

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

1) Εκκίνηση κινητήρα

Κινητήρας ξένης διέγερσης $V_T = 230 \text{ V}$ έχει αντίσταση τυμπάνου $R_A = 0,3 \Omega$ και λειτουργεί στις $n = 1200 \text{ rpm}$ με ρεύμα τυμπάνου $I_A = 50 \text{ A}$, που είναι και η ονομαστική του τιμή.

- 1) Αν το φορτίο αυξηθεί και το ρεύμα τυμπάνου φτάσει στα $I_A = 60 \text{ A}$, με τι ταχύτητα θα περιστρέφεται ο κινητήρας?
- 2) Αν το φορτίο μειωθεί και το ρεύμα τυμπάνου πέσει στα $I_A = 25 \text{ A}$, με τι ταχύτητα θα περιστρέφεται ο κινητήρας?
- 3) Αν αποπειραθούμε να εκκινήσουμε τον κινητήρα χωρίς βοηθητική αντίσταση εκκίνησης ποια θα είναι η τιμή του ρεύματος τυμπάνου τη στιγμή που θα κλείσουμε το διακόπτη?
- 4) Αν το ρεύμα τυμπάνου δεν πρέπει να ξεπεράσει την ονομαστική του τιμή παραπάνω από 1,5 φορές, τι βοηθητική αντίσταση πρέπει να συνδέσουμε σε σειρά κατά την εκκίνηση?

Λύση

Οι εξισώσεις που ισχύουν κατά τη λειτουργία της μηχανής είναι $E = K\Phi\omega$ και $V_T = E + I_A R_A$.

Επειδή η διέγερση είναι ανεξάρτητη η μαγνητική ροή Φ διατηρείται σταθερή.

$$1) \text{ Αρχικά } E = V_T - I_A R_A = 230 - 50 \cdot 0,3 \Rightarrow E = 215 \text{ V}$$

$$\text{Τελικά, όταν το ρεύμα τυμπάνου γίνει } I'_A = 60 \text{ A: } E' = V_T - I'_A R_A = 230 - 60 \cdot 0,3 \Rightarrow E' = 212 \text{ V}$$

Επειδή η ταχύτητα είναι ανάλογη με την επαγωγική τάση,

$$E = K\Phi\omega = K\Phi \frac{60}{2\pi} n = K\Phi n$$

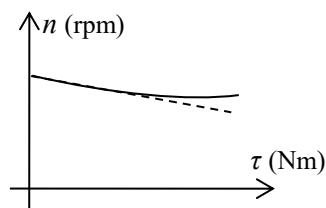
όταν η μαγνητική ροή Φ διατηρείται σταθερή, οι στροφές του κινητήρα θα μειωθούν ανάλογα με την επαγωγική τάση

$$\frac{E'}{E} = \frac{K\Phi n'}{K\Phi n} \Rightarrow n' = \frac{E'}{E} n \Rightarrow n' = \frac{212}{215} 1200 \Rightarrow n' = 1.183 \text{ rpm}$$

2) Παρόμοια

$$\frac{E'}{E} = \frac{K\Phi n'}{K\Phi n} \Rightarrow n'' = \frac{E''}{E} n \Rightarrow n'' = \frac{230 - 25 \cdot 0,3}{215} 1200 = \frac{222,5}{215} 1200 \Rightarrow n'' = 1.242 \text{ rpm}$$

Η ταχύτητα αυξομειώνεται ελαφρώς ανάλογα με το φορτίο όπως αναμένουμε από τη χαρακτηριστική καμπύλη n vs. τ του κινητήρα. Επειδή δεν έχουμε λάβει υπόψη την αντίδραση του σπλισμού (μείωση της Φ από το μαγνητικό πεδίο του δρομέα) η χαρακτηριστική καμπύλη του κινητήρα είναι η διακεκομμένη του σχήματος δίπλα. Ευθεία με μικρή κλίση προς τα κάτω



$$3) \text{ Το ρεύμα τυμπάνου κατά τη λειτουργία δίνεται από τον τύπο: } I_A = \frac{V_T - E}{R_A}$$

Κατά τη στιγμή της εκκίνησης όμως, δηλαδή κατά το διάστημα που ο κινητήρας ξεκινάει να περιστρέφεται και έχει μηδέν ή πολύ μικρή ταχύτητα, δεν έχει αναπτυχθεί ακόμα επαγωγική τάση E

, δηλ. $E=0$. Οπότε το ρεύμα αρχικά θα είναι $I_{A \text{ start}} = \frac{V_T - 0}{R_A} = \frac{230}{0,3} = 767 \text{ A}$. Αυτή είναι μια πολύ

μεγάλη τιμή, πάνω από 10 φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική του τιμή, και θα καταστρέψει τον κινητήρα (τα χάλκινα σύρματα των τυλιγμάτων του δρομέα θα λιώσουν ή θα λιώσει έστω το μονωτικό βερνίκι που δεν τα αφήνει να έρθουν σε επαφή και θα βραχυκυκλωθούν).

Για το σκοπό αυτό πρέπει κατά την εκκίνηση να υπάρχει πρόσθετη βοηθητική αντίσταση που θα εμποδίσει την ανάπτυξη τόσο μεγάλου ρεύματος στο τύμπανο και η οποία αφού αναπτυχθεί η

απαραίτητη επαγωγική τάση E , αφαιρείται από το κύκλωμα με κατάλληλο μηχανισμό (π.χ. ρυθμιστική).

4) Κατά την εκκίνηση με βοηθητική αντίσταση $I_{A \text{ start}} = \frac{V_T}{R_A + R_S}$

$$\text{Θέλουμε } I_{A \text{ start}} \leq 1,5 \cdot I_{An} \Rightarrow \frac{V_T}{R_A + R_S} \leq 1,5 \cdot I_{An} \Rightarrow R_S \geq \frac{V_T}{1,5 \cdot I_{An}} - R_A = \frac{230}{1,5 \cdot 50} - 0,3 \Rightarrow \boxed{R_S \geq 2,77 \Omega}$$

Χρειαζόμαστε βοηθητική αντίσταση τουλάχιστον ίση με $2,77 \Omega$ ώστε το ρεύμα τυμπάνου στον κινητήρα να μην ξεπεράσει την ονομαστική του τιμή 50 A κατά μιάμιση φορά 75 A .

2) Αντίσταση εκκίνησης

Θεωρήστε ένα κινητήρα με $P_n = 10 \text{ Hp}$ και αντίσταση πηνίου τυμπάνου $R_A = 0,5 \Omega$. Στον κινητήρα παρέχεται τάση εισόδου $V_T = 200 \text{ V}$. Η ονομαστική τιμή του ρεύματος τυμπάνου στο πλήρες φορτίο είναι $I_{An} = 50 \text{ A}$. Αν κατά την εκκίνηση το ρεύμα τυμπάνου πρέπει να περιοριστεί στο 200% της ονομαστικής του τιμής να βρείτε την απαιτούμενη βοηθητική αντίσταση εκκίνησης R_S που πρέπει να έχουμε συνδέσει σε σειρά με το τύμπανο.

Λύση

Όποια και να είναι η διέγερση του κινητήρα το ρεύμα τυμπάνου θα δίνεται από τον τύπο

$$I_A = \frac{V_T - E}{R_A}$$

Τη στιγμή της εκκίνησης (Start) του κινητήρα δεν υπάρχει επαγωγική τάση, οπότε το ρεύμα εκκίνησης

$$I_{AS} = \frac{V_T}{R_A}$$

θα είναι πολύ μεγάλο και πιθανώς να καταστρέψει τη μηχανή

$$I_{AS} = \frac{V_T}{R_A} = \frac{200}{0,5} = 400 \text{ A} = 8 \cdot 50 \text{ A} = 800\% \cdot I_{An}$$

Για να αποφευχθεί αυτό συνδέεται σε σειρά με το τύμπανο μια μεταβλητή αντίσταση R_S την οποία αφού ξεκινήσει η μηχανή γυρίζουμε στο μηδέν. Άρα το ρεύμα εκκίνησης δίνεται από τον τύπο

$$I_{AS} = \frac{V_T}{R_A + R_S}$$

Αν θέλουμε το ρεύμα εκκίνησης να μην ξεπεράσει το 200% του ονομαστικού ρεύματος της μηχανής δηλαδή $I_{AS} = 2 \cdot I_{An}$ λύνουμε την παραπάνω εξίσωση για να βρούμε την R_S .

$$R_S = \frac{V_T}{I_{AS}} - R_A = \frac{V_T}{2 \cdot I_{An}} - R_A = \frac{200}{2 \cdot 50} - 0,5 \Rightarrow R_S = 1,5 \Omega$$

3) Άμεσες επιπτώσεις μείωσης της μαγνητικής ροής σε κινητήρα

Κινητήρας ξένης διέγερσης $V_T = 220 \text{ V}$ έχει αντίσταση τυμπάνου $R_A = 0,2 \Omega$ και για συγκεκριμένο φορτίο το ρεύμα τυμπάνου είναι $I_A = 30 \text{ A}$. Ποιο είναι το άμεσο αποτέλεσμα στην ροπή που αναπτύσσεται στον κινητήρα αν η ροή του μαγνητικού πεδίου μειωθεί κατά 3% ;

Λύση

Η ροπή που αναπτύσσεται στον κινητήρα για ρεύμα τυμπάνου $I_A = 30 \text{ A}$ δίνεται από τον τύπο (δύναμη Laplace)

$$\tau = K\Phi I_A = 30 \cdot K\Phi$$

ενώ η επαγωγική τάση που αναπτύσσεται στο τύμπανο είναι

$$E = V_{in} - I_A R_A = 220 - 30 \cdot 0,2 \Rightarrow E = 214 \text{ V} \quad \text{και} \quad E = K\Phi\omega$$

Όταν η μαγνητική ροή γίνει $\Phi' = 0,97 \cdot \Phi$, η επαγωγική τάση θα μειωθεί και αυτή ανάλογα κατά 3% στο 97% της τιμής της, αφού η ταχύτητα ω δεν μπορεί να αλλάξει στιγμιαία. Οπότε η νέα επαγωγική τάση θα είναι : $E' = 0,97 \cdot E = 0,97 \cdot 214 \Rightarrow E' = 207,58 \text{ V}$

και το νέο ρεύμα τυμπάνου θα είναι

$$I'_A = \frac{V_T - E'}{R_A} = \frac{220 - 207,58}{0,2} \Rightarrow I'_A = 62,1 \text{ A}$$

Η νέα ροπή θα είναι $\tau' = K\Phi'I'_A = 62,1 \cdot 0,97 \cdot K\Phi \Rightarrow \tau' = 60,24 \cdot K\Phi$

$$\text{Άρα } \frac{\tau'}{\tau} = \frac{60,24 \cdot K\Phi}{30 \cdot K\Phi} \Rightarrow \frac{\tau'}{\tau} = 2,008$$

Η νέα ροπή αυξάνεται αρχικά (σχεδόν στιγμιαία) και θα είναι 2 φορές μεγαλύτερη από την παλιά (100% αύξηση).

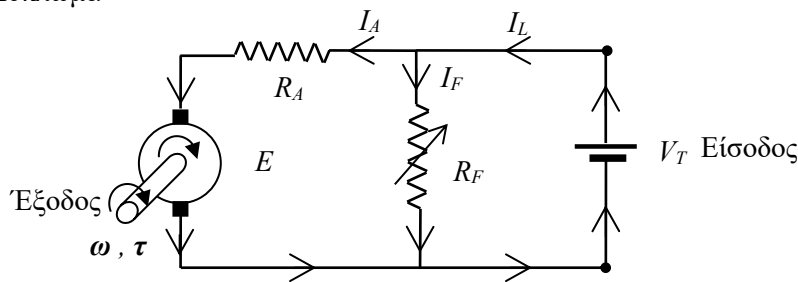
Οι αρχικές (στιγμιαίες) αυτές μεταβολές θα εξελιχθούν και θα ισορροπήσουν σε νέες σταθερές τιμές όπως περιγράφεται παρακάτω. Η αυξημένη ροπή του κινητήρα γίνεται τώρα μεγαλύτερη της ροπής του φορτίου που εφαρμοζόταν εκείνη τη στιγμή και άρα θα προκαλέσει επιτάχυνση. Η ταχύτητα αυξάνεται σε μεγαλύτερη τιμή. Αυτό προκαλεί αύξηση της επαγωγικής τάσης και άρα μείωση του ρεύματος τυμπάνου και άρα της παραγόμενης ροπής. Η ροπή θα μειωθεί έως οι ροπές κινητήρα και φορτίου να ισορροπούν πάλι και ο κινητήρας θα γυρίζει με σταθερή ταχύτητα που είναι όμως μεγαλύτερη από πριν.

4) Μείωση μαγνητικής ροής σε κινητήρα παράλληλης διέγερσης

Κινητήρας παράλληλης διέγερσης ($V_F = V_T$) έχει αντίσταση τυμπάνου $R_A = 0,25 \Omega$ λειτουργεί με τάση εισόδου $V_T = 250 \text{ V}$, περιστρέφεται με ταχύτητα $n = 1500 \text{ rpm}$ και παράγει στο εσωτερικό του επαγωγική τάση $E = 245 \text{ V}$. Ρυθμίζοντας την αντίσταση του πηνίου παράλληλης διέγερσης R_F μεταβάλλουμε το ρεύμα διέγερσης $I_F = V_F / R_F = V_T / R_F$ και άρα τη μαγνητική ροή $\Phi = kI_F$. Ποιες θα είναι οι επιπτώσεις στο ρεύμα οπλισμού, στη ροπή και στην ταχύτητα του κινητήρα αν η μαγνητική ροή μειωθεί κατά 1% κατά 10% και κατά 50% αντίστοιχα?

Λύση

Κύκλωμα



Εξισώσεις	Μαγνητικές	$E = K\Phi\omega$, $\tau = K\Phi I_A$,	$\Phi = kI_F$
	Ηλεκτρικές	$I_L = I_F + I_A$, $V_T = E + I_A R_A$,	$P_{in} = V_T I_L$
	Μηχανικές	$\omega = \frac{2\pi}{60} n$,	$P_{out} = \tau\omega$

Περίπτωση 1% Η επαγωγική τάση θα μειωθεί στιγμιαία επίσης κατά 1% καθώς είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής $E = K\Phi n$ (η ταχύτητα n δεν θα αλλάξει στιγμιαία)
 $\Phi' = 0,99\Phi$

$$E' = K\Phi'\omega = 0,99 \cdot K\Phi\omega = 0,99 \cdot 245 = 242,55 \text{ V}$$

$$\text{Το ρεύμα τυμπάνου που ήταν αρχικά } I_A = \frac{V_T - E}{R_A} = \frac{250 - 245}{0,25} = \frac{5}{0,25} = 20 \text{ A}$$

$$\text{θα αυξηθεί σε } I'_A = \frac{V_T - E'}{R_A} = \frac{250 - 242,55}{0,25} = \frac{7,45}{0,25} = 29,8 \text{ A}$$

$$\frac{I'_A}{I_A} = \frac{29,8}{20} \Rightarrow I'_A = 1,49 I_A$$

(αγνοούμε την αντίδραση οπλισμού δηλαδή τη μείωση της μαγνητικής ροής λόγω αυτής της αύξησης του ρεύματος τυμπάνου)

Η αρχική αύξηση του ρεύματος τυμπάνου είναι πολύ μεγαλύτερη από το 1% της μαγνητικής ροής και είναι ίση με 49%

Οπότε και η ροπή, που δίνεται από τον τύπο $\tau = K\Phi I_A$, θα αυξηθεί, καθώς η αρχική μείωση της μαγνητικής ροής υπερκαλύπτεται από την αρχική αύξηση του ρεύματος τυμπάνου : $\tau' = K\Phi' I'_A = 0,99 \cdot 1,49 \cdot K\Phi I_A = 1,4751 \cdot \tau$

Η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας αυξάνεται περίπου κατά 47,5 %. Όμως μέχρι εκείνη τη στιγμή η ροπή του κινητήρα εξισορροπούσε τη ροπή του φορτίου $\tau_{\text{αναπτ}} = \tau_{\text{φορτ}}$ ώστε ο κινητήρας να γυρίζει και να μετακινεί το φορτίο με σταθερή ταχύτητα (αγνοούμε τριβές στον άξονα και παίρνουμε τη ροπή που αναπτύσσεται από επαγωγή ίση με την τελική ροπή εξόδου στον άξονα του κινητήρα)

Επειδή τώρα $\tau'_{\text{αναπτ}} > \tau_{\text{φορτ}}$ ο κινητήρας θα επιταχύνει και θα ανέβει σε μεγαλύτερη ταχύτητα.

Αυτό θα προκαλέσει αύξηση της παραγόμενης επαγωγικής τάσης και επακόλουθα μείωση του ρεύματος τυμπάνου και της ροπής μέχρι η ροπή να γίνει πάλι ίση με τη ροπή του φορτίου και ο κινητήρας να περιστρέφεται πάλι με σταθερή αλλά μεγαλύτερη ταχύτητα.

$$\tau_{\text{αναπτ}} = K\Phi I_A = \tau_{\text{φορτ}}$$

$$\tau_{\text{φορτ}} = \tau'_{\text{αναπτ}} \Rightarrow \tau_{\text{φορτ}} = K\Phi' I''_A \Rightarrow I''_A = \frac{\tau_{\text{φορτ}}}{K\Phi'} = \frac{K\Phi I_A}{K\Phi'} = \frac{1}{0,99} I_A \Rightarrow I''_A = 1,01 \cdot I_A = 1,01 \cdot 20 = 20,2 \text{ A}$$

Το ρεύμα τυμπάνου θα σταθεροποιηθεί τελικά σε 1% αυξημένη τιμή από την αρχική. Η τελική επαγωγική τάση θα είναι

$$E'' = V_T - I''_A R_A = 250 - 20,2 \cdot 0,25 = 244,95 \text{ V}$$

$$\frac{E''}{E} = \frac{244,95}{245} = 0,9998 \Rightarrow E'' = 0,9998 \cdot E, \text{ μείωση κατά } 0,02 \% \text{ αμελητέα}$$

Η τελική ταχύτητα θα βρεθεί από :

$$E'' = K\Phi'\omega'' \Rightarrow \omega'' = \frac{E''}{K\Phi'} = \left(\frac{0,9998}{0,99} \right) \frac{E}{K\Phi} = 1,01 \cdot \omega \Rightarrow n'' = 1,01 \cdot n \Rightarrow$$

$$n'' = 1,01 \cdot 1500 = 1515 \text{ rpm} \quad \text{μικρή αύξηση στροφών κατά } 1 \%$$

Περίπτωση 10%

$$\Phi' = 0,90 \cdot \Phi$$

$$E' = K\Phi'\omega = 0,90 \cdot K\Phi\omega = 0,90 \cdot E = 0,90 \cdot 245 = 220,5 \text{ V} \quad \text{αρχική μείωση κατά } 10\%$$

$$I'_A = \frac{V_T - E'}{R_A} = \frac{250 - 220,5}{0,25} = \frac{29,5}{0,25} = 118 \text{ A}$$

$$\frac{I'_A}{I_A} = \frac{118}{20} \Rightarrow I'_A = 5,9 \cdot I_A \quad \text{αρχική αύξηση κατά } 90\%$$

(αγνοούμε την αντίδραση οπλισμού δηλαδή τη μείωση της μαγνητικής ροής λόγω αυτής της αύξησης του ρεύματος τυμπάνου)

$$\tau' = K\Phi'I'_A = 0,90 \cdot 5,9 \cdot K\Phi I_A = 5,31 \cdot \tau \quad \text{αρχική αύξηση κατά 431\%}$$

$\tau'_{\text{αναπτ}} > \tau_{\text{φορτ}} \Rightarrow \sum \tau \neq 0 \Rightarrow \text{Επιτάχυνση} \rightarrow \text{αύξηση στροφών} \rightarrow \text{αύξηση } E \rightarrow \text{μείωση } I_A \rightarrow \text{μείωση ροπής}$
 έως εξίσωσής της πάλι με τη ροπή φορτίου

$$\tau_{\text{αναπτ}} = K\Phi I_A = \tau_{\text{φορτ}} = \tau'' = K\Phi'I''_A \Rightarrow$$

$$I''_A = \frac{\tau_{\text{φορτ}}}{K\Phi'} = \frac{K\Phi I_A}{K\Phi'} = \frac{\Phi}{\Phi'} I_A = \frac{1}{0,90} I_A \Rightarrow I''_A = 1,111 \cdot I_A = 1,111 \cdot 20 \Rightarrow I''_A = 22,22 \text{ A}$$

Το ρεύμα τυμπάνου θα σταθεροποιηθεί τελικά σε αυξημένη κατά 11,1 % τιμή από την αρχική. Η τελική επαγωγική τάση θα είναι

$$E'' = V_T - I''_A R_A = 250 - 22,22 \cdot 0,25 = 244,45 \text{ V}$$

$$\frac{E''}{E} = \frac{244,45}{245} \Rightarrow E'' = 0,9977 \cdot E, \quad \text{μεταβολή κατά } \frac{\Delta E}{E} 100\% = \frac{E'' - E}{E} 100\% = -0,23\%$$

Η τελική ταχύτητα θα βρεθεί από :

$$E'' = K\Phi'\omega'' \Rightarrow \omega'' = \frac{E''}{K\Phi'} = \left(\frac{0,9977}{0,90} \right) \frac{E}{K\Phi} = 1,1086 \cdot \omega \Rightarrow n'' = 1,1086 \cdot n \Rightarrow$$

$$n'' = 1,1086 \cdot 1500 = 1663 \text{ rpm} \quad \text{αύξηση στροφών κατά 10,86 \%}$$

Περίπτωση 50%

$$\Phi' = 0,50 \cdot \Phi$$

$$E' = K\Phi'\omega = 0,50 \cdot K\Phi\omega = 0,50 \cdot E = 0,50 \cdot 245 = 122,5 \text{ V} \quad \text{αρχική μείωση κατά 50\%}$$

$$I'_A = \frac{V_T - E'}{R_A} = \frac{250 - 122,5}{0,25} = \frac{127,5}{0,25} = 510 \text{ A}$$

$$\frac{I'_A}{I_A} = \frac{510}{20} \Rightarrow I'_A = 25,5 \cdot I_A \quad \text{αρχική αύξηση κατά } \frac{\Delta I_A}{I_A} \cdot 100\% = \frac{I'_A - I_A}{I_A} \cdot 100\% = 24,5 \cdot 100\% = 2.450\%$$

(αγνοούμε την αντίδραση οπλισμού δηλαδή τη μείωση της μαγνητικής ροής λόγω αυτής της αύξησης του ρεύματος τυμπάνου)

$$\tau' = K\Phi'I'_A = 0,50 \cdot 25,5 \cdot K\Phi I_A = 12,75 \cdot \tau \quad \text{αύξηση κατά 1.275 \%}$$

$\tau'_{\text{αναπτ}} > \tau_{\text{φορτ}} \Rightarrow \sum \tau \neq 0 \Rightarrow \text{Επιτάχυνση} \rightarrow \text{αύξηση στροφών} \rightarrow \text{αύξηση } E \rightarrow \text{μείωση } I_A \rightarrow \text{μείωση ροπής}$
 έως εξίσωσής της πάλι με τη ροπή φορτίου

$$\tau_{\text{αναπτ}} = K\Phi I_A = \tau_{\text{φορτ}} = \tau'' = K\Phi'I''_A \Rightarrow$$

$$I''_A = \frac{\tau_{\text{φορτ}}}{K\Phi'} = \frac{K\Phi I_A}{K\Phi'} = \frac{1}{0,50} I_A \Rightarrow I''_A = 2I_A = 2 \cdot 20 = 40 \text{ A}$$

Το ρεύμα τυμπάνου θα σταθεροποιηθεί τελικά σε αυξημένη κατά 100 % τιμή από την αρχική. Η τελική επαγωγική τάση θα είναι

$$E'' = V_T - I''_A R_A = 250 - 40 \cdot 0,25 = 240 \text{ V}$$

$$\frac{E''}{E} = \frac{240}{245} \Rightarrow E'' = 0,9796 \cdot E, \quad \text{μείωση κατά 2,04 \%}$$

Η τελική ταχύτητα θα βρεθεί από :

$$E'' = K\Phi'\omega'' \Rightarrow \omega'' = \frac{E''}{K\Phi'} = \left(\frac{0,9796}{0,50} \right) \frac{E}{K\Phi} = 1,9592 \cdot \omega \Rightarrow n'' = 1,9592 \cdot n \Rightarrow$$

$$n'' = 1,9592 \cdot 1500 = 2939 \text{ rpm} \quad \text{αύξηση στροφών κατά 95,92 \%}$$

Συγκεντρωτικά

Μεταβολή Φ	Μεταβολή I_A	Μεταβολή E	Μεταβολή n
- 1 %	+ 1 %	- 0,02 %	+ 1 %
- 10 %	+ 11,1 %	- 0,23 %	+ 10,86 %

- 50 %	+ 100 %	- 2,04 %	+ 95,92 %
--------	---------	----------	-----------

[**Ακραία Περίπτωση: αύξηση της αντίστασης διέγερσης στο άπειρο, δηλαδή διακοπή του κυκλώματος διέγερσης.** Τότε η Φ μειώνεται απότομα στην τιμή της παραμένουσας μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού πυρήνα των πόλων $\Phi_{\text{παρ}}$ που είναι πολύ μικρή και ανάλογα μειώνεται και η επαγωγική τάση E , σχεδόν μηδενίζεται. Η αύξηση του ρεύματος τυμπάνου είναι πολύ μεγάλη όπως και η αύξηση της αναπτυσσόμενης ροπής και της ταχύτητας. Η επακόλουθη αύξηση της επαγωγικής τάσης που θα προκαλέσει μείωση του ρεύματος τυμπάνου και της ροπής, κατά πάσα πιθανότητα δεν θα προλάβει να εξισορροπήσει τις ροπές πριν ο κινητήρας που διαρκώς επιταχύνεται καταστραφεί από μεγάλη ταχύτητα (συνήθως καταστρέφονται αν δεν προλάβουμε να κλείσουμε το διακόπτη της τάσης εισόδου).]

5) Υπολογισμός και έλεγχος ταχύτητας κινητήρα διέγερσης σειράς

Οι ονομαστικές τιμές κινητήρα διέγερσης σειράς είναι $P_{\text{out}}=25 \text{ Hp}$, $V_T=250 \text{ V}$ και διαθέτει αντίσταση τυμπάνου $R_A=0,1 \Omega$ και αντίσταση διέγερσης σειράς $R_F=0,05 \Omega$. Όταν λειτουργεί θεωρείστε ότι υπάρχει και πτώση τάσης στις ψήκτρες ίση με $V_B=3 \text{ V}$. Όταν ο κινητήρας τραβάει ρεύμα εισόδου $I_L=85 \text{ A}$ γυρίζει με ταχύτητα $n=600 \text{ rpm}$.

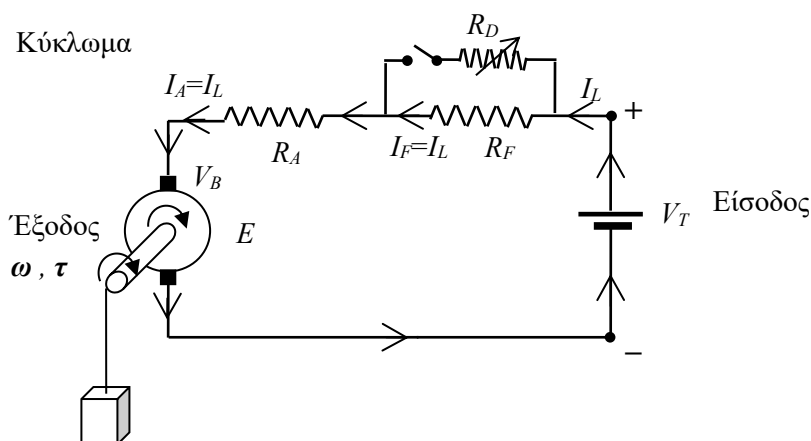
A) Να υπολογιστεί η ταχύτητά του κινητήρα όταν το ρεύμα εισόδου γίνει 100 A και 40 A αντίστοιχα. (Πρακτικά το ρεύμα εισόδου που είναι ίσο με το ρεύμα τυμπάνου μπορεί να αλλάζει χωρίς να αλλάζει η τάση εισόδου με μια ρυθμιστική αντίσταση παράλληλα με την πηγή)

B) Να υπολογιστούν οι αντίστοιχες ταχύτητες αν συνδέσουμε μια ρυθμιστική αντίσταση παράλληλα (diverter) με την αντίσταση διέγερσης όταν η ρυθμιστική αντίσταση έχει τιμή $R_D=0,05 \Omega$

Γ) Να υπολογιστεί η απόδοση του κινητήρα και το κλάσμα φορτίου στο οποίο λειτουργεί για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις (Αγνοήστε την αντίδραση οπλισμού, επίσης θεωρήστε ότι η μηχανή λειτουργεί στο γραμμικό μέρος της καμπύλης μαγνήτισης και αγνοήστε μηχανικές απώλειες και απώλειες πυρήνα).

$$1 \text{ Hp} = 0,7457 \text{ kW}$$

Λύση



Εξισώσεις (με το διακόπτη ανοικτό)

$$\text{Μαγνητικές } E = K\Phi\omega, \tau = K\Phi I_A, \Phi = kI_F$$

$$\text{Ηλεκτρικές } I_L = I_F = I_A \equiv I, V_T = E + V_B + I \cdot (R_A + R_F), P_{\text{in}} = V_T I_L$$

$$\text{Μηχανικές } \omega = \frac{2\pi}{60} n, P_{\text{out}} = \tau\omega$$

A) Η μεταβολή του ρεύματος εισόδου επηρεάζει ανεξάρτητα τόσο την επαγωγική τάση

$E = V_T - V_B - I \cdot (R_A + R_F)$ όσο και τη μαγνητική ροή $\Phi = kI$. Οπότε για να συνεχίσει να ισχύει η $E = K\Phi\omega$, θα αλλάξει η ταχύτητα του κινητήρα ω .

$$I_0 = 85 \text{ A} \quad E_0 = V_T - V_B - I_0 \cdot (R_A + R_F) = 250 - 3 - 85 \cdot (0,1 + 0,05) = 234,3 \text{ V}$$

$$I_1 = 100 \text{ A} \quad E_1 = V_T - V_B - I_1 \cdot (R_A + R_F) = 250 - 3 - 100 \cdot (0,1 + 0,05) = 232 \text{ V}$$

$$I_2 = 40 \text{ A} \quad E_2 = V_T - V_B - I_2 \cdot (R_A + R_F) = 250 - 3 - 40 \cdot (0,1 + 0,05) = 241 \text{ V}$$

Παίρνουμε αναλογίες

$$\left. \begin{aligned} E &= K\Phi\omega = KkI_F \frac{2\pi}{60} n \\ E_0 &= K\Phi_0\omega_0 = KkI_{F0} \frac{2\pi}{60} n_0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{n}{n_0} = \frac{E}{E_0} \frac{I_{F0}}{I_F} \Rightarrow \boxed{n = n_0 \frac{E}{E_0} \frac{I_{F0}}{I_F}} \quad \text{οπότε}$$

$$n_1 = 600 \frac{232}{234,3} \frac{85}{100} = 505 \text{ rpm} \quad \text{και} \quad n_2 = 600 \frac{241}{234,3} \frac{85}{40} = 1312 \text{ rpm}$$

Β) Κλείνοντας το διακόπτη μέρος του ρεύματος εισόδου θα περάσει από τη ρυθμιστική αντίσταση (diverter) παρακάμπτοντας το πηνίο διέγερσης.

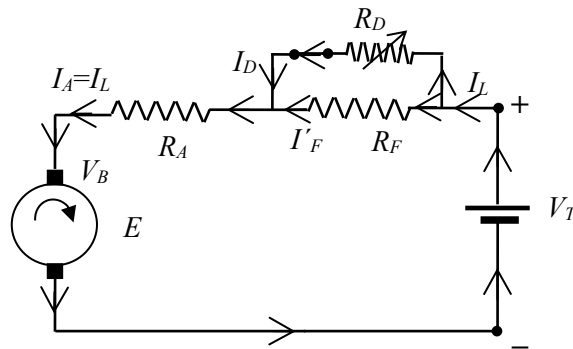
$$I_L = I'_F + I_D = I_A \equiv I$$

Το ρεύμα διέγερσης θα μειωθεί και ανάλογα θα μειωθεί η μαγνητική ροή.

$$\Phi = kI'_F \quad \text{όπου} \quad I'_F = \frac{R_D}{R_F + R_D} \cdot I \quad \text{από διαιρέτη ρεύματος}$$

Επίσης θα μειωθεί η επαγωγική τάση αφού θα μειωθεί η ολική αντίσταση του κυκλώματος

$$V_T = E + V_B + I \cdot (R_A + R_F \parallel R_D) \quad \text{όπου} \quad R_F \parallel R_D = \frac{R_F \cdot R_D}{R_F + R_D}$$



Επειδή βάλαμε τη ρυθμιστική αντίσταση σε τιμή ίση με την αντίσταση διέγερσης σειράς $R_D = 0,05 \Omega = R_F$ το ρεύμα διέγερσης θα μειωθεί προφανώς στο μισό $I'_F = I/2$ (θα μοιραστεί στις δύο ίσες αντιστάσεις). Για τυχαία τιμή της R_D χρησιμοποιούμε τον τύπο του διαιρέτη ρεύματος για να υπολογίσουμε το ρεύμα διέγερσης.

$$R_F \parallel R_D = \frac{R_F \cdot R_D}{R_F + R_D} = \frac{0,05 \cdot 0,05}{0,05 + 0,05} = 0,025 \Omega \quad I'_F = \frac{R_D}{R_F + R_D} \cdot I = \frac{0,05}{0,05 + 0,05} \cdot I = \frac{1}{2} \cdot I$$

Αρχικά λοιπόν $I_{0L} = I_{0F} = I_{0A} \equiv I = 85 \text{ A}$ και $E_0 = 234,3 \text{ V}$

Όταν αλλάξουμε και το ρεύμα εισόδου και το ρεύμα διέγερσης παίρνουμε

$$I_1 = 100 \text{ A} \quad , \quad E = V_T - V_B - I_1 \cdot (R_A + R_F \parallel R_D) = 250 - 3 - 100 \cdot (0,1 + 0,025) = 234,5 \text{ V}$$

$$I_2 = 40 \text{ A} \quad , \quad E = V_T - V_B - I_2 \cdot (R_A + R_F \parallel R_D) = 250 - 3 - 40 \cdot (0,1 + 0,025) = 242 \text{ V}$$

Παίρνοντας πάλι αναλογίες καταλήγουμε στον ίδιο τύπο

$$n = n_0 \frac{E}{E_0} \frac{I_{F0}}{I_F} = n_0 \frac{E}{E_0} \frac{I_{F0}}{I/2}$$

$$n_1 = 600 \frac{334,5}{234,3} \frac{85}{100/2} = 1021 \text{ rpm}, \quad n_2 = 600 \frac{242}{234,3} \frac{85}{40/2} = 2634 \text{ rpm}$$

Γ) Η εισερχόμενη ισχύς είναι $P_{in} = V_T I_L = V_T I$.

Η εξερχόμενη ισχύς είναι $P_{out} = \tau \omega = (K \Phi I_A) \omega = (K \Phi \omega) I_A = E I_A = E I$

(Έχουμε αγνοήσει τις μηχανικές απώλειες ισχύος $P_{Mηχ}$, από την τριβή του άξονα στα έδρανα και των ψηκτρών στον συλλέκτη και από την αντίσταση αέρα στον ανεμιστήρα και στο δρομέα που περιστρέφονται. Επίσης έχουμε αγνοήσει τις απώλειες του σιδηρομαγνητικού πυρήνα του δρομέα $P_{Πορ}$ από δινορεύματα και υστέρηση επειδή διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα και αλλάζει ο προσανατολισμός του με το μαγνητικό πεδίο όπως περιστρέφεται. Αλλιώς θα έπρεπε να γράψουμε $P_{out} = \tau \omega - P_{Mηχ} - P_{Πορ}$. Οι ωμικές απώλειες χαλκού και πτώσης τάσης στις ψήκτρες λαμβάνονται υπόψη αφού $E = V_T - V_B - I R_A - I R_F \Rightarrow E I = V_T I - V_B I - I^2 R_A - I^2 R_F \Rightarrow P_{out} = P_{in} - P_B - P_A - P_F \Rightarrow P_{out} = P_{in} - P_{απωλ}$)

Ο βαθμός απόδοσης ορίζεται από τη σχέση : $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} 100\%$

Η ονομαστική ισχύς του κινητήρα είναι $P_n = 25 \text{ Hp} \cdot 0,7457 \text{ kW/HP} = 18,64 \text{ kW}$

Η ισχύς αυτή είναι η ιδανική ισχύς που μπορεί να παρέχει ο κινητήρας. Δηλαδή η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδίδει για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς να κινδυνεύει να καταστραφεί. Όταν ο κινητήρας αποδίδει αυτή την ισχύ λέμε ότι λειτουργεί στο πλήρες φορτίο. Για κάθε άλλη ισχύ υπολογίζουμε το αντίστοιχο ποσοστό φορτίου στο οποίο λειτουργεί: $\varphi = \frac{P_{out}}{P_n} 100\%$

Με το διακόπτη ανοιχτό

$$I_0 = 85 \text{ A} \quad E_0 = 234,3 \text{ V} \quad P_{in} = 250 \cdot 85 = 21,25 \text{ kW} \quad P_{out} = 234,3 \cdot 85 = 19,92 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{19,92}{21,25} 100\% = 93,74\% \quad \varphi = \frac{19,92}{18,64} 100\% = 106,9\%$$

Λειτουργεί λίγο πάνω από το πλήρες φορτίο με πολύ καλή απόδοση

$$I_1 = 100 \text{ A} \quad E_1 = 232 \text{ V} \quad P_{in} = 250 \cdot 100 = 25 \text{ kW} \quad P_{out} = 232 \cdot 100 = 23,2 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{23,2}{25} 100\% = 92,8\% \quad \varphi = \frac{23,2}{18,64} 100\% = 124,5\%$$

Λειτουργεί αρκετά πάνω από το πλήρες φορτίο, προσοχή! Η απόδοση έπεσε λίγο.

$$I_2 = 40 \text{ A} \quad E_2 = 241 \text{ V} \quad P_{in} = 250 \cdot 40 = 10 \text{ kW} \quad P_{out} = 241 \cdot 40 = 9,64 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{9,64}{10} 100\% = 96,4\% \quad \varphi = \frac{9,64}{18,64} 100\% = 51,7\%$$

Λειτουργεί περίπου στο μισό φορτίο. Πολύ καλή απόδοση αλλά παίρνουμε λίγη ισχύ

Με το διακόπτη κλειστό (diverter)

$$I_1 = 100 \text{ A} \quad E_1 = 234,5 \text{ V} \quad P_{in} = 250 \cdot 100 = 25 \text{ kW} \quad P_{out} = 234,5 \cdot 100 = 23,45 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{23,45}{25} 100\% = 93,8\% \quad \varphi = \frac{23,45}{18,64} 100\% = 125,8\%$$

Λειτουργεί πάλι αρκετά πάνω από το πλήρες φορτίο, προσοχή! Η απόδοση δεν μεταβλήθηκε

$$I_2 = 40 \text{ A} \quad E_2 = 242 \text{ V} \quad P_{in} = 250 \cdot 40 = 10 \text{ kW} \quad P_{out} = 242 \cdot 40 = 9,68 \text{ kW}$$

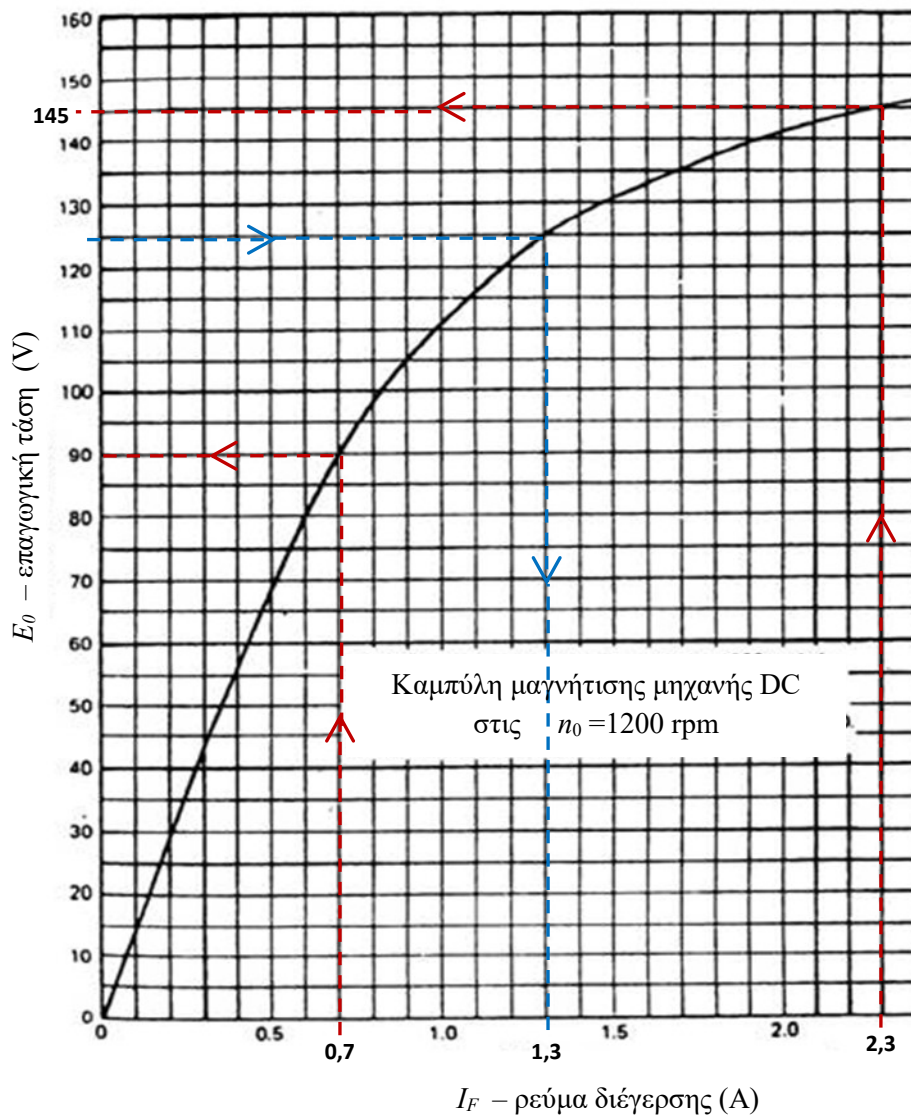
$$\eta = \frac{9,68}{10} 100\% = 96,8\% \quad \varphi = \frac{9,68}{18,64} 100\% = 51,9\%$$

Λειτουργεί πάλι περίπου στο μισό φορτίο. Η απόδοση πάλι δεν μεταβλήθηκε αισθητά, είναι πολύ καλή αλλά παίρνουμε λίγη ισχύ

Οπότε με την παράλληλη ρυθμιστική αντίσταση (diverter) έχουμε πετύχει διπλασιασμό της ταχύτητας χωρίς να έχουμε επηρεάσει την ενεργειακή απόδοση της μηχανής. Αυτό σημαίνει ότι μετακινούμε με διπλάσια ταχύτητα το μισό φορτίο από πριν.

6) Καμπύλη μαγνήτισης (ή καμπύλη κορεσμού)

Η καμπύλη μαγνήτισης μιας ηλεκτρικής μηχανής συνεχούς ρεύματος E vs. I_F για ταχύτητα $n_0 = 1.200 \text{ rpm}$ δίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση.



Η μηχανή έχει αντίσταση τυμπάνου $R_A = 0,2 \Omega$ και αντίσταση πηνίου παράλληλης διέγερσης $R_F = 50 \Omega$. Η μηχανή συνδέεται ως κινητήρας παράλληλης διέγερσης σε πηγή τάσης $V_T = 125 \text{ V}$ και το ρεύμα διέγερσης ρυθμίζεται με μεταβλητή αντίσταση σε σειρά με την R_F .

A) Αν το ρεύμα διέγερσης ρυθμιστεί στα $I_F=0,70$ A, τι ταχύτητα θα έχει ο κινητήρας όταν αναπτύσσει ροπή $\tau=30$ Nm ?

B) Αν το ρεύμα διέγερσης ρυθμιστεί στα $I_F=2,3$ A, τι ταχύτητα θα έχει ο κινητήρας όταν αναπτύσσει την ίδια ροπή $\tau=30$ Nm ?

Γ) Για κάποιο λόγο θέλω η μηχανή να μετακινεί φορτία με ταχύτητα $n=1100$ rpm . Αν το φορτίο που θέλω να μετακινήσω είναι $\tau=52$ N·m σε ποια τιμή θα πρέπει να ρυθμίσω το ρεύμα διέγερσης I_F ?

Δ) Ποια είναι η απόδοση του κινητήρα στις παραπάνω περιπτώσεις? (αγνοήστε απώλειες πυρήνα και μηχανικές απώλειες)

Λύση

A) Η μαγνητική ροή τώρα δεν θα είναι παντού ανάλογη με το ρεύμα διέγερσης $\Phi \neq kI_F$ αλλά μια πιο περίπλοκη συνάρτηση που δίνεται από την καμπύλη μαγνήτισης $\Phi = \Phi(I_F)$. Οι υπόλοιπες εξισώσεις ισχύουν και πρέπει να ικανοποιούνται ταυτόχρονα :

$$E = K\Phi\omega \quad (1), \quad \tau = K\Phi I_A \quad (2), \quad E = V_T - I_A R_A \quad (3)$$

A) Από την (1) βλέπουμε ότι οι στροφές είναι ανάλογες με την επαγωγική τάση άρα :

$$\left. \begin{aligned} E &= K\Phi(I_F)\omega = K\Phi(I_F)\frac{2\pi}{60}n \\ E_0 &= K\Phi(I_F)\omega_0 = K\Phi(I_F)\frac{2\pi}{60}n_0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{n}{n_0} = \frac{E}{E_0} \Rightarrow \boxed{n = n_0 \frac{E}{E_0}}$$

Την E_0 θα την βρούμε από την καμπύλη μαγνήτισης και την E από το ρεύμα τυμπάνου (3) που θα το βρούμε από τη ροπή (2). Επειδή το ρεύμα διέγερσης παραμένει σταθερό $I_F=0,70$ A και η μαγνητική ροή θα παραμένει σταθερή, άρα και η συνδυασμένη σταθερά $K\Phi$. Την υπολογίζουμε από τη σχέση $E_0 = K\Phi\omega_0$. Από την καμπύλη μαγνήτισης στις $n_0=1.200$ rpm βρίσκουμε ότι σε ρεύμα διέγερσης $I_F=0,70$ A αντιστοιχεί επαγωγική τάση $\boxed{E_0=90$ V}. οπότε :

$$E_0 = K\Phi\omega_0 \Rightarrow K\Phi = \frac{E_0}{\omega_0} = \frac{90 \text{ V}}{2\pi \cdot 1200 / 60 \text{ rad/s}} = \frac{9}{4\pi} \text{ V} \cdot \text{s} \Rightarrow \boxed{K\Phi = 0,7162 \text{ V} \cdot \text{s}}$$

$$\tau = K\Phi I_A \Rightarrow I_A = \frac{\tau}{K\Phi} = \frac{30 \text{ N} \cdot \text{m}}{0,7162 \text{ V} \cdot \text{s}} \Rightarrow \boxed{I_A = 41,9 \text{ A}}$$

Θυμίζουμε ότι $\text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$ και $\text{V} = \text{J/C}$ άρα $\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{V} \cdot \text{s}} = \frac{\text{J}}{\frac{\text{J}}{\text{C}} \cdot \text{s}} = \frac{\text{C}}{\text{s}} = \text{A}$

$$E = V_T - I_A R_A = 125 - 41,9 \cdot 0,2 \Rightarrow \boxed{E = 116,6 \text{ V}}$$

$$\text{Οπότε } n = n_0 \frac{E}{E_0} = 1200 \frac{116,6}{90} \Rightarrow \boxed{n = 1555 \text{ rpm}}$$

Ισοδύναμα θα μπορούσαμε να αντικαταστήσουμε τις (2) και (3) στην (1) και να βρούμε την χαρακτηριστική καμπύλη του κινητήρα που συνδέει την ταχύτητα με τη ροπή

$$E = K\Phi\omega \Rightarrow \omega = \frac{E}{K\Phi} = \frac{V_T}{K\Phi} - I_A \frac{R_A}{K\Phi} = \frac{V_T}{K\Phi} - \frac{\tau}{K\Phi} \frac{R_A}{K\Phi} \Rightarrow \boxed{\omega = \frac{V_T}{K\Phi} - \frac{R_A}{K^2\Phi^2} \cdot \tau}$$

Από όπου για $K\Phi = 0,7162 \text{ V} \cdot \text{s}$ που το υπολογίζουμε όπως πριν, παίρνουμε

$$\omega = \frac{125}{0,7162} - \frac{0,2}{(0,7162)^2} \cdot 30 = 162,8 \text{ rad/s}$$

$$n = \frac{60}{2\pi} \omega \Rightarrow n = 1555 \text{ rpm}$$

B) $I_F = 2,3 \text{ A} \xrightarrow{\text{καμπύλη μαγνήτισης}} E_0 = 145 \text{ V}$ στις $n_0 = 1200 \text{ rpm}$

$$E_0 = K\Phi\omega_0 \Rightarrow K\Phi = \frac{E_0}{\omega_0} = \frac{145 \text{ V}}{2\pi \cdot 1200 / 60 \text{ rad/s}} = \frac{29}{8\pi} \text{ V} \cdot \text{s} \Rightarrow \boxed{K\Phi = 1,154 \text{ V} \cdot \text{s}}$$

$$\omega = \frac{V_T}{K\Phi} - \frac{R_A}{K^2\Phi^2} \cdot \tau = \frac{125}{1,154} - \frac{0,2}{(1,154)^2} 30 \Rightarrow \boxed{\omega = 103,8 \text{ rad/s}}$$

$$n = \frac{60}{2\pi} \omega \Rightarrow \boxed{n = 991,3 \text{ rpm}}$$

[Επιβεβαιώνουμε ότι $E = K\Phi\omega = 1,154 \cdot 103,8 = 119,8 < 125 \text{ V} = V_T$.

$$\text{Επίσης } \tau = K\Phi I_A \Rightarrow I_A = \frac{\tau}{K\Phi} = \frac{30 \text{ N} \cdot \text{m}}{1,154 \text{ V} \cdot \text{s}} \Rightarrow I_A = 26 \text{ A}$$

$$E = V_T - I_A R_A = 125 - 26 \cdot 0,2 = 119,8 \text{ V}]$$

Όταν αυξάνεται η μαγνητική ροή ο κινητήρας μετακινεί το ίδιο φορτίο με μικρότερη ταχύτητα.

Γ) Με τους ίδιους τύπους εργαζόμαστε τώρα αντίστροφα. Από την E_0 θα βρούμε το ρεύμα διέγερσης I_F . Την E_0 θα την βρούμε από την $E_0 = E \frac{n_0}{n}$ Για να βρούμε την E χρησιμοποιούμε την (3)

$E = V_T - I_A R_A$. Το ρεύμα τυμπάνου το βρίσκουμε πολλαπλασιάζοντας τις (1) και (2):

$$\left. \begin{array}{l} K\Phi\omega = E \\ \tau = K\Phi I_A \end{array} \right\} \Rightarrow \tau\omega = EI_A \Rightarrow I_A = \frac{\tau\omega}{E}$$

Αυτή η εξίσωση δεν είναι τίποτα άλλο παρά η διατήρηση της ενέργειας. Η εισερχόμενη ηλεκτρική ισχύς στον δρομέα EI_A μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ $\tau\omega$.

Αντικαθιστώντας στην (1) καταλήγουμε σε μια δευτεροβάθμια εξίσωση για την E την οποία λύνουμε από τον γνωστό τύπο:

$$E = V_T - I_A R_A \Rightarrow E = V_T - \frac{\tau\omega}{E} R_A \Rightarrow \boxed{E^2 - V_T E + \tau\omega R_A = 0}$$

Η διακρίνουσα είναι $\Delta = V_T^2 - 4 \cdot 1 \cdot \tau\omega R_A = 10850,72$ και οι λύσεις

$$E = \frac{V_T \pm \sqrt{\Delta}}{2} = \frac{125 \pm 104,1668}{2} = 114,583 \text{ V} \text{ και } 5,21 \text{ V}$$

Η δεύτερη λύση απορρίπτεται ως φυσικώς απαράδεκτη (η επαγωγική τάση δεν μπορεί να πέσει τόσο πολύ από τα 125 V της πηγής καθώς αυτό θα σήμαινε ότι η πτώση τάσης συμβαίνει κυρίως πάνω στη μικρή αντίσταση του τυμπάνου 0,2 Ω που θα απαιτούσε τεράστιο ρεύμα τυμπάνου που θα έλιωνε όλη τη μηχανή)

$$\text{Οπότε } \boxed{E = 114,583 \text{ V}}$$

Η αντίστοιχη επαγωγική τάση στις 1200 στροφές θα ήταν

$$E_0 = E \frac{n_0}{n} = 114,583 \frac{1200}{1100} = 125 \text{ V}$$

Το ρεύμα διέγερσης που θα την δημιουργούσε το διαβάζουμε από την καμπύλη διέγερσης

$$E_0 = 125 \text{ V} \xrightarrow{\text{καμπύλη μαγνήτισης}} \boxed{I_F = 1,3 \text{ A}}$$

Άρα αν θέλω να ανεβάσω το φορτίο $\tau = 52 \text{ N} \cdot \text{m}$ με ταχύτητα $n = 1100 \text{ rpm}$ θα πρέπει να ρυθμίσω το ρεύμα διέγερσης στην τιμή 1,3 A.

$$\Delta) \alpha) V_T = 125 \text{ V} \quad E = 116 \text{ V} \quad I_F = 0,7 \text{ A} \quad I_A = 41,9 \text{ A} \quad I_L = 0,7 + 41,9 = 42,6 \text{ A}$$

$$P_{in} = V_T I_L = 125 \cdot 42,6 = 5.325 \text{ W} \quad P_{out} = E I_A = 116,6 \cdot 41,9 = 4.885,54 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} 100\% = \frac{4.885,54}{5.325} 100\% = 92\%$$

Για έλεγχο μπορείτε να υπολογίσετε την εξερχόμενη ισχύ από τον τύπο

$$P_{out} = \tau \omega = \tau \frac{2\pi}{60} n = 30 \cdot \frac{2\pi}{60} 1555 = 4.885,18 \text{ W} \quad \text{Το αποτέλεσμα είναι πάλι το ίδιο}$$

$$\beta) \quad V_T = 125 \text{ V} \quad E = 119,8 \text{ V} \quad I_F = 2,3 \text{ A} \quad I_A = 26 \text{ A} \quad I_L = 2,3 + 26 = 28,3 \text{ A}$$

$$P_{in} = V_T I_L = 125 \cdot 28,3 = 3.537,5 \text{ W} \quad P_{out} = E I_A = 119,8 \cdot 26 = 3.114,8 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} 100\% = \frac{3.114,8}{3.537,5} 100\% = 88\%$$

$$\gamma) \quad V_T = 125 \text{ V} \quad E = 114,583 \text{ V} \quad I_F = 1,3 \text{ A} \quad I_A = \frac{V_T - E}{R_A} = \frac{125 - 114,583}{0,2} = 52,085 \text{ A}$$

$$I_L = 1,3 + 52,083 = 53,383 \text{ A}$$

$$P_{in} = V_T I_L = 125 \cdot 53,383 = 6.672,88 \text{ W}$$

$$P_{out} = E I_A = 114,583 \cdot 52,083 = 5.967,83 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} 100\% = \frac{5.967,83}{6.672,88} 100\% = 89\%$$