεκτρεγερτική δύναμη E στις γεννήτριες

$$E_a = C_e \phi \omega_r \quad (4.1)$$

Από το ισοδύναμο κύκλωμα ισχύει η σχέση,

$$V = E_a + I R_a \quad (4.2)$$

όπου V είναι η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα. Η τάση τροφοδοσίας είναι μεγαλύτερη από την ΑΗΕΔ του κινητήρα και η διαφορά των δύο τάσεων καθορίζει το μέγεθος του ρεύματος στο δρομέα. Για δεδομένη φορά περιστροφής, το ρεύμα του δρομέα στον κινητήρα έχει αντίθετη φορά από εκείνο στη γεννήτρια. Στις γεννήτριες, όπου η ροή της ισχύος είναι αντίθετη, η ηλεκτρεγερτική δύναμη E είναι μεγαλύτερη από την τάση εξόδου V . Η ροπή που αναπτύσσεται στον άξονα των μηχανών συνεχούς ρεύματος, όλων των κατηγοριών, ορίζεται από τη σχέση

$$T_e = C_T \varphi I_a \quad (4.3)$$

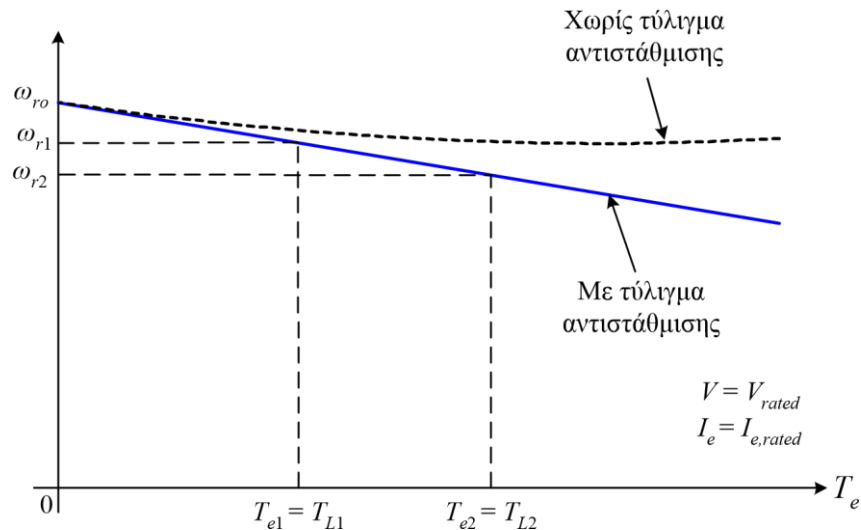
Οι σταθερές C_e και C_T στις Εξ. (4.1), (4.3) είναι ίσες, $C_e = C_T$. Από τις Εξ. (4.1), (4.2) προκύπτει μια έκφραση της ταχύτητας του κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση

$$\omega_r = \frac{V - I_a R_a}{C_e \varphi (I_e)} \quad (4.4)$$

Η κύρια μαγνητική ροή στην Εξ. (4.4) ορίζεται από το ρεύμα διέγερσης I_e , το οποίο ρυθμίζεται από την ανεξάρτητη πηγή συνεχούς τάσης V_e . Αντικαθιστώντας στην Εξ. (4.4) το ρεύμα του δρομέα από την Εξ. (4.3), προκύπτει η παρακάτω έκφραση της ταχύτητας ως προς τη ροπή

$$\omega_r = \frac{V}{C_e \varphi} - \frac{R_a}{(C_e \varphi)^2} T_e \quad (4.5)$$

Από την Εξ. (4.5), όταν η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα V και η μαγνητική ροή είναι σταθερές, η ταχύτητα μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της ροπής φορτίου T_L (Σχ. 4.2). Στην κατάσταση ισορροπίας ισχύει, $T_e = T_L$.



Σχ. 4.2 Φυσική χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής του κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση

Η γραμμική μεταβολή της ταχύτητας ισχύει μόνο όταν ο κινητήρας διαθέτει τύλιγμα αντιστάθμισης. Αν αυτό δεν συμβαίνει, με την αύξηση της ροπής φορτίου η αντίδραση του

οπλισμού προκαλεί τη μείωση της ροής, καθώς από την Εξ. (4.3) αυξάνει το ρεύμα I_a . Έτσι, η μείωση της ταχύτητας είναι μικρότερη από αυτή που ορίζει η Εξ. (4.5) και εικονίζεται στο Σχ. 4.2 με διακεκομμένη γραμμή. Η χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής του κινητήρα που αντιστοιχεί στην ονομαστική τάση οπλισμού $V = V_{rated}$ και την ονομαστική ροή $\Phi = \Phi_{rated}$ ονομάζεται *φυσική* (*natural*).

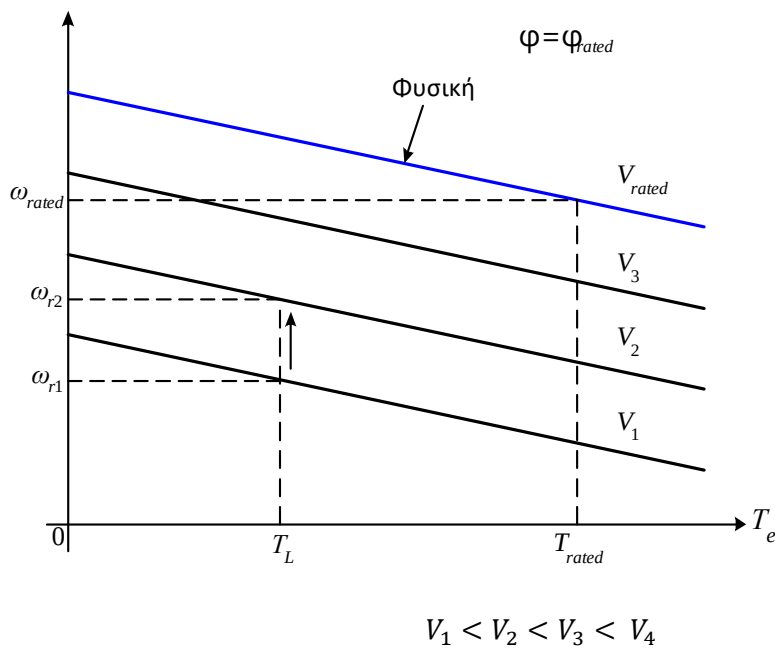
Η χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής του κινητήρα εξηγείται ως εξής: Θεωρούμε ότι ο κινητήρας στρέφεται με **ταχύτητα** ω_{r1} και αναπτύσσει **ροπή** T_{e1} , η οποία είναι ίση με τη ροπή του φορτίου T_{L1} ($T_{e1} = T_{L1}$). Αν η ροπή του φορτίου αυξηθεί στην τιμή T_{L2} , η ταχύτητα του κινητήρα τείνει να μειωθεί. Με τη μείωση της ταχύτητας, από την Εξ. (4.1) με σταθερή ροή, η ΑΗΕΔ μειώνεται. Εφόσον η τάση τροφοδοσίας είναι σταθερή, με τη μείωση της E_a το ρεύμα στο δρομέα αυξάνεται. Το αυξημένο I_a από την Εξ. (4.3) προκαλεί την αύξηση της παραγόμενης ροπής, στην τιμή T_{e2} , η οποία είναι ίση με τη νέα ροπή φορτίου T_{L2} . Η **μειωμένη ταχύτητα του κινητήρα ω_{r2} στο νέο σημείο ισορροπίας, εξαρτάται αποκλειστικά από τη ροπή του φορτίου.**

Από την Εξ. (4.5), προκύπτουν οι τρεις μέθοδοι για τον έλεγχο της ταχύτητας ενός κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση:

- **Ρύθμιση της τάσης στο τυλίγμα του οπλισμού (armature voltage control) V .**
- **Ρύθμιση της μαγνητικής ροής (field control) Φ .**
- **Ρυθμιζόμενη αντίσταση στο κύκλωμα του δρομέα (armature resistance control).**

4.2.1 Έλεγχος της Ταχύτητας με Ρύθμιση της Τάσης Οπλισμού

Η ταχύτητα ενός κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση, μπορεί να ρυθμιστεί με τον έλεγχο της τάσης που εφαρμόζεται στο τυλίγμα του οπλισμού. Η τάση διέγερσης διατηρείται σταθερή. Έτσι, το ρεύμα διέγερσης και η μαγνητική ροή είναι επίσης σταθερές. Προκειμένου να ερμηνεύσουμε τη διαδικασία μεταβολής της ταχύτητας, θεωρούμε ότι ο κινητήρας αρχικά τροφοδοτείται με τάση V_1 , στρέφεται με ταχύτητα ω_{r1} και αναπτύσσει ροπή T_{e1} , η οποία είναι ίση με τη ροπή του φορτίου T_L ($T_{e1} = T_L$). Μια αύξηση της τάσης του τυλίγματος οπλισμού, από την τιμή V_1 στην V_2 , προκαλεί την αύξηση του ρεύματος οπλισμού I_a , καθώς $I_{a2} = (V_2 - E_a) / R_a$. Η αύξηση του I_a , από την τιμή I_{a1} στην τιμή I_{a2} , προκαλεί την αύξηση της αναπτυσσόμενης ροπής, στην τιμή $T_{e2} = C_e \Phi I_{a2} > T_L$ (Σχ. 4.3).



Σχ. 4.3 Έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση, με τη ρύθμιση της τάσης οπλισμού

Εφόσον η ροπή T_{e2} είναι μεγαλύτερη της ροπής φορτίου, ο κινητήρας επιταχύνεται. Η αύξηση της ταχύτητας προκαλεί την αύξηση της ΑΗΕΔ από τη σχέση $E_a = C_e \Phi \omega_r$, οπότε το ρεύμα του οπλισμού ελαττώνεται ξανά. Έτσι, η ροπή επανέρχεται στην αρχική της τιμή $T_{e1} = T_L$, σε μια ταχύτητα ω_{r2} μεγαλύτερη της αρχικής. Η ροπή του φορτίου έχει θεωρηθεί σταθερή και ανεξάρτητη της ταχύτητας.

Οι χαρακτηριστικές ταχύτητας–ροπής του κινητήρα, με τη ρύθμιση της τάσης οπλισμού, εικονίζονται στο Σχ. 4.3. Οι χαρακτηριστικές είναι παράλληλες μεταξύ τους, δηλαδή η κλίση τους είναι σταθερή, όπως ορίζει η Εξ. (4.5).

Αυτή η μέθοδος ελέγχου εφαρμόζεται μόνο για τη ρύθμιση της ταχύτητας του κινητήρα σε τιμές μικρότερες της ονομαστικής. Ο κινητήρας στρέφεται με την ονομαστική του ταχύτητα ω_{rated} , όταν τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση V_{rated} , το ονομαστικό ρεύμα διέγερσης και το ονομαστικό φορτίο. Η ταχύτητα του κινητήρα είναι ανάλογη με την τάση του δρομέα. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση του οπλισμού, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του κινητήρα. Επομένως, για την αύξηση της ταχύτητας σε τιμές μεγαλύτερες της ονομαστικής, πρέπει και η τάση στο τύλιγμα του δρομέα να υπερβεί την V_{rated} . Όμως αυτό δεν είναι επιτρεπτό, καθώς μπορεί να καταστραφεί το κύκλωμα του οπλισμού. Έτσι, η μέθοδος της ρύθμισης της τάσης οπλισμού, χρησιμοποιείται στον έλεγχο της ταχύτητας σε τιμές μικρότερες από την ονομαστική.

συμπεριφορά ερμηνεύεται από την Εξ. (4.5), στην οποία ο δεύτερος όρος (κλίση), είναι αντι-στροφώς ανάλογος με το τετράγωνο της μαγνητικής ροής. Η ταχύτητα του κινητήρα στο κενό, είναι αντιστροφώς ανάλογη της μαγνητικής ροής.

Με τη ρύθμιση της μαγνητικής ροής, η ταχύτητα του κινητήρα ελέγχεται σε τιμές μεγαλύτερες από την ονομαστική. Για τη λειτουργία του κινητήρα σε ταχύτητες μικρότερες από την ονομαστική, το ρεύμα διέγερσης πρέπει να γίνει μεγαλύτερο από το ονομαστικό. Θεωρούμε ότι $V=V_{rated}$. Όμως, ένα ρεύμα διέγερσης μεγαλύτερο από το ονομαστικό, θα προκαλέσει υπερ-θέρμανση του τυλίγματος, με κίνδυνο την καταστροφή του.

Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι κρίσιμο το ρεύμα διέγερσης να ρέει συνεχώς. Αν για κάποιο λόγο το ρεύμα διέγερσης διακοπεί, ενώ ο κινητήρας λειτουργεί, η μαγνητική ροή θα γίνει ίση με την παραμένουσα ϕ_r . Η ΑΗΕΔ θα γίνει πολύ μικρή $E_a = C_e \phi_r \omega_r$ και το ρεύμα του οπλισμού θα αυξηθεί υπερβολικά. Έτσι, η παραγόμενη ροπή θα γίνει μεγαλύτερη της ροπής φορτίου και η ταχύτητα του κινητήρα θα αυξάνει συνεχώς.

4.2.3 Έλεγχος της Ταχύτητας με Ρυθμιζόμενη Αντίσταση στο Δρομέα

Από την Εξ. (4.5) προκύπτει ότι, η ταχύτητα του κινητήρα ανεξάρτητης διέγερσης μπορεί να ρυθμιστεί με την εισαγωγή μιας μεταβλητής αντίστασης σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της αντίστασης, τόσο μικρότερη είναι η ταχύτητα του κινητήρα, όταν λειτουργεί με φορτίο. **Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σπάνια, εξαιτίας των μεγάλων απωλειών ισχύος στην αντίσταση ρύθμισης, από το μεγάλο ρεύμα του οπλισμού. Ένα δεύτερο μειονέκτημα είναι ότι, η ταχύτητα του κινητήρα στο κενό δεν μπορεί να ελεγχθεί.**

4.2.4 Περιοχές Λειτουργίας Μέγιστης Ροπής και Μέγιστης Ισχύος

Οι μέθοδοι ελέγχου της ταχύτητας του κινητήρα ανεξάρτητης διέγερσης, με ρύθμιση της τάσης οπλισμού και ρύθμιση της μαγνητικής ροής, δρουν συμπληρωματικά. Όταν απαιτείται η ρύθμιση της ταχύτητας του κινητήρα σε μεγάλο εύρος, οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα. Σε ταχύτητες μικρότερες της ονομαστικής, η μαγνητική ροή διατηρείται στην ονομαστική τιμή και η ταχύτητα ελέγχεται με τη ρύθμιση της τάσης του οπλισμού. Σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής, η τάση του οπλισμού διατηρείται στην ονομαστική τιμή και η μαγνητική ροή μειώνεται από την ονομαστική.

Στο Σχ. 4.5 εικονίζεται η μεταβολή της μέγιστης ροπής και της μέγιστης ισχύος, που μπορεί να αναπτύξει ένας κινητήρας με ανεξάρτητη διέγερση, όταν η ταχύτητα του ελέγχεται με τις δύο μεθόδους. Σε ταχύτητες μικρότερες της ονομαστικής, όπου $\phi = \phi_{rated}$, η μέγιστη ροπή που μπορεί να αναπτύξει ο κινητήρας εξαρτάται από το μέγιστο ρεύμα του οπλισμού $I_{a,max}$

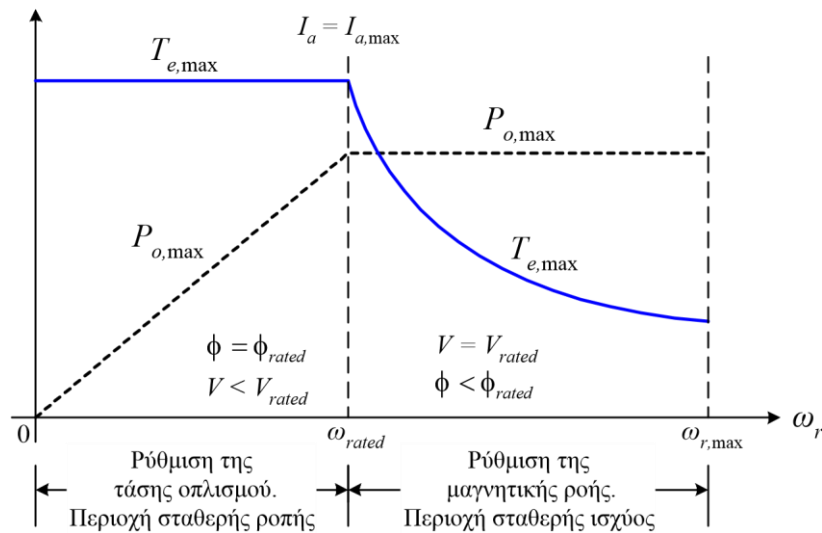
$$T_{e,max} = C_e \phi I_{a,max} \quad (4.6)$$

Η τιμή της μέγιστης ροπής διατηρείται σταθερή με τη μείωση της ταχύτητας, μέχρι τη μηδενική (περιοχή σταθερής ροπής). Η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι ίση με

$$P_{o,max} = T_{e,max} \omega_r \quad (4.7)$$

Επομένως, η τιμή της μέγιστης ισχύος μεταβάλλεται γραμμικά με την ταχύτητα.

Σε ταχύτητες μεγαλύτερες από την ονομαστική, η ροή μειώνεται από την ονομαστική. Επειδή το ρεύμα του οπλισμού διατηρείται στη μέγιστη τιμή $I_{a,max}$, η μέγιστη ροπή μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας, Εξ. (4.6). Η μέγιστη ισχύς εξόδου διατηρείται σταθερή, στην τιμή που αντιστοιχεί στην ονομαστική ταχύτητα (περιοχή σταθερής ισχύος).

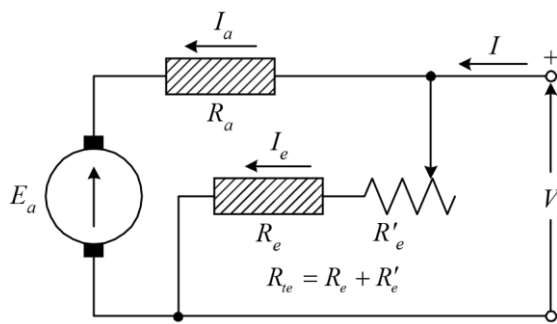


Σχ. 4.5 Περιοχές λειτουργίας του κινητήρα ανεξάρτητης διέγερσης με σταθερή μέγιστη ροπή σε ταχύτητες μικρότερες της ονομαστικής και σταθερή μέγιστη ισχύ σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής

4.3 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

Το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα παράλληλης διέγερσης εικονίζεται στο Σχ. 4.6. **Η διαφορά του κινητήρα παράλληλης διέγερσης από τον κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση, είναι ότι το κύκλωμα του δρομέα και το κύκλωμα της διέγερσης τροφοδοτούνται από την ίδια πηγή συνεχούς τάσης V .** Οι Εξ. (4.1)–(4.5) και η χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής του Σχ. 4.2, ισχύουν και στους κινητήρες με παράλληλη διέγερση. Έτσι, η συμπεριφορά των κινητήρων παράλληλης διέγερσης, δεν διαφέρει από εκείνη των κινητήρων με ανεξάρτητη διέγερση.

Οι κινητήρες ανεξάρτητης διέγερσης, προτιμώνται από τους κινητήρες με παράλληλη διέγερση, σε εφαρμογές όπου απαιτείται ο έλεγχος της ταχύτητας σε ευρεία περιοχή με υψηλή ακρίβεια.

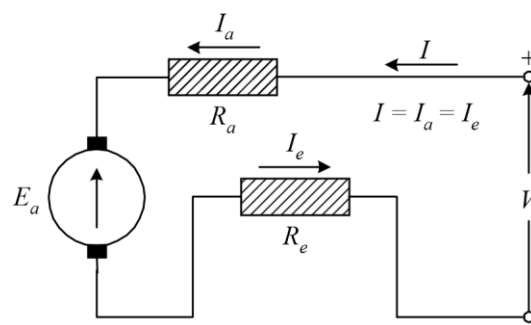


Σχ. 4.6 Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα παράλληλης διέγερσης

4.4 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΕ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΣΕΙΡΑΣ

Στους κινητήρες με διέγερση σειράς, το τύλιγμα της διέγερσης συνδέεται σε σειρά με το κύκλωμα του δρομέα, όπως εικονίζεται στο Σχ. 4.7. Έτσι, **το ρεύμα της διέγερσης είναι ίσο με το ρεύμα του οπλισμού και η μαγνητική ροή είναι συνάρτηση του ρεύματος στο δρομέα ($I = I_a = I_e$).** Στη μη κορεσμένη περιοχή της καμπύλης μαγνήτισης του κινητήρα, η ροή μπορεί να θεωρηθεί ότι μεταβάλλεται γραμμικά με το ρεύμα του οπλισμού

$$\varphi = C_f I_a \quad (4.8)$$



Σχ. 4.7 Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα με διέγερση σειράς

Αντικαθιστώντας την Εξ. (4.8) στις Εξ. (4.1) και (4.3), οι οποίες ισχύουν σ' όλους τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, έχουμε

$$E_a = C_e C_f I_a \omega_r \quad (4.9)$$

$$T_e = C_e C_f I_a^2 \quad (4.10)$$

Από το ισοδύναμο κύκλωμα (Σχ. 4.7), ισχύει η σχέση

$$V = E_a + I_a (R_a + R_e) \quad (4.11)$$

Συνδυάζοντας τις Εξ. (4.9)–(4.11), προκύπτει η σχέση της ταχύτητας του κινητήρα ως προς τη ροπή

$$\omega_r = \frac{V}{C_e C_f I_a} - \frac{R_a + R_e}{C_e C_f} = \frac{V}{\sqrt{C_e C_f}} \frac{1}{\sqrt{T_e}} - \frac{R_a + R_e}{C_e C_f} \quad (4.12)$$

Από την Εξ. (4.12) παρατηρούμε ότι, η ταχύτητα του ακόρεστου κινητήρα με διέγερση σειράς, μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα της ροπής του. Η χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής που προκύπτει από

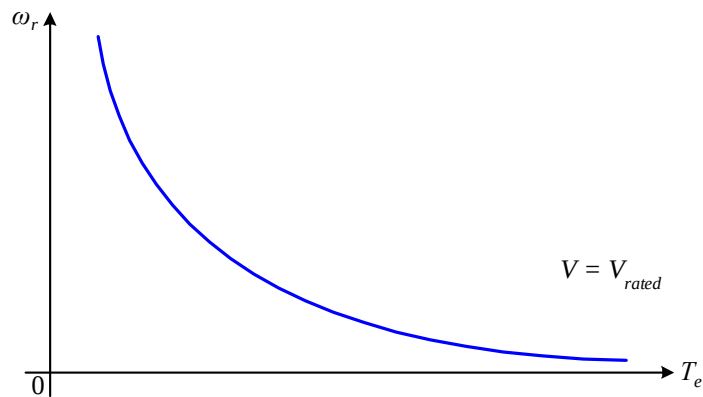
την Εξ. (4.12) εικονίζεται στο Σχ. 4.8, με σταθερή τάση τροφοδοσίας ίση με την ονομαστική (φυσική χαρακτηριστική). Η απότομη μεταβολή της ταχύτητας με τη ροπή, οφείλεται στη μεταβολή της μαγνητικής ροής με το φορτίο. Έτσι, μια αύξηση της ροπής φορτίου προκαλεί την αύξηση του ρεύματος οπλισμού Εξ. (4.10) και της μαγνητικής ροής Εξ. (4.8). Επειδή η ροή αυξάνεται με τη ροπή, η ταχύτητα πρέπει να μειωθεί σημαντικά ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία μεταξύ της σταθερής τάσης τροφοδοσίας V και της ΑΗΕΔ του κινητήρα, Εξ. (4.9) και (4.11).

Από το Σχ. 4.8 παρατηρούμε ότι, η ταχύτητα του κινητήρα αποκτά πολύ μεγάλες τιμές όταν η ροπή του φορτίου τείνει στο μηδέν. Έτσι, οι κινητήρες με διέγερση σειράς δεν πρέπει ποτέ να λειτουργούν χωρίς φορτίο. Οι

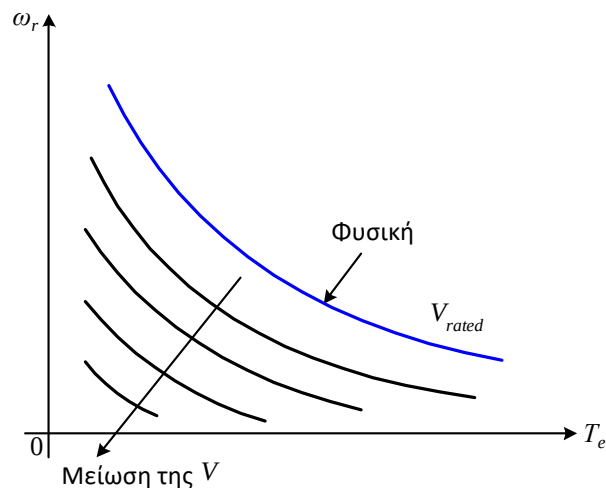
κινητήρες σειράς δίνουν τη μεγαλύτερη ροπή ανά μονάδα ρεύματος, από κάθε άλλο κινητήρα συνεχούς ρεύματος, εξαιτίας της αύξησης της ροής με τη ροπή και μάλιστα σε μικρή ταχύτητα.

Επομένως, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ροπή

εκκίνησης και μεγάλες υπερφορτίσεις. Τέτοιες εφαρμογές είναι οι κινητήρες των ανελκυστήρων, των γερανών και των συστημάτων έλξης (τρένα).



Σχ. 4.8 Φυσική χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής του κινητήρα με διέγερση σειράς



Σχ. 4.9 Έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα διέγερσης σειράς, με ρύθμιση της τάσης τροφοδοσίας V

4.4.1 Έλεγχος της Ταχύτητας

Από την Εξ. (4.12) προκύπτει ότι, η μόνη βολική μέθοδος για τον έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα με διέγερση σειράς, είναι η ρύθμιση της τάσης τροφοδοσίας. Μειώνοντας την τάση από την ονομαστική της τιμή, μειώνεται και η ταχύτητα του κινητήρα, ανεξάρτητα από την ροπή του φορτίου (Σχ. 4.9). Επειδή η μαγνητική ροή δεν μπορεί να ελεγχθεί, η ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα σειράς πρέπει να επιλέγεται ίση με τη μέγιστη επιθυμητή ταχύτητα του συστήματος.

4.5 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ

Στους κινητήρες με αθροιστική σύνθετη διέγερση, το τύλιγμα σειράς και το παράλληλο τύλιγμα συνδέονται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε οι μαγνητικές ροές που αναπτύσσουν να προστίθενται. Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των δύο τυλιγμάτων, διακρίνουμε τα ισοδύναμα κυκλώματα του Σχ. 4.10. Οι τάσεις και τα ρεύματα στη σύνδεση *long shunt* δίνονται από τις σχέσεις

$$I_a = I - I_e \quad (4.13)$$

$$V = E_a + I_a(R_a + R_{es}) \quad (4.14)$$

$$I_e = \frac{V}{R_{tep}} \quad (4.15)$$

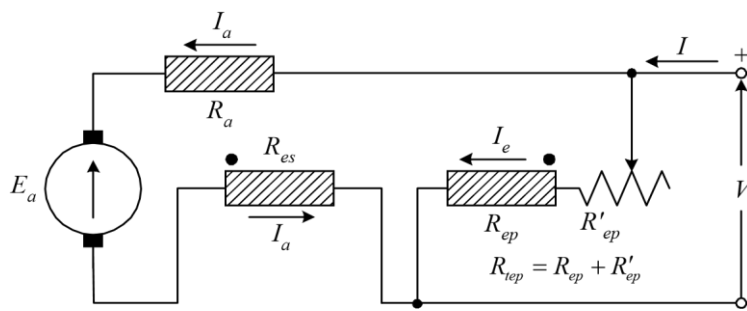
Στη σύνδεση *short shunt*, ισχύουν οι σχέσεις

$$I_a = I - I_e \quad (4.16)$$

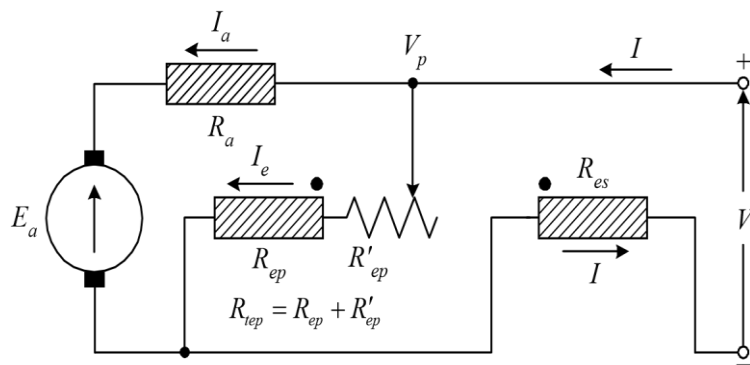
$$V_p = E_a + I_a R_a \quad (4.17)$$

$$V = V_p + I R_{es} \quad (4.18)$$

$$I_e = \frac{V_p}{R_{tep}} \quad (4.19)$$



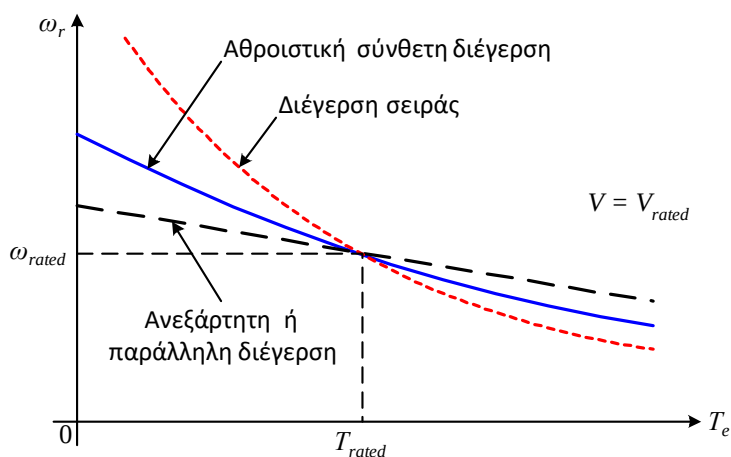
(α)



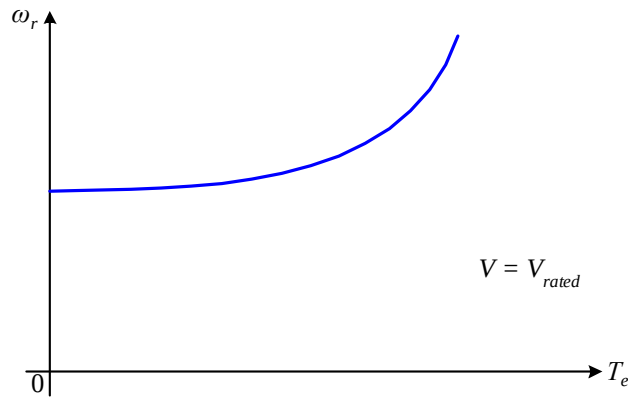
(β)

Σχ. 4.10 Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα αθροιστικής σύνθετης διέγερσης σε σύνδεση *long shunt* (α) και σε σύνδεση *short shunt* (β)

Η χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής του κινητήρα με αθροιστική σύνθετη διέγερση εικονίζεται στο Σχ. 4.11. Στο ίδιο σχήμα έχουν σχεδιαστεί για σύγκριση, οι φυσικές χαρακτηριστικές ταχύτητας–ροπής των κινητήρων με ανεξάρτητη ή παράλληλη διέγερση και διέγερσης σειράς. Όλοι οι κινητήρες έχουν την ίδια ονομαστική ταχύτητα και ισχύ (ροπή). **Σε μικρές ροπές φορτίου, η επίδραση του τυλίγματος σειράς είναι ασθενής. Έτσι, ο κινητήρας παρουσιάζει τη συμπεριφορά ενός κινητήρα με παράλληλη διέγερση.** Η ταχύτητα του κινητήρα στο κενό έχει μια σαφώς καθορισμένη τιμή, όπως οι κινητήρες παράλληλης και ανεξάρτητης διέγερσης. Σε μεγάλες ροπές του φορτίου, η επίδραση του τυλίγματος σειράς είναι έντονη, εξαιτίας του υψηλού ρεύματος δρομέα. Επομένως, ο κινητήρας αθροιστικής σύνθετης διέγερσης τείνει να συμπεριφέρεται ως κινητήρας με διέγερση σειράς, εμφανίζοντας μεγάλη ροπή εκκίνησης.



Σχ. 4.11 Φυσική χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής του κινητήρα αθροιστικής σύνθετης διέγερσης, σε συνδυασμό με τις χαρακτηριστικές των κινητήρων παράλληλης διέγερσης και διέγερσης σειράς



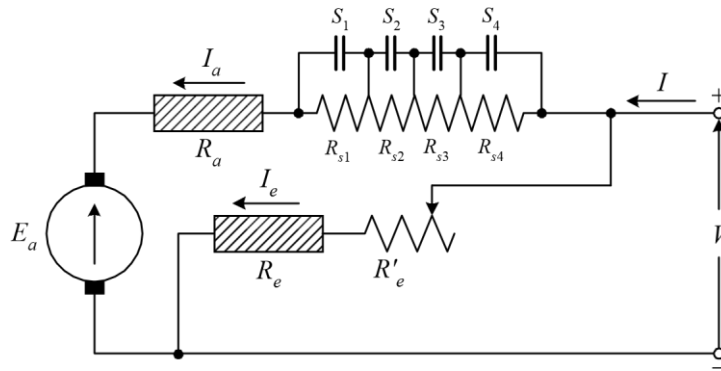
Σχ. 4.12 Χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής του κινητήρα διαφορικής σύνθετης διέγερσης

Οι κινητήρες στο Σχ. 4.10 μετατρέπονται σε κινητήρες διαφορικής σύνθετης διέγερσης, αλλάζοντας τη φορά σύνδεσης του τυλίγματος σειράς (θέση της τελείας). Στους κινητήρες με διαφορική σύνθετη διέγερση, η μαγνητική ροή μειώνεται με την αύξηση της ροπής φορτίου. Έτσι, η ταχύτητα του κινητήρα αυξάνεται με την αύξηση της ροπής, όπως εικονίζεται στο Σχ. 4.12, με αποτέλεσμα την ασταθή λειτουργία της μηχανής. Επομένως, **οι κινητήρες με διαφορική σύνθετη διέγερση δεν έχουν πρακτικές εφαρμογές.**

4.6 ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Κατά την εκκίνηση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος με την ονομαστική τάση, το ρεύμα του οπλισμού αποκτά πολύ μεγάλες τιμές. Τη στιγμή της εκκίνησης, η ΑΗΕΔ του κινητήρα είναι μηδενική. Έτσι, το αρχικό ρεύμα εκκίνησης είναι ίσο με V/R_a . Η ωμική αντίσταση του οπλισμού είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα το ρεύμα εκκίνησης των τυπικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος να είναι περίπου 20 φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό. Το μεγάλο ρεύμα εκκίνησης οφείλεται στο ότι η ΑΗΕΔ είναι μηδενική, επειδή ο κινητήρας δεν στρέφεται, $\omega_r = 0$. Καθώς η ταχύτητα του κινητήρα αυξάνεται, η ΑΗΕΔ ενισχύεται και περιορίζει το ρεύμα του οπλισμού.

Αν και η χρονική διάρκεια του ρεύματος εκκίνησης είναι μικρή, η εξαιρετικά μεγάλη τιμή του μπορεί να προκαλέσει βλάβη στη μηχανή. Για τον περιορισμό του ρεύματος εκκίνησης, τοποθετείται σε σειρά με το τύλιγμα του οπλισμού μια αντίσταση εκκίνησης. Η αντίσταση εκκίνησης βραχυκυκλώνεται με διακόπτες, όταν η ταχύτητα του κινητήρα αποκτήσει μια επαρκώς μεγάλη τιμή. Στο Σχ. 4.13 εικονίζεται η διάταξη εκκίνησης ενός κινητήρα παράλληλης διέγερσης.



Σχ. 4.13 Διάταξη εκκίνησης του κινητήρα με παράλληλη διέγερση

Η αντίσταση εκκίνησης αποτελείται από τέσσερα στάδια, με τις κατάλληλες τιμές, τα οποία βραχυκυκλώνονται σταδιακά από τους διακόπτες S_1, S_2, S_3, S_4 . Ένα κύκλωμα ελέγχου ενεργοποιεί αυτόματα τους διακόπτες την κατάλληλη χρονική στιγμή, για τη βέλτιστη εκκίνηση του κινητήρα. **Η εκκίνηση του κινητήρα είναι τόσο πιο ομαλή, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των βημάτων της αντίστασης εκκίνησης.**

4.7 ΠΕΔΗΣΗ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Πέδηση ονομάζεται η διαδικασία επιβράδυνσης, μείωσης της ταχύτητας, ενός ηλεκτρικού κινητήρα. Κατά τη διάρκεια της πέδησης, ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια. Δηλαδή, ο κινητήρας μετατρέπει κατά το διάστημα της πέδησης τη μηχανική ενέργεια από το φορτίο, σε ηλεκτρική.

Η μηχανική ενέργεια παρέχεται, στην περίπτωση του *παθητικού φορτίου*, από την κινητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην αδράνεια του συστήματος κινητήρας–φορτίο, είτε απευθείας από το *ενεργό φορτίο*.

Για την πέδηση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος, το ρεύμα του οπλισμού πρέπει να αντιστραφεί, ενώ η φορά της κύριας μαγνητικής ροής διατηρείται σταθερή.

Τότε, η φορά της αναπτυσσόμενης ροπής αντιστρέφεται $T_e = -C_T \Phi I_a$ και η ισχύς γίνεται αρνητική $P = -T_e \omega_r$. Η αρνητική ισχύς σημαίνει ότι, η μηχανή μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, δηλαδή λειτουργεί ως γεννήτρια.

Διακρίνουμε τρεις μεθόδους πέδησης των ηλεκτρικών κινητήρων όλων των κατηγοριών,

ανάλογα με τον τρόπο διάθεσης της ισχύος που ανακτάται από τη μηχανή (*regenerated power*):

- **Πέδηση με ανάκτηση της ισχύος (*regenerative braking*)**
- **Δυναμική πέδηση (*dynamic braking*)**
- **Πέδηση με αναστροφή της τάσης (*plugging*)**

4.7.1 Πέδηση με ανάκτηση ισχύος (regenerative braking) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται κυρίως σε ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα για να ανακτήσει μέρος της ενέργειας που συνήθως χάνεται κατά το φρενάρισμα.

Πώς λειτουργεί

- Όταν ο οδηγός πατάει το φρένο, ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί αντίστροφα ως **γεννήτρια**.
- Αντί το όχημα να επιβραδύνει μόνο με μηχανικά φρένα, ο κινητήρας “αντιστέκεται” στην κίνηση και μετατρέπει την **κινητική ενέργεια** του οχήματος σε **ηλεκτρική ενέργεια**.
- Η ενέργεια αυτή **αποθηκεύεται στην μπαταρία**.

Πλεονεκτήματα

- **Μεγαλύτερη αυτονομία:** Επαναφόρτιση μπαταρίας κατά την οδήγηση.
- **Μειωμένη φθορά φρένων:** Χρησιμοποιούνται λιγότερο τα συμβατικά φρένα.
- **Βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση.**

Πού χρησιμοποιείται

- Ηλεκτρικά αυτοκίνητα (EV).
- Υβριδικά οχήματα (HEV, PHEV).
- Τραμ, τρένα, ηλεκτρικά ποδήλατα.

4.7.2 Δυναμική πέδηση (dynamic braking) είναι μια μέθοδος ηλεκτρικής πέδησης που χρησιμοποιείται σε ηλεκτροκινητήρες κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές, τρένα, ανελκυστήρες και ηλεκτρικά οχήματα για να επιβραδύνει την κίνηση του συστήματος μετατρέποντας την κινητική ενέργεια σε **θερμότητα** αντί για ηλεκτρική ενέργεια.

Πώς λειτουργεί

Όταν θέλουμε να επιβραδύνουμε έναν ηλεκτροκινητήρα:

1. **Αποσυνδέεται από την πηγή τροφοδοσίας.**
2. **Συνδέεται σε μια αντίσταση πέδησης.**
3. Καθώς ο κινητήρας συνεχίζει να περιστρέφεται λόγω της αδράνειας, δρα σαν **γεννήτρια**.
4. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια **διοχετεύεται σε αντίσταση**, όπου μετατρέπεται σε **θερμότητα**.
5. Η παραγωγή θερμότητας ασκεί ηλεκτρομαγνητική πέδηση και επιβραδύνει τον κινητήρα.

Πλεονεκτήματα δυναμικής πέδησης

- **Απλή και αξιόπιστη.**
- Δεν απαιτεί σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.
- **Κατάλληλη για πολύ υψηλά φορτία και βαριά συστήματα.**

Μειονεκτήματα δυναμικής πέδησης

- Η ενέργεια χάνεται ως θερμότητα.
- Απαιτεί μεγάλες και καλά ψυχόμενες αντιστάσεις για ασφάλεια.

4.7.3 Πέδηση με αναστροφή της τάσης (plugging braking) είναι μια μέθοδος ηλεκτρικής πέδησης στην οποία η τάση τροφοδοσίας του ηλεκτροκινητήρα **αντιστρέφεται στιγμιαία**, προκαλώντας μια ισχυρή αντίθετη ροπή που επιβραδύνει ή σταματά τον κινητήρα πολύ γρήγορα.

Πώς λειτουργεί

1. Ο κινητήρας τροφοδοτείται κανονικά και περιστρέφει τον άξονα.
2. Κατά την πέδηση, η τάση στις φάσεις (DC ή AC) **αντιστρέφεται ηλεκτρικά**.
3. Ο κινητήρας "νομίζει" ότι πρέπει να περιστραφεί **ανάποδα**, ενώ στην πραγματικότητα κινείται ακόμα προς την αρχική κατεύθυνση.
4. Αυτή η αντίθεση δημιουργεί **μεγάλη ροπή πέδησης**.
5. Επειδή ο κινητήρας συνεχίζει να λειτουργεί ως φορτίο, ένα μέρος της ενέργειας πρέπει να **απορροφάται από αντίσταση πέδησης**, για να αποφευχθεί υπερθέρμανση.

Πλεονεκτήματα

- Πολύ γρήγορη επιβράδυνση.
- Ισχυρή ροπή πέδησης σε χαμηλές ταχύτητες.
- Αποτελεσματικό σε εφαρμογές όπου η ασφάλεια και ο άμεσος έλεγχος είναι κρίσιμα.

Μειονεκτήματα

- Μεγάλη κατανάλωση ενέργειας.
- Αυξημένη **φθορά κινητήρα** και ισχύος.
- Υψηλές θερμοκρασίες – απαιτείται συχνά εξωτερική αντίσταση.
- Όχι κατάλληλο για συχνές χρήσεις ή για συστήματα όπου η απόδοση είναι σημαντική.

Πού χρησιμοποιείται

- Βιομηχανικές μηχανές (πρέσες, εργαλειομηχανές)
- Γερανογέφυρες και ανυψωτικά
- Συστήματα μεταφορών με αυστηρές απαιτήσεις πέδησης
- Παλαιότερα AC/DC ηλεκτρικά οχήματα

4.8 ΡΟΠΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Οι δυνατότητες των ηλεκτρικών κινητήρων περιγράφονται από τη χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής. Η χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής που λαμβάνεται όταν ο κινητήρας τροφοδοτείται με τα ονομαστικά του ηλεκτρικά μεγέθη, ονομάζεται *φυσική (natural)*. **Η επιλογή κάποιου είδους κινητήρα, συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος που θα εξετάσουμε στη συνέχεια, εξαρτάται από το αν η χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής του κινητήρα, ταιριάζει με τη χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής του φορτίου.** Επομένως, η χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής του φορτίου πρέπει να είναι γνωστή, για την επιλογή του κατάλληλου κινητήρα οδήγησης του φορτίου. Ένας κινητήρας είναι **συμβατός με το φορτίο**, αν ικανοποιεί τις απαιτήσεις ταχύτητας και ροπής του φορτίου, χωρίς να υπερβαίνει τους περιορισμούς ρεύματος που επιβάλλονται είτε από τον ίδιο τον κινητήρα, ή από την πηγή τροφοδοσίας του.

Συχνά, η φυσική χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής οποιοδήποτε κινητήρα, δεν είναι συμβατή με τις απαιτήσεις του φορτίου. Τότε, ένας *μετατροπέας ισχύος (power semiconductor converter)*, παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής τροφοδοσίας και του κινητήρα. Ο μετατροπέας ελέγχει τη ροή της ισχύος από την πηγή προς τον κινητήρα με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε η χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής του κινητήρα να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις του φορτίου. Επιπλέον, με το μετατροπέα ισχύος επιτυγχάνεται ο έλεγχος των μεταβατικών ρευμάτων στην πηγή (δίκτυο), έτσι ώστε να πληρούνται οι κανονισμοί που επιβάλλουν τη χρήση του.

4.8.1 Δυναμική Ροπή

Η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας T_e και ροπή του φορτίου T_L , συνδέονται με τη σχέση

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (4.22)$$

όπου, J είναι η αδράνεια του συστήματος κινητήρας–φορτίο σε $\text{kg}\cdot\text{m}^2$. Ο δεύτερος όρος $J \frac{d\omega_r}{dt}$ στην Εξ. (4.22) ονομάζεται *δυναμική ροπή (dynamic torque)*, επειδή υφίσταται μόνο κατά τη διάρκεια των μεταβατικών χρονικών διαστημάτων. Η δυναμική ροπή είναι μηδέν στην κατάσταση ισορροπίας. **Στην κατάσταση ισορροπίας, η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας είναι ίση με τη ροπή του φορτίου.**

Όταν η ροπή του κινητήρα είναι μεγαλύτερη από τη ροπή του φορτίου, ο κινητήρας επιταχύνει. Κατά την επιτάχυνση, ο κινητήρας πρέπει να παρέχει εκτός από τη ροπή φορτίου T_L και τη δυναμική ροπή, για να υπερνικήσει την αδράνεια των στρεφόμενων μαζών. Έτσι, σε εφαρμογές όπου η αδράνεια είναι μεγάλη και απαιτούνται μικροί χρόνοι απόκρισης, ο κινητήρας πρέπει να παρέχει μια ροπή πολύ μεγαλύτερη από τη στατική ροπή του φορτίου.

Ο κινητήρας επιβραδύνεται όταν η ροπή που παράγει είναι μικρότερη από τη ροπή του φορτίου. Κατά την επιβράδυνση (πέδηση), η δυναμική ροπή αλλάζει πρόσημο. Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια που είναι

αποθηκευμένη στις στρεφόμενες μάζες του συστήματος ανακτάται και μετατρέπεται σε ηλεκτρική (λειτουργία γεννήτριας). Αν η ροπή του κινητήρα T_e απλά μηδενιστεί κατά την πέδηση, με την αποσύνδεση του κινητήρα από την πηγή τροφοδοσίας, ο ρυθμός της επιβράδυνσης εξαρτάται μόνο από την αδράνεια και τη ροπή T_L . Όταν η αδράνεια είναι μεγάλη, είτε η ροπή φορτίου μικρή, ο χρόνος πέδησης είναι υψηλός. Για τη μείωση του χρόνου πέδησης, ο κινητήρας τροφοδοτείται από το μετατροπέα ισχύος με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να αναπτύξει αρνητική ροπή, οπότε λειτουργεί ως γεννήτρια. Δηλαδή, χρησιμοποιούνται ηλεκτρικά μέσα για την πέδηση του κινητήρα. Η **ηλεκτρική πέδηση** εξασφαλίζει ταχεία και με υψηλή ακρίβεια επιβράδυνση των κινητήρων.

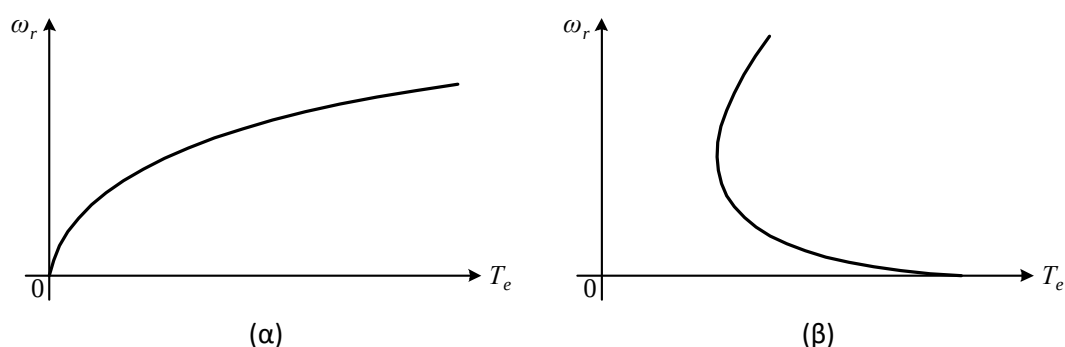
4.8.2 Χαρακτηριστικές Ταχύτητας–Ροπής από Συνήθη Φορτία

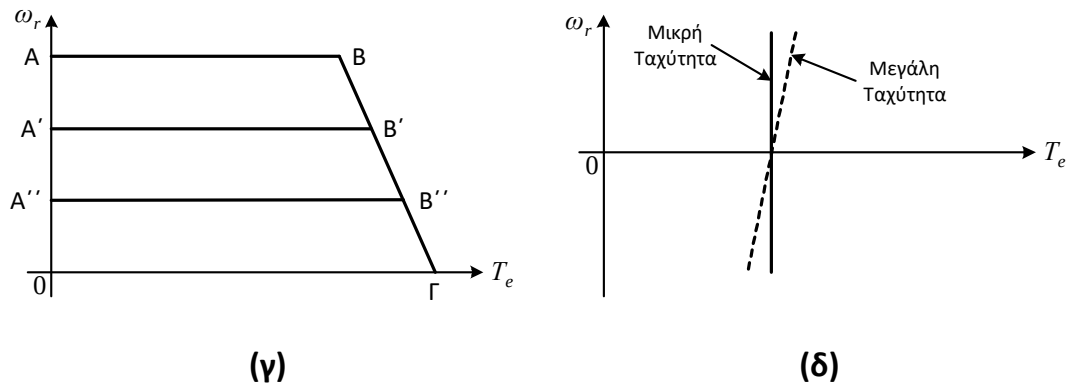
Οι χαρακτηριστικές ταχύτητας–ροπής κάποιων φορτίων που χρησιμοποιούνται συχνά σε πρακτικές εφαρμογές, εικονίζονται στο Σχ. 4.21. Η ροπή του φορτίου μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας στις **αντλίες (centrifugal pumps)** και τους **ανεμιστήρες (blowers, fans)**, όπως δείχνει το Σχ. 4.21α.

Στα **συστήματα έλξης**, όπως τα ηλεκτρικά τρένα και τα αυτοκίνητα, η μεταβολή της ροπής με την ταχύτητα παρουσιάζεται στο Σχ. 4.21β. Στη χαρακτηριστική αυτή δεν έχει συμπεριληφθεί η ροπή που οφείλεται στη βαρύτητα.

Στους εκσκαφείς, οι χαρακτηριστικές ταχύτητας–ροπής έχουν τη μορφή του Σχ. 4.21γ. Όταν ο εκσκαφέας συναντήσει κάποιο εμπόδιο, η ταχύτητα του κινητήρα πρέπει να μηδενιστεί και η ροπή, όπως και το ρεύμα να περιοριστούν σε κάποια ασφαλή τιμή (τμήμα ΒΓ της χαρακτηριστικής). Τα τμήματα ΑΒ, Α'Β' και Α''Β'' σχετίζονται με τη σκληρότητα του εδάφους.

Στα ανυψωτικά συστήματα, όπως οι γερανοί, η ροπή του φορτίου εξαρτάται κυρίως από τη βαρύτητα και είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας. Στα ανυψωτικά υψηλής ταχύτητας, εξαιτίας των τριβών και του αερισμού, η ροπή αποκτά μια μικρή εξάρτηση από την ταχύτητα.





Σχ. 4.21 Χαρακτηριστικές ταχύτητας–ροπής μερικών τυπικών φορτίων.

(α)Αντλιών - ανεμιστήρων, (β) συστημάτων έλξης,(γ) εκσκαφών, (δ)ανυψωτικών

4.8.3 Κατηγορίες Φορτίων

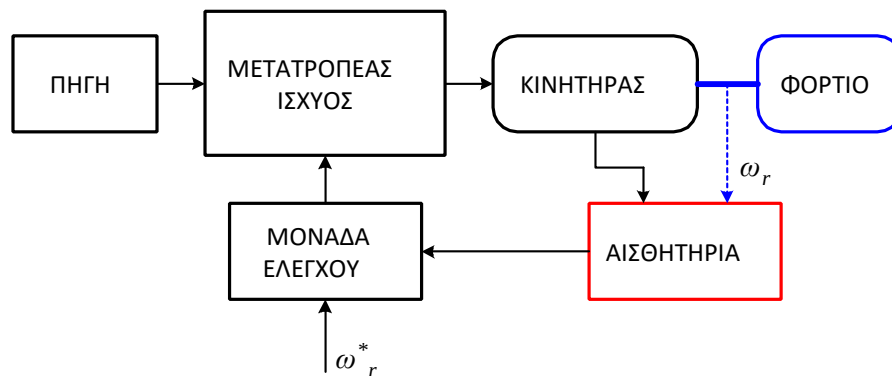
Τα φορτία διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα *παθητικά φορτία* και τα *ενεργά φορτία*. Ως παθητικά φορτία χαρακτηρίζουμε εκείνα, που πάντοτε αντιτίθενται στην κίνηση της μηχανής. Η ροπή των παθητικών φορτίων αλλάζει πρόσημο, με την αντιστροφή της φοράς του κινητήρα.

Αντίθετα, τα ενεργά φορτία έχουν τη δυνατότητα να οδηγήσουν τον κινητήρα, κατά τη φορά της κίνησής του. Η ροπή των ενεργών φορτίων δεν αλλάζει πρόσημο, με την αλλαγή της φοράς περιστροφής. Η ροπή που προκαλείται από τη βαρύτητα είναι μια ενεργός ροπή. Έτσι, όταν ένα ηλεκτρικό όχημα κινείται σε μια ανηφόρα, η ενεργός ροπή από τη βαρύτητα αντιτίθενται στην κίνηση. Επομένως, ο κινητήρας του οχήματος πρέπει να αναπτύξει επιπλέον ροπή, για να υπερνικήσει τη ροπή της βαρύτητας. Όταν το ίδιο όχημα κινείται σε μια κατωφέρεια με έντονη κλίση, η ροπή της βαρύτητας είναι αυτή που το κινεί. Ο κινητήρας πρέπει τώρα να αναπτύξει ροπή πέδησης, για τον έλεγχο της ταχύτητας στην επιθυμητή τιμή. Το ίδιο ισχύει και σε ένα γερανό, ο οποίος κατεβάζει κάποιο φορτίο.

4.9 ΚΙΝΗΤΗΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Όταν η φυσική χαρακτηριστική του ηλεκτρικού κινητήρα δεν ταιριάζει με τη χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής του φορτίου, είναι αναγκαία η εισαγωγή μεταξύ του κινητήρα και της πηγής τροφοδοσίας ενός μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας ισχύος ελέγχει τη ροή της ενέργειας από την πηγή, με σταθερή συνεχή ή εναλλασσόμενη τάση, στον κινητήρα. Έτσι, σχηματίζεται ένα *κινητήριο σύστημα (motor drive)*, το λειτουργικό διάγραμμα του οποίου εικονίζεται στο Σχ. 4.22. Ο μετατροπέας ισχύος αποτελείται από ημιαγωγούς διακόπτες ισχύος (*MOSFET, IGBT, SCR*), με συνέπεια να

παρουσιάζει πολύ μεγάλο βαθμό απόδοσης. Με το κινητήριο σύστημα επιτυγχάνεται η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, στην επιθυμητή τιμή αναφοράς ω_r^* . Όταν απαιτείται η ρύθμιση της ταχύτητας με μεγάλη ακρίβεια, χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας μέτρησης της ταχύτητας, ή οποία σ' ένα σύστημα κλειστού βρόχου αναγκάζεται να ακολουθεί την τιμή αναφοράς ω_r^* .



Σχ. 4.22 Γενικό λειτουργικό διάγραμμα των κινητήριων συστημάτων

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (DC)

Βιομηχανία & Αυτοματισμοί

- Ρομποτικοί βραχίονες
- CNC μηχανήματα μικρού μεγέθους
- Γραμμές παραγωγής με συστήματα μεταφοράς (conveyors)
- Ανυψωτικά συστήματα (μικρά ανυψωτικά, γερανάκια)

Οχήματα & Μεταφορές

- Ηλεκτρικά ποδήλατα & ηλεκτρικά πατίνια (e-bikes, e-scooters)
- Μικρά ηλεκτρικά οχήματα (gokarts, AGVs)
- Υαλοκαθαριστήρες
- Ανεμιστήρες καλοριφέρ/air-condition σε αυτοκίνητα
- Σύστημα ηλεκτρικών παραθύρων και κεντρικού κλειδώματος

Οικιακές Συσκευές

- Ηλεκτρικές ξυριστικές μηχανές
- Μίξερ, μπλέντερ
- Σκούπες ρομπότ (robot vacuums)
- Μικρά ανεμιστηράκια (USB fans)

Παιχνίδια & Χόμπι

- Τηλεκατευθυνόμενα αυτοκίνητα, drones
- DIY/Arduino projects
- Ρομποτικά kits STEM

Άλλες Εφαρμογές

- Αντλίες νερού μικρού μεγέθους
- Εκτυπωτές (κινήσεις κεφαλής & ρολό χαρτιού)
- Συστήματα αυτόματου ανοίγματος πορτών
- Ιατρικές συσκευές μικρού μεγέθους (π.χ. αντλίες)

Ταξινόμηση των εφαρμογών ανάλογα με τον τύπο κινητήρα DC

1. Brushed DC Motors (Κινητήρες DC με ψήκτρες)

Χαρακτηριστικά: απλοί, φθηνοί, εύκολοι στον έλεγχο, χαμηλή έως μεσαία απόδοση

Εφαρμογές:

- Παιχνίδια (τηλεκατευθυνόμενα αυτοκίνητα, μικρά drones)
- Ηλεκτρικά κατσαβίδια & εργαλεία χειρός
- Μικρές αντλίες νερού ή αέρα
- Μικροί ανεμιστήρες (USB fans)
- Σκούπες ρομπότ (οδήγηση τροχών)
- Ηλεκτρικές οδοντόβουρτσες
- Αυτόματοι διανομείς/μηχανισμοί (π.χ. αυτόματες κουρτίνες)

2. Brushless DC Motors – BLDC (Κινητήρες χωρίς ψήκτρες)

Χαρακτηριστικά: υψηλή απόδοση, μεγάλη διάρκεια ζωής, ήσυχη λειτουργία, απαιτούν ηλεκτρονικό έλεγχο (ESC)

Εφαρμογές:

- Drones και quadcopters
- Ηλεκτρικά πατίνια & ηλεκτρικά ποδήλατα
- Ηλεκτρικά αυτοκίνητα (κινητήρες traction)
- Υπολογιστές: ανεμιστήρες CPU/GPU
- Σκληροί δίσκοι (HDD spindle motor)
- Οικιακές συσκευές υψηλής απόδοσης (π.χ. Dyson σκούπες)
- Ρομποτικοί βραχίονες (αρθρώσεις υψηλής ακρίβειας)
- Αντλίες inverter (π.χ. κυκλοφορητές θέρμανσης)

3. Servo Motors (DC Servo)

Χαρακτηριστικά: υψηλή ακρίβεια θέσης, ενσωματωμένος έλεγχος με feedback (potentiometer/encoder)

Εφαρμογές:

- Ρομποτικοί βραχίονες (αρθρώσεις μικρής-μεσαίας ισχύος)
- Τηλεκατευθυνόμενα μοντέλα (rudder, throttle, steering)
- CNC εργαλειομηχανές μικρού μεγέθους
- Κάμερες: pan-tilt μηχανισμοί
- Αυτόματα κιβώτια (actuators θέσης)
- Πλατφόρμες σταθεροποίησης (gimbals)

4. Stepper Motors (Βηματικοί κινητήρες – ηλεκτρικά αποτελούν ειδικό

τύπο DC)

Χαρακτηριστικά: πολύ υψηλή ακρίβεια βήματος, ιδανικοί για θέσεις χωρίς ανάγκη μεγάλης ταχύτητας

Εφαρμογές:

- 3D printers (X, Y, Z, extruder)
- CNC routers (μικρά φρέζακια)
- Εκτυπωτές (μετακίνηση κεφαλής και χαρτιού)
- Ιατρικοί δοσομετρητές / αντλίες
- Αυτόματα μηχανήματα vending
- Συστήματα ελέγχου βαλβίδων και μηχανισμών
- Ρομποτική ακριβείας

5. Άλλες Ειδικές Κατηγορίες DC Motors

Coreless Motors

- Drones racing
- Precision robotics
- Μηχανισμοί κάμερας

Geared DC Motors (με κιβώτιο)

- Αυτόματες πόρτες
- Ρομποτικά οχήματα
- Χειριστήρια θέσης (actuators)

Σύγκριση Τύπων Κινητήρων DC

Τύπος Κινητήρα	Ταχύτητα	Ροπή	Ακρίβεια	Απόδοση	Κόστος	Συντήρηση	Κύριες Εφαρμογές
Brushed DC	Μεσαία–Υψηλή	Μεσαία	Χαμηλή	Μέτρια	Πολύ χαμηλό	Υψηλή (λόγω ψηκτρών)	Παιχνίδια, μικρές συσκευές, ανεμιστήρες
Brushless DC (BLDC)	Υψηλή	Μέτρια–Υψηλή	Μέτρια	Πολύ υψηλή	Μεσαίο–Υψηλό	Πολύ χαμηλή	Drones, e-bikes, ηλεκτρικά οχήματα
Servo Motor (DC Servo)	Μεσαία	Μεσαία	Πολύ υψηλή (με feedback)	Υψηλή	Μεσαίο	Χαμηλή	Ρομποτικοί βραχίονες, RC μοντέλα, CNC
Stepper Motor	Χαμηλή–Μεσαία	Υψηλή σε χαμηλές στροφές	Εξαιρετική (βήμα-βήμα)	Χαμηλή–Μέτρια	Χαμηλό–Μεσαίο	Χαμηλή	CNC, 3D printers, εκτυπωτές
Coreless DC	Πολύ υψηλή	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλό	Μέτρια	Micro drones, precision robotics

Ποιον κινητήρα χρησιμοποιούμε ανά περίπτωση;

- Για ροπή σε χαμηλές στροφές → Stepper motor
- Για ταχύτητα & υψηλή απόδοση → BLDC motor
- Για ακρίβεια θέσης → Servo ή Stepper motor
- Για χαμηλό κόστος → Brushed DC motor
- Για compact και ελαφριές εφαρμογές → Coreless DC motor

4.10 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Παράδειγμα 4.1 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με παράλληλη διέγερση έχει τάση τροφοδοσίας 220V και στρέφεται με ταχύτητα 1400rpm, όταν το ρεύμα του δρομέα είναι 25A. Η αντίσταση του δρομέα είναι 0.3Ω. Να βρεθούν:

α) Η ΑΗΕΔ του κινητήρα.

β) Η ταχύτητα του κινητήρα όταν το ρεύμα του δρομέα αυξηθεί στα 50A και η ροή κατά 10%.

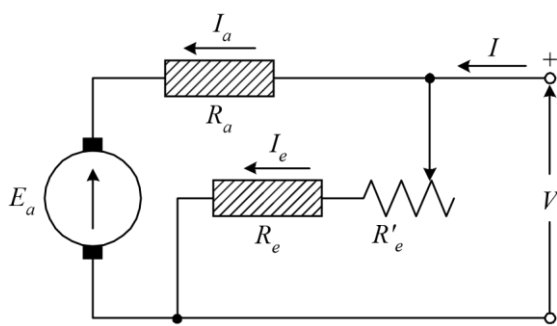
γ) Η ισχύς εξόδου στις δύο περιπτώσεις.

Λύση

Η ΑΗΕΔ του κινητήρα για ρεύμα δρομέα $I_{a1} = 25A$ είναι η E_{a1} και για ρεύμα $I_{a2} = 50A$ η E_{a2} , οι οποίες υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$V = E_{a1} + R I_{a1} \Rightarrow E_{a1} = 220 - 0.3 \cdot 25 = 212.5V$$

$$V = E_{a2} + R I_{a2} \Rightarrow E_{a2} = 220 - 0.3 \cdot 50 = 205V$$



Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα παράλληλης διέγερσης

Η ΑΗΕΔ συνδέεται με την ταχύτητα από τη σχέση $E_a = C_e \phi \omega_r$, η οποία για τις δύο περιπτώσεις γράφεται ως εξής

$$E_{a1} = C_e \phi_1 \omega_{r1} \Rightarrow 212.5 = C_e \phi_1 \frac{2\pi}{60} n_1$$

$$E_{a2} = C_e \phi_2 \omega_{r2} \Rightarrow 205 = C_e \phi_2 \frac{2\pi}{60} n_2$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις παραπάνω εξισώσεις έχουμε

$$\frac{212.5}{205} = \frac{n_1}{1.1n_2} \Rightarrow n_2 = \frac{205 \cdot 1400}{212.5 \cdot 1.1} = 1228 \text{ rpm}$$

Η ισχύς εξόδου για τα ρεύματα $I_{a1} = 25\text{A}$ και $I_{a2} = 50\text{A}$ είναι

$$P_{o1} = E_{a1} I_{a1} = 212.5 \cdot 25 = 5.3\text{kW}$$

$$P_{o2} = E_{a2} I_{a2} = 205 \cdot 50 = 10.25\text{kW}$$

Παράδειγμα 4.2 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς, έχει την παρακάτω καμπύλη μαγνήτισης, όταν στρέφεται με ταχύτητα 700rpm.

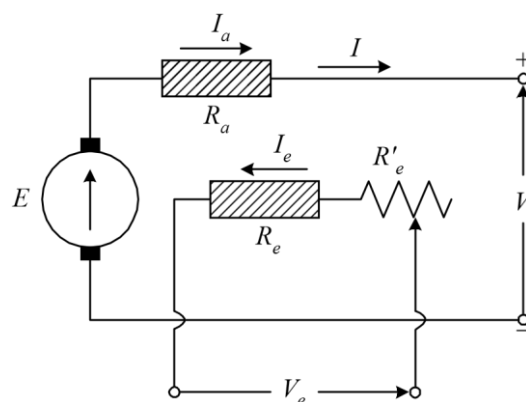
I_e [A]	20	40	60	80	100
E_{700} [V]	150	270	350	400	430

Πίνακας 1

Η αντίσταση του δρομέα είναι 0.45Ω και του τυλίγματος σειράς 0.35Ω .

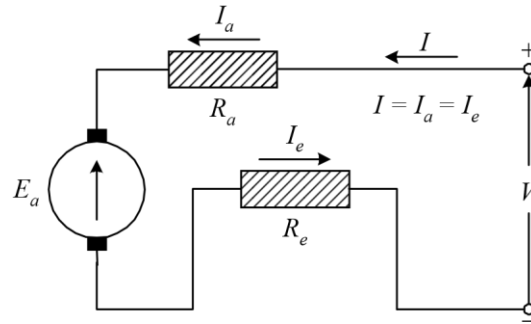
Όταν η τάση λειτουργίας του κινητήρα είναι 400V , σχεδιάστε τη χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής του κινητήρα, υπολογίζοντας πέντε σημεία της καμπύλης.

Η καμπύλη μαγνήτισης του κινητήρα έχει ληφθεί λειτουργώντας τη μηχανή ως γεννήτρια με ανεξάρτητη διέγερση. Η μηχανή στρέφεται με 700rpm και το ρεύμα διέγερσης λαμβάνει διαδοχικά τις τιμές του πίνακα 1. Η ΗΕΔ είναι ίση με την τάση στα άκρα της μηχανής. Στα παρακάτω σχήματα εικονίζονται το ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής για τη μέτρηση της καμπύλης μαγνήτισης και το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα σειράς.



Ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής για τη λήψη της καμπύλης μαγνήτισης.

Ο κινητήρας σειράς συνδέεται ως γεννήτρια με ανεξάρτητη διέγερση και στρέφεται με 700rpm



Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα σειράς

Λύση

Για την εύρεση της χαρακτηριστικής ταχύτητας-ροπής, αρχικά υπολογίζουμε την ΑΗΕΔ του κινητήρα, ανάλογα με το ρεύμα τροφοδοσίας, το οποίο είναι ίσο με το ρεύμα διέγερσης. Η ΑΗΕΔ ορίζεται από τη σχέση

$$E_a = V - I(R_a + R_e) = 400 - I \cdot (0.45 + 0.35) = 400 - I_e \cdot 0.8$$

Η ΑΗΕΔ του κινητήρα ορίζεται από τη γενική σχέση

$$E_a = C_e \phi \omega_r = C_e \frac{2\pi}{60} \phi n$$

Η ταχύτητα του κινητήρα υπολογίζεται από το λόγο της ΗΕΔ από την καμπύλη μαγνήτισης, προς την πραγματική ΑΗΕΔ του κινητήρα

$$\frac{E_{700}}{E_a} = \frac{700}{n} \Rightarrow n = \frac{700 E_a}{E_{700}}$$

Η ροπή και η ισχύς εξόδου συνδέονται με τη σχέση $P_o = E I_a = T e \omega_r$. Έτσι, η ροπή του κινητήρα είναι ίση με

$$T_e = \frac{60 E_a I_e}{2\pi n}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις συμπληρώνουμε τον πίνακα

I_e [A]	20	40	60	80	100
E_{700} [V]	150	270	350	400	430
$E_a = 400 - 0.8I_e$ [V]	384	368	352	336	320
$n = 700E_a / E_{700}$ [rpm]	1792	954	704	588	521
$T_e = 60E_a I_e / (2\pi n)$ [Nm]	40.9	147.3	286.5	436.5	586.5

Η χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής $n = f(T_e)$, σχεδιάζεται από τα ζεύγη τιμών στις δύο τελευταίες σειρές του πίνακα.

<https://www.youtube.com/watch?v=LAtPHANefQo>

dc motors

<https://www.youtube.com/watch?v=eyqwLiowZiU&t=27s>

stepper motors

<https://www.youtube.com/watch?v=0PDRJKz-mqE&t=4s>

universal motor

ΜΕΡΟΣ Β: ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Ερωτήσεις :

- 1) Ποιες είναι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ταχύτητας ενός κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση;
- 2) Σε ένα κινητήρα με διέγερση σειράς ποια είναι η μόνη βολική μέθοδος ελέγχου της ταχύτητάς του;
- 3) Σε ποιες εφαρμογές χρησιμοποιούνται οι κινητήρες με διέγερση σειράς ;
- 4) Κατά την εκκίνηση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος ποια είναι η λύση που επιλέγεται για τον περιορισμό του μεγάλου ρεύματος εκκίνησης που μπορεί να προκαλέσει βλάβη στη μηχανή;
- 5 Τι ονομάζουμε πέδηση ενός ηλεκτρικού κινητήρα και σε τι μετατρέπεται ο ηλεκτρικός κινητήρας κατά την διάρκεια της πέδησής του ;
- 6) Ποιες είναι οι τρεις μέθοδοι πέδησης των ηλεκτρικών κινητήρων όλων των κατηγοριών ανάλογα με τον τρόπο διάθεσης της ισχύος που ανακτάται από την μηχανή;

Ασκήσεις :

- 1) Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με παράλληλη διέγερση έχει τάση τροφοδοσίας 220V και στρέφεται με ταχύτητα 1500rpm, όταν το ρεύμα του δρομέα είναι 30A. Η αντίσταση του δρομέα είναι 0.5Ω. Να βρεθούν:
 - α) Η ΑΗΕΔ του κινητήρα.
 - β) Η ταχύτητα του κινητήρα όταν το ρεύμα του δρομέα αυξηθεί στα 60A και η ροή κατά 20%.
 - γ) Η ισχύς εξόδου στις δύο περιπτώσεις.