



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά  
μαθήματα ΠΠ

# Ηλεκτρικές Μηχανές II

Ενότητα 2: Σύγχρονη Μηχανή με Κυλινδρικό  
Δρομέα

Επ. Καθηγήτρια Τζόγια Χ. Καππάτου

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας  
Υπολογιστών



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

# 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

# **Σύγχρονη μηχανή με κυλινδρικό δρομέα 1**

- Ο δρομέας μίας σύγχρονης μηχανής με κυλινδρικό δρομέα, δηλαδή με κατανεμημένους πόλους, φέρει ένα τύλιγμα που διαρρέεται από συνεχές ρεύμα και επομένως δημιουργεί ένα συνεχές μαγνητικό πεδίο, εάν όμως ο δρομέας στρέφεται με σταθερή ταχύτητα, τότε δημιουργείται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με συγκεκριμένη συχνότητα.
- Εάν το τύλιγμα του στάτη συνδεθεί με ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων με την ίδια συχνότητα, θα έχουμε στις τρεις φάσεις του τυλίγματος ρεύματα συμμετρικά με την ίδια συχνότητα. Στην περίπτωση αυτή το πεδίο που προέρχεται από τα ρεύματα του στάτη και το πεδίο του δρομέα είναι στρεφόμενα πεδία και έχουν την ίδια ταχύτητα περιστροφής.
- Εάν δεν συμβαίνει αυτό, τότε το πεδίο του δρομέα επάγει στο στάτη τάσεις με συχνότητα διαφορετική εκείνης του δικτύου, οι οποίες προκαλούν μεγάλα ρεύματα. Η κατάσταση αυτή χαρακτηρίζεται ως αποσυνχρονισμός.

# *Σύγχρονη μηχανή με κυλινδρικό δρομέα 2*

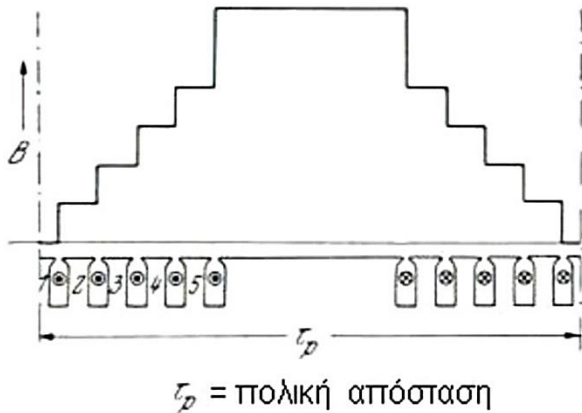
Εδώ εμείς θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά της μηχανής με την υπόθεση ότι ισχύουν οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Ο δρομέας στρέφεται με σταθερή σύγχρονη ταχύτητα.
- Οι τάσεις του στάτη είναι ημιτονοειδείς και συμμετρικές.
- Το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο παρουσιάζει ημιτονοειδή κατανομή.
- Οι απώλειες σιδήρου παραλείπονται.

# Σύγχρονη μηχανή με κυλινδρικό δρομέα 3

- Κατά τη μελέτη της λειτουργικής συμπεριφοράς μίας Σ.Μ. διακρίνουμε τη **μεταβατική** και τη **μόνιμη** κατάσταση. Η αναλυτική περιγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς κατά τα δυναμικά φαινόμενα περιγράφεται με ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων, στο οποίο δεν θα επεκταθούμε.
- Μετά το πέρας κάθε μεταβατικού φαινομένου από-καθίσταται η μόνιμη κατάσταση, η οποία περιγράφεται με απλές αλγεβρικές εξισώσεις μιγαδικής μορφής και θα αποτελέσει το αντικείμενο μελέτης στα επόμενα κεφάλαια.
- Προφανώς η μόνιμη κατάσταση είναι αυτή που μας ενδιαφέρει για την επίτευξη του σκοπού μας, δηλαδή την ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας.

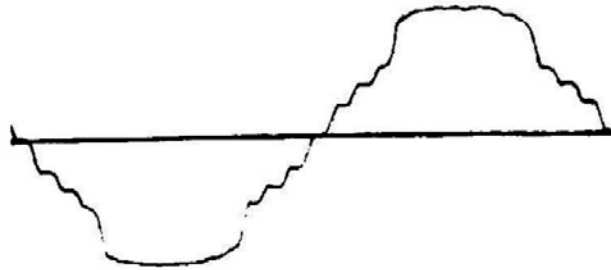
# Καμπύλη πεδίου και χαρακτηριστική εν ΚΕΝΩ



**Καμπύλη πεδίου  $B(x)$**

Για να πάρουμε στους ακροδέκτες της Σ.Μ. κατά το δυνατόν πιο ημιτονοειδή τάση, φροντίζουμε οι αυλακώσεις να είναι έτσι τοποθετημένες στο δρομέα, ώστε να παίρνουμε την καμπύλη πεδίου  $B(x)$ .

# Καμπύλη πεδίου και χαρακτηριστική εν ΚΕΝΩ

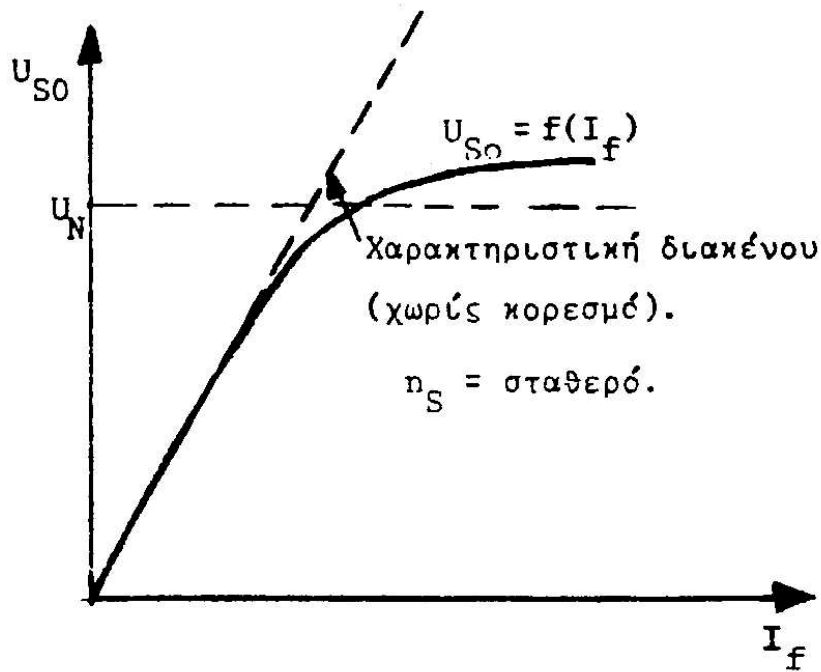


**Παλμογράφημα του μαγνητικού πεδίου στο  
διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα.**

Το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα μιας μηχανής με κατανεμημένους πόλους είναι σχεδόν ημιτονοειδές. Αυτό επάγει στο στάτη μια σχεδόν ημιτονοειδή τάση. Για το σκοπό αυτό οι αυλακώσεις πρέπει να καλύπτουν τα  $2/3$  της περιφέρειας του δρομέα.



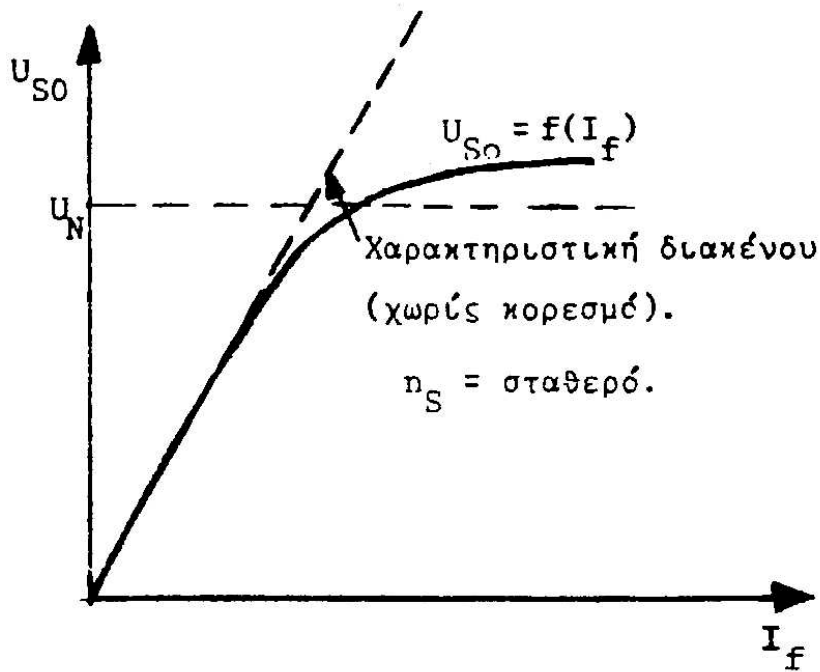
# Χαρακτηριστική εν κενώ



Χαρακτηριστική εν κενώ

- Η τάση στους ακροδέκτες του στάτη ως συνάρτηση του ρεύματος διέγερσης  $I_f$ , όταν το ρεύμα του στάτη είναι μηδέν.
- Στην αρχή είναι ευθεία γραμμή, όταν όμως πλησιάζουμε την ονομαστική τάση αρχίζει ο κόρος, όπου αποκτάει μια καμπυλότητα.
- Είναι προφανές ότι η χαρακτηριστική αυτή ισχύει για ορισμένη ταχύτητα του δρομέα  $n_s = \omega_s / p$ , η οποία για τη σταθερή συχνότητα του δικτύου  $\omega_s$  εξαρτάται από τα ζεύγη πόλων  $p$ .

# Χαρακτηριστική εν κενώ 2



Χαρακτηριστική εν κενώ

- Στο ίδιο διάγραμμα βλέπουμε μια διακεκομμένη γραμμή, η οποία δείχνει τη σχέση μεταξύ τάσης του στάτη και ρεύματος διέγερσης, εάν παραλείψουμε τον κορεσμό του σιδήρου. Στην πραγματικότητα για  $I_f=0$  έχουμε στο στάτη μια μικρή τάση λόγω του παραμένουστος μαγνητισμού στο δρομέα.

# Χαρακτηριστική εν κενώ 3

- Την καμπύλη  $U_{S0}=f(I_f)$  τη μετράμε εν κενώ, στρέφοντας το δρομέα με μια βοηθητική μηχανή και μετρώντας το μεταβαλλόμενο ρεύμα διεγέρσεως καθώς και την αντίστοιχη τάση  $U_{S0}$  του στάτη για κάθε τιμή του  $I_f$ . Με το ρεύμα  $I_f$  δημιουργούμε ένα συνεχές μαγνητικό πεδίο, το οποίο, λόγω της περιστροφής του δρομέα, από το στάτη φαίνεται ως ένα στρεφόμενο πεδίο. Στο τριφασικό τύλιγμα του στάτη επομένως δημιουργείται μια τάση εξ επαγωγής  $U_{S0}$ , η οποία είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής και της συχνότητας.
- Σε κάθε φάση έχουμε μια εναλλασσόμενη μαγνητική ροή λόγω περιστροφής του σταθερού μαγνητικού πεδίου με συχνότητα  $f=pn$ . Η ταχύτητα στην προκειμένη περίπτωση δεν είναι υποχρεωτικά η σύγχρονη που αντιστοιχεί σε ορισμένη συχνότητα, διότι μπορούμε να επιλέξουμε οποιαδήποτε ταχύτητά περιστροφής της κινητήριας μηχανής.
- Όταν παίρνουμε την χαρακτηριστική εν κενώ, προτιμάμε συγκεκριμένη σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$ , για να χρησιμοποιήσουμε αυτή την καμπύλη όταν η μηχανή θα παραλληλισθεί με το δίκτυο ίδιας συχνότητας. Κατά τον παραλληλισμό με το δίκτυο πρέπει οπωσδήποτε η συχνότητα των τάσεων του στάτη να ταυτίζεται με τη συχνότητα του δικτύου (είναι μία από τις προϋποθέσεις παραλληλισμού).
- Η χαρακτηριστική εν κενώ  $U_{S0}=f(I_f)$  έχει την ίδια μορφή με τη μαγνητική χαρακτηριστική των σιδηρομαγνητικών υλικών  $B=f(H)$ .

# Εξισώσεις Σ.Μ. με κυλινδρικό δρομέα

$$u_a = R_s i_a + \frac{d\Psi_a}{dt}$$
$$u_b = R_s i_b + \frac{d\Psi_b}{dt}$$
$$u_c = R_s i_c + \frac{d\Psi_c}{dt}$$

τύλιγμα στάτη

$$0 = R_D i_d + \frac{d\Psi_D}{dt}$$
$$0 = R_Q i_q + \frac{d\Psi_Q}{dt}$$

κλωβός απόσβεσης

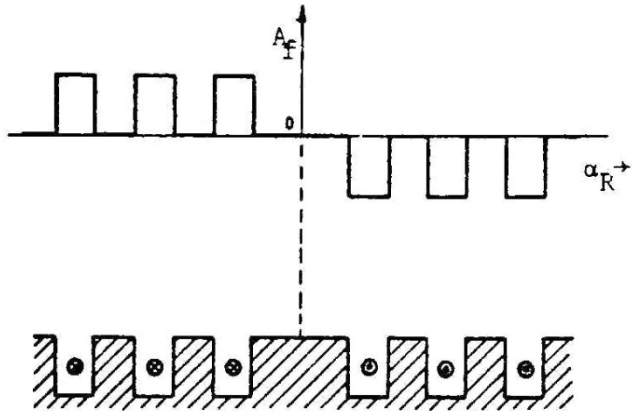
$$u_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt}$$

τύλιγμα διέγερσης

$$m = \frac{\partial w_m}{\partial \gamma}$$

ηλεκτρομαγνητική ροπή

# Ρευματικό στρώμα



Ρευματικό στρώμα ενός κυλινδρικού δρομέα

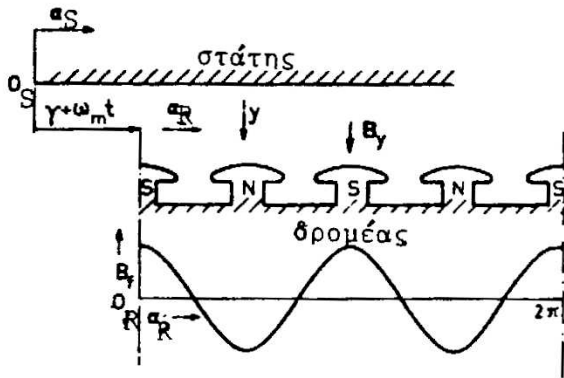
Το συνεχές ρεύμα  $I_f$  του δρομέα δημιουργεί ένα ρευματικό στρώμα. Η βασική αρμονική μετά από ανάλυση κατά Fourier δίνεται από τον τύπο:

$$A_f(\alpha_R) = \frac{4I_f W_f \xi_f}{\pi D} \sin(p\alpha_R)$$

Πεδίο Δρομέα:  $B_f(a_R) = \mu_0 \frac{2I_f W_f \xi_f}{p\pi \delta''} \cos(p a_R)$

Εξίσωση κύματος μαγνητικού πεδίου:  $B_f(a_s, t) = \mu_0 \frac{2W_f \xi_f I_f}{p\pi \delta''} \cos(p a_s + \omega t + \phi_f)$

# Τάση εξ' επαγωγής



$$\omega = p\omega_m$$

$$\varphi_f = p\gamma$$

Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί το ρεύμα διέγερσης επάγει σε κάθε μια σπείρα του στάτη μιας φάσης την τάση:

$$e_s = -\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_0^{\pi/p} B_f(\alpha_s, t) l \frac{D}{2} d\alpha_s$$

$$e_s = \frac{\hat{B}_f}{p} D l \omega \sin(\omega t + \varphi_f)$$

**Μαγνητικό πεδίο του δρομέα και γωνιακές συντεταγμένες**

Η τάση που επάγεται σε μια φάση του στάτη από το πεδίο του δρομέα

$$e_p = W_s \xi_s e_s = \mu_0 \frac{2DI(W_s \xi_s)(W_f \xi_f)}{p^2 \pi \delta''} L_f \omega \sin(\omega t + \varphi_f)$$

# Τάση εξ' επαγωγής 2

Πιο συνοπτικά:

$$e_p = \omega M I_f \sin(\omega t + \phi_f)$$

$$M = \mu_0 \frac{2(W_s \xi_s)(W_f \xi_f) D I}{r^2 \pi \delta''}$$

Η παράμετρος  $M$  είναι η αλληλεπαγωγιμότητα μεταξύ του τυλίγματος του δρομέα και του τυλίγματος μίας φάσης του στάτη. Στα τυλίγματα του στάτη εμφανίζεται η τάση  $e_p$  εξ επαγωγής λόγω περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του δρομέα, όταν ο στάτης βρίσκεται εν κενώ.

# Τάση εξ' επαγωγής 3

Όταν όμως φορτιστεί και δημιουργηθεί ρεύμα, τότε αναπτύσσεται και ένα άλλο μαγνητικό πεδίο, το οποίο, επειδή προέρχεται από τρεις συμμετρικές φάσεις και από ημιτονοειδή ρεύματα, είναι ένα στρεφόμενο πεδίο, όπως συμβαίνει και στην ασύγχρονη μηχανή.

Το πεδίο αυτό επάγει ομοίως μια τάση εξ επαγωγής, η οποία προκύπτει σύμφωνα με τους ίδιους συλλογισμούς όπως και η  $e_p$ .

Πρώτα όμως πρέπει να χωρίσουμε το πεδίο του στάτη σε δύο μέρη δηλαδή στο πεδίο που διαρρέει στάτη και δρομέα, δηλαδή στο κύριο (ωφέλιμο) πεδίο, και στο πεδίο σκεδάσεως. Η τάση  $e_h$  μίας φάσης που προέρχεται από το κύριο μαγνητικό πεδίο του στάτη δίνεται από τη σχέση :

$$e_h = \omega L_h I_s \sqrt{2} \sin(\omega t + \phi)$$

$$L_h = \mu_0 \frac{m(W_s \xi_s)^2 DI}{p^2 \pi \delta''}$$



# Τάση εξ' επαγωγής 4

Εκτός από το κύριο μαγνητικό πεδίο του στάτη υπάρχει και το πεδίο σκέδασης, το οποίο σύμφωνα με τη θεώρηση της σκέδασης των μηχανών αποτελείται από τρία μέρη, δηλαδή από το πεδίο σκέδασης των αυλακώσεων, του διακένου και των κεφαλών των τυλιγμάτων.

Το συνολικό πεδίο σκεδάσεως προκαλεί στο τύλιγμα κάθε φάσης μια τάση εξ επαγωγής, η οποία δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$e_{\sigma} = \omega L_{s\sigma} I_s \sqrt{2} \sin(\omega t + \phi)$$

# Τάση εξ' επαγωγής 5

Μπορούμε τώρα να γράψουμε για τη συνολική τάση εξ επαγωγής που εμφανίζεται σε μία φάση του στάτη π.χ. φάση  $a$ , την εξίσωση:

$$u_{aεπ} = \frac{d\Psi_a}{dt} = e_p + e_h + e_\sigma$$

Στη μόνιμη κατάσταση η τάση  $u_{aεπ}$  είναι ημιτονοειδής. Επομένως για τα ρεύματα και τις τάσεις που εμφανίζονται σε μια φάση του στάτη μπορούμε να γράψουμε :

$$u_a = \sqrt{2}U_s \sin(\omega t)$$

$$i_a = \sqrt{2}I_s \sin(\omega t + \phi)$$

$$u_a = R_s i_a + e_p + e_h + e_\sigma$$

# Τάση εξ' επαγωγής 6

- Όταν η τάση  $e_h$  είναι ημιτονοειδής, το ρεύμα  $i_a$  πρέπει να είναι συνημιτονοειδές διότι η τάση αυτή είναι η πρώτη παράγωγος της ροής  $\Psi_h$ , η οποία είναι ανάλογη του ρεύματος  $i_a$ . Συνημιτονοειδής πρέπει τότε να είναι και η τάση  $u_a$  στους ακροδέκτες.
- Προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση τάσεων για τον στάτη στη μόνιμη κατάσταση:

$$\begin{aligned}\sqrt{2}U_s \cos(\omega t) = & \sqrt{2}I_s [R \cos(\omega t + \phi)] + \\ & + \omega(L_h + L_{s\sigma}) \sin(\omega t + \phi) + \\ & + \omega MI_f \sin(\omega t + \phi)\end{aligned}$$

- Από όπου προκύπτει ότι:

$$\vec{U}_s = (R_s + jX_d) \vec{I}_s + \vec{E}_p$$

# Τάση εξ' επαγωγής 6

- Το άθροισμα της κύριας αυτεπαγωγής  $L_h$  και της επαγωγής σκέδασης  $L_{S\sigma}$  ονομάζεται σύγχρονη επαγωγή.

$$L_d = L_h + L_{S\sigma}$$

- Η τάση  $\vec{E}_p$  που προέρχεται από το μαγνητικό πεδίο του δρομέα λέγεται πολική τάση.

$$\vec{E}_p = j\omega M I_f e^{j\phi_f} = \omega M I_f e^{j(\phi_f + \frac{\pi}{2})} = E_p e^{j\theta}$$

- Μεταξύ των τάσεων  $\vec{E}_p$  και  $\vec{U}_s$  σχηματίζεται η γωνία  $\theta$ , που ονομάζεται πολική γωνία.

$$\theta = \phi_f + \frac{\pi}{2}$$

# Τάση εξ' επαγωγής 7

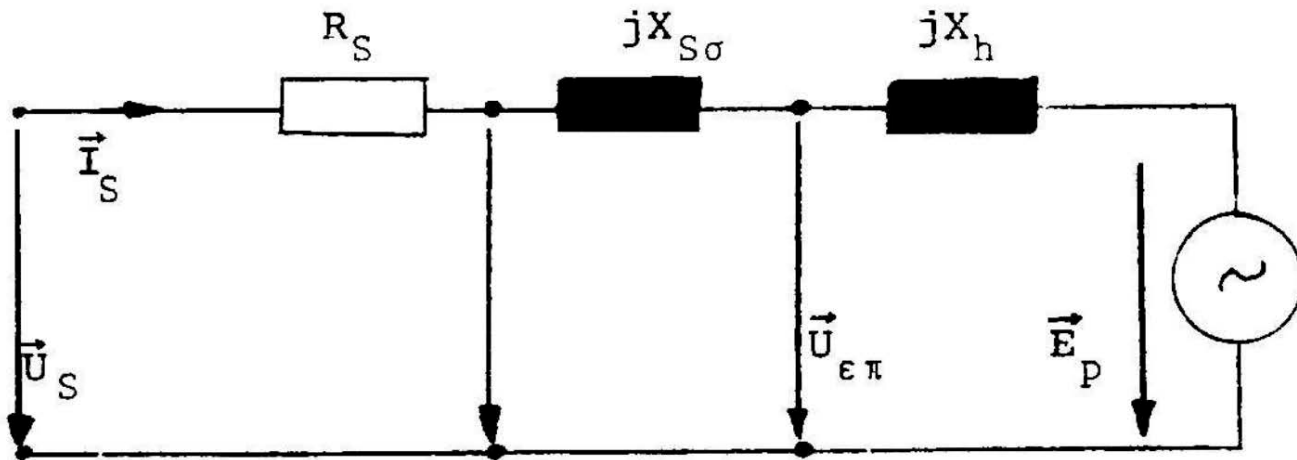
- Η εξίσωση τάσεων για τον δρομέα, όταν η μηχανή βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση έχει την απλή μορφή:

$$U_f = R_f I_f$$

- Στην περίπτωση αυτή ο δρομέας στρέφεται με το σύγχρονο αριθμό στροφών και επομένως η σχετική κίνηση μεταξύ αυτού και των μαγνητικών πεδίων είναι μηδέν. Συνεπώς δεν δημιουργείται τάση εξ επαγωγής στο τύλιγμα διέγερσης, όπως δεν δημιουργείται και στο τύλιγμα απόσβεσης ( $d\Phi/dt=0$ ).
- Το ρεύμα του στάτη  $I_s$  εξαρτάται από τα στοιχεία  $R_s$  και  $X_d$  καθώς και από την πολική γωνία  $\theta$ , η οποία είναι ένα μέτρο για τη μηχανική φόρτιση και κατά αυτόν τον τρόπο για τη ροπή της μηχανής.

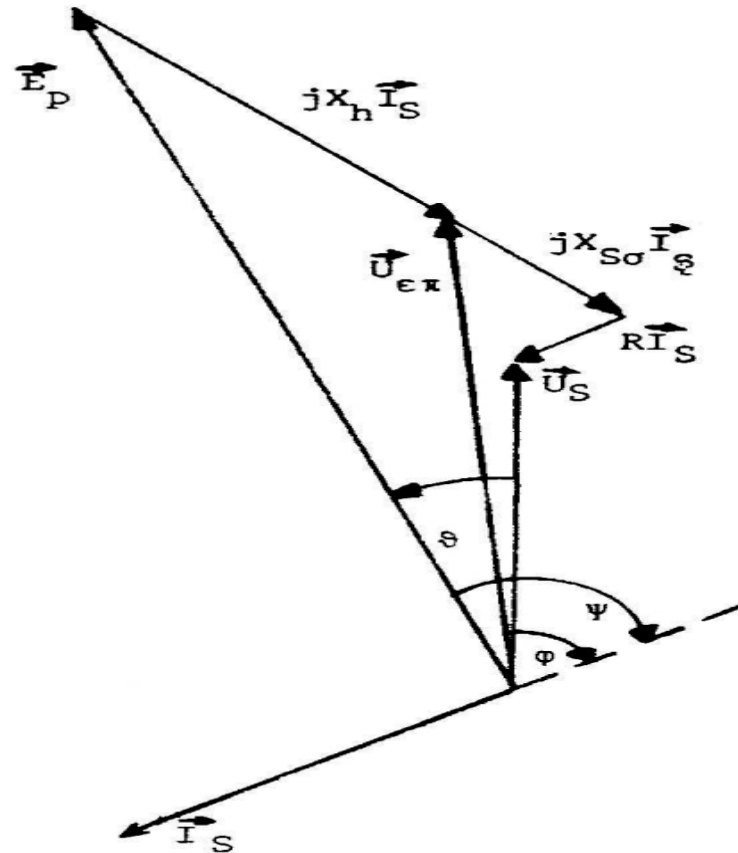
# Ισοδύναμο Κύκλωμα

- Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει το ακόλουθο ισοδύναμο κύκλωμα της Σ.Μ. με κατανομημένους πόλους:



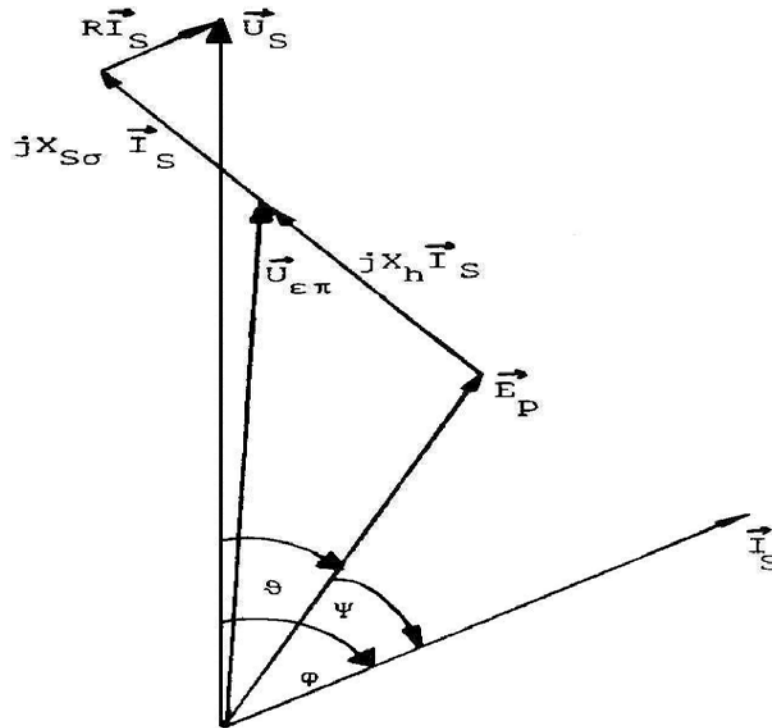
Ισοδύναμο κύκλωμα Σ.Μ. με κυλινδρικό δρομέα

# Διανυσματικό διάγραμμα



Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης μηχανής με κυλινδρικό δρομέα ως γεννήτρια σε υπερδιέγερση

# Διανυσματικό διάγραμμα 2



Διανυσματικό διάγραμμα Σ.Μ. με κυλινδρικό δρομέα ως κινητήρας



# 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



Πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ