



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Ηλεκτρικές Μηχανές II

Ενότητα 2: Σ.Μ με Κυλινδρικό Δρομέα 2

Επ. Καθηγήτρια Τζόγια Χ. Καππάτου

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας
Υπολογιστών



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

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.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» 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.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Φυσική σημασία της πολικής γωνίας θ

Στο σχήμα που ακολουθεί, για τις χωρικές γωνίες ισχύει η σχέση :

$$a_s = a_R + \omega_m t + \gamma$$

Επίσης ισχύει ότι:

$$\phi = p\gamma$$

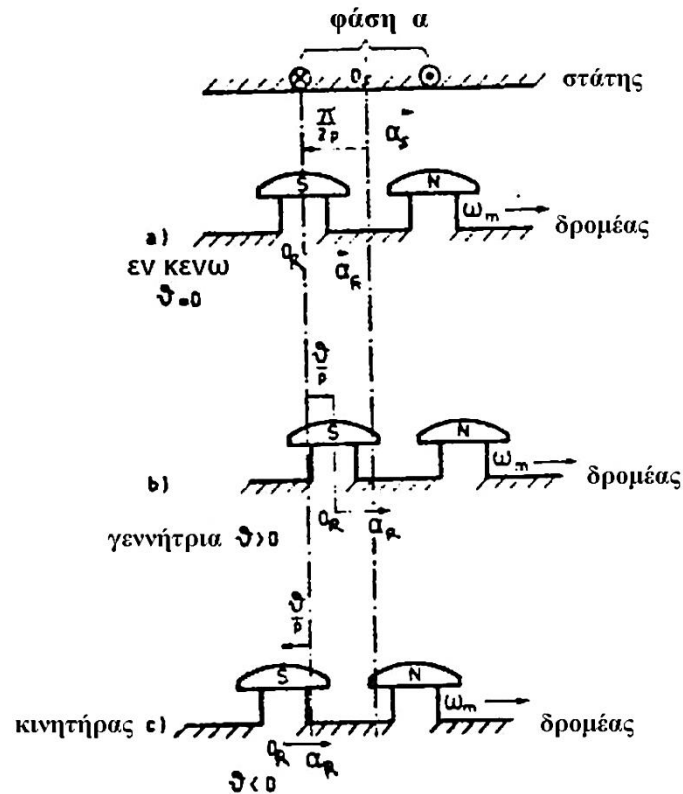
$$\omega_m = \frac{\omega}{p}$$

Προκύπτει ότι:

$$a_s = a_R + \frac{\omega}{p}t + \frac{\theta}{p} - \frac{\pi}{2p}$$

Από τη σχέση αυτή γίνεται κατανοητό ότι η γωνία μεταξύ των συστημάτων συντεταγμένων για $t=0$ εξαρτάται από τη γωνία θ . Στην εν κενώ κατάσταση είναι $\theta=0$ και τα δύο συστήματα συντεταγμένων σχηματίζουν μεταξύ τους την γωνία $\pi/2p$.

Φυσική σημασία της πολικής γωνίας θ 2



Αμοιβαία θέση στάτη και δρομέα για $t=0$

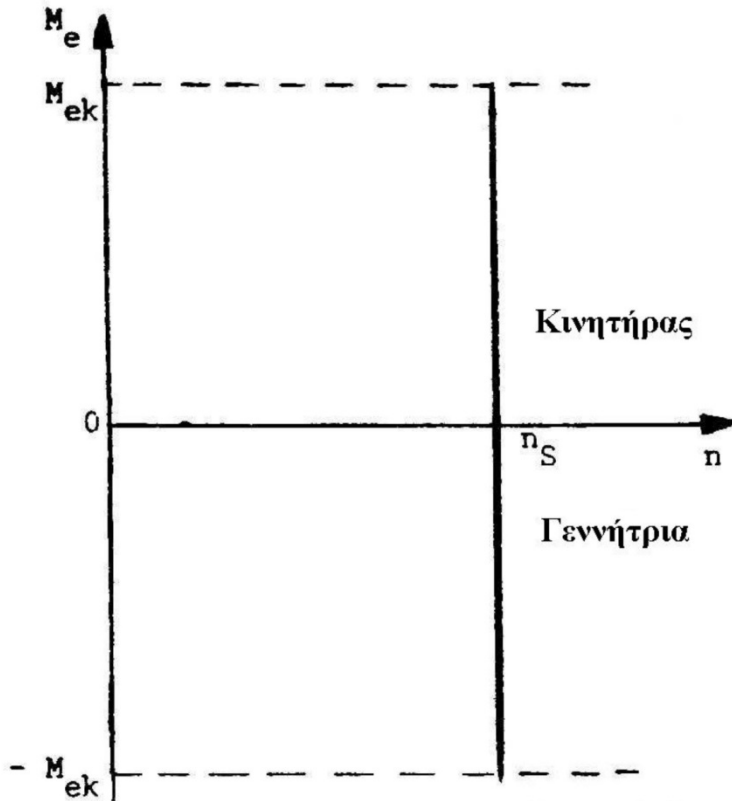
Φυσική σημασία της πολικής γωνίας θ 3

- Η φόρτιση της Σ.Μ. εκφράζεται από μια συγκεκριμένη θέση του δρομέα ως προς το στάτη.
- Επειδή ο δρομέας στρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα, θεωρούμε ως θέση αναφοράς τη θέση που έχει ένα συγκεκριμένο σημείο του δρομέα στην κατάσταση εν κενώ σχετικά προς τον στάτη.
- Η απομάκρυνση από τη θέση αυτή εξηγείται ως εξής: Εάν στρέψουμε το δρομέα μίας Σ.Μ. που βρίσκεται σε κατάσταση εν κενώ εφαρμόζοντας στον άξονα μια ροπή, τότε ο δρομέας θα υπερβεί τη σύγχρονη ταχύτητα. Αυτό διαρκεί μέχρι να δημιουργηθεί μια αντίθετη εσωτερική ηλεκτρομαγνητική ροπή και να επέλθει ισορροπία ροπών. Στην κατάσταση ισορροπίας ο δρομέας έχει απομακρυνθεί κατά την πολική γωνία θ . Αντίθετα, εάν φρενάρουμε το δρομέα στην κατάσταση ισορροπίας, θα παραμείνει ο δρομέας πίσω κατά την αρνητική πολική γωνία θ .
- **η πολική γωνία θ αποτελεί ένα μέτρο για την ενεργό ισχύ**, που μεταφέρεται μέσω του άξονα.

Φυσική σημασία της πολικής γωνίας θ 4

- Εάν η σύγχρονη μηχανή λειτουργεί εν κενώ και παραλείψουμε τις τριβές και την αντίσταση του αέρα, η γωνία θ είναι μηδέν.
- Όσο φορτίζεται ο άξονας, δηλαδή όσο μεγαλώνει η ροπή, τόσο μεγαλώνει και η πολική γωνία θ , ενώ η ταχύτητα παραμένει απολύτως σταθερή (συγχρονισμός).
- Εάν η ροπή και συνεπώς η ενεργός ισχύς αυξηθεί τόσο ώστε η γωνία θ να φτάσει τις $\pm 90^\circ$, τότε φθάνουμε στο όριο του συγχρονισμού. Με την παραμικρή αύξηση της μηχανικής ισχύος, η μηχανή αποσυγχρονίζεται και ασφαλώς διαταράσσεται εντελώς η λειτουργία της.
- Μόλις η ταχύτητα του δρομέα διαφοροποιηθεί από τη σύγχρονη ταχύτητα, τότε ρέουν μεγάλα ρεύματα στο στάτη και η σύγχρονη μηχανή πρέπει να αποσυνδεθεί από το δίκτυο, διαφορετικά θα καταστραφεί.
- Τη γωνία θ/p , που είναι η γωνία μεταξύ δύο θέσεων του δρομέα, δηλαδή της θέσης που παίρνει εν κενώ ως προς το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο και της θέσης υπό φορτίο πάλι σχετικά ως προς το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου, μπορούμε να μετρήσουμε με διάφορους τρόπους. Ένας απλός τρόπος μέτρησης είναι η μέτρηση με ένα όργανο που ονομάζεται στροβοσκόπιο.

Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας Σ.Μ.



- Η ταχύτητα της σύγχρονης μηχανής είναι ανεξάρτητη της ηλεκτρομαγνητικής ροπής που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της μηχανής και που αντισταθμίζεται από τη ροπή που επικρατεί επάνω στον άξονα (ροπή φορτίου).
- Αυτό συμβαίνει, βεβαίως, όταν η μηχανή είναι παραλληλισμένη με το δίκτυο.

Χαρακτηριστική ροπής-στροφών $M_e=f(n)$ της σύγχρονης μηχανής.

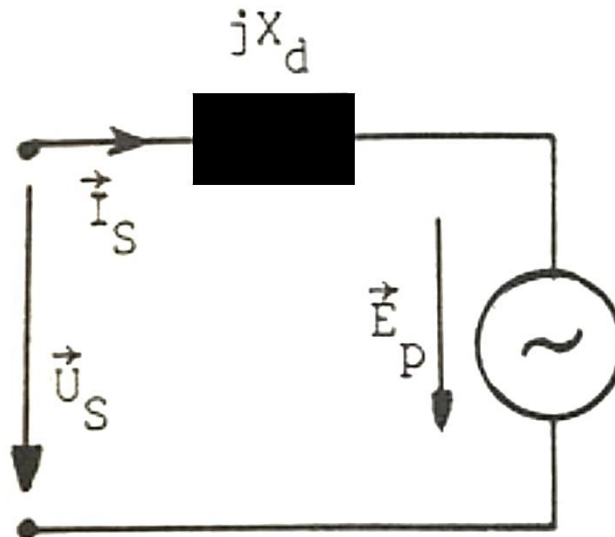
Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας Σ.Μ. 2

- Σημαντικό μέγεθος είναι η ροπή ανατροπής (M_{ek}) των Σ.Μ., η οποία καθορίζει και το μέγεθος της υπερφόρτισης δηλαδή την ικανότητα φόρτισης πέρα από την ονομαστική.
- Το μέγεθος της ροπής ανατροπής προσδιορίζει τον συντελεστή υπερφόρτισης, ο οποίος ορίζεται ως εξής :

$$\ddot{u} = \frac{M_{ek}}{M_{eN}}$$

Φόρτιση της Σ.Μ. παραλληλισμένης με το δίκτυο

- Λέγοντας φόρτιση εννοούμε το μέγεθος της φαινομένης ισχύος που ανταλλάσσει η Σ.Μ. με το δίκτυο, δηλαδή την ενεργό και την άεργο ισχύ.
- Τίθεται το ερώτημα, πώς μπορούμε να επηρεάσουμε τη φόρτιση, όταν ο στάτης συνδέεται με το δίκτυο, το οποίο έχει σταθερή τάση και σταθερή συχνότητα ανεξάρτητα από την φόρτιση της μηχανής.

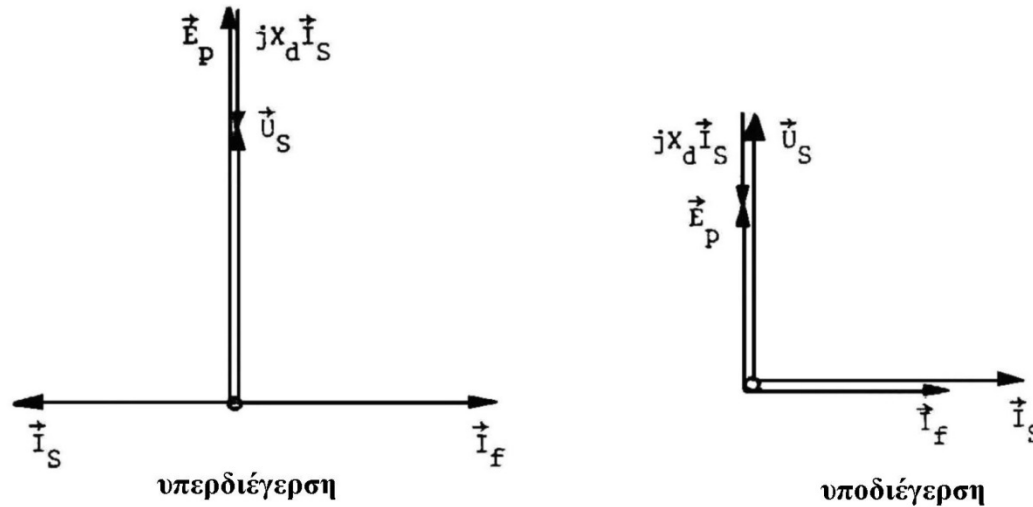


Ισοδύναμο κύκλωμα για τη φόρτιση Σ.Μ. με κυλινδρικό δρομέα

Φόρτιση της Σ.Μ. παραλληλισμένης με το δίκτυο 2

- Στην κατάσταση εν κενώ, δηλαδή όταν $\vec{I}_S=0$, τότε $\vec{E}_p=\vec{U}_S$. Για να δημιουργηθεί ρεύμα πρέπει, επομένως, να μεταβληθεί η επαγόμενη τάση ή κατά μέγεθος ή κατά φάση ή και κατά τα δύο.
- Έτσι ξεκινώντας από την τιμή I_{f0} , που λέγεται ρεύμα διέγερσης εν κενώ, εάν μεγαλώσουμε το I_f θα μεγαλώσει και η πολική τάση E_p
- Εάν ελαττώσουμε το I_f , θα μειωθεί και η πολική τάση E_p
- Την πρώτη περίπτωση ονομάζουμε κατάσταση υπερδιέγερσης $I_f > I_{f0}$ και την δεύτερη κατάσταση υποδιέγερσης $I_f < I_{f0}$.

Φόρτιση της Σ.Μ. παραλληλισμένης με το δίκτυο 3



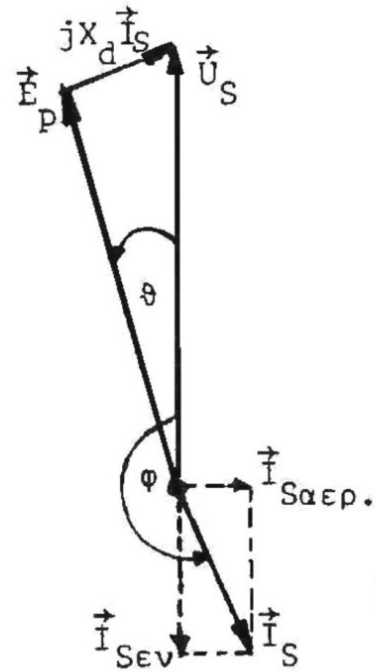
Φόρτιση Σ.Μ. μόνο με άεργο ισχύ ($M_e=0$).

- Κατά την υπερδιέγερση η Σ.Μ. συμπεριφέρεται ως τριφασικός πυκνωτής συνδεδεμένος με το δίκτυο, δηλαδή δίνει άεργο ισχύ στο δίκτυο.
- Κατά την υποδιέγερση συμπεριφέρεται ως ένα τριφασικό πηνίο και συνεπώς παίρνει άεργο ισχύ.
- Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι, η άεργος ισχύς μίας σύγχρονης μηχανής μπορεί να ρυθμίζεται με το ρεύμα διέγερσης.

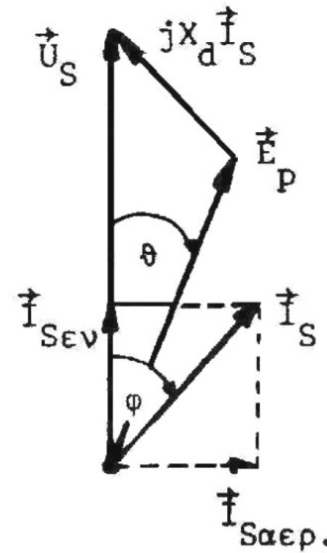
Φόρτιση της Σ.Μ. παραλληλισμένης με το δίκτυο 4

- Για να γίνει ανταλλαγή ενεργού ισχύος με το δίκτυο, πρέπει επάνω στον άξονα και κατά την φορά περιστροφής να επενεργήσει μια ροπή, η οποία να προέρχεται από μια άλλη μηχανή που συνδέεται μηχανικά με τον άξονα.
- Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας για να διατηρηθεί η ταχύτητα σταθερή, η ροπή αυτή ισορροπείται από την εσωτερική ροπή M_e της Σ.Μ., η οποία πρέπει να είναι ίση και αντίθετη προς την επιβαλλόμενη εξωτερική ροπή.
- Η ενεργός ισχύς που ανταλλάσσει ο στάτης με το δίκτυο ρυθμίζεται με την ροπή που επιβάλλεται στον άξονα της Σ.Μ.

Φόρτιση της Σ.Μ. παραλληλισμένης με το δίκτυο 5



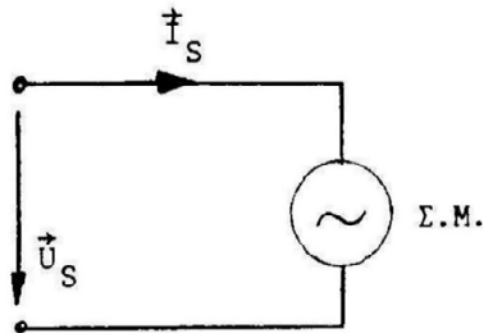
a) Γεννήτρια $\theta > 0$



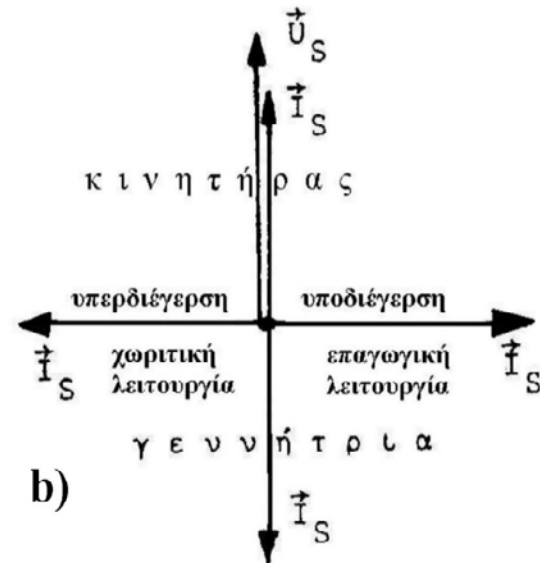
b) Κινητήρας $\theta < 0$

Διανυσματικό διάγραμμα κατά τη φόρτιση Σ.Μ. με εξωτερική ροπή και υποδιέγερση.

Φόρτιση της Σ.Μ. παραλληλισμένης με το δίκτυο



a)



b)

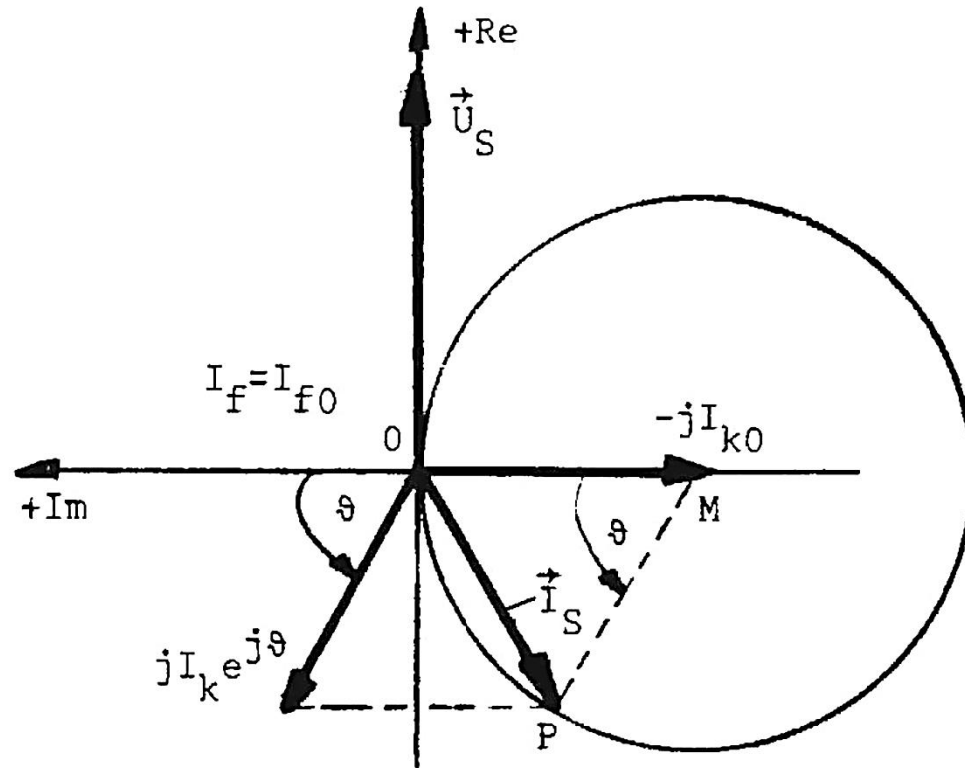
Θέση διανύσματος ρεύματος ως προς την τάση στις διάφορες καταστάσεις φόρτισης Σ.Μ.

- Επιλογή φοράς διανυσμάτων τάσεως και ρεύματος (επιλέγεται το σύστημα "καταναλωτή")
- Θέση διανυσμάτων στο διάγραμμα των τεσσάρων τεταρτημορίων (γεννήτρια, κινητήρας, υποδιέγερση, υπερδιέγερση).

Γεωμετρικός τύπος ρεύματος στάτη

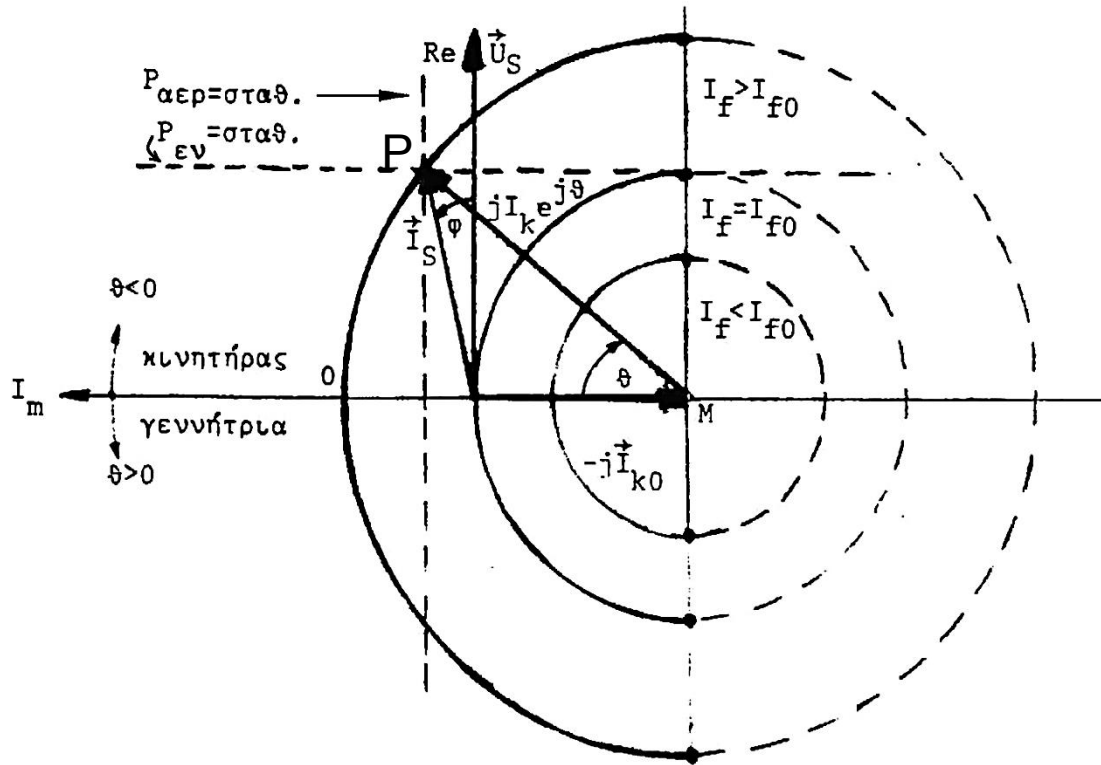
$$\left. \begin{aligned} \vec{I}_s &= \frac{\vec{U}_s}{jX_d} - \frac{\vec{E}_p}{jX_d} = -j \frac{\vec{U}_s}{X_d} + j \frac{\vec{E}_p}{X_d} \\ \vec{I}_{k0} &= \frac{\vec{U}_s}{jX_d} \\ \vec{I}_k &= \frac{\vec{E}_p}{X_d} = \frac{E_p}{X_d} e^{j\theta} = I_{k0} e^{j\theta} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \vec{I}_s = -j\vec{I}_{k0} + j\vec{I}_k e^{j\theta}$$

Γεωμετρικός τόπος ρεύματος στάτη



Διανυσματικό διάγραμμα των ρευμάτων μιας Σ.Μ. με κυλινδρικό δρομέα

Γεωμετρικός τόπος ρεύματος στάτη 2



Γεωμετρικός τόπος ρεύματος

Αντίδραση τυμπάνου και ρεύμα μαγνητίσεως

- Όταν φορτιστούν τα τυλίγματα του στάτη με ρεύμα, τότε δημιουργείται ένα δεύτερο μαγνητικό πεδίο, το οποίο επιδρά επί του αρχικού πεδίου του δρομέα, όπως συμβαίνει και στη μηχανή συνεχούς ρεύματος.
- Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «αντίδραση τυμπάνου». Είναι δυνατόν το αρχικό πεδίο να ενισχύεται ή να εξασθενεί.
- Αυτό εξαρτάται από το είδος της φόρτισης δηλαδή από τη διαφορά φάσης μεταξύ ρεύματος και τάσης στο στάτη.
- Όταν έχουμε χωρητική φόρτιση (της Σ.Μ.), το αρχικό πεδίο ενισχύεται, ενώ αντίθετα όταν έχουμε επαγωγική φόρτιση το αρχικό πεδίο εξασθενεί, δηλαδή είναι σαν να αυξάνουμε ή να μειώνουμε το ρεύμα διέγερσης κατά ένα ποσό ανάλογο του ρεύματος του στάτη.

Αντίδραση τυμπάνου και ρεύμα μαγνητίσεως 2

Επειδή για τη μαγνήτιση του σιδηρομαγνητικού πυρήνα του στάτη κατά κύριο λόγο συμβάλλει το ρεύμα διεγέρσεως I_f , το δε ρεύμα του στάτη I_s απλώς ενισχύει ή ελαττώνει το αποτέλεσμα του I_f , ανάγουμε το I_s στο δρομέα και έτσι εμφανίζεται το I'_s , το οποίο συνδέεται με το I_s σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

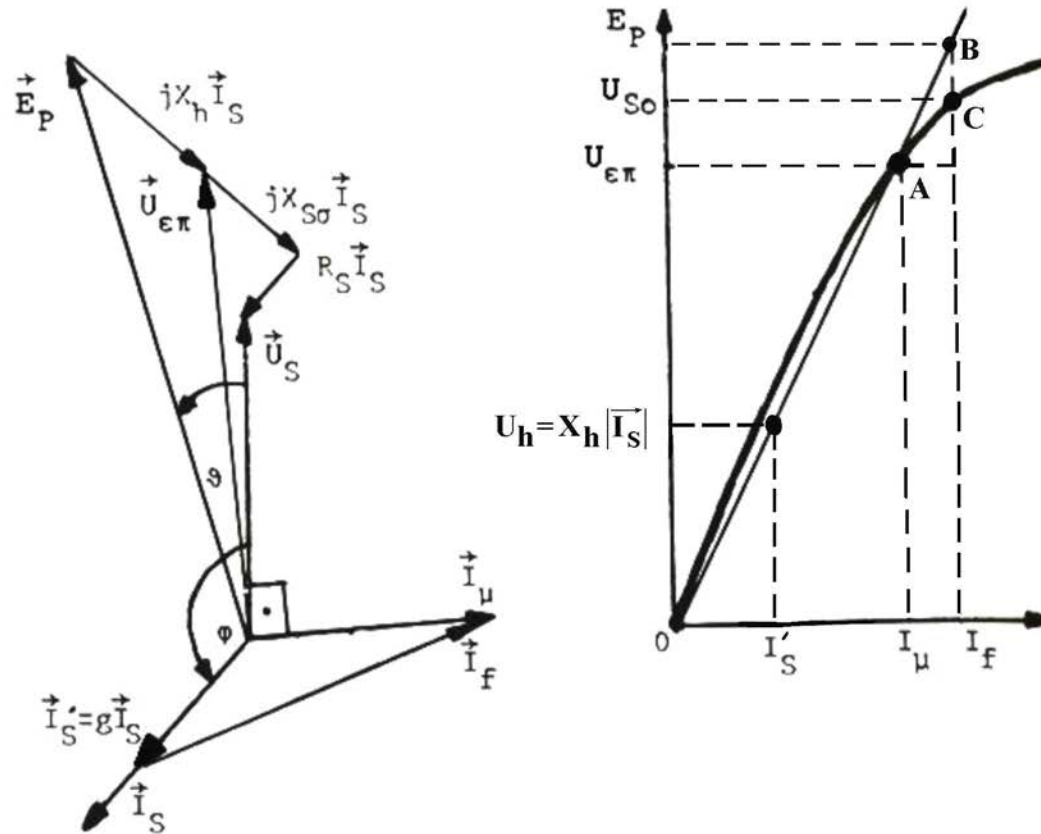
$$I'_s = gI_s, g = \frac{3w_s\xi_s}{\sqrt{2}w_f\xi_f}$$

Ο συντελεστής αναγωγής g εξαρτάται από το λόγο των ενεργών σπειρών $w_s\xi_s$ του στάτη και $w_f\xi_f$ του δρομέα, όπου ξ_s και ξ_f είναι οι αντίστοιχοι συντελεστές μορφής τυλίγματος.

Το ρεύμα μαγνητίσεως είναι το άθροισμα των ρευμάτων, που δημιουργούν το τελικό μαγνητικό πεδίο στο διάκενο, από το οποίο προέρχεται η τάση εξ' επαγωγής στο τύλιγμα του στάτη :

$$\vec{I}_\mu = \vec{I}_f + \vec{I}'_s$$

Αντίδραση τυμπάνου και ρεύμα μαγνητίσεως 3



Διανυσματικό διάγραμμα Σ.Μ. με κατανεμημένο τύλιγμα και χαρακτηριστική εν κενώ

Μεταβολή της τάσεως της σύγχρονης γεννήτριας

- Μεταβολή της τάσεως στους ακροδέκτες μίας σύγχρονης γεννήτριας έχουμε, όταν αυτή δεν λειτουργεί παράλληλα με το ισχυρό δίκτυο. Τότε, στην κατάσταση εν κενώ έχουμε μια ορισμένη τάση π.χ. $U_{SO}=U_N$ για I_{f0} . Η τάση αυτή μεταβάλλεται μόλις φορτιστεί ο στάτης με ρεύμα και είναι δυνατόν να παρουσιαστεί αύξηση ή μείωση ανάλογα με τη φύση του φορτίου (επαγωγικού ή χωρητικού χαρακτήρα).
- Εάν επιλέξουμε τέτοιο I_f , ώστε υπό ορισμένη φόρτιση, π.χ. I_{SN} , να έχουμε στους ακροδέκτες μια ορισμένη τάση, π.χ. U_N , τότε μετά την αποσύνδεση του φορτίου έχουμε αύξηση ή μείωση της τάσης. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται εάν λάβουμε υπ' όψη μας την εσωτερική σύνθετη αντίσταση της μηχανής.
- Εάν το φορτίο είναι χωρητικό, μετά τον μηδενισμό του ρεύματος I_s , σύμφωνα με το διανυσματικό διάγραμμα, έχουμε πτώση της τάσης στους ακροδέκτες της μηχανής.
- Αντίθετα για επαγωγικό φορτίο έχουμε αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες μετά την αποσύνδεση του φορτίου. Η αύξηση είτε υπό φορτίο, είτε εν κενώ είναι προβληματική για τις μονώσεις. Υπάρχουν κανονισμοί (π.χ. VDE 0530, τμήμα 1/1-66, §36), σύμφωνα με τους οποίους η αύξηση επιτρέπεται να φτάσει το πολύ 50% της ονομαστικής τάσεως, όταν έχουμε ονομαστικό συντελεστή ισχύος .

Μεταβολή της τάσεως της σύγχρονης γεννήτριας 2

- Για να έχουμε στους ακροδέκτες της Σ.Μ. πάντοτε ονομαστική τάση, πρέπει να ρυθμίζουμε το ρεύμα διεγέρσεως. Εάν κατά τη φόρτιση είχαμε $I_{fN} > I_{f0}$ και $U_S = U_N$, μετά την αποσύνδεση του ρεύματος του στάτη θα έχουμε $I_{\mu} = I_{fN}$. Αυτό σημαίνει ότι βρισκόμαστε αρκετά μέσα στην περιοχή του κορεσμού σύμφωνα με τη μορφή της χαρακτηριστικής $U = f(I_f)$ εν κενώ. Έτσι η τάση στους ακροδέκτες θα υπερβεί την ονομαστική τιμή.

$$\frac{\Delta U}{\%} = \frac{U_{S0} - U_N}{U_N} 100$$

- Η μεταβολή αυτή εξαρτάται από την τιμή του ρεύματος I_S και από τον συντελεστή ισχύος $\cos\phi$, δηλ. από τη φύση του φορτίου.

Πηγές

Οι πηγές των **Εικόνων, των Σχημάτων και των Διαγραμμάτων είναι:**

[1] Α.Ν. Σαφάκας, «Ηλεκτρικές Μηχανές Α», Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2009

[2] Α.Ν. Σαφάκας, «Ηλεκτρικές Μηχανές Β», Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2009

[3] Α.Ν. Σαφάκας, «Δυναμική Ηλεκτρομηχανικών συστημάτων» Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2008

[4] Τζόγια Χ. Καππάτου, Εξομοιώσεις Ηλεκτρικών Μηχανών σε περιβάλλον Πεπερασμένων Στοιχείων, Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας, Η.Μ.Τ.Υ, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Τζόγια Καππάτου. Τζόγια Καππάτου, «Ηλεκτρικές Μηχανές II». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://eclass.upatras.gr/courses/EE687/>.

Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ