

ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Οι κινητήρες αυτής της κατηγορίας τροφοδοτούνται από κάποια πηγή συνεχούς τάσης. Από κατασκευαστικής απόψεως, δεν παρουσιάζουν καμία διαφορά σε σχέση με τις γεννήτριες ΣΡ. Βασικό πλεονέκτημά τους αποτελεί η ευκολία ελέγχου της ροπής και της ταχύτητάς τους σε ένα μεγάλο εύρος τιμών. Ένα μέτρο σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών κινητήρων ΣΡ είναι η **διακύμανση ταχύτητας**, η οποία ορίζεται από τη σχέση

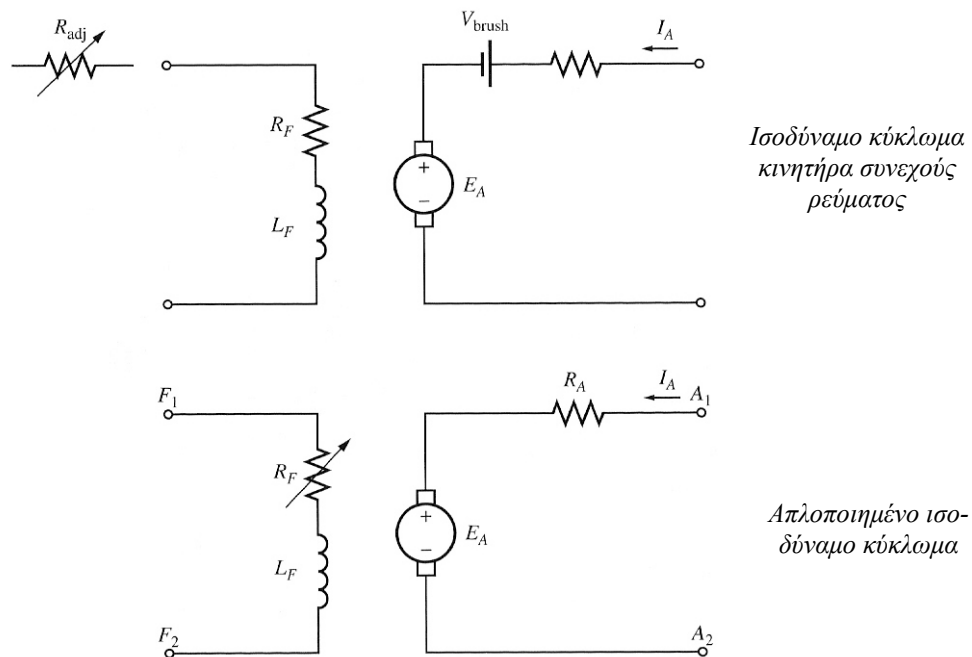
$$SR = \frac{\omega_{nl} - \omega_{fl}}{\omega_{fl}} 100\%$$

με τους δείκτες nl και fl να υποδεικνύουν, αντίστοιχα, λειτουργία υπό μηδενικό και υπό πλήρες φορτίο. Θετική τιμή της SR σημαίνει μείωση της ταχύτητας του κινητήρα κατά την αύξηση του φορτίου, ενώ αρνητική τιμή της SR υποδεικνύει αύξηση της ταχύτητας κατά την αύξηση του φορτίου. Το μέγεθος αυτό εκφράζει προφανώς την ικανότητα ενός κινητήρα να διατηρεί την ταχύτητά του σταθερή, όταν μεταβάλλεται το εφαρμοζόμενο φορτίο (μικρότερη απόλυτη τιμή της SR υποδηλώνει μεγαλύτερη σταθερότητα).

Όπως είναι ήδη γνωστό, ένας ηλεκτρικός κινητήρας παρέχει μηχανική ισχύ σε μια μηχανή η οποία αποτελεί το “φορτίο” του. Όταν ο κινητήρας περιστρέφεται χωρίς να υπάρχει κάποιο φορτίο συνδεδεμένο, τότε η λειτουργία του χαρακτηρίζεται ως “εν κενώ”.

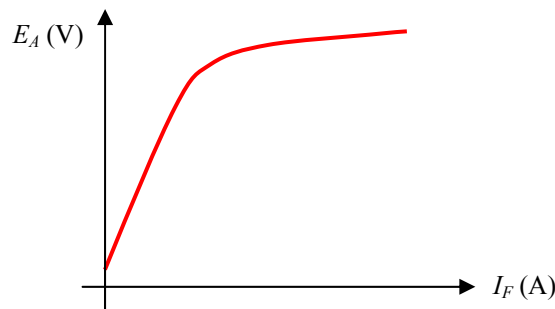
Όπως και στις γεννήτριες, υπάρχουν οι ακόλουθες κατηγορίες κινητήρων συνεχούς ρεύματος:

- α) Ανεξάρτητης διέγερσης.
- β) Παράλληλης διέγερσης.
- γ) Διέγερσης σειράς.
- δ) Σύνθετης διέγερσης.



Όσον αφορά το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα ΣΡ, αυτό είναι παρόμοιο με εκείνο που παρουσιάστηκε στην περίπτωση γεννητριών ΣΡ, με τη βασική διαφορά ότι η κατεύθυνση του ρεύματος του οπλισμού είναι πλέον η αντίστροφη (επιπλέον, η πηγή που αναπαριστά την πτώση τάσης στις ψήκτρες έχει αντίθετη πολικότητα, αφού πρέπει να αντιτίθεται στο ρεύμα του δρομέα).

Η καμπύλη μαγνήτισης (ή στατική χαρακτηριστική) ενός κινητήρα παριστάνει τη μεταβολή της τάσης E_A ως προς το ρεύμα διέγερσης σε συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής. Αυτή προκύπτει από τις σχέσεις $E_A = K\Phi\omega$ και $\mathcal{F} = N_F I_F$, δεδομένου ότι η γραφική παράσταση της $\Phi = f(\mathcal{F})$ είναι η καμπύλη μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού. Για την παραγωγή όσο το δυνατό μεγαλύτερης ισχύος, οι κινητήρες συνήθως λειτουργούν κοντά στον κορεσμό.



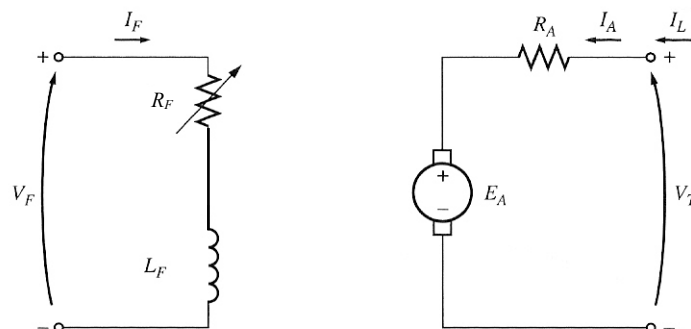
Καμπύλη μαγνήτισης κινητήρα ΣΡ

ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΗΣ (ΞΕΝΗΣ) ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

Εδώ το κύκλωμα διέγερσης τροφοδοτείται από μια ανεξάρτητη πηγή συνεχούς τάσης και οι εξισώσεις που προκύπτουν από το κυκλωματικό ισοδύναμο είναι:

$$I_F = \frac{V_F}{R_F}, \quad V_T = E_A + I_A R_A \quad \text{και} \quad I_L = I_A.$$

Η αντι-ΗΕΔ E_A που αναπτύσσεται στο τύλιγμα του οπλισμού είναι πάντα μικρότερη από την εφαρμοζόμενη τάση εισόδου V_T . Λόγω των κοινών χαρακτηριστικών στοιχείων με τους κινητήρες παράλληλης διέγερσης (αφού, όπως θα δειχτεί, και στις δύο περιπτώσεις το ρεύμα διέγερσης είναι σταθερό), η χαρακτηριστική φορτίου του κινητήρα ξένης διέγερσης θα εξεταστεί στην επόμενη παράγραφο.



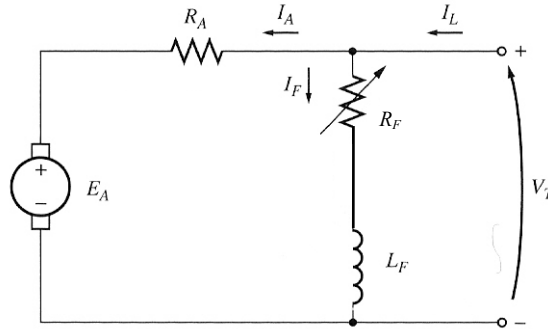
Ισοδύναμο κύκλωμα

ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

Τώρα το κύκλωμα διέγερσης τροφοδοτείται από το κύκλωμα οπλισμού του κινητήρα, με τις αντίστοιχες εξισώσεις να είναι

$$I_F = \frac{V_T}{R_F}, \quad V_T = E_A + I_A R_A, \quad I_L = I_A + I_F.$$

Συνεπώς, εάν θεωρηθεί σταθερή η τάση τροφοδοσίας V_T του κινητήρα, η ανάλυση που ακολουθεί θα είναι παρόμοια με την ανάλυση ενός κινητήρα ανεξάρτητης διέγερσης.



Ισοδύναμο κύκλωμα

Χαρακτηριστική φορτίου

Η χαρακτηριστική φορτίου ενός κινητήρα είναι το διάγραμμα της ροπής εξόδου ως προς την ταχύτητά του. Για να βρεθεί η απόκριση ενός κινητήρα παράλληλης διέγερσης, ακολουθούμε το εξής σκεπτικό: θεωρώντας ότι αυξάνεται η ροπή του φορτίου ($\tau_{load} \nearrow$), αυτή θα ξεπεράσει τη ροπή της μηχανής τ_{ind} (αφού σε σταθερή ταχύτητα οι δύο ροπές είναι ίσες, αμελώντας τις τριβές), με αποτέλεσμα να αρχίσει να μειώνεται η ταχύτητα περιστροφής ($\omega \searrow$). Το γεγονός αυτό σημαίνει πως μειώνεται η εσωτερική τάση $E_A (= K\Phi\omega \searrow)$, οπότε αυξάνεται το ρεύμα του οπλισμού $I_A (= (V_T - E_A)/R_A \nearrow)$, οδηγώντας στην παραγωγή μεγαλύτερης ροπής από τον κινητήρα ($\tau_{ind} = K\Phi I_A \nearrow$). Τελικά η ροπή του κινητήρα θα εξισωθεί με τη ροπή του φορτίου και η περιστροφή θα πραγματοποιείται σε μια σταθερή και πάλι ταχύτητα, μικρότερη από την αρχική.

Για τον υπολογισμό της μαθηματικής έκφρασης της χαρακτηριστική φόρτισης, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι

$$E_A = K\Phi\omega \text{ και } \tau_{ind} = K\Phi I_A \Rightarrow I_A = \frac{\tau_{ind}}{K\Phi}.$$

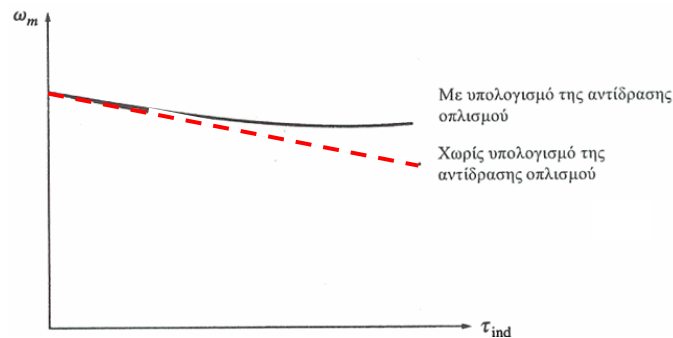
Οι σχέσεις αυτές οδηγούν την εξίσωση $V_T = E_A + I_A R_A$ στη μορφή

$$V_T = K\Phi\omega + \frac{\tau_{ind}}{K\Phi} R_A \Rightarrow \omega = -\frac{R_A}{(K\Phi)^2} \tau_{ind} + \frac{V_T}{K\Phi}$$

η οποία παριστάνει ευθεία με αρνητική (όπως αναμενόταν, σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν) κλίση. Γενικά, η απόλυτη τιμή της κλίσης αυτής είναι σχετικά μικρή, οπότε οι κινητήρες παράλληλης διέγερσης χαρακτηρίζονται από ικανοποιητική σταθερότητα της ταχύτητας περιστροφής για μεγάλο εύρος φορτίων. Για πολύ μεγάλη ροπή η συγκεκριμένη γραφική παράσταση τέμνει τον οριζόντιο

άξονα σε σημείο όπου, προφανώς, μηδενίζεται η ταχύτητα. Ωστόσο το σημείο αυτό δεν αντιστοιχεί σε επιτρεπτή λειτουργία, διότι συνεπάγεται απαγορευτικά μεγάλη τιμή του ρεύματος.

Βέβαια, η χαρακτηριστική παριστάνεται με ευθεία γραμμή μόνο εάν η τάση τροφοδοσίας V_T και η μαγνητική ροή Φ έχουν σταθερές τιμές. Εάν ο κινητήρας δε διαθέτει τυλίγματα αντιστάθμισης, τότε η αντίδραση του οπλισμού επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης ροπής-ταχύτητας. Συγκεκριμένα, τα φαινόμενα εξασθένησης της ροής στο εσωτερικό του κινητήρα προκαλούν την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής.



Χαρακτηριστική φορτίου κινητήρα ΣΡ παράλληλης διέγερσης

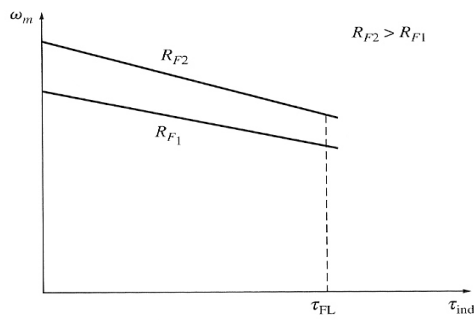
Έλεγχος της ταχύτητας

Η ταχύτητα περιστροφής ενός κινητήρα παράλληλης διέγερσης μπορεί να ελεγχθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

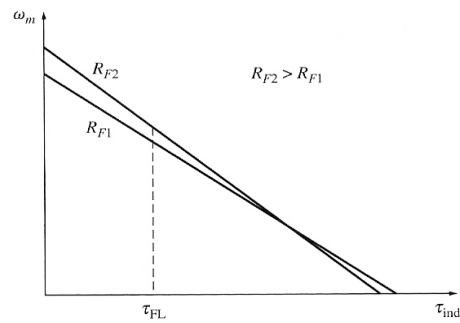
α) μεταβάλλοντας την αντίσταση διέγερσης:

Αυξάνοντας την αντίσταση διέγερσης ($R_F \nearrow$) ελαττώνεται το ρεύμα διέγερσης ($I_F = V_T / R_F \searrow$), οπότε και η μαγνητική ροή ($\Phi \searrow$). Έτσι μειώνεται η $E_A (= K\Phi\omega \searrow)$, έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος στον οπλισμό $I_A (= (V_T - E_A) / R_A \nearrow)$. Επειδή η συγκεκριμένη αύξηση του ρεύματος είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση της μαγνητικής ροής, τελικά η επαγόμενη ροπή $\tau_{ind} = K\Phi I_A$ συνολικά αυξάνεται. Τότε έχουμε $\tau_{ind} > \tau_{load}$, οπότε ο κινητήρας περιστρέφεται πιο γρήγορα από πριν, γεγονός που σημαίνει ότι μεγαλώνει η τάση E_A , οπότε μειώνεται το ρεύμα στον οπλισμό ($I_A \searrow$) και μαζί του η ροπή ($\tau_{ind} \searrow$), μέχρι να γίνει πάλι $\tau_{ind} = \tau_{load}$ σε μια ταχύτητα περιστροφής μεγαλύτερη από πριν. Στη θεωρητική περίπτωση όπου $R_F \rightarrow \infty$ (οπότε ουσιαστικά το κύκλωμα διέγερσης διακόπτεται κατά τη λειτουργία της μηχανής), το ρεύμα του οπλισμού παίρνει πολύ μεγάλες τιμές (αφού η E_A οφείλεται μόνο στην παραμένουσα ροή) και η ταχύτητα περιστροφής μπορεί να γίνει πολλαπλάσια της ονομαστικής.

Επειδή η ελάττωση του ρεύματος διέγερσης συνοδεύεται από αύξηση της ταχύτητας, η τεχνική αυτή αξιοποιείται για την επίτευξη ταχυτήτων μεγαλύτερων και όχι μικρότερων από τη βασική ω , η οποία επιτυγχάνεται όταν το ρεύμα διέγερσης παίρνει τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή του. Περαιτέρω αύξηση του I_F θα προκαλέσει προβλήματα υπερθέρμανσης και πιθανή καταστροφή του τυλίγματος διέγερσης.



Έλεγχος της ταχύτητας μέχρι το πλήρες φορτίο

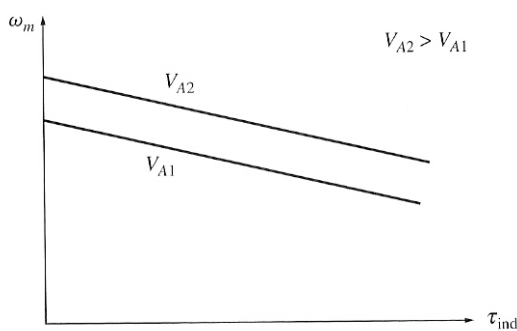


Έλεγχος της ταχύτητας μέχρι την ακινητοποίηση του δρομέα

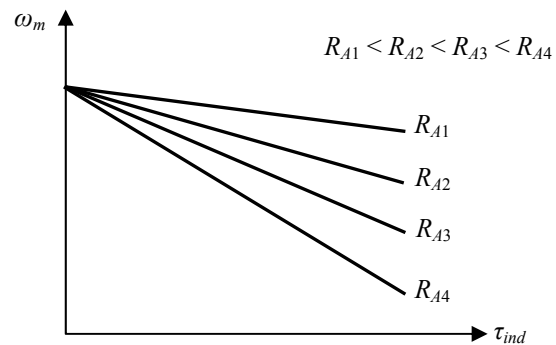
β) με μεταβολή της τάσης στον οπλισμό:

Τώρα μεταβάλλεται η τάση V_A στα άκρα του οπλισμού, χωρίς ωστόσο να μεταβάλλεται η τάση στα άκρα του κυκλώματος διέγερσης (αυτό μπορεί να γίνει μέσω ενός ελεγκτή μεταβλητής τάσης). Αυξάνοντας μόνο την τάση V_A ενισχύεται το ρεύμα στον οπλισμό ($I_A = (V_A - E_A) / R_A \nearrow$), προκαλώντας αύξηση της ροπής ($\tau_{ind} = K\Phi I_A \nearrow$). Έτσι, είναι τώρα $\tau_{ind} > \tau_{load}$, οπότε ο κινητήρας επιταχύνεται, με συνέπεια την αύξηση της τάσης $E_A (= K\Phi\omega \nearrow)$. Το γεγονός αυτό μειώνει το ρεύμα $I_A (= (V_A - E_A) / R_A \searrow)$, με συνέπεια τον περιορισμό της ροπής μέχρι το σημείο όπου $\tau_{ind} = \tau_{load}$, σε ταχύτητα μεγαλύτερη της αρχικής. Σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο, η κλίση των καμπυλών ροπής-ταχύτητας δε μεταβάλλεται.

Επειδή η ταχύτητα αυξάνεται μαζί με την τάση του οπλισμού, η οποία δεν πρέπει να ξεπερνάει μια μέγιστη επιτρεπτή τιμή, η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται για έλεγχο της περιστροφής σε τιμές μικρότερες της βασικής ταχύτητας.



Έλεγχος της ταχύτητας μέσω της τάσης του οπλισμού



Έλεγχος της ταχύτητας μέσω της αντίστασης του οπλισμού

γ) με τη σύνδεση μιας αντίστασης σε σειρά με το κύκλωμα οπλισμού:

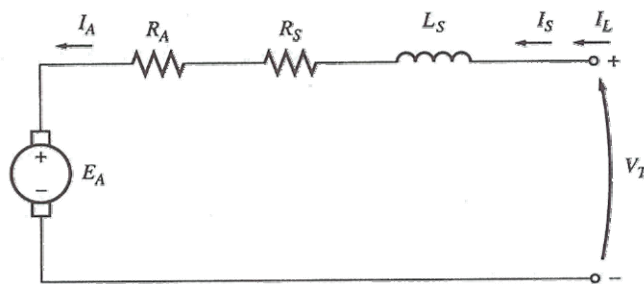
Με την τεχνική αυτή η κλίση της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας μπορεί να μεταβληθεί (αυτό προκύπτει εύκολα από την αντίστοιχη μαθηματική διατύπωση). Εφαρμόζεται ωστόσο σπάνια, διότι συνεπάγεται μεγάλες απώλειες, εξαιτίας της σημαντικής τιμής του ρεύματος του οπλισμού.

ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΜΕ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΣΕΙΡΑΣ

Τα τυλίγματα διέγερσης των κινητήρων αυτής της κατηγορίας διαθέτουν σχετικά λίγες σπείρες και είναι συνδεδεμένα σε σειρά με το κύκλωμα οπλισμού. Συνεπώς, τα ρεύματα οπλισμού, διέγερσης και εισόδου σε έναν τέτοιο κινητήρα έχουν την ίδια τιμή. Συγκεκριμένα, από το ισοδύναμο κύκλωμα ισχύουν τα ακόλουθα:

$$I_A = I_s = I_L \text{ και } V_T = E_A + I_A(R_A + R_s).$$

Χαρακτηριστική ιδιότητα των κινητήρων με διέγερση σειράς είναι η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής μεταξύ εξαιρετικά διαφορετικών τιμών, κατά τη μεταβολή του φορτίου.



Ισοδύναμο κύκλωμα

Επαγόμενη ροπή στον άξονα

Πριν την εμφάνιση κορεσμού, όταν δηλαδή το σημείο λειτουργίας του κινητήρα βρίσκεται στη γραμμική περιοχή (μικρά φορτία), η μαγνητική ροή στο εσωτερικό του κινητήρα είναι ανάλογη του ρεύματος οπλισμού. Άρα το ρεύμα αυξάνει αντίστοιχα τη ροή, οδηγώντας στη μείωση της ταχύτητας περιστροφής, με συνέπεια η καμπύλη ροπής-ταχύτητας να έχει απότομη κλίση. Συγκεκριμένα, είναι

$$\tau_{ind} = K\Phi I_A \text{ και } \Phi = cI_A,$$

οπότε

$$\tau_{ind} = KcI_A^2.$$

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται πως ο κινητήρας διέγερσης σειράς εξασφαλίζει μεγάλη ροπή ανά μονάδα ρεύματος, μεγαλύτερη από οποιονδήποτε άλλο κινητήρα.

Χαρακτηριστική φορτίου

Υποθέτουμε πως η καμπύλη μαγνήτισης είναι γραμμική, δηλ. $\Phi = cI_A$. Τότε για την τάση V_T ισχύει

$$\left. \begin{aligned} V_T &= E_A + I_A(R_A + R_s) \\ I_A &= \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}} \\ E_A &= K\Phi\omega \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_T = K\Phi\omega + \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}}(R_A + R_s).$$

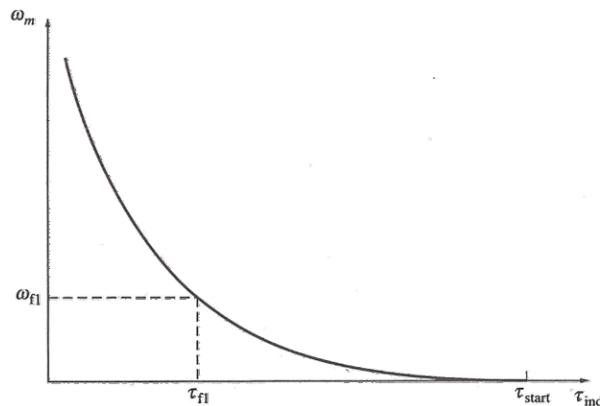
Επιπλέον, μια έκφραση της μαγνητικής ροής είναι

$$\tau_{ind} = KcI_A^2 = Kc\left(\frac{\Phi}{c}\right)^2 \Rightarrow \Phi = \sqrt{\frac{c}{K}}\sqrt{\tau_{ind}}$$

οπότε αντικαθιστώντας θα έχουμε

$$\begin{aligned} V_T &= K\Phi\omega + \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}}(R_A + R_s) \\ &= K\sqrt{\frac{c}{K}}\sqrt{\tau_{ind}}\omega + \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}}(R_A + R_s) \Rightarrow \\ \sqrt{Kc}\sqrt{\tau_{ind}}\omega &= V_T - \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}}(R_A + R_s) \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\boxed{\omega = \frac{V_T}{\sqrt{Kc}} \frac{1}{\sqrt{\tau_{ind}}} - \frac{R_A + R_s}{Kc}}$$



Χαρακτηριστική φορτίου κινητήρα ΣΡ διέγερσης σειράς

Θεωρητικά, αν η ροπή του κινητήρα μηδενιστεί, η ταχύτητά του θα γίνει άπειρη. Στην πράξη, αν δε συνδεθεί κάποιο φορτίο στον κινητήρα, η ταχύτητά του θα γίνει γρήγορα πολύ μεγάλη (όχι, όμως, άπειρη, λόγω των τριβών). Γι' αυτό ένας τέτοιος κινητήρας δεν πρέπει να μένει ποτέ χωρίς φορτίο, ούτε να συνδέεται στο φορτίο του μέσω κάποιου ιμάντα, ο οποίος είναι πιθανό να σπάσει και να αφήσει αφόρτιστο τον κινητήρα.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό πως ο κινητήρας διέγερσης σειράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη μεγάλη ροπή σε χαμηλή περιστροφική ταχύτητα (π.χ. ανελκυστήρες, γερανοί κτλ).

Έλεγχος της ταχύτητας

Η πιο αποδοτική μέθοδος σε αυτήν τη κατηγορία των κινητήρων είναι η ρύθμιση της τάσης εισόδου, με την αύξησή της να συνεπάγεται γρηγορότερη περιστροφή για δεδομένη ροπή. Άλλη, πιο δαπανηρή όμως μέθοδος, περιλαμβάνει την εισαγωγή αντίστασης σε σειρά με το κύκλωμα του κινητήρα.

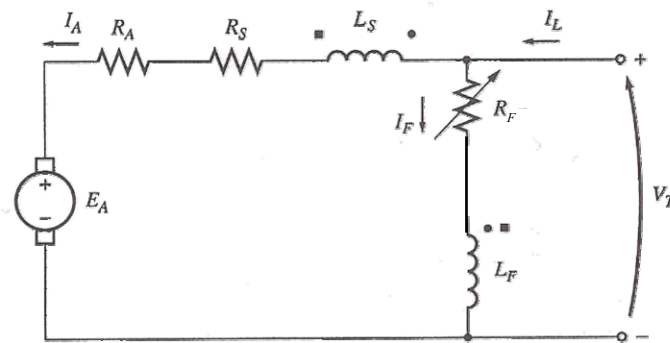
ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

Οι κινητήρες σύνθετης διέγερσης χρησιμοποιούν ένα τύλιγμα σειράς και ένα παράλληλο τύλιγμα. Στο σχήμα φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα στην περίπτωση της μεταπαράλληλης συνδεσμολογίας, όπου από το νόμο των τάσεων έχουμε

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

ενώ στο εσωτερικό του κινητήρα τα ρεύματα ικανοποιούν τις σχέσεις

$$I_A = I_L - I_F \text{ και } I_F = V_T / R_F.$$



Ισοδύναμο κύκλωμα

Χαρακτηριστική φορτίου

Ο κινητήρας αθροιστικής σύνθετης διέγερσης παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα των κινητήρων διέγερσης σειράς και των κινητήρων παράλληλης διέγερσης. Στο εσωτερικό του η μαγνητική ροή αποτελείται από ένα σταθερό τμήμα και από ένα τμήμα ανάλογο του ρεύματος οπλισμού. Διαθέτει υψηλή ροπή εκκίνησης (διέγερση σειράς) και δεν επιταχύνεται ασταμάτητα κατά την αφόρτιση λειτουργία (παράλληλη διέγερση). Αν το φορτίο είναι μικρό, τότε το τύλιγμα διέγερσης σειράς δεν παίζει σημαντικό ρόλο και ο κινητήρας συμπεριφέρεται ως παράλληλης διέγερσης. Αντίθετα, σε μεγάλη αύξηση του φορτίου η μαγνητική ροή του τυλίγματος διέγερσης σειράς γίνεται σημαντική και η καμπύλη ροπής ταχύτητας μοιάζει με αυτή ενός κινητήρα διέγερσης σειράς.

Από την άλλη πλευρά, κινητήρες διαφορικής σύνθετης διέγερσης δε χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές, αφού η λειτουργία τους είναι ασταθής και οδηγούνται σε μεγάλες τιμές της ταχύτητας περιστροφής.

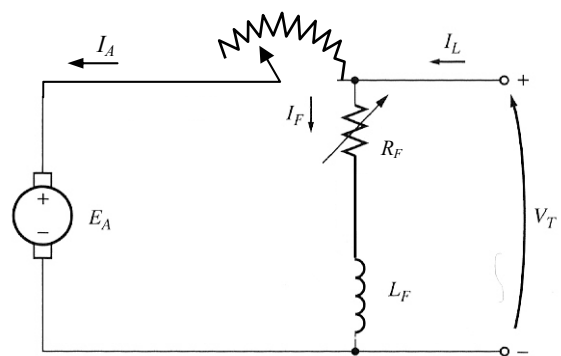
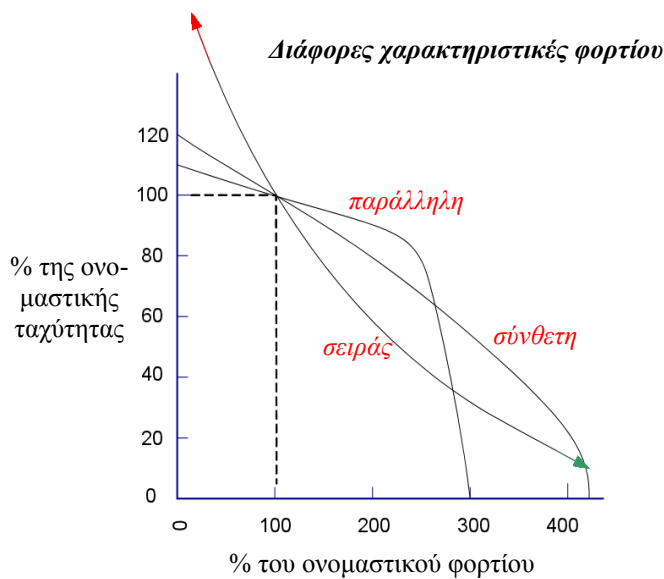
ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΡ

Τη στιγμή που ένας κινητήρας ΣΡ (π.χ. παράλληλης διέγερσης) αρχίζει να περιστρέφεται, επειδή η ταχύτητα περιστροφής είναι μηδενική, αντίστοιχα μηδενική είναι και η τάση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του ($E_A = 0$). Συνεπώς, τότε το ρεύμα του οπλισμού παίρνει πολύ μεγάλη τιμή ($I_A = V_T / R_A$), δεδομένου ότι η αντίσταση του οπλισμού είναι αρκετά μικρή. Συγκεκριμένα, το ρεύμα μπορεί να πάρει τιμές που υπερβαίνουν μέχρι και 20 φορές την τιμή του ρεύματος υπό πλήρη φόρτιση, με συνέπεια την αυξημένη πιθανότητα βλάβης του κινητήρα, ακόμη και αν αυτό το εξαιρετικά μεγάλο ρεύμα εμφανιστεί για μικρό χρονικό διάστημα. Η λύση στο συγκεκριμένο πρό-

βλημα είναι η εισαγωγή μιας **αντίστασης εκκίνησης** σε σειρά με το τύλιγμα οπλισμού. Αν, για παράδειγμα, θεωρηθεί πως η μέγιστη επιτρεπτή τιμή του ρεύματος δεν μπορεί να ξεπερνά το 50% του ονομαστικού, η τιμή της αντίστασης εκκίνησης θα πρέπει να είναι ίση με

$$R_{εκκ} = \frac{V_T}{1.5I_{ον}} - R_A.$$

Η αντίσταση εκκίνησης δεν παραμένει μόνιμα στον κινητήρα (τόσο λόγω απωλειών, όσο και λόγω της επίδρασής της στη χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας) και απομακρύνεται, όταν ο κινητήρας αποκτήσει ικανοποιητική ταχύτητα. Στην πράξη, η αντίσταση εκκίνησης είναι μεταβλητή και μειώνεται σταδιακά, έτσι ώστε να επιτευχθεί σταθερό ρεύμα και, συνεπώς, σταθερή ροπή κατά την εκκίνηση, περιορίζοντας τη συνολική της διάρκεια της διαδικασίας.



Κινητήρας παράλληλης διέγερσης με αντίσταση εκκίνησης