



Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχ. Η/Υ

Ηλεκτρικές Μηχανές II

Μάθημα 8^ο

Σύγχρονοι Κινητήρες

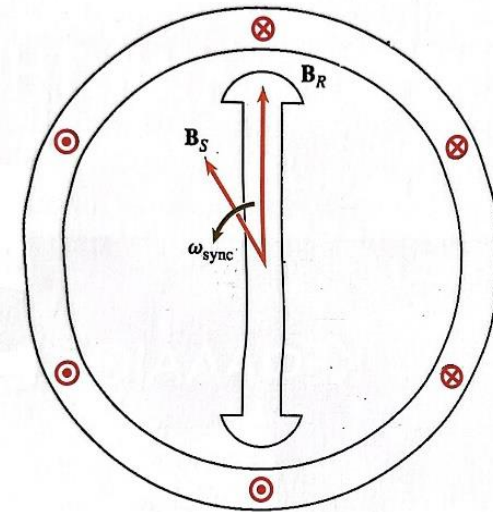
Γιώργος Ορφανουδάκης

Περιεχόμενα μαθήματος

1. Βασικές Αρχές Λειτουργίας Σύγχρονων Κινητήρων
2. Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονου Κινητήρα
3. Ανάλυση Σύγχρονου Κινητήρα από τη Σκοπιά των Μαγνητικών Πεδίων
4. Σύγχρονος Κινητήρας στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας
5. Η Επίδραση των Μεταβολών του Φορτίου
6. Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας Σύγχρονου Κινητήρα

Βασικές Αρχές Λειτουργίας Σύγχρονων Κινητήρων

- Στο σχέδιο δίπλα φαίνεται ένας σύγχρονος κινητήρας δυο πόλων, όπου το μαγνητικό πεδίο του δρομέα (B_R) παράγεται από το ρεύμα διέγερσης I_F
- Στο στάτη της μηχανής εφαρμόζεται ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων το οποίο, παράγει στο εσωτερικό της στρεφόμενο ομογενές μαγνητικό πεδίο B_S
- Άρα στο εσωτερικό του κινητήρα υφίστανται δύο πεδία, τα οποία τείνουν να ευθυγραμμιστούν, όπως ακριβώς δυο μαγνητικές ράβδοι
- Επειδή το πεδίο του στάτη περιστρέφεται συνεχώς, το πεδίο του δρομέα (και συνεπώς και ο ίδιος ο δρομέας) προσπαθεί συνέχεια να το ακολουθήσει
 - Το μαγνητικό πεδίο του δρομέα «κυνηγάει» συνεχώς το πεδίο του στάτη, χωρίς ποτέ να καταφέρνει να το φτάνει

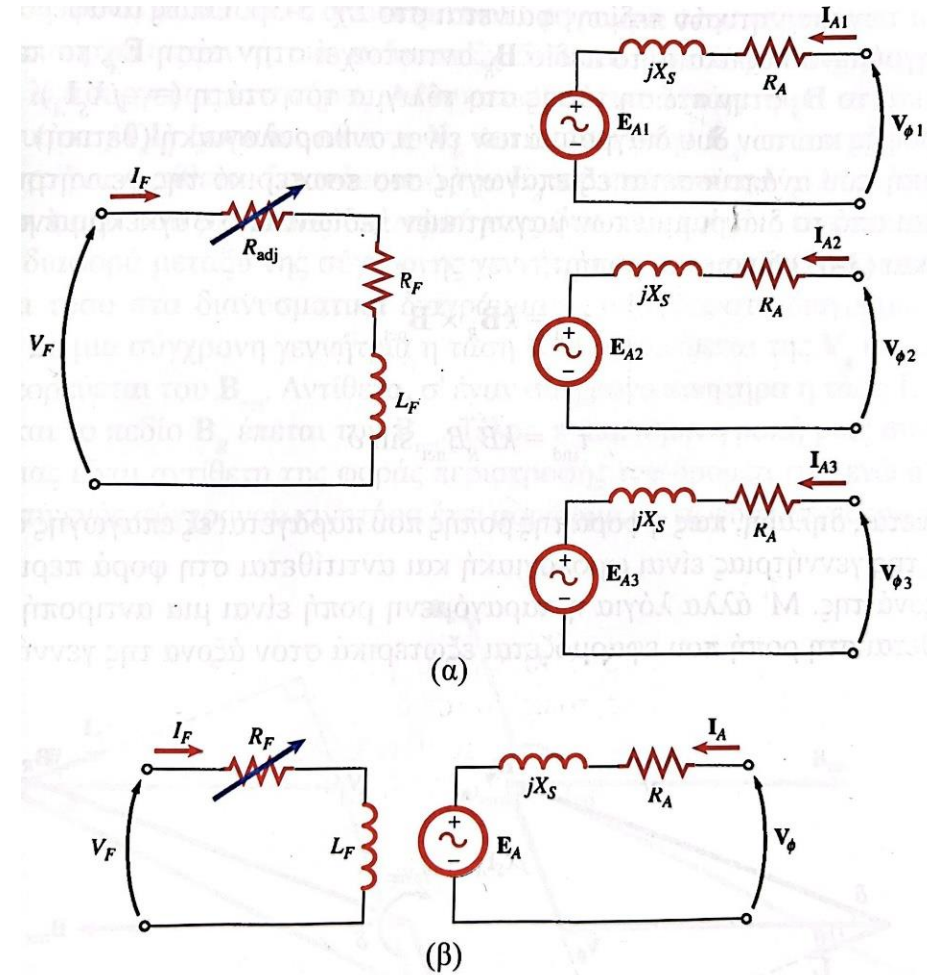


$$\tau_{ind} = k \mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_S$$

= με φορά ανθρωπολογική

Ισοδύναμο Κύκλωμα του Σύγχρονου Κινητήρα

- Επειδή ο σύγχρονος κινητήρας έχει την ίδια φυσική υπόσταση με μια σύγχρονη γεννήτρια, οι **εξισώσεις για τη ροπή, την ισχύ και την ταχύτητα**, ισχύουν και εδώ
- Η βασική διαφορά βρίσκεται στη **φορά ροής της ισχύος**
 - Γεννήτρια: Μηχανική \longrightarrow Ηλεκτρική
 - Κινητήρας: Ηλεκτρική \longrightarrow Μηχανική
- Επειδή η ροή της ισχύος αντιστρέφεται, και το **ρεύμα στο στάτη αντιστρέφεται**
- Ισοδύναμο κύκλωμα: Το ρεύμα I_A ρέει **προς** τη μηχανή
 - Σχήμα (α): Πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα
 - Σχήμα (β): Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα



Ισοδύναμο Κύκλωμα του Σύγχρονου Κινητήρα

- Λόγω της αντιστροφής του ρεύματος οπλισμού, στις σχέσεις που εκφράζουν το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα το ρεύμα εφαρμόζεται με **το αντίθετο πρόσημο**
- Στο παραπάνω σχήμα (β) ισχύει

$$V_{\Phi} = E_A + jX_S I_A + R_A I_A$$

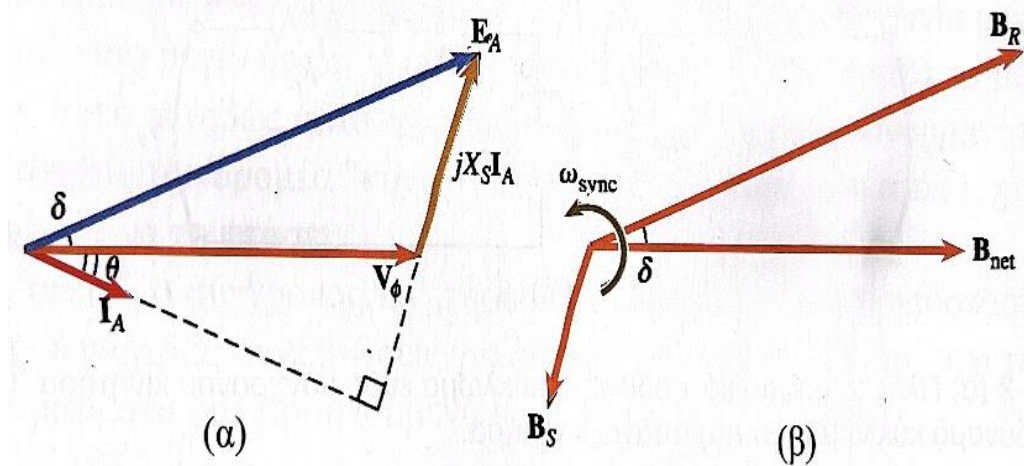
ή

$$E_A = V_{\Phi} - jX_S I_A - R_A I_A$$

- Το τύλιγμα του στάτη ενός σύγχρονου κινητήρα είναι δυνατό να συνδέεται σε αστέρα ή σε τρίγωνο, όπως και το αντίστοιχο τύλιγμα μιας σύγχρονης γεννήτριας

Ανάλυση του Σύγχρονου Κινητήρα από τη σκοπιά των Μαγνητικών Πεδίων

- Ας θεωρηθεί η περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας που συνδέεται σε ένα άπειρο ζυγό
- Η κινητήρια μηχανή της γεννήτριας εφαρμόζει ροπή (τ_{app}) στον άξονα της η οποία έχει φορά ίδια μ' αυτή της κίνησης του άξονα
- Το διανυσματικό διάγραμμα της παραπάνω γεννήτριας, όταν αυτή λειτουργεί με σχετικά υψηλό ρεύμα διέγερσης, παρουσιάζεται στο σχήμα (α)
- Το αντίστοιχο διάγραμμα των μαγνητικών πεδίων παρουσιάζεται στο σχήμα (β)



Ανάλυση του Σύγχρονου Κινητήρα από τη σκοπιά των Μαγνητικών Πεδίων

- Το πεδίο \mathbf{B}_R αντιστοιχεί στην τάση \mathbf{E}_A , το πεδίο \mathbf{B}_{net} στην \mathbf{V}_Φ και το \mathbf{B}_S στην πτώση τάσης ($= -jX_S I_A$)
- Η φορά και των δυο διαγραμμάτων είναι **ανθωρολογιακή** (θετική)
- Η ροπή που αναπτύσσεται εξ επαγωγής στο εσωτερικό της γεννήτριας υπολογίζεται από το διάγραμμα των μαγνητικών πεδίων:

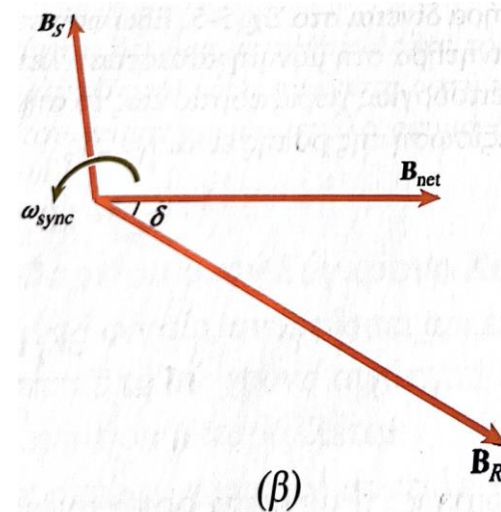
$$\tau_{ind} = k\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_{net}$$

$$\tau_{ind} = k\mathbf{B}_R \mathbf{B}_{net} \sin \delta$$

- Επειδή το \mathbf{B}_{net} καθυστερεί από το \mathbf{B}_R κατά τη γωνία δ , η φορά της τ_{ind} είναι **ωρολογιακή** (αρνητική)
- Άρα, η παραγόμενη ροπή είναι μια αντιροπή η οποία αντιτίθεται στη φορά περιστροφής του άξονά της και στη ροπή που εφαρμόζεται εξωτερικά από την κινητήρια μηχανή

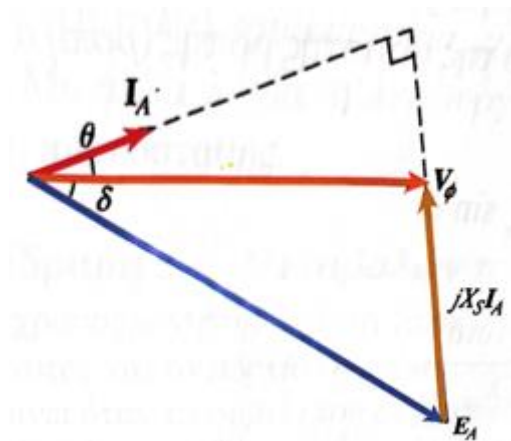
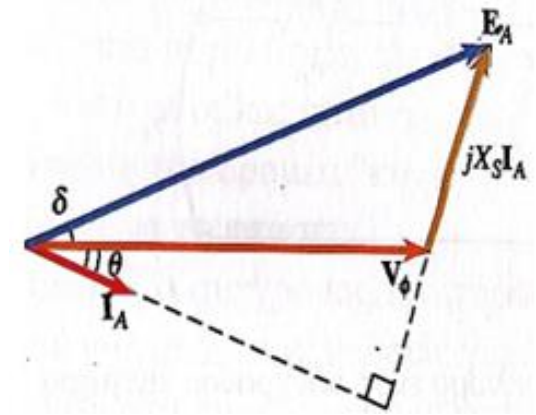
Ανάλυση του Σύγχρονου Κινητήρα από τη σκοπιά των Μαγνητικών Πεδίων

- Αν η κινητήρια μηχανή της γεννήτριας παύσει να προσφέρει ισχύ, τότε η γεννήτρια θα “σέρνει” την κινητήρια μηχανή της
- Το αποτέλεσμα θα είναι η μετακίνηση του μαγνητικού πεδίου \mathbf{B}_{net} μπροστά από το πεδίο \mathbf{B}_R
- Η εξίσωση $\tau_{ind} = k\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_{net}$ δίνει στην επαγόμενη ροπή το αντίθετο πρόσημο από πριν
- Η φορά αυτής της ροπής γίνεται **ίδια** με τη φορά της κίνησης και η μηχανή αρχίζει πια να λειτουργεί ως κινητήρας
- Αν η κινητήρια μηχανή αντικατασταθεί με ένα μηχανικό φορτίο, η γωνία δ αυξάνεται και η επαγόμενη ροπή αυξάνεται μέχρι να εξισωθεί με τη ροπή του φορτίου που εφαρμόζεται στον άξονά της



Διανυσματικό διάγραμμα

- Στο διανυσματικό διάγραμμα της γεννήτριας το διάνυσμα $jX_S I_A$ ξεκινά από τη \mathbf{V}_Φ και φτάνει στην \mathbf{E}_A
- Στο διάγραμμα του κινητήρα, αντίθετα, ξεκινά από την \mathbf{E}_A και φτάνει στη \mathbf{V}_Φ
- Άρα, σε μια σύγχρονη γεννήτρια η τάση \mathbf{E}_A προπορεύεται της \mathbf{V}_Φ και το πεδίο \mathbf{B}_R προπορεύεται του \mathbf{B}_{net}
- Αντίθετα, σ' έναν σύγχρονο κινητήρα η τάση \mathbf{E}_A έπεται της \mathbf{V}_Φ και το πεδίο \mathbf{B}_R έπεται του \mathbf{B}_{net}

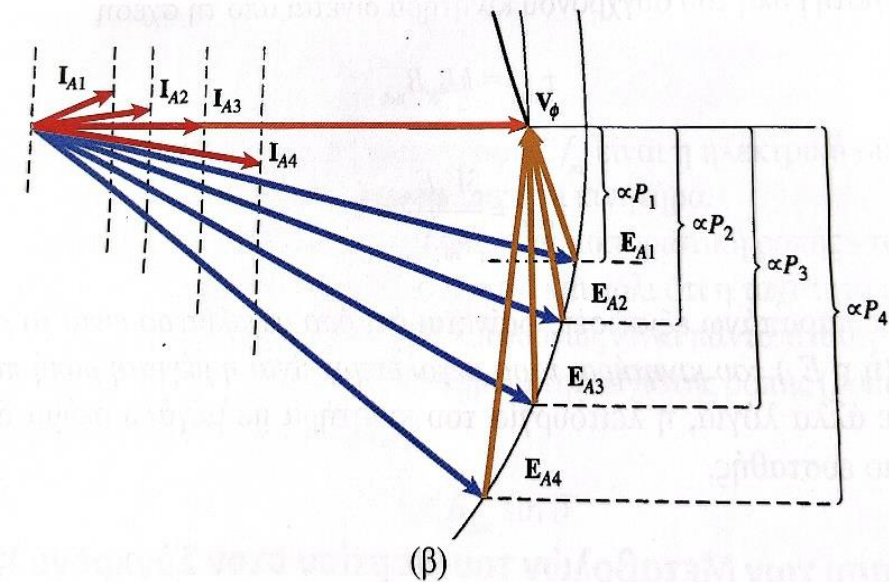
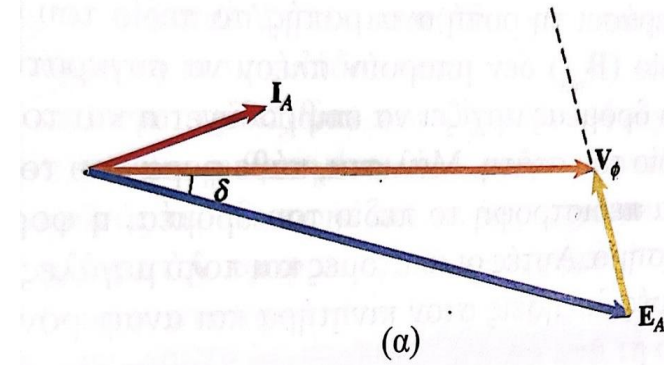


Ο Σύγχρονος Κινητήρας στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας

- Συμπεριφορά του σύγχρονου κινητήρα κατά τη μεταβολή
 - του φορτίου
 - του ρεύματος διέγερσης
- Μέθοδοι βελτίωσης του συντελεστή ισχύος
- Θα αγνοηθεί η αντίσταση οπλισμού του κινητήρα (εκτός για ορισμένους υπολογισμούς)

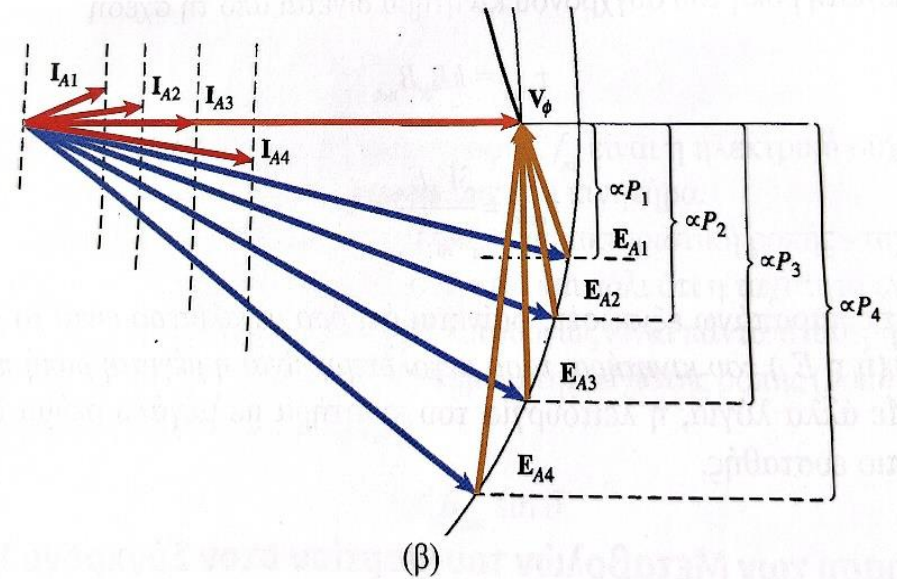
Επίδραση των Μεταβολών του Φορτίου

- Στο σχήμα (α) φαίνεται το διανυσματικό διάγραμμα ενός κινητήρα που λειτουργεί με χωρητικό συντελεστή ισχύος, πριν από τη μεταβολή του φορτίου
- Η αύξηση του φορτίου (δηλ. της ροπής του φορτίου) του κινητήρα στο σχήμα (β), προκαλεί αύξηση της γωνίας δ ώστε να αυξηθεί η επαγόμενη ροπή
- Η τάση $E_A (= K\Phi\omega)$ εξαρτάται αποκλειστικά από το ρεύμα διέγερσης και από την ταχύτητα της μηχανής
- Το ρεύμα διέγερσης παραμένει σταθερό, άρα και το μέτρο της \mathbf{E}_A διατηρείται σταθερό
- Καθώς αυξάνεται η γωνία δ , τα τμήματα $E_A \sin \delta$ και $I_A \cos \theta$ (που είναι και ανάλογα της πραγματικής ισχύος) θα αυξηθούν



Η Επίδραση των Μεταβολών του Φορτίου στον Σύγχρονο Κινητήρα

- Καθώς το φορτίο αυξάνεται, η \mathbf{E}_A μετακινείται όπως φαίνεται στο σχήμα (β)
- Η ποσότητα $jX_S \mathbf{I}_A$ αυξάνεται, ώστε να βρίσκεται πάντα μεταξύ των άκρων της \mathbf{E}_A και της \mathbf{V}_ϕ
- Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την **αύξηση του ρεύματος οπλισμού** του κινητήρα
- Επίσης, η γωνία ϑ που αντιστοιχεί στον συντελεστή ισχύος,
 - αρχικά είναι χωρητική και μειώνεται
 - ενώ κατόπιν γίνεται επαγωγική και αρχίζει να αυξάνεται



Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας

- Ο κινητήρας συνδέεται με ένα σύστημα ισχύος πολύ μεγαλύτερο από αυτόν, ώστε να το «βλέπει» ως άπειρο ζυγό
- Η τάση εισόδου και η συχνότητα παραμένουν σταθερές και ανεξάρτητες από την ισχύ εξόδου του κινητήρα
- Η ταχύτητα του σύγχρονου κινητήρα είναι σταθερή και **ανεξάρτητη από το φορτίο**:

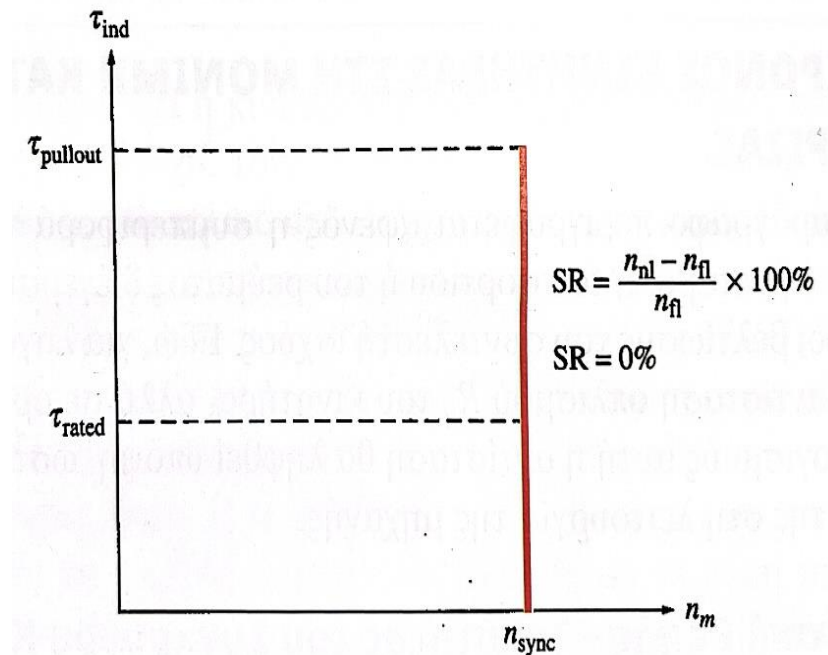
$$n_m = \frac{120f_{se}}{P}$$

- Όπου
 - n_m η ταχύτητα περιστροφής σε rpm
 - f_{se} η ηλεκτρική συχνότητα του στάτη σε Hz
 - P το πλήθος των πόλων του κινητήρα

Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας (2)

- Σύμφωνα με τις παραπάνω παρατηρήσεις η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του κινητήρα φαίνεται στο διπλανό σχήμα
- Η ταχύτητα ενός σύγχρονου κινητήρα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι πάντα σταθερή, από το σημείο λειτουργίας χωρίς φορτίο έως το σημείο της μέγιστης ροπής (ροπή ανατροπής)
- Άρα, το φορτίο ενός σύγχρονου κινητήρα είναι συνήθως μια διάταξη που πρέπει να περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα
- Η εξίσωση της ροπής είναι:

$$\tau_{ind} = k \mathbf{B}_R \mathbf{B}_{net} \sin \delta \quad \text{ή} \quad \tau_{ind} = \frac{3V_\Phi E_A \sin \delta}{\omega_m X_S}$$



Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας (3)

- Η μέγιστη ροπή (ροπή ανατροπής, $\tau_{pullout}$ ή τ_{max}) αναπτύσσεται όταν $\delta = 90^\circ$
- Η ροπή ενός πραγματικού κινητήρα στην πλήρη φόρτιση (τ_{rated}) είναι δύο έως τρεις φορές μικρότερη από τη μέγιστη ροπή
- Αν η ροπή του κινητήρα ξεπεράσει τη ροπή ανατροπής
 - Το πεδίο του στάτη και το συνολικό μαγνητικό πεδίο δεν μπορούν πλέον να συγκρατήσουν το δρομέα της μηχανής
 - Ο δρομέας αρχίζει να επιβραδύνεται και το πεδίο του μένει πολύ πίσω από το πεδίο του στάτη
 - Κάθε φορά που το πεδίο του στάτη υπερβαίνει κατά μια περιστροφή το πεδίο του δρομέα, η φορά της επαγόμενης ροπής αλλάζει πρόσημο
 - Αυτές οι απότομες και πολύ μεγάλες αλλαγές στη ροπή προκαλούν ισχυρές δονήσεις και μεγάλα ρεύματα στον κινητήρα
 - Το φαινόμενο αναφέρεται ως απώλεια συγχρονισμού

Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας (4)

- Η μέγιστη ροπή του σύγχρονου κινητήρα δίνεται από τη σχέση

$$\tau_{max} = kB_R B_{net} = \frac{3V_\Phi E_A}{\omega_m X_S}$$

- Όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα διέγερσης (ή ισοδύναμα η E_A) του κινητήρα, τόσο μεγαλύτερη είναι η μέγιστη ροπή που παράγεται
- Άρα, η λειτουργία του κινητήρα με μεγάλο ρεύμα διέγερσης γίνεται πιο ευσταθής

Παράδειγμα 5-1

Τα ονομαστικά στοιχεία μιας σύγχρονης μηχανής που συνδέεται σε τρίγωνο είναι τα εξής: ονομαστική τάση 208 V , ονομαστική ισχύς 45 kVA με συντελεστή ισχύος $0,8$ χωρητικό και ονομαστική συχνότητα 60 Hz . Η σύγχρονη αντίδραση της μηχανής έχει τιμή $2,5\ \Omega$, ενώ η αντίσταση του οπλισμού θεωρείται αμελητέα. Οι μηχανικές απώλειες είναι $1,5\text{ kW}$, ενώ οι απώλειες στον πυρήνα της είναι $1,0\text{ kW}$. Το αρχικό φορτίο του κινητήρα είναι 15 hp και ο αντίστοιχος συντελεστής ισχύος είναι $0,8$ χωρητικός.

1. Να σχεδιαστεί το διανυσματικό διάγραμμα του κινητήρα και να υπολογιστούν οι τιμές των \mathbf{I}_A , \mathbf{I}_L και \mathbf{E}_A .
2. Ας υποθεθεί ότι το φορτίο της μηχανής διπλασιάζεται (30 hp). Ποιο είναι το νέο διανυσματικό διάγραμμα του κινητήρα μετά από αυτή τη μεταβολή;
3. Να υπολογιστούν τα μεγέθη \mathbf{I}_A , \mathbf{I}_L και \mathbf{E}_A μετά την παραπάνω μεταβολή. Ποιος είναι ο νέος συντελεστής ισχύος του κινητήρα;

Σχετικό υλικό

- Από το βιβλίο «Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC», Stephen J. Chapman, εκδ. Τζιόλα, 5^η έκδ.
 - Κεφάλαιο 5, Παράγραφοι 5.1 έως 5.2