

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ  
ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ**

# **ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ**

**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

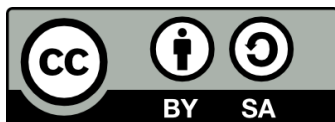
**κ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΘΕΜΕΛΗΣ**

**ΣΕΡΡΕΣ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015**



## Άδειες Χρήσης

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons. Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Το έργο αυτό αδειοδοτείται από την Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Παρόμοια Διανομή 4.0 Διεθνές Άδεια. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής, επισκεφτείτε <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.el>.

## Χρηματοδότηση

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.

Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.

Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



## ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

### 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, διαρρέετε από ρεύμα, αναπτύσσεται ροπή η οποία τείνει να στρέψει το δρομέα. Επομένως, η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια εισόδου σε μηχανική.

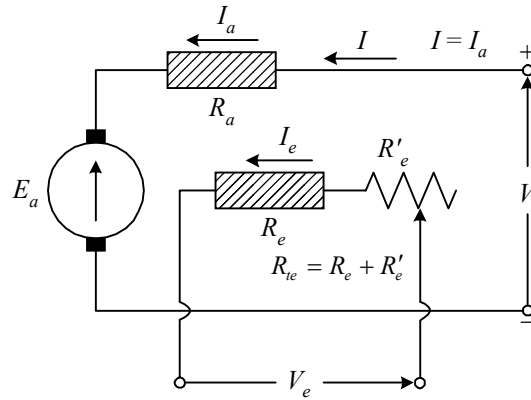
Παρόλο που οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος άρχισαν να εκτοπίζονται από τις γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος πριν από το 1900, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι ακόμη και σήμερα αρκετά διαδεδομένοι. Ο κύριος λόγος που καθιστά τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος δημοφιλείς, είναι η ευκολία στον έλεγχο 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.

Στη συνέχεια εξετάζουμε τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των μηχανών συνεχούς ρεύματος με ανεξάρτητη διέγερση και αυτοδιέγερση, όταν χρησιμοποιούνται ως κινητήρες.

### 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,

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

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

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

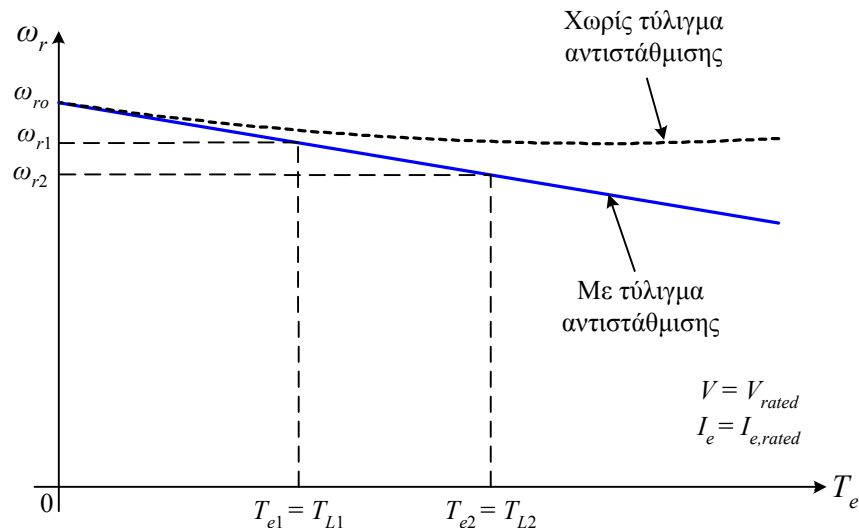
Οι σταθερές  $C_e$  και  $C_T$  στις Εξ. (4.1), (4.3) είναι ίσες,  $C_e = C_T$ . Από τις Εξ. (4.1), (4.2) προκύπτει μια έκφραση της ταχύτητας του κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση

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

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

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

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*).

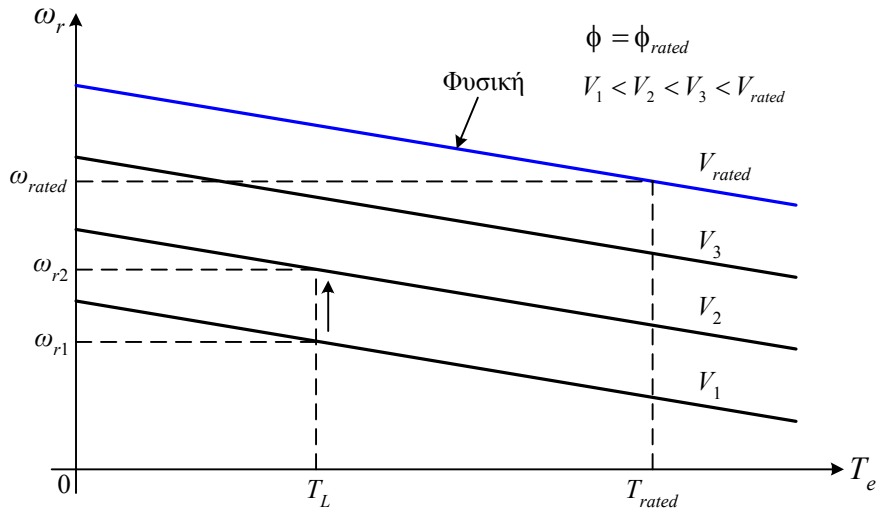
Η χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής του κινητήρα εξηγείται ως εξής: Θεωρούμε ότι ο κινητήρας στρέφεται με ταχύτητα  $\omega_{r1}$  και αναπτύσσει ροπή  $T_{e1}$ , η οποία είναι ίση με τη ροπή του φορτίου  $T_{L1}$  ( $T_{e1} = T_{L1}$ ). Αν η ροπή του φορτίου αυξηθεί στην τιμή  $T_{L2}$ , η ταχύτητα του 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  $\omega_{r2}$  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 τύλιγμα του οπλισμού (*armature voltage control*)  $V$ .
- Ρύθμιση της μαγνητικής ροής (*field control*)  $\phi$ .
- 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 τύλιγμα 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  $\omega_{r1}$  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

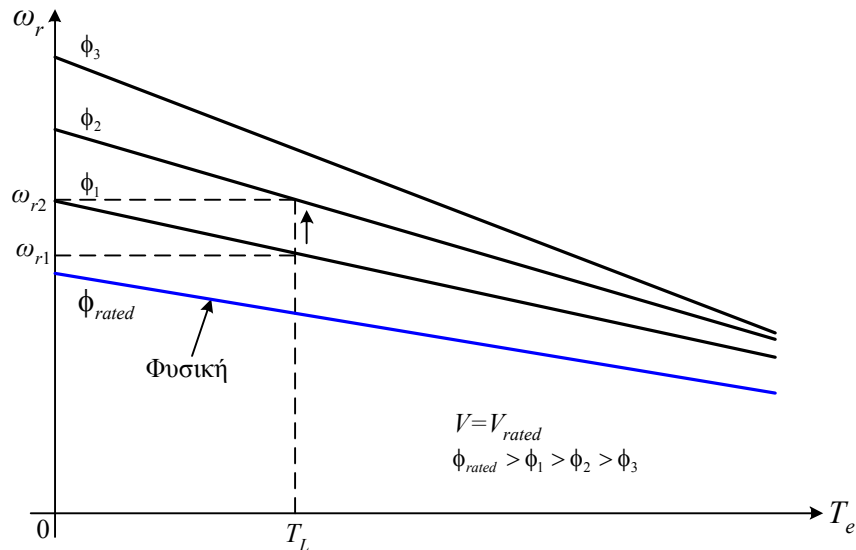
Εφόσον η ροπή  $T_{e2}$  είναι μεγαλύτερη της ροπής φορτίου, ο κινητήρας επιταχύνεται. Η αύξηση της ταχύτητας προκαλεί την αύξηση της ΑΗΕΔ από τη σχέση  $E_a = C_e \phi \omega_r$ , οπότε το ρεύμα του οπλισμού ελαττώνεται ξανά. Έτσι, η ροπή επανέρχεται στην αρχική της τιμή  $T_{e1} = T_L$ , σε μια ταχύτητα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

#### 4.2.2 Έλεγχος της Ταχύτητας με Ρύθμιση της Μαγνητικής Ροής

Η μαγνητική ροή του κινητήρα ελέγχεται με τη ρύθμιση του ρεύματος διέγερσης  $I_e$ , μέσω της τάσης  $V_e$  ή της αντίστασης  $R'_e$ . Θεωρούμε όπως και προηγούμενα, ότι ο κινητήρας στρέφεται αρχικά με ταχύτητα  $\omega_{r1}$  και αναπτύσσει ροπή  $T_{e1}$ , η οποία είναι ίση με τη ροπή του φορτίου  $T_L$  ( $T_{e1} = T_L$ ). Η μαγνητική ροή είναι ίση με  $\phi_1$ . Η τάση στο τύλιγμα του δρομέα είναι σταθερή και ίση με την ονομαστική. Μια μείωση στο ρεύμα διέγερσης και αντίστοιχα στη μαγνητική ροή, από την τιμή  $\phi_1$  στην τιμή  $\phi_2$ , προκαλεί την ελάττωση της ΑΗΕΔ  $E_a = C_e \phi \omega_r$ . Η μείωση της ΑΗΕΔ έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος οπλισμού  $I_a = (V - E_a) / R_a$ . Όταν η ταχύτητα του κινητήρα  $\omega_{r1}$  είναι κοντά στην ονομαστική, η ΑΗΕΔ έχει μεγάλη τιμή. Έτσι, ακόμη και μια ελάχιστη μείωση στη ροή και την ΑΗΕΔ, προκαλεί μια εξαιρετικά μεγάλη αύξηση του ρεύματος οπλισμού, καθώς η  $R_a$  είναι πολύ μικρή. Επειδή η αύξηση του  $I_a$  είναι πολύ μεγαλύτερη της μείωσης της ροής, η αναπτυσσόμενη ροπή αυξάνει  $T_e = C_T \phi I_a$ .



Σχ. 4.4 Έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση, με τη ρύθμιση της μαγνητικής ροής

Σημειώνουμε ότι, σε μικρές ταχύτητες η αύξηση του ρεύματος οπλισμού με τη μείωση της ροής περιορίζεται. Έτσι, σε εξαιρετικά μικρές ταχύτητες είναι δυνατό η μείωση της ροής να υπερσχύει της αύξησης του  $I_a$  και η ροπή να μειώνεται με τη μείωση ροής. Όμως, αυτή η συνθήκη λειτουργίας δεν έχει πρακτικό ενδιαφέρον.

Εξαιτίας της αύξησης της ροπής που προκαλεί η μείωση της ροής, ο κινητήρας επιταχύνει. Όμως, καθώς αυξάνει η ταχύτητα, μειώνεται η ΑΗΕΔ, το ρεύμα του δρομέα και η παραγόμενη ροπή. Τελικά ο κινητήρας ισορροπεί σε μια μεγαλύτερη ταχύτητα  $\omega_{r2}$  από την αρχική, στην οποία η ροπή του είναι και πάλι ίση με τη ροπή του φορτίου.

Οι χαρακτηριστικές ταχύτητας–ροής του κινητήρα, με τη ρύθμιση της μαγνητικής ροής, εικονίζονται στο Σχ. 4.4. Οι χαρακτηριστικές δεν έχουν την ίδια κλίση, όπως στην προηγούμενη μέθοδο. Όσο μειώνεται η ροή, τόσο μεγαλύτερη είναι η κλίση των χαρακτηριστικών. Αυτή η συμπεριφορά ερμηνεύεται από την Εξ. (4.5), στην οποία ο δεύτερος όρος (κλίση), είναι αντιστρόφως ανάλογος με το τετράγωνο της μαγνητικής ροής. Η ταχύτητα του κινητήρα στο κενό, είναι αντιστρόφως 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 υπερθέρμανση 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  $\phi_r$ . 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 τυλίγμα 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  $I_{a,max}$

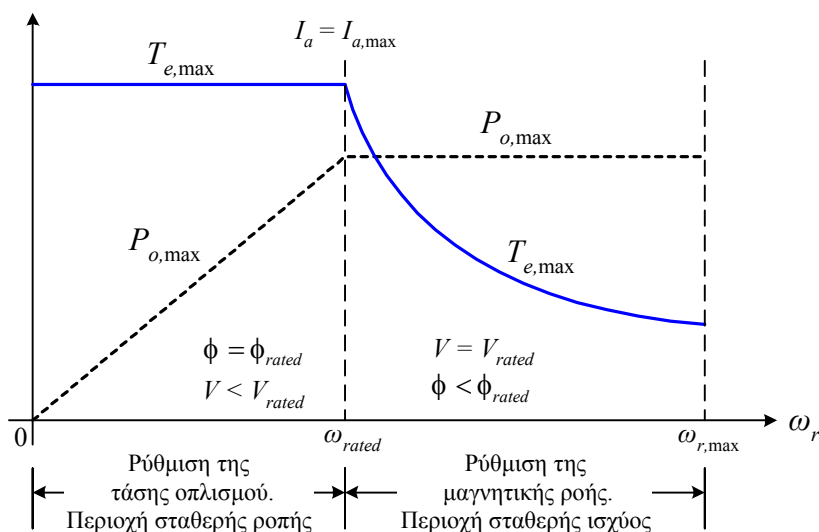
$$T_{e,max} = C_e \phi I_{a,max} \tag{4.6}$$

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

$$P_{o,max} = T_{e,max} \omega_r \tag{4.7}$$

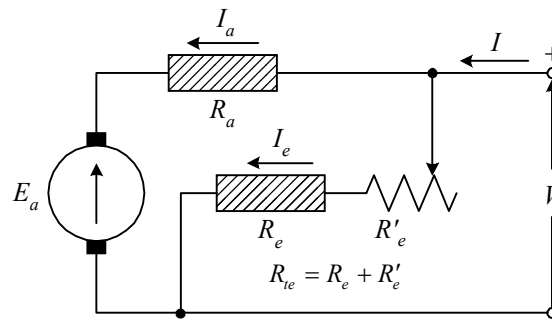
Επομένως, η τιμή της μέγιστης ισχύος μεταβάλλεται γραμμικά με την ταχύτητα.

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





Σχ. 4.6 Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα παράλληλης διέγερσης

### 4.3 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

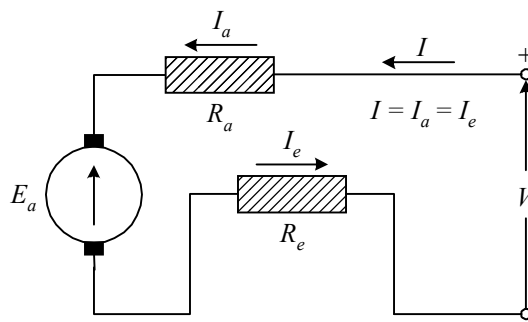
Το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα παράλληλης διέγερσης εικονίζεται στο Σχ. 4.6. Η διαφορά του κινητήρα παράλληλης διέγερσης από τον κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση, είναι ότι το κύκλωμα του δρομέα και το κύκλωμα της διέγερσης τροφοδοτούνται από την ίδια πηγή συνεχούς τάσης  $V$ . Οι Εξ. (4.1)–(4.5) και 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.

### 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 σπλισμού 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 σπλισμού

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



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

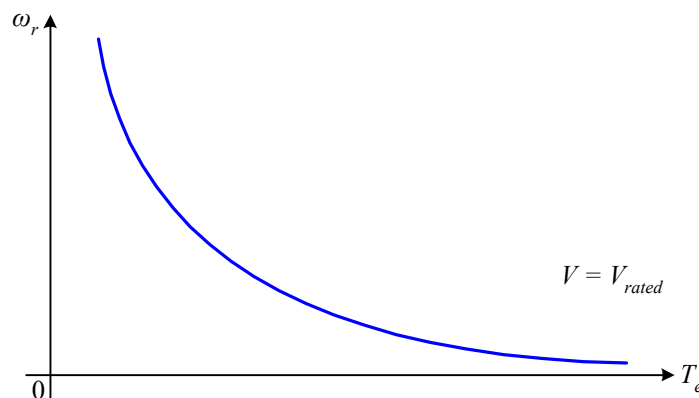
$$V = E_a + I_a (R_a + R_e) \quad (4.11)$$

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

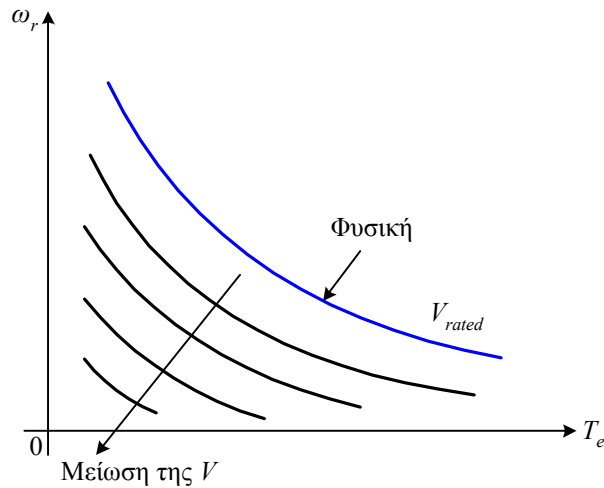
$$\omega_r = \frac{V}{C_e C_f I_a} - \frac{R_a + R_e}{C_e C_f} = \frac{V}{\sqrt{C_e C_f}} \frac{1}{\sqrt{T_e}} - \frac{R_a + R_e}{C_e C_f} \quad (4.12)$$

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

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

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

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

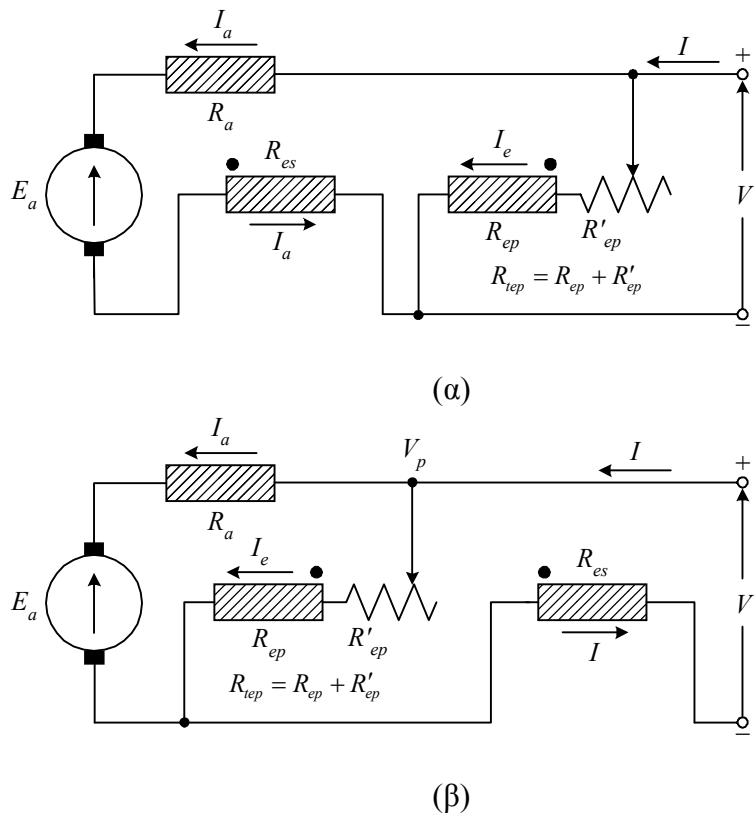
Στη σύνδεση *short shunt*, ισχύουν οι σχέσεις

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

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

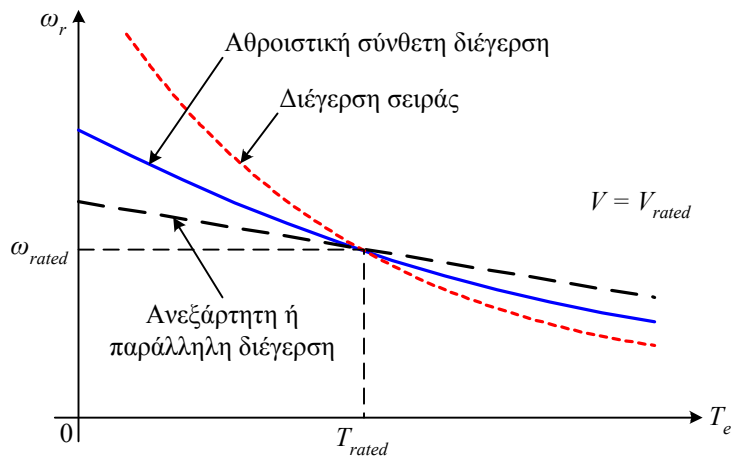
$$V = V_p + I R_{es} \quad (4.18)$$

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

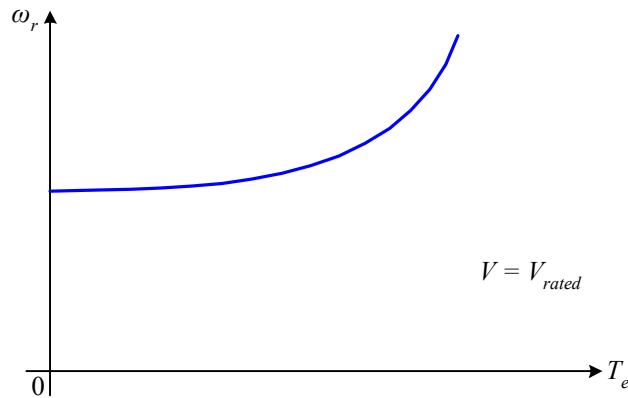


Σχ. 4.10 Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα αθροιστικής σύνθετης διέγερσης σε σύνδεση *long shunt* (α) και σε σύνδεση *short shunt* (β)

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



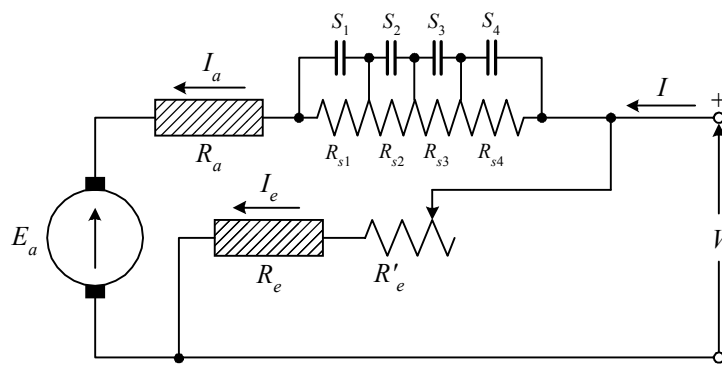
Σχ. 4.12 Χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής του κινητήρα διαφορικής σύνθετης διέγερσης

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 τυλίγμα 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*. Τα είδη των φορτίων αναφέρονται στην παρ. 4.9.3.

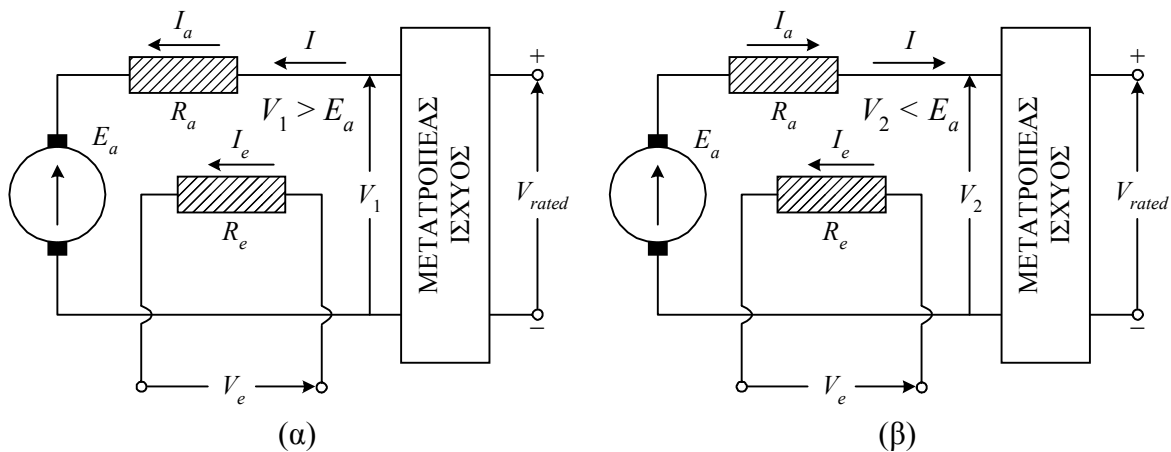
Για την πέδηση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος, το ρεύμα του οπλισμού πρέπει να αντιστραφεί, ενώ η φορά της κύριας μαγνητικής ροής διατηρείται σταθερή. Τότε, η φορά της αναπτυσσόμενης ροπής αντιστρέφεται  $T_e = -C_T \phi I_a$  και η ισχύς γίνεται αρνητική  $P = -T_e \omega_r$ . Η αρνητική ισχύς σημαίνει 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*):

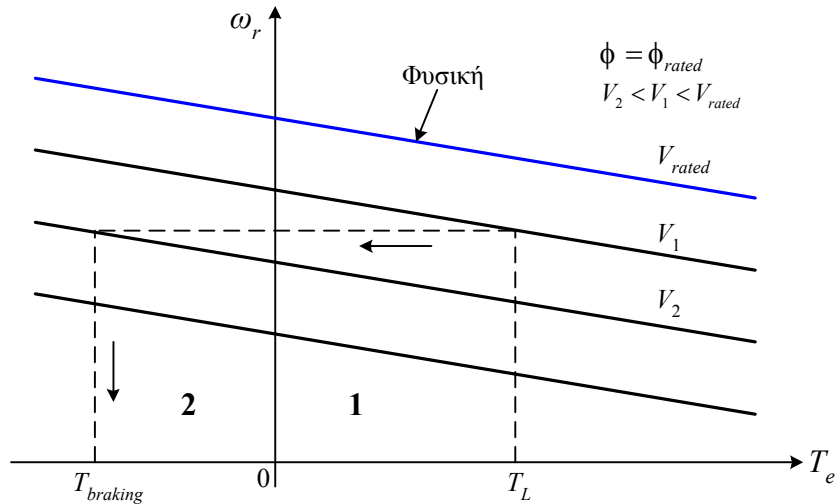
- ❑ Πέδηση με ανάκτηση της ισχύος (*regenerative braking*)
- ❑ Δυναμική πέδηση (*dynamic braking*)
- ❑ Πέδηση με αναστροφή της τάσης (*plugging*)

#### 4.7.1 Πέδηση με Ανάκτηση της Ισχύος

Στη μέθοδο πέδησης με ανάκτηση της ισχύος, η ενέργεια που παράγεται από τη μηχανή κατά το διάστημα της επιβράδυνσής της, επιστρέφει στην πηγή τροφοδοσίας. Επομένως, η πηγή τροφοδοσίας πρέπει να έχει την ικανότητα αποθήκευσης, ή διάθεσης σ' άλλα φορτία, της παραγόμενης από τη μηχανή ενέργειας. Αν η δυνατότητα αυτή δεν υπάρχει, τότε η μέθοδος της πέδησης με ανάκτηση της ισχύος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί.



Σχ. 4.14 Πέδηση του κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση. Λειτουργία κινητήρα με  $V_1 > E_a$  (α) και λειτουργία γεννήτριας  $V_2 < E_a$  (β)



**Σχ. 4.15** Χαρακτηριστικές ταχύτητας–ροπής του κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση, κατά τη λειτουργία κινητήρα (πρώτο τεταρτημόριο) και κατά την πέδηση με τη μέθοδο της ανάκτησης ισχύος (δεύτερο τεταρτημόριο)

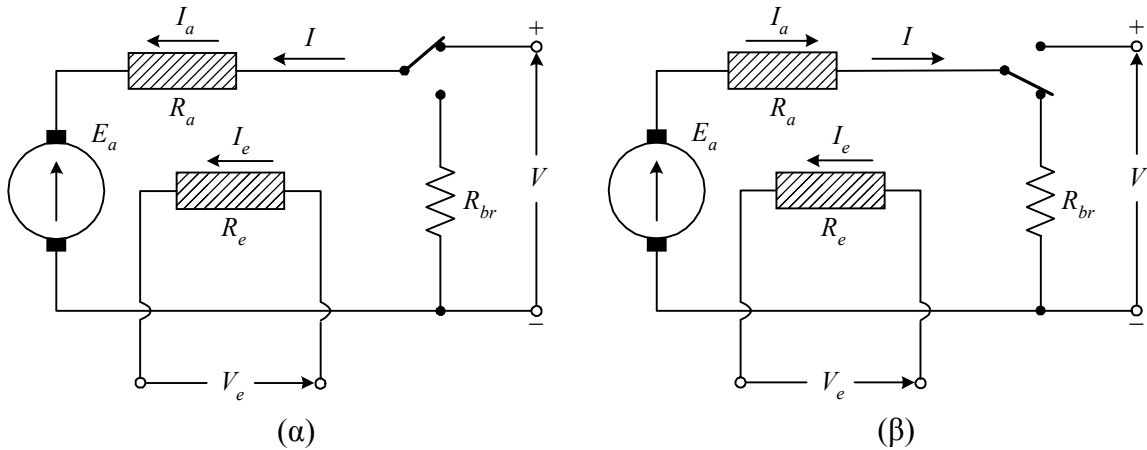
Στο Σχ. 4.14 εικονίζεται ένας κινητήρας με ανεξάρτητη διέγερση. Το τύλιγμα διέγερσης του κινητήρα τροφοδοτείται από μια πηγή σταθερής τάσης  $V_e$  και ο κινητήρας λειτουργεί με την ονομαστική μαγνητική ροή. Το κύκλωμα του οπλισμού τροφοδοτείται από ένα μετατροπέα ισχύος, με τάση  $V$  που μπορεί να ρυθμιστεί από το μηδέν έως την ονομαστική τιμή ( $0 < V < V_{rated}$ ). Μέσω του μετατροπέα ισχύος είναι δυνατός ο έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα, από το μηδέν έως την ονομαστική τιμή και ταυτόχρονα η πέδησή του, με τη μέθοδο της ανάκτησης ισχύος. Για την πέδηση του κινητήρα, ο μετατροπέας ισχύος μειώνει την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα από την τιμή  $V_1$  (Σχ. 4.14α), στην τιμή  $V_2$  (Σχ. 4.14β). Στο Σχ. 4.14α είναι  $V_1 > E_a$  έτσι, το ρεύμα του οπλισμού είναι θετικό και η μηχανή απορροφά ισχύ από την ηλεκτρική πηγή εισόδου. Στο Σχ. 4.14β, ο μετατροπέας επιβάλλει την τάση  $V_2 < E_a$ . Επειδή η ΑΗΕΔ του κινητήρα είναι μεγαλύτερη από την τάση εισόδου του, το ρεύμα του οπλισμού και η ροπή λαμβάνουν αρνητικές τιμές. Επομένως, η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια. Ο μετατροπέας ισχύος πρέπει να έχει την ικανότητα να φέρει ρεύμα και προς τις δύο κατευθύνσεις και η πηγή να απορροφά την ενέργεια της πέδησης. Αυτές οι συνθήκες εκπληρώνονται στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, όπου η ενέργεια που παράγεται σε κάθε πέδηση του οχήματος, χρησιμοποιείται στη φόρτιση των συσσωρευτών του.

Οι χαρακτηριστικές ταχύτητας–ροπής του κινητήρα προκύπτουν από την Εξ. (4.5) και εικονίζονται στο Σχ. 4.15. Οι χαρακτηριστικές αυτές αποτελούν μια επέκταση των χαρακτηριστικών του κινητήρα από το Σχ. 4.3, στο δεύτερο τεταρτημόριο, όπου η ροπή είναι αρνητική.

#### 4.7.2 Δυναμική Πέδηση

Η πέδηση ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος με τη δυναμική μέθοδο, σημαίνει την αποσύνδεση του κυκλώματος οπλισμού από την πηγή τροφοδοσίας και τον παραλληλισμό του με μια αντίσταση (Σχ. 4.16). Επειδή η τάση τροφοδοσίας της μηχανής είναι μηδέν (Σχ. 4.16β), η ΑΗΕΔ προκαλεί τη ροή ενός ρεύματος οπλισμού με την αντίθετη φορά από εκείνη στη λειτουργία του κινητήρα (Σχ. 4.16α). Επομένως, η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια αναπτύσσοντας αρνητική ροπή.

Η αντίσταση πέδησης  $R_{br}$  που συνδέεται στο κύκλωμα του δρομέα πρέπει να έχει κατάλληλη τιμή, έτσι ώστε το αρχικό ρεύμα πέδησης, για τη μέγιστη ταχύτητα άρα και τη μέγιστη ΑΗΕΔ του κινητήρα  $I^{\max} = E_a^{\max} / (R_a + R_{br})$ , να περιορίζεται σε ασφαλή τιμή.



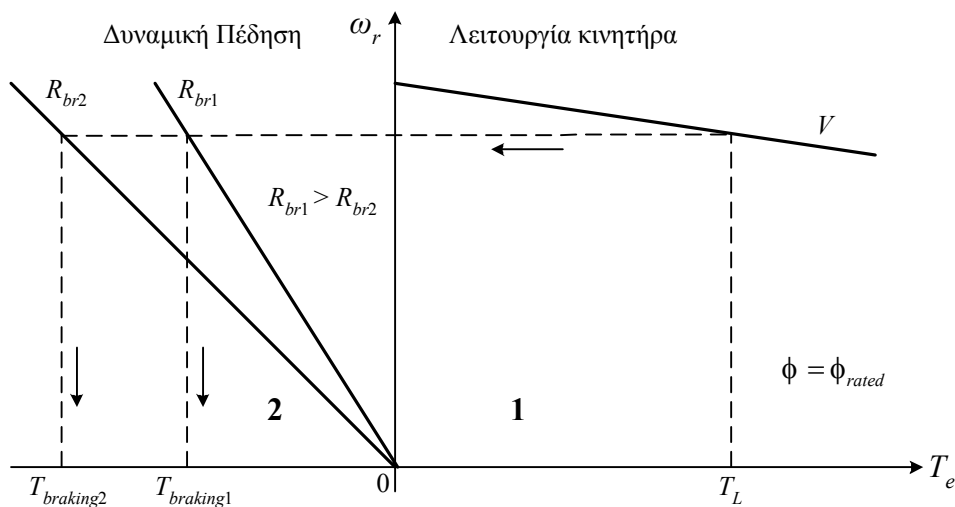
**Σχ. 4.16** Δυναμική πέδηση του κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση. Λειτουργία κινητήρα (α), λειτουργία γεννήτριας (β)

Στο δεύτερο τεταρτημόριο του Σχ. 4.17 εικονίζονται οι χαρακτηριστικές ταχύτητας–ροπής του κινητήρα ανεξάρτητης διέγερσης με δυναμική πέδηση, για δύο τιμές της αντίστασης πέδησης. Οι χαρακτηριστικές αυτές λαμβάνονται από την Εξ. (4.5) θέτοντας,  $V = 0$  και στη θέση της αντίστασης σπλισμού το άθροισμα  $R_a + R_{br}$ .

$$\omega_r = -\frac{R_a + R_{br}}{(C_e \phi)^2} (-T_e) \tag{4.20}$$

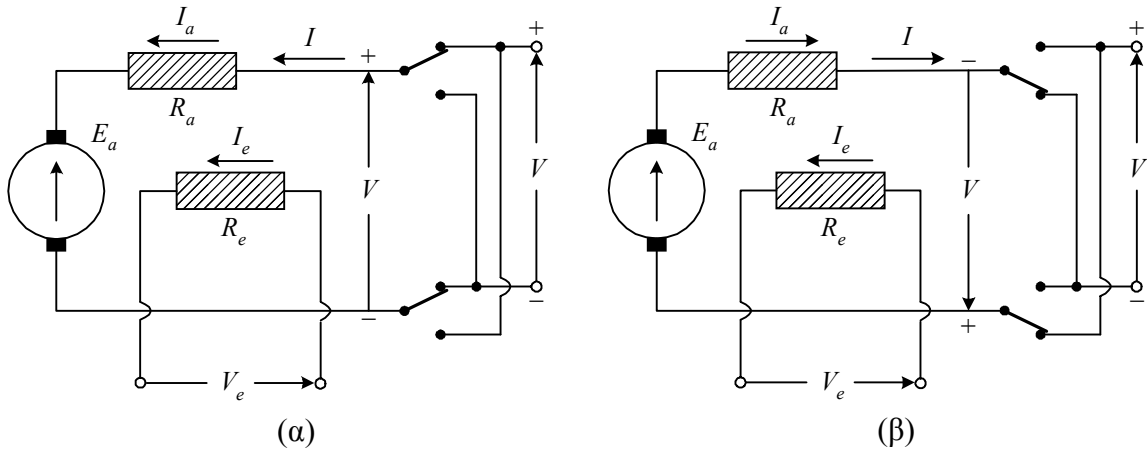
Παρατηρούμε ότι, το μέγεθος της αρνητικής ροπής είναι τόσο μεγαλύτερο, όσο μικρότερη είναι η τιμή της αντίστασης πέδησης. Έτσι, το χρονικό διάστημα της πέδησης ελαττώνεται, με τη μείωση της αντίστασης  $R_{br}$ . Ακόμη, η ροπή πέδησης μειώνεται με τη μείωση της ταχύτητας και μηδενίζεται στη μηδενική ταχύτητα. Έτσι, σε εφαρμογές όπου απαιτείται ταχεία πέδηση, η τιμή της αντίστασης  $R_{br}$  μειώνεται έως το μηδέν, καθώς ελαττώνεται η ταχύτητα του κινητήρα.

Η δυναμική πέδηση είναι μια αναποτελεσματική μέθοδος πέδησης των κινητήρων, καθώς η ενέργεια που παράγει η μηχανή σπαταλάτε υπό μορφή θερμότητας, στην αντίσταση πέδησης.



**Σχ. 4.17** Χαρακτηριστικές ταχύτητας–ροπής του κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση, κατά τη λειτουργία κινητήρα (πρώτο τεταρτημόριο) και κατά τη δυναμική πέδηση (δεύτερο τεταρτημόριο)





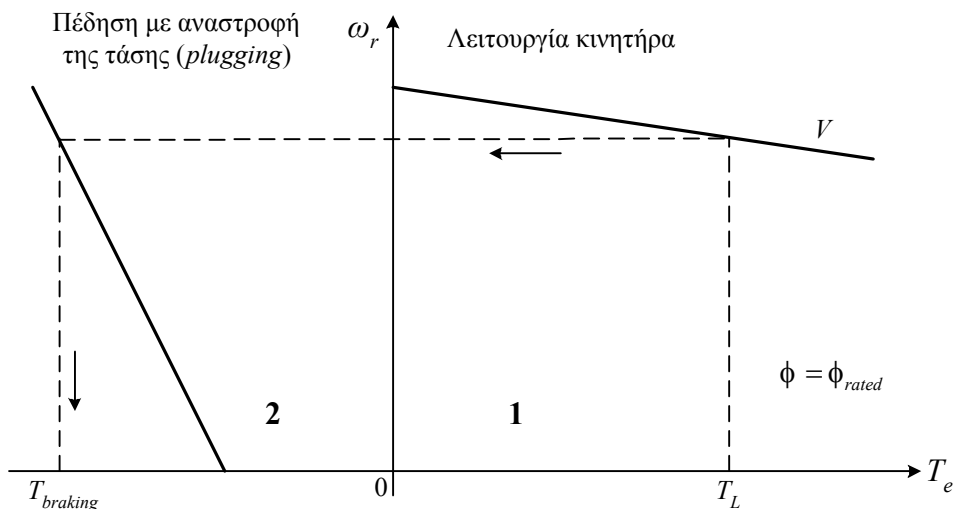
Σχ. 4.18 Πέδηση του κινητήρα ανεξάρτητης διέγερσης με αναστροφή της τάσης τροφοδοσίας. Λειτουργία κινητήρα (α), λειτουργία γεννήτριας (β)

4.7.3 Πέδηση με Αναστροφή της Τάσης (*plugging*)

Σ’ αυτή τη μέθοδο πέδησης, αντιστρέφεται η φορά της τάσης τροφοδοσίας στο τύλιγμα του οπλισμού (Σχ. 4.18). Έτσι, αντιστρέφεται η φορά του ρεύματος στον οπλισμό και η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια. Η ενέργεια που παράγεται από τη μηχανή, μαζί με την ισχύ που η μηχανή απορροφά από την πηγή τροφοδοσίας, καταναλώνονται στην ωμική αντίσταση του δρομέα. Το ρεύμα στον οπλισμό αποκτά μια εξαιρετικά μεγάλη τιμή  $I_a = (E_a + V)/R_a$ , η οποία συχνά περιορίζεται με τη σύνδεση μιας εξωτερικής αντίστασης, σε σειρά με το κύκλωμα του δρομέα. Επομένως, η πέδηση με *plugging* είναι μια εξαιρετικά αναποτελεσματική μέθοδος.

Η χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής του κινητήρα με *plugging*, εικονίζεται στο δεύτερο τεταρτημόριο του Σχ. 4.19. Η χαρακτηριστική λαμβάνεται από την Εξ. (4.5) αντικαθιστώντας την τάση  $V$  με την  $-V$ . Η ροπή πέδησης της μηχανής στη μηδενική ταχύτητα είναι σημαντική. Έτσι, όταν ο σκοπός της πέδησης είναι το σταμάτημα του κινητήρα, απαιτούνται πρόσθετες διατάξεις για την αποσύνδεση του κινητήρα από την πηγή. Αν δεν γίνει αυτό, ο κινητήρας επιταχύνει προς την αντίθετη κατεύθυνση.

$$\omega_r = \frac{-V}{C_e \phi} - \frac{R_a}{(C_e \phi)^2} (-T_e) \tag{4.21}$$

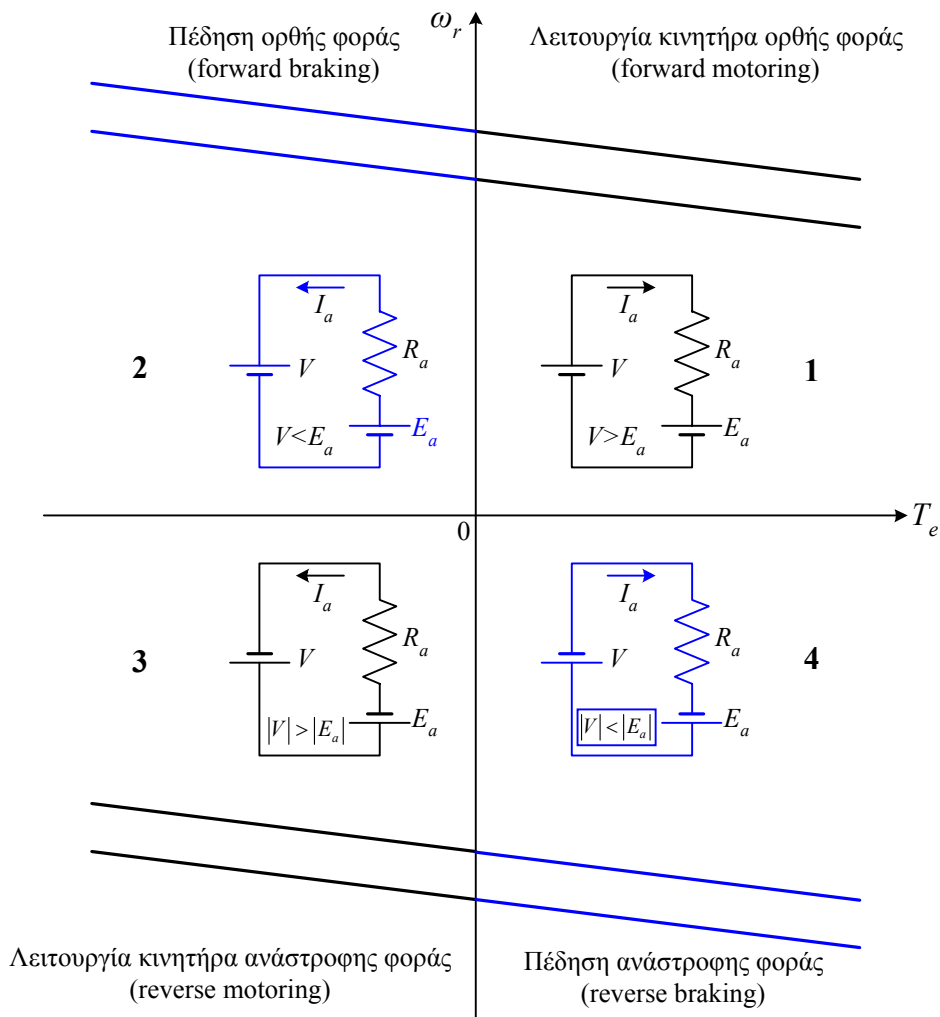


Σχ. 4.19 Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής του κινητήρα με ανεξάρτητη διέγερση, κατά τη λειτουργία κινητήρα (πρώτο τεταρτημόριο) και κατά τη πέδηση με αναστροφή της τάσης (δεύτερο τεταρτημόριο)

4.8 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕ ΤΕΣΣΕΡΑ ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΑ

Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος με ανεξάρτητη διέγερση, μπορεί να ελεγχθεί σε τέσσερα τεταρτημόρια του επιπέδου ταχύτητας-ροπής, με πέδηση ανάκτησης ισχύος, όταν το τύλιγμα του οπλισμού τροφοδοτείται από τον κατάλληλο μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας ισχύος πρέπει να παρέχει τάση τροφοδοσίας με θετική και αρνητική πολικότητα και ταυτόχρονα να επιτρέπει την αμφίδρομη ροή του ρεύματος οπλισμού (μετατροπέας τεσσάρων τεταρτημορίων).

Σύμφωνα με το Σχ. 4.20, η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας στο πρώτο τεταρτημόριο καθώς η ισχύς, η οποία είναι ίση με το γινόμενο της ταχύτητας με τη ροπή  $P=T_e\omega_r$ , είναι θετική. Ο κινητήρας θεωρούμε ότι στρέφεται με την ορθή (θετική) φορά στο πρώτο τεταρτημόριο, όταν η τάση τροφοδοσίας είναι θετική και  $V > E_a$  (forward motoring). Στο δεύτερο τεταρτημόριο, όπου  $V < E_a$ , η ισχύς είναι αρνητική και η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια (πέδηση κατά την ορθή φορά, forward braking). Η φορά του ρεύματος οπλισμού και η ροπή είναι αντεστραμμένες, σε σχέση με το πρώτο τεταρτημόριο. Η ροπή του παθητικού φορτίου και η αρνητική ροπή πέδησης, επιβραδύνουν τη μηχανή. Έτσι, η μηχανή μπορεί να λειτουργήσει στο δεύτερο τεταρτημόριο μόνο κατά το μεταβατικό χρονικό διάστημα της πέδησης. Η μηχανή λειτουργεί σε μόνιμη κατάσταση ισορροπίας στο δεύτερο τεταρτημόριο, μόνο όταν το φορτίο είναι ενεργό με αρνητική ροπή. Παράδειγμα τέτοιου φορτίου είναι ένα ηλεκτρικό τρένο που κινείται σε κατωφέρεια. Τότε, η ροπή της βαρύτητας υποστηρίζει την κίνηση, ενώ το μέγεθος της ροπής πέδησης ρυθμίζει την ταχύτητα.



Σχ. 4.20 Λειτουργία του κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ανεξάρτητη διέγερση, σε τέσσερα τεταρτημόρια

Η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας στο τρίτο τεταρτημόριο. Η ταχύτητα και η ροπή θεωρούνται αρνητικές. Επομένως, η ισχύς είναι θετική και η μηχανή απορροφά ισχύ από την πηγή τροφοδοσίας (*reverse motoring*). Η τάση τροφοδοσίας, η ΑΗΕΔ και το ρεύμα του οπλισμού, είναι αρνητικά σε σχέση με το πρώτο τεταρτημόριο. Για την πέδηση της μηχανής κατά την ανάστροφη (αρνητική) φορά περιστροφής, πρέπει  $|V| < |E_a|$ . Τότε, αντιστρέφεται η φορά του ρεύματος οπλισμού και η ροπή γίνεται θετική, τέταρτο τεταρτημόριο (*reverse braking*).

## 4.9 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.

### 4.9.1 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  $J \cdot d\omega_r / dt$  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  $T_e$  αλλά 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.

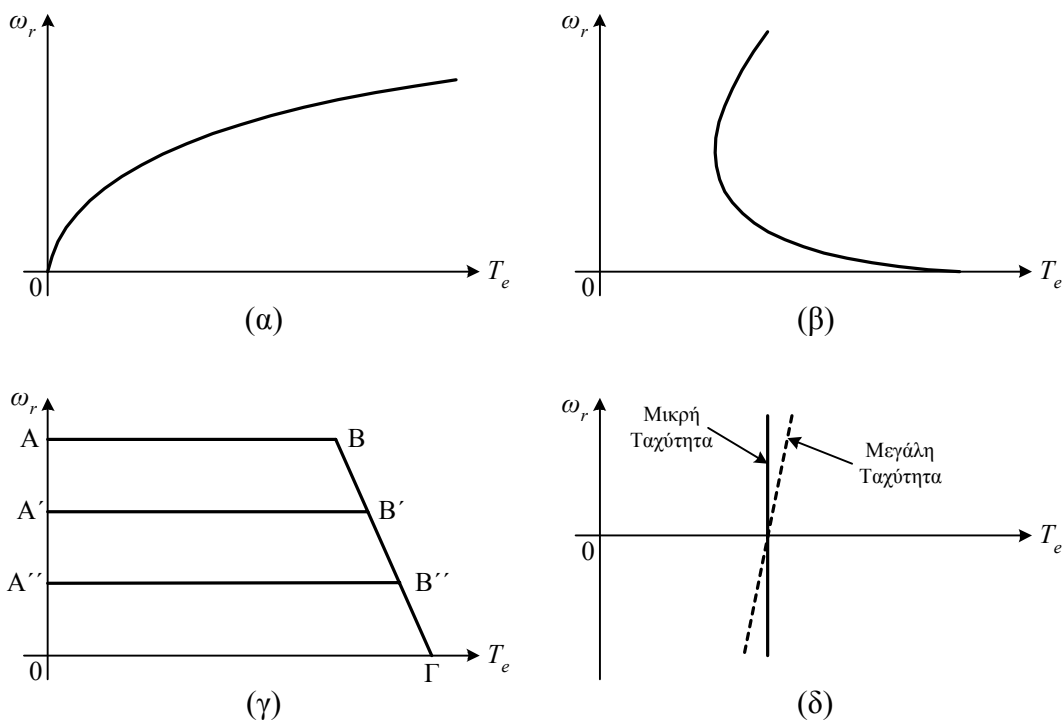
#### 4.9.2 Χαρακτηριστικές Ταχύτητας–Ροπής από Συνήθη Φορτία

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. Αντλιών, ανεμιστήρων (α), συστημάτων έλξης (β), εκσκαφέων (γ), ανυψωτικών (δ)

### 4.9.3 Κατηγορίες Φορτίων

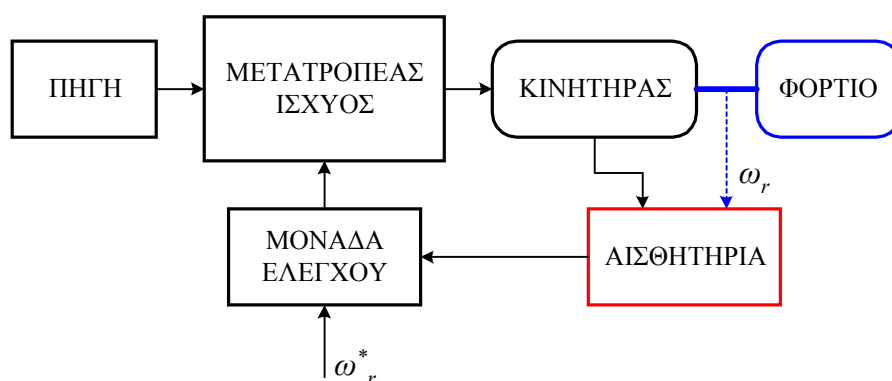
Τα φορτία διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα *παθητικά φορτία* και τα *ενεργά φορτία*. Ως παθητικά φορτία χαρακτηρίζουμε εκείνα, που πάντοτε αντιτίθενται στην κίνηση της μηχανής. Η ροπή των παθητικών φορτίων αλλάζει πρόσημο, με την αντιστροφή της φοράς του κινητήρα.

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.

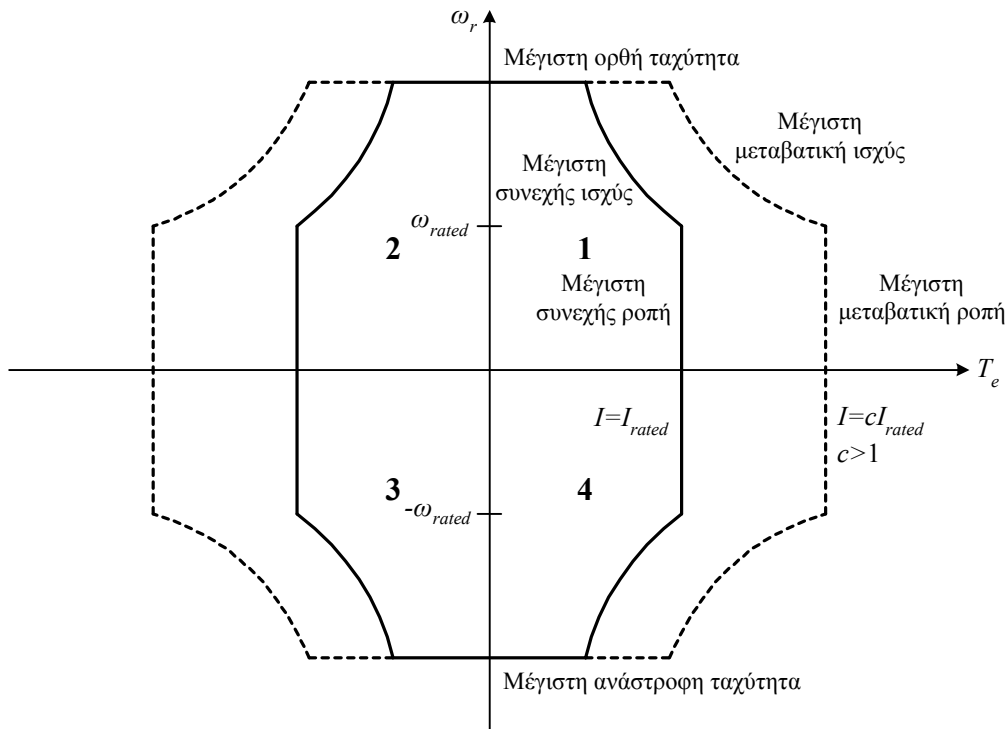
### 4.10 ΚΙΝΗΤΗΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

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  $\omega_r^*$ . 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  $\omega_r^*$ .

Οι μετατροπείς ισχύος διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με τον αριθμό των τεταρτημορίων που επιτρέπουν τη λειτουργία του κινητήρα. Κάθε ηλεκτρικός κινητήρας, όπως ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος στο Σχ. 4.20, μπορεί να λειτουργεί και στα τέσσερα τεταρτημόρια του επιπέδου ταχύτητας–ροπής. Αν ο κινητήρας στο κινητήριο σύστημα θα λειτουργεί και στα τέσσερα τεταρτημόρια ή σε λιγότερα, όπως σε δύο είτε σε ένα, εξαρτάται από τη δομή του μετατροπέα ισχύος.



Σχ. 4.22 Γενικό λειτουργικό διάγραμμα των κινητήριων συστημάτων

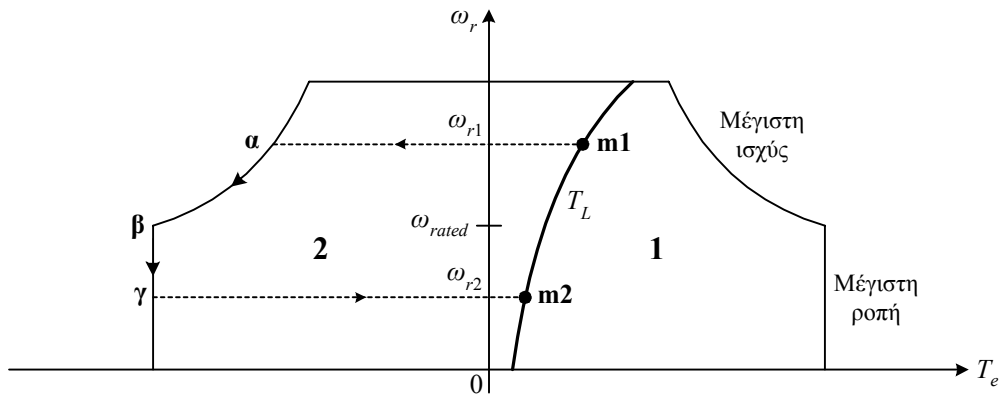


**Σχ. 4.23** Λειτουργία του κινητήριου συστήματος σε τέσσερα τεταρτημόρια. Εικονίζονται οι περιοχές σταθερής μέγιστης ροπής και ισχύος στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας (συνεχής γραμμή) και οι αντίστοιχες περιοχές για λειτουργία στα μεταβατικά χρονικά διαστήματα (διακεκομμένη γραμμή)

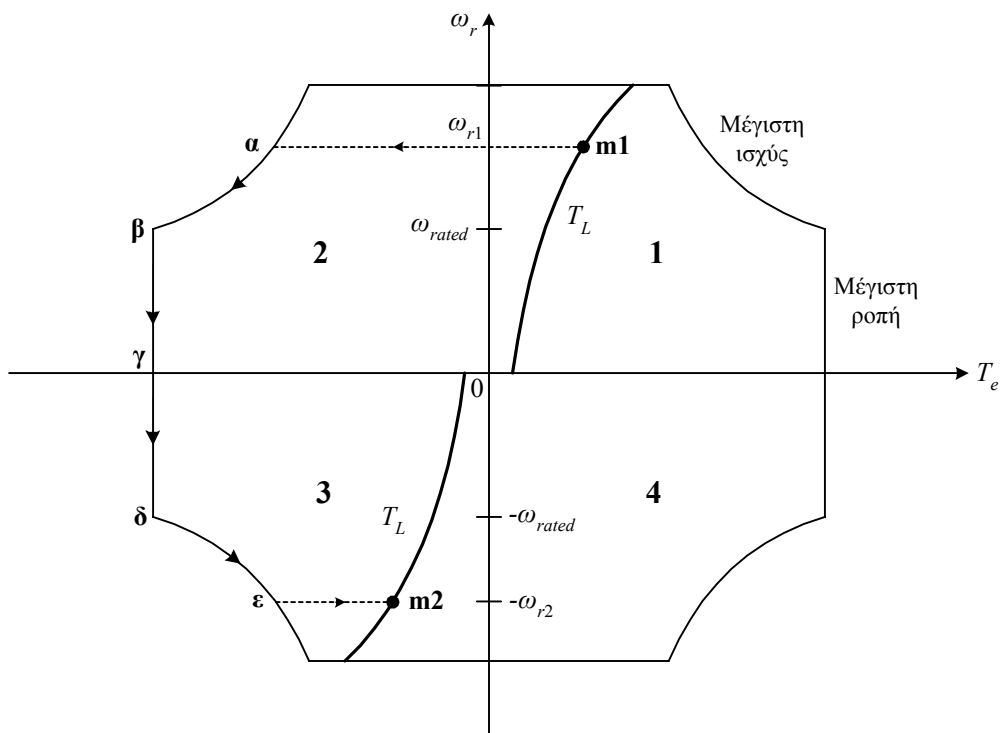
Στο Σχ. 4.23 θεωρούμε ότι, ο κινητήρας οδηγείται από ένα μετατροπέα ισχύος τεσσάρων τεταρτημορίων. Η εσωτερική επιφάνεια ορίζει την περιοχή λειτουργίας του κινητήρα στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας. Η συνεχής γραμμή που περιβάλλει την επιφάνεια αυτή, αντιστοιχεί στη λειτουργία του κινητήρα με το ονομαστικό του ρεύμα. Έτσι, σε ταχύτητες μικρότερες από την ονομαστική ο κινητήρας λειτουργεί με σταθερή μέγιστη ροπή. Σε ταχύτητες μεγαλύτερες από την ονομαστική, έχουμε τη λειτουργία με σταθερή μέγιστη ισχύ, ίση με την ονομαστική. Ο κινητήρας λειτουργεί με την ονομαστική ροή, σε ταχύτητες μικρότερες από την ονομαστική. Η ροή μειώνεται σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Όταν το ρεύμα είναι μικρότερο από το ονομαστικό, το σημείο λειτουργίας του κινητήρα βρίσκεται στο εσωτερικό της επιφάνειας που περικλείεται από τη συνεχή γραμμή.

Κατά τη διάρκεια των μεταβατικών καταστάσεων αλλαγής της ταχύτητας του κινητήρα, το ρεύμα μπορεί να λάβει τιμές σημαντικά μεγαλύτερες από το ονομαστικό  $c \cdot I_{rated}$ . Αυτό οφείλεται στη μεγάλη θερμική σταθερά χρόνου του κινητήρα και το μικρό χρονικό διάστημα που διαρκεί η ροή του μεταβατικού ρεύματος. Η ροή ενός ρεύματος μεγαλύτερου από το ονομαστικό, επιτρέπει την ανάπτυξη μιας ροπής που υπερβαίνει την ονομαστική. Έτσι, το χρονικό διάστημα της μεταβατικής λειτουργίας περιορίζεται και η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος βελτιώνεται. Στο Σχ. 4.23 η διακεκομμένη γραμμή ορίζει τη μέγιστη ροπή και ισχύ που μπορεί να αναπτύξει ο κινητήρας, όταν τροφοδοτείται με το αυξημένο ρεύμα  $c \cdot I_{rated}$  στα μεταβατικά χρονικά διαστήματα. Επομένως, ο κινητήρας μπορεί να λειτουργεί στα μεταβατικά διαστήματα, στην περιοχή που ορίζεται μεταξύ της διακεκομμένης και της συνεχούς γραμμής. Όμως, η λειτουργία στην περιοχή αυτή σημαίνει ότι, οι ημιαγωγοί διακόπτες του μετατροπέα ισχύος πρέπει να επιλεγούν με βάση τα αυξημένα μεταβατικά ρεύμα, αντί για το ονομαστικό. Αυτό οφείλεται στη μικρή θερμική σταθερά χρόνου των ημιαγωγών ισχύος. Έτσι, το κόστος του μετατροπέα ισχύος αυξάνεται σημαντικά.

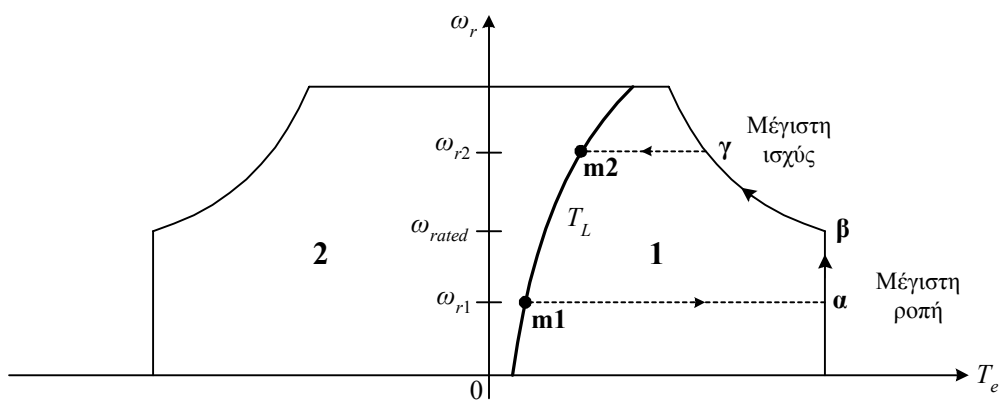
Στο Σχ. 4.24 περιγράφεται η μεταβατική συμπεριφορά των κινητήριων συστημάτων, σε τρεις διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.



(α)



(β)



(γ)

Σχ. 4.24 Μεταβατική λειτουργία του κινητήριου συστήματος. Μείωση της ταχύτητας (α), αντιστροφή της φοράς περιστροφής (β), αύξηση της ταχύτητας (γ)

Στο Σχ. 4.24α παρουσιάζεται η διαδικασία μείωσης της ταχύτητας του κινητήρα από την τιμή  $\omega_{r1}$  στην τιμή  $\omega_{r2}$ . Ο κινητήρας αρχικά λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας στο σημείο **m1**, όπου η ροπή του κινητήρα είναι ίση με τη ροπή του φορτίου. Όταν το σήμα αναφοράς ταχύτητας στο κινητήριο σύστημα λάβει την τιμή  $\omega_{r2}^*$ , το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει από το **m1** στο **a**. Η μετάβαση γίνεται σε ελάχιστο χρονικό διάστημα, γι' αυτό η ταχύτητα δεν μεταβάλλεται. Το σημείο **a** βρίσκεται στο δεύτερο τεταρτημόριο, όπου η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια και αναπτύσσει τη μέγιστη ισχύ πέδησης. Επειδή η ταχύτητα  $\omega_{r1}$  είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική, ο κινητήρας αρχικά υφίσταται πέδηση με τη μέγιστη ισχύ, έως το σημείο **β** και στη συνέχεια με τη μέγιστη ροπή έως το σημείο **γ**. Ανάλογα με τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του ρεύματος, η τροχιά **a-β-γ** αντιστοιχεί στη συνεχή ή τη διακεκομμένη γραμμή του Σχ. 4.23. Το σημείο **γ** αντιστοιχεί στη νέα επιθυμητή ταχύτητα  $\omega_{r2}$  και η λειτουργία του κινητήρα μεταβαίνει στο νέο σημείο ισορροπίας **m2**, στο πρώτο τεταρτημόριο.

Στο Σχ. 4.24β εικονίζεται η διαδικασία αντιστροφής της ταχύτητας του κινητήρα, από την τιμή  $\omega_{r1}$  στην τιμή  $-\omega_{r2}$ . Από το αρχικό σημείο ισορροπίας **m1**, ο κινητήρας μεταβαίνει στο δεύτερο τεταρτημόριο, σημείο **a**. Ο κινητήρας αρχικά υφίσταται πέδηση με τη μέγιστη ισχύ, έως το σημείο **β** και κατόπιν με τη μέγιστη ισχύ, έως τη μηδενική ταχύτητα **γ**. Στη συνέχεια η λειτουργία μεταβαίνει στο τρίτο τεταρτημόριο, όπου η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας και επιταχύνει με τη μέγιστη ροπή ως το σημείο **δ** και τη μέγιστη ισχύ ως το σημείο **ε**. Στο σημείο **ε**, όπου η ταχύτητα είναι ίση με την επιθυμητή  $-\omega_{r2}$ , μειώνεται το ρεύμα και ο κινητήρας μεταβαίνει στο νέο σημείο ισορροπίας **m2**.

Η διαδικασία αύξησης της ταχύτητας από την τιμή  $\omega_{r1}$  στην τιμή  $\omega_{r2}$ , φαίνεται στο Σχ. 4.24γ. Ο κινητήρας επιταχύνει αρχικά με τη μέγιστη ροπή, τμήμα **a-β**, και στη συνέχεια με τη μέγιστη ισχύ, τμήμα **β-γ**. Η διαδικασία επιτελείται στο πρώτο τεταρτημόριο.

Οι μετατροπείς ισχύος τεσσάρων τεταρτημορίων χρησιμοποιούνται όταν είναι επιθυμητή η περιστροφή του κινητήρα και προς τις δύο φορές. Όταν η περιστροφή του κινητήρα σε μια φορά είναι επαρκής, χρησιμοποιούνται οι *μετατροπείς δύο τεταρτημορίων*. Η λειτουργία στο δεύτερο τεταρτημόριο, παρέχει την ταχεία ηλεκτρική πέδηση της μηχανής (Σχ. 4.24α). Όταν η ροπή του φορτίου είναι υψηλή, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι *μετατροπείς ενός τεταρτημορίου*. Οι μετατροπείς αυτοί δεν παρέχουν ροπή πέδησης,  $T_e = 0$ . Έτσι, ο κινητήρας επιβραδύνεται μόνο με την επίδραση της ροπής του φορτίου, με συνέπεια η απόκρισή του να είναι αργή.

## 4.11 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:

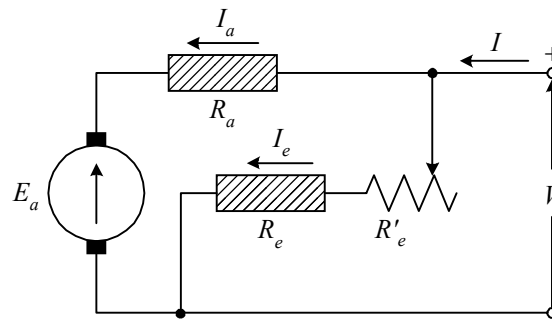
- Η ΑΗΕΔ του κινητήρα.
- Η ταχύτητα του κινητήρα όταν το ρεύμα του δρομέα αυξηθεί στα 50A και η ροή κατά 10%.
- Η ισχύς εξόδου στις δύο περιπτώσεις.

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

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

$$V = E_{a2} + R_a I_{a2} \Rightarrow E_{a1} = 220 - 0.3 \cdot 50 = 205V$$





Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα παράλληλης διέγερσης

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

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

$$E_{a2} = C_e 1.1 \phi_1 \omega_{r2} \Rightarrow 205 = C_e 1.1 \phi_1 \frac{2\pi}{60} n_2$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις παραπάνω εξισώσεις έχουμε

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

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 παράλληλη διέγερση, έχει τα εξής ονομαστικά στοιχεία:  $V = 220\text{V}$ ,  $P = 15\text{kW}$ ,  $\eta = 88\%$ ,  $n = 1000\text{rpm}$ ,  $R_a = 0.5\Omega$ ,  $P_e = 220\text{W}$ ,  $J = 0.5\text{Kgm}^2$ . Υπολογίστε:

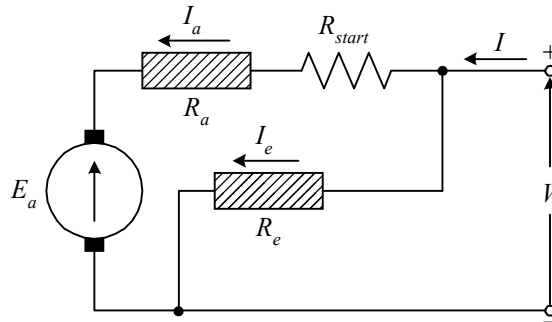
- Την αντίσταση εκκίνησης, έτσι ώστε  $I_{a,\text{max}} = 2I_{a,\text{rated}}$ ,
- την ονομαστική ροπή,
- το χρόνο εκκίνησης, όταν η μέση ροπή εκκίνησης είναι  $300\text{Nm}$ .

Η ισχύς των  $15\text{kW}$  είναι η ισχύς εξόδου του κινητήρα. Επομένως, η ισχύς εισόδου είναι ίση με

$$P_{in} = \frac{P_o}{\eta} = \frac{15}{0.88} = 17 \text{kW}$$

Το ρεύμα τροφοδοσίας είναι

$$I = \frac{P_{in}}{V} = \frac{17000}{220} = 77.5 \text{A}$$



Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα παράλληλης διέγερσης, με την αντίσταση εκκίνησης

Το ρεύμα στο τύλιγμα παράλληλης διέγερσης είναι

$$I_e = \frac{P_e}{V} = \frac{220}{220} = 1\text{A}$$

και το ονομαστικό ρεύμα στον οπλισμό

$$I_{a,rated} = I - I_e = 77.5 - 1 = 76.5\text{A}$$

Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του ρεύματος εκκίνησης είναι ίση με  $I_{a,max} = 2I_{a,rated} = 153\text{A}$ . Τη στιγμή της εκκίνησης, η ΑΗΕΔ είναι μηδέν, καθώς ο κινητήρας δεν στρέφεται. Έτσι, η ολική αντίσταση του κυκλώματος οπλισμού, η οποία είναι ίση με το άθροισμα της αντίστασης του δρομέα και της άγνωστης αντίστασης εκκίνησης  $R_{start}$ , ορίζεται από τη σχέση

$$V = (E_a = 0) + I_{a,max} (R_a + R_{start}) \Rightarrow R_a + R_{start} = \frac{V}{I_{a,max}} = \frac{220}{153} = 1.44\Omega$$

Επομένως, η αντίσταση εκκίνησης είναι ίση με  $R_{start} = 1.44 - 0.5 = 0.94\Omega$ .

Η ονομαστική ροπή υπολογίζεται από την ονομαστική ισχύ εξόδου

$$P_o = T_{rated} \omega_{rated} = T_{rated} \frac{2\pi}{60} n \Rightarrow T_{rated} = \frac{15000 \cdot 60}{2\pi \cdot 1000} = 143.3\text{Nm}$$

Ο χρόνος εκκίνησης υπολογίζεται από την παρακάτω διαφορική εξίσωση, στην οποία θεωρούμε προσεγγιστικά ότι η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας  $T_e$ , έχει μια σταθερή μέση τιμή  $300\text{Nm}$

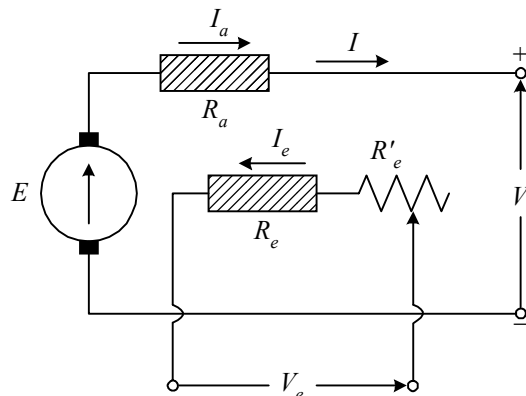
$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_r}{dt} \Rightarrow 300 = 143.3 + 0.5 \frac{2\pi \cdot 1000 / 60}{t_{start}} \Rightarrow t_{start} = 0.33\text{s}$$

**Παράδειγμα 4.3** Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς, έχει την παρακάτω καμπύλη μαγνήτισης, όταν στρέφεται με ταχύτητα  $700\text{rpm}$ .

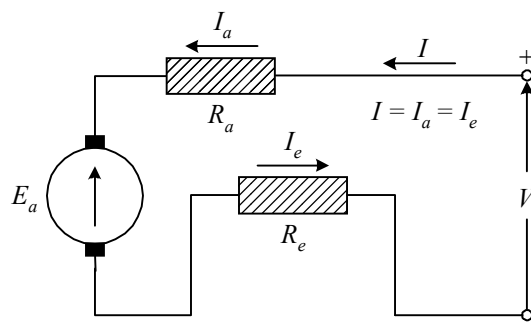
$I_e$ [A]	20	40	60	80	100
$E_{700}$ [V]	150	270	350	400	430

Η αντίσταση του δρομέα είναι  $0.45\Omega$  και του τυλίγματος σειράς  $0.35\Omega$ . 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  $700\text{rpm}$  και το ρεύμα διέγερσης λαμβάνει διαδοχικά τις τιμές του πίνακα. 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  $700\text{rpm}$



Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα σειράς

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

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

Η ροπή και η ισχύς εξόδου συνδέονται με τη σχέση  $P_o = E_a I = T_e \omega_r$ . Έτσι, η ροπή του κινητήρα είναι ίση με

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

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.

**Παράδειγμα 4.4** Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με παράλληλη διέγερση έχει τα εξής ονομαστικά στοιχεία:  $P = 50\text{kW}$ ,  $V = 400\text{V}$ ,  $n = 1000\text{rpm}$ ,  $\eta = 90\%$ ,  $R_a = 0.2\Omega$ ,  $R_e = 200\Omega$ . Ζητούνται:

α) Οι επιμέρους απώλειες της μηχανής στην ονομαστική λειτουργία, όταν οι απώλειες σιδήρου είναι διπλάσιες από τις απώλειες τριβών και αερισμού. Οι απώλειες ψηκτρών και οι κατανεμημένες απώλειες αγνοούνται.

β) Η ταχύτητα του κινητήρα στο κενό.

γ) Η αδράνεια του κινητήρα, όταν ο χρόνος εκκίνησης στο κενό είναι 0.7s και η μέση ροπή εκκίνησης 500Nm.

Οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται από τα ρεύματα στον οπλισμό και το τύλιγμα διέγερσης

$$I_e = \frac{V}{R_e} = \frac{400}{200} = 2\text{A}$$

$$I = \frac{P_{in}}{V} = \frac{P_o / \eta}{V} = \frac{50000 / 0.9}{400} = \frac{55555}{400} = 138.9\text{A}$$

$$I_a = I - I_e = 138.9 - 2 = 136.9\text{A}$$

$$P_{cu} = R_a I_a^2 + R_e I_e^2 = 0.2 \cdot 136.9^2 + 200 \cdot 2^2 = 3748 + 800 = 4548\text{W}$$

Οι ολικές απώλειες είναι ίσες με  $P_{loss} = 55555 - 50000 = 5555\text{W}$ . Επομένως, οι απώλειες σιδήρου μαζί με τις απώλειες τριβών και αερισμού είναι

$$P_{iron} + P_{fw} = P_{loss} - P_{cu} \Rightarrow 3P_{fw} = 5555 - 4548 \Rightarrow P_{fw} = 336\text{W} \text{ και } P_{iron} = 2P_{fw} = 672\text{W}$$

Στο κενό η ΑΗΕΔ του κινητήρα  $E_{a\_nl}$  είναι ίση με την τάση τροφοδοσίας του, καθώς το ρεύμα του οπλισμού είναι μηδενικό. Στην ονομαστική λειτουργία, η ΑΗΕΔ είναι ίση με

$$E_a = V - R_a I_a = 400 - 0.2 \cdot 136.9 = 372.6V$$

Από το λόγο των ΑΗΕΔ στο κενό και την ονομαστική λειτουργία έχουμε

$$\frac{E_{a\_nl}}{E_a} = \frac{n_{nl}}{n} \Rightarrow n_{nl} = \frac{E_{a\_nl} n}{E_a} = \frac{400 \cdot 1000}{372.6} = 1073.5 \text{rpm}$$

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί στο κενό, η μόνη ροπή φορτίου είναι η ροπή τριβών και αερισμού. Η ροπή αυτή υπολογίζεται στην ονομαστική ταχύτητα και θεωρείται καταχρηστικά σταθερή

$$T_{L_{fw}} = \frac{P_{fw}}{\omega_{r\_nl}} = \frac{336}{2\pi \cdot 1073.5 / 60} = 3 \text{Nm}$$

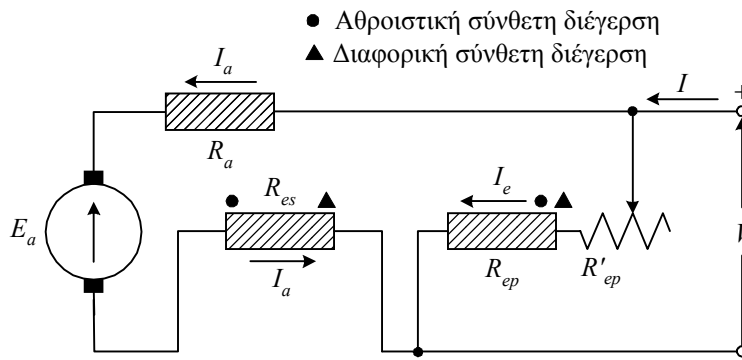
Η αδράνεια του κινητήρα υπολογίζεται από τη σχέση

$$T_e = T_L + J \frac{\Delta\omega_r}{\Delta t} \Rightarrow 500 = 3 + J \frac{2\pi \cdot 1073.5 / 60}{0.7} \Rightarrow J = 3.1 \text{kgm}^2$$

**Παράδειγμα 4.5** Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος με σύνθετη διέγερση, έχει τα εξής ονομαστικά στοιχεία:  $P = 70\text{kW}$ ,  $V = 220\text{V}$ ,  $R_a = 0.02\Omega$ ,  $R_{es} = 0.03\Omega$ ,  $R_{ep} = 50\Omega$ . Το τύλιγμα παράλληλης διέγερσης διαθέτει 1000 σπείρες ανά πόλο και το τύλιγμα σειράς 4 σπείρες ανά πόλο. Η καμπύλη μαγνήτιση ορίζεται στις 1000rpm από τον παρακάτω πίνακα, όπου  $I_{te}$  είναι το ισοδύναμο ρεύμα διέγερσης από τα δύο τυλίγματα διέγερσης. Υπολογίστε:

- α) Την τιμή της αντίστασης  $R'_{ep}$  έτσι ώστε ο κινητήρας να στρέφεται στο κενό με 1000rpm.
- β) Την ταχύτητα του κινητήρα με αθροιστική σύνθετη διέγερση, όταν το ρεύμα του οπλισμού είναι 200A.
- γ) Την ταχύτητα του κινητήρα με διαφορική σύνθετη διέγερση, όταν το ρεύμα του οπλισμού είναι 200A.

$I_{te}$ [A]	2.8	3.2	4.0	4.8	5.6
$E_{1000}$ [V]	180	205	220	230	235



Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα σύνθετης διέγερσης

Στη λειτουργία χωρίς φορτίο, το ρεύμα του οπλισμού είναι μηδέν. Έτσι, η ΑΗΕΔ του κινητήρα είναι ίση με την τάση τροφοδοσίας  $E_{a\_nl} = 220\text{V}$ . Το ολικό ρεύμα διέγερσης είναι ίσο με το ρεύμα διέγερσης στο

παράλληλο τύλιγμα, καθώς το τύλιγμα σειράς δεν διαρρέετε από ρεύμα,  $I_{te} = I_e$ . Από την καμπύλη μαγνήτισης προκύπτει ότι για  $E_{a\_nl} = 220\text{V}$ , απαιτείται ένα ρεύμα διέγερσης ίσο με 4A. Επομένως, η ρυθμιστική αντίσταση  $R'_{ep}$  πρέπει να είναι ίση με

$$R_{ep} + R'_{ep} = \frac{V}{I_e} \Rightarrow R'_{ep} = \frac{V}{I_e} - R_{ep} = \frac{220}{4} - 50 = 5\Omega$$

Όταν  $I_a = 200\text{A}$ , η ΑΗΕΔ του κινητήρα είναι ίση με

$$E_a = V - I_a(R_a + R_{es}) = 220 - 200(0.02 + 0.03) = 210\text{V}$$

Το ισοδύναμο ρεύμα διέγερσης στην περίπτωση του κινητήρα με αθροιστική σύνθετη διέγερση είναι

$$I_{te} = I_e + \frac{4}{1000} I_a = 4 + \frac{4}{1000} 200 = 4.8\text{A}$$

Από την καμπύλη μαγνήτισης, η ΑΗΕΔ στο κενό με ταχύτητα 1000rpm, όταν  $I_{te} = 4.8\text{A}$ , είναι ίση με 230V. Επομένως, η ταχύτητα του κινητήρα με φορτίο

$$\frac{E_{a\_nl}}{E_a} = \frac{1000}{n} \Rightarrow n = \frac{1000 E_a}{E_{a\_nl}} = \frac{1000 \cdot 210}{230} = 913\text{rpm}$$

είναι μικρότερη από την ταχύτητα στο κενό.

Αντίστοιχα, στον κινητήρα με διαφορική σύνθετη διέγερση το ισοδύναμο ρεύμα διέγερσης είναι ίσο με

$$I_{te} = I_e - \frac{4}{1000} I_a = 4 - \frac{4}{1000} 200 = 3.2\text{A}$$

Από την καμπύλη μαγνήτισης βρίσκουμε την ΑΗΕΔ  $E_{a\_nl} = 205\text{V}$ . Επομένως, η ταχύτητα του κινητήρα είναι ίση με

$$\frac{E_{a\_nl}}{E_a} = \frac{1000}{n} \Rightarrow n = \frac{1000 E_a}{E_{a\_nl}} = \frac{1000 \cdot 210}{205} = 1024.4\text{rpm}$$

δηλαδή, αυξημένη σε σχέση με την ταχύτητα του κινητήρα στο κενό.