



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ II

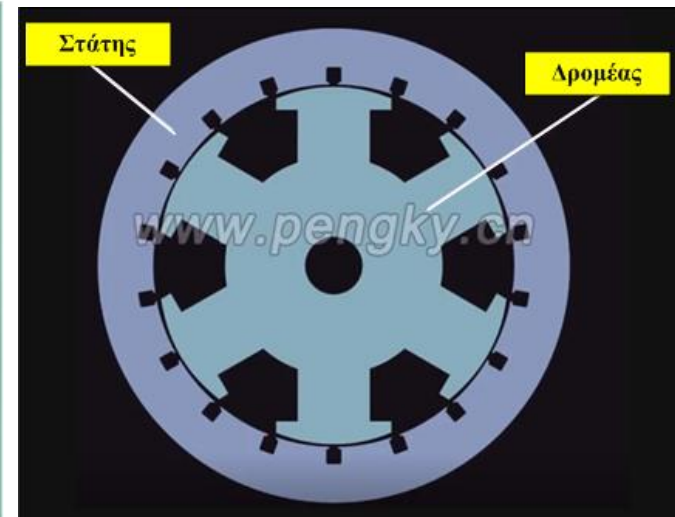
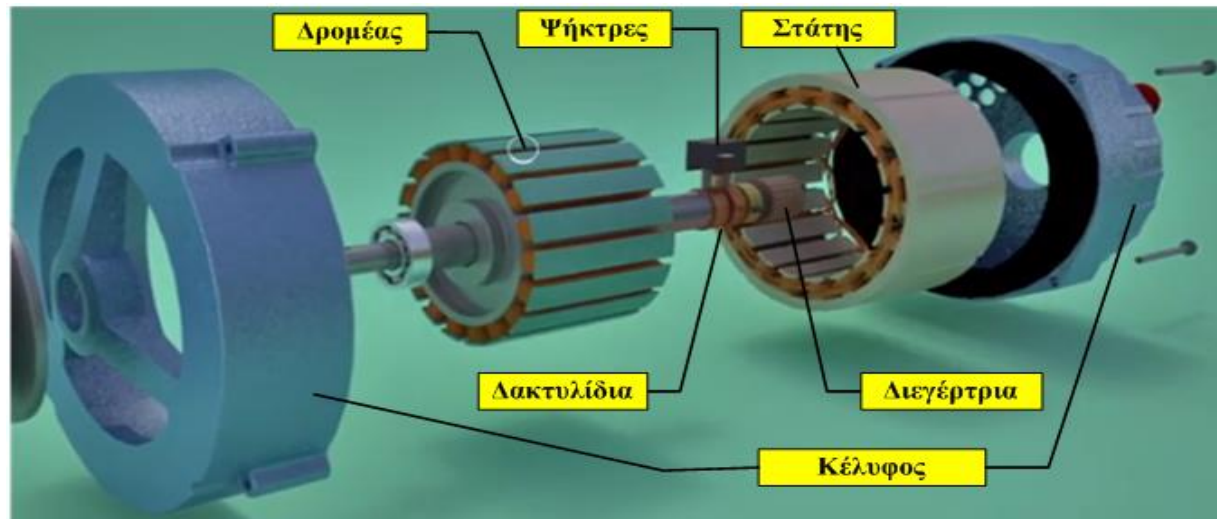
ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

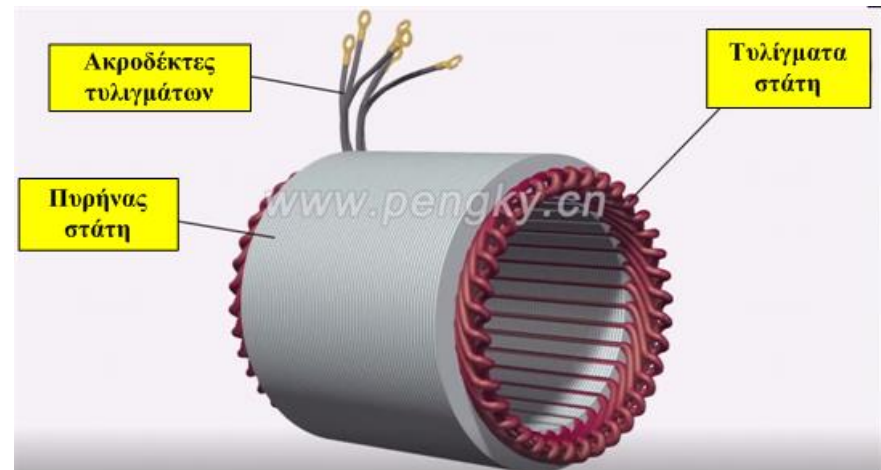
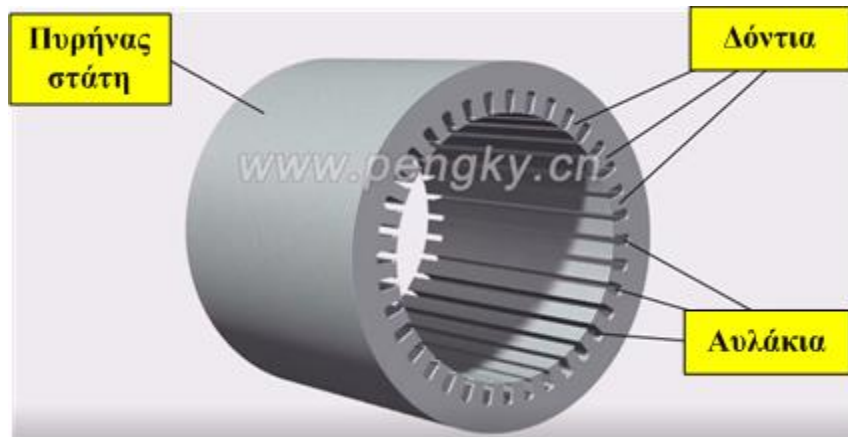
Σε αντίθεση με την ασύγχρονη μηχανή η οποία είναι **απλής τροφοδότησης** (καθόσον το τύλιγμα του δρομέα τροφοδοτείται εξ' αλληλεπαγωγής από το τύλιγμα του στάτη), η **σύγχρονη μηχανή** είναι **διπλής τροφοδότησης**.

Το **τύλιγμα τυμπάνου** είναι απόλυτα όμοιο με εκείνο των μηχανών επαγωγής, βρίσκεται συνήθως στο **στάτη** και είναι **τριφασικό διανεμημένο τύλιγμα**.

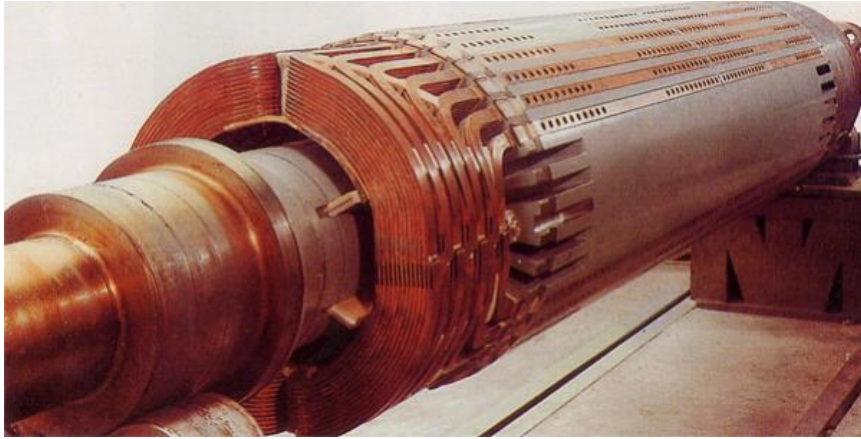
Το **τύλιγμα του δρομέα** γνωστό και ως **τύλιγμα διέγερσης** ή **τύλιγμα πεδίου**, είναι τύλιγμα **συνεχούς ρεύματος** και ανάλογα του αριθμού των πόλων μπορεί να είναι διανεμημένο ή συγκεντρωμένο. Σε σπάνιες περιπτώσεις, είναι δυνατόν το τύλιγμα τυμπάνου να βρίσκεται στο δρομέα και το τύλιγμα διέγερσης στο στάτη.



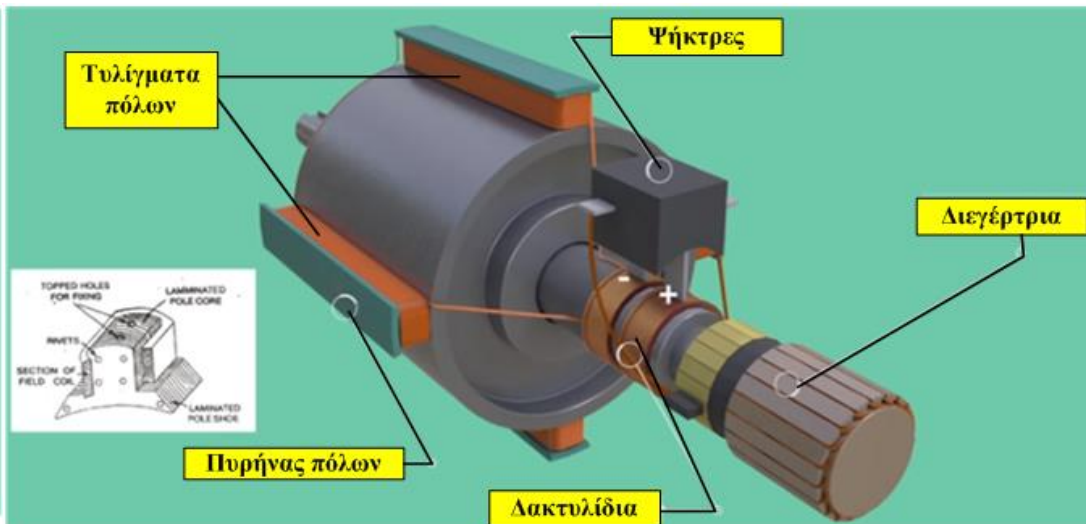
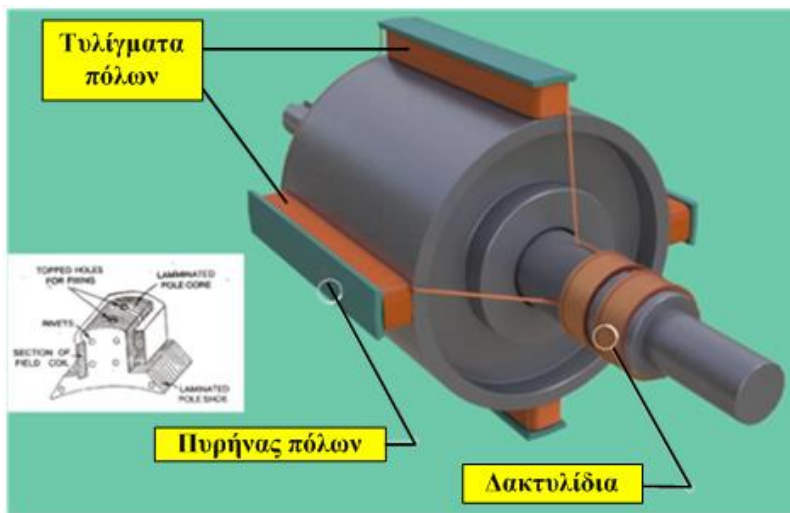
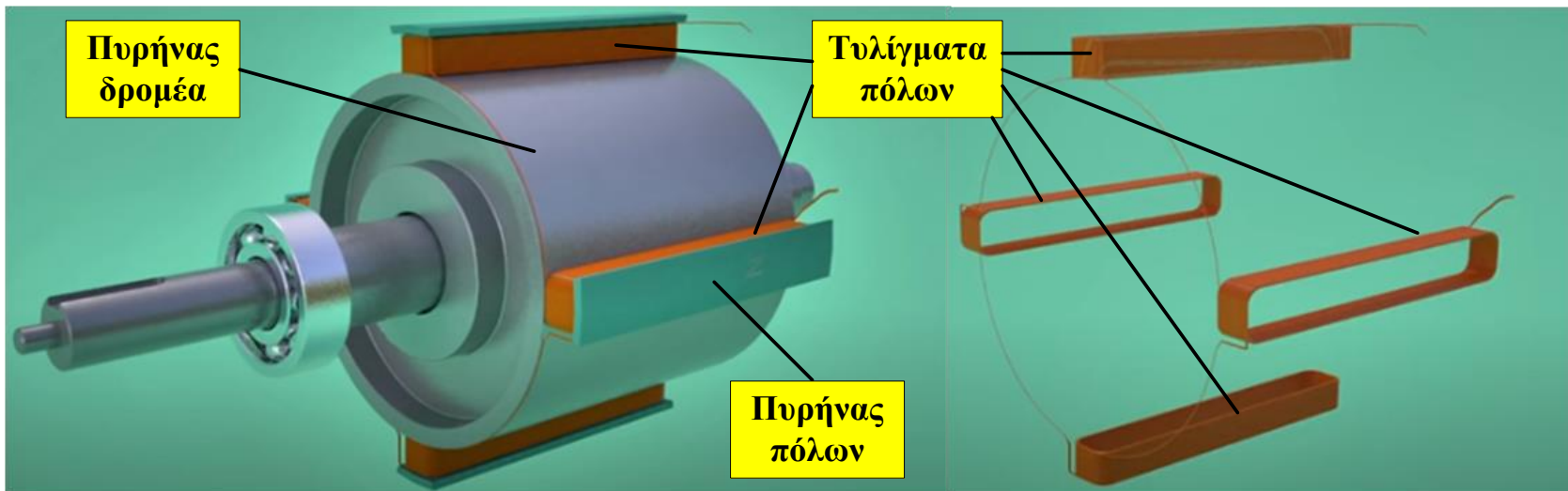
Στάτης σύγχρονης μηχανής

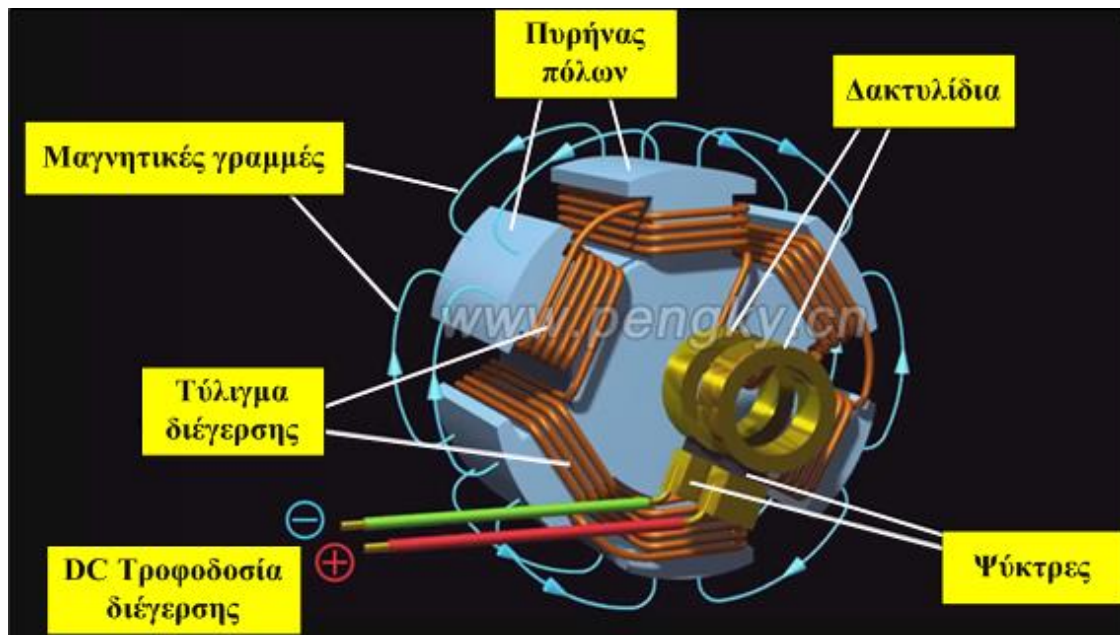
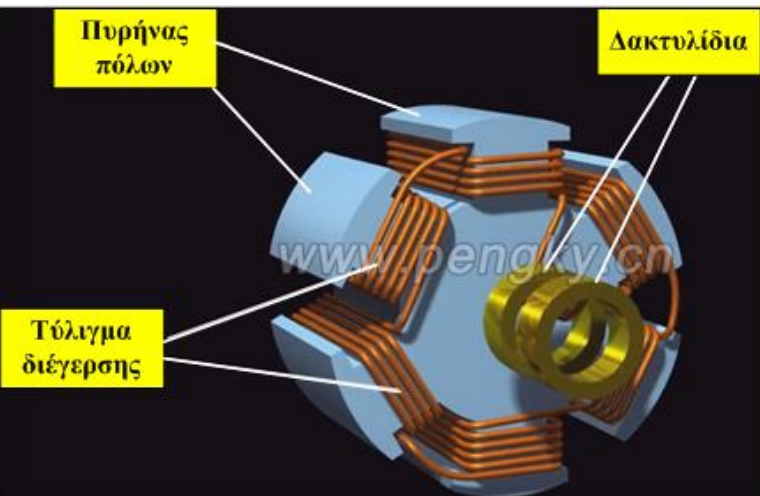
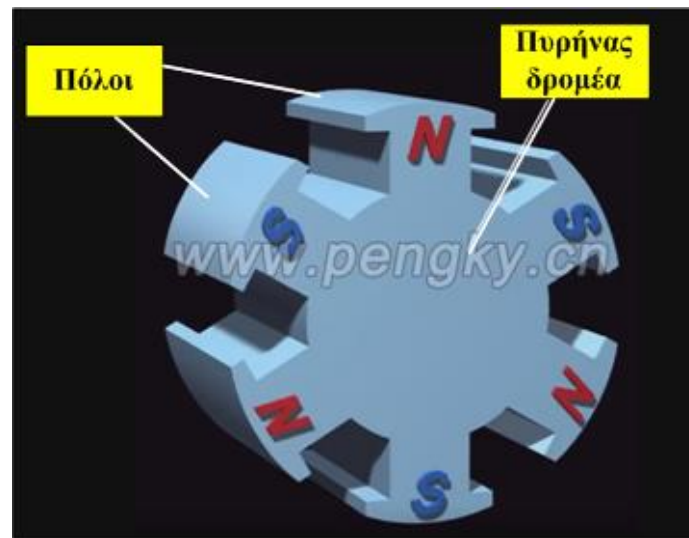
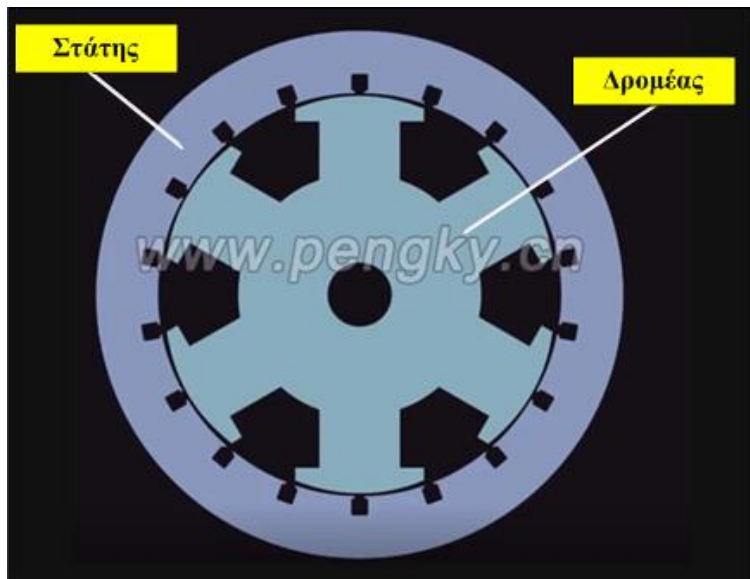


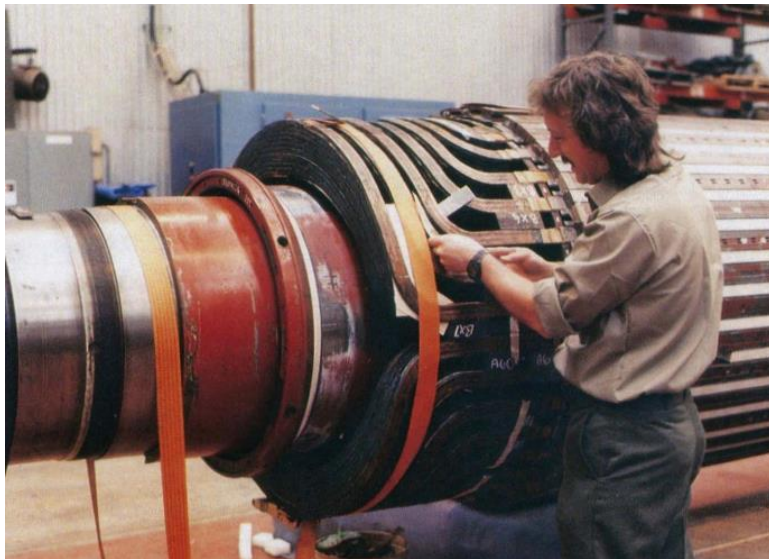
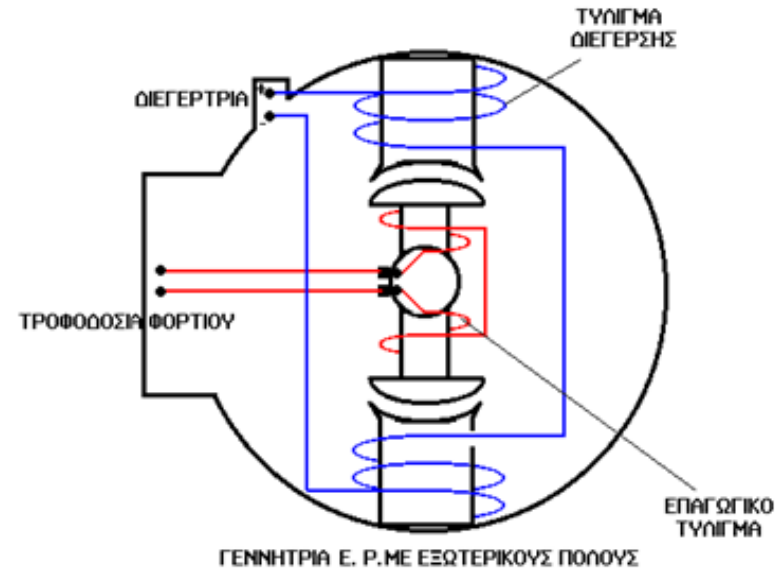
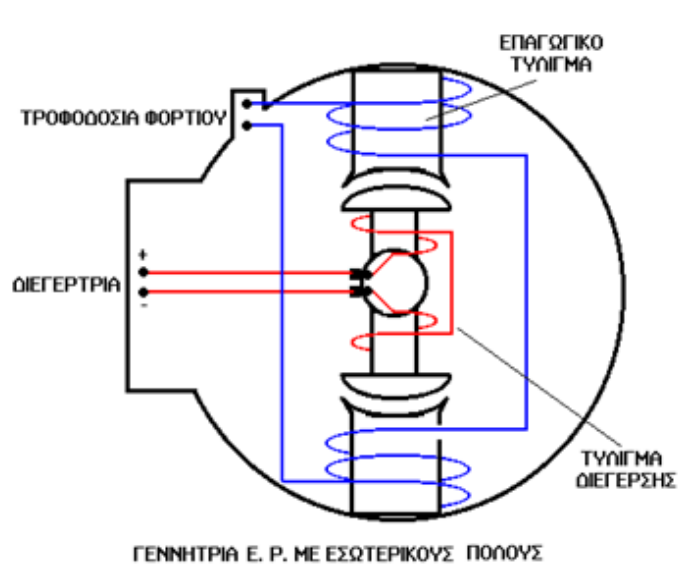
Δρομέας σύγχρονης μηχανής



Δρομέας σύγχρονης μηχανής



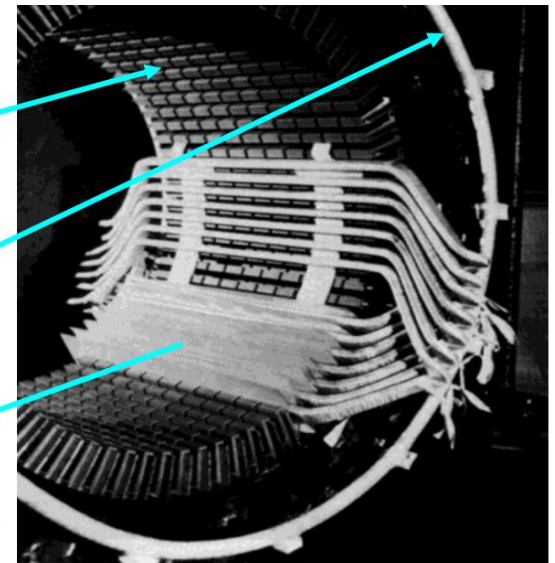




Πυρήνας από ελάσματα σιδήρου
(με αυλακώσεις)

Μεταλλικό περίβλημα

Μονομένες ράβδοι χαλκού
τοποθετημένες στις αυλακώσεις
για τη δημιουργία των
περιλίξεων στις τρεις φάσεις

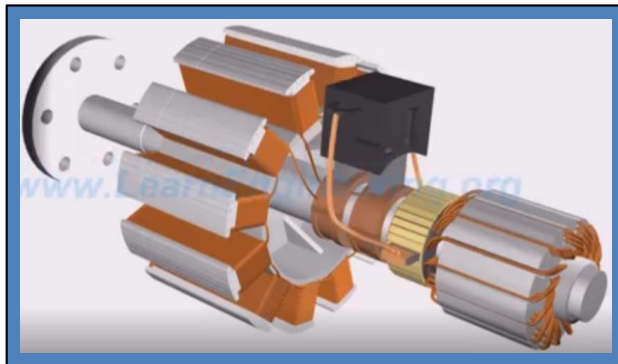
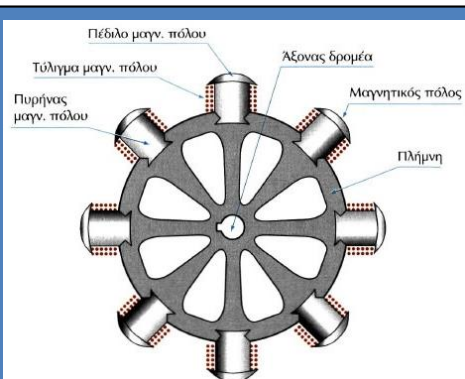


Κατηγορίες σύγχρονων μηχανών (Ανάλογα με τον αριθμό των πόλων)

- **Μηχανές κυλινδρικού δρομέα** (Πολύστροφες μηχανές. Συνήθως είναι διπολικές ή τετραπολικές)
- **Μηχανές έκτυπων πόλων** (Αργόστροφες μηχανές. Πρακτικά άνω των τεσσάρων πόλων, οι σύγχρονες μηχανές κατασκευάζονται με έκτυπους πόλους).

Οι μηχανές ομοιόμορφου διάκενου, εμφανίζουν **καλύτερα δυναμικά χαρακτηριστικά** .

Οι δρομείς των μηχανών ομοιόμορφου διάκενου είναι **μεγαλύτερου ενεργού μήκους** και **μικρότερης διαμέτρου**, από τους αντίστοιχους δρομείς των μηχανών με έκτυπους πόλους (περιορισμός των φυγοκεντρικών δυνάμεων αλλά και μείωση της ροπής αδράνειας των στρεφόμενων μαζών).



Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

- Ανεξάρτητα από το είδος της λειτουργίας της ως **κινητήρα** ή **γεννήτρια** και τις συνθήκες φόρτισης, στρέφεται πάντα με **σταθερό αριθμό στροφών** (**σύγχρονο αριθμό στροφών**)
- Η **ολίσθηση** του δρομέα είναι **μηδενική** (το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής και ο δρομέας, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, **στρέφονται με την ίδια ταχύτητα**).

ΧΡΗΣΗ : Οι σύγχρονες μηχανές, χρησιμοποιούνται κυρίως ως **γεννήτριες** και λιγότερο ως **κινητήρες** (σε αντλητικούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς)

Βασικό πλεονέκτημα σύγχρονης γεννήτριας

Εύκολη ρύθμιση της ενεργής και της άεργης ισχύος.

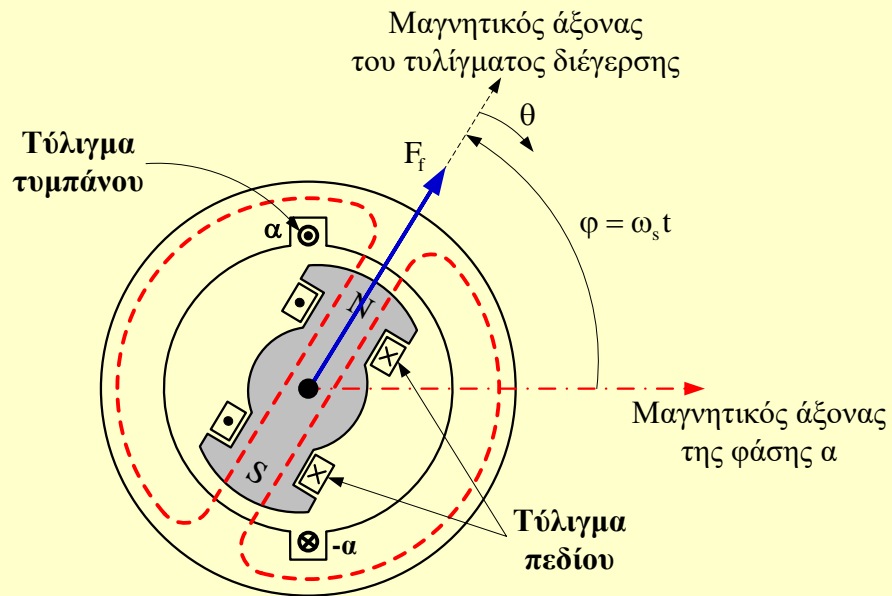
Χαρακτηριστικό των σύγχρονων κινητήρων

Με **κατάλληλη** ρύθμιση της διέγερσης, για τις **ίδιες συνθήκες φόρτισης** μπορεί να εμφανίζουν **χωρητική, επαγωγική ή ωμική συμπεριφορά**.

Υπάρχουν **σύγχρονοι κινητήρες** (στα κέντρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και στους υποσταθμούς βιομηχανικών μονάδων μεγάλης ισχύος), οι οποίοι συνήθως είναι χωρίς εξωτερικούς άξονες και οι οποίοι χρησιμοποιούνται σαν **τοπικές μονάδες αντιστάθμισης της άεργης ισχύος**. Οι κινητήρες αυτοί, **δεν παράγουν μηχανικό έργο** («επιπλέουν» στο δίκτυο) και κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου, με κατάλληλη ρύθμιση της διέγερσης τους, συμπεριφέρονται είτε ως **ιδανικοί πυκνωτές** είτε ως **ιδανικά πηνία**.

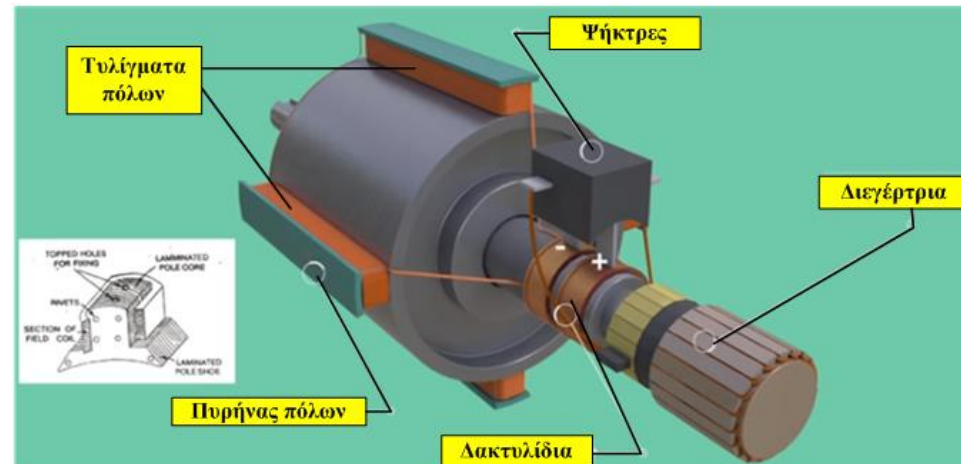
Κύματα χώρου μαγνητεγερτικών δυνάμεων τυλιγμάτων στάτη και δρομέα

Διπολική τριφασική σύγχρονη μηχανή με ομοιόμορφο διάκενο

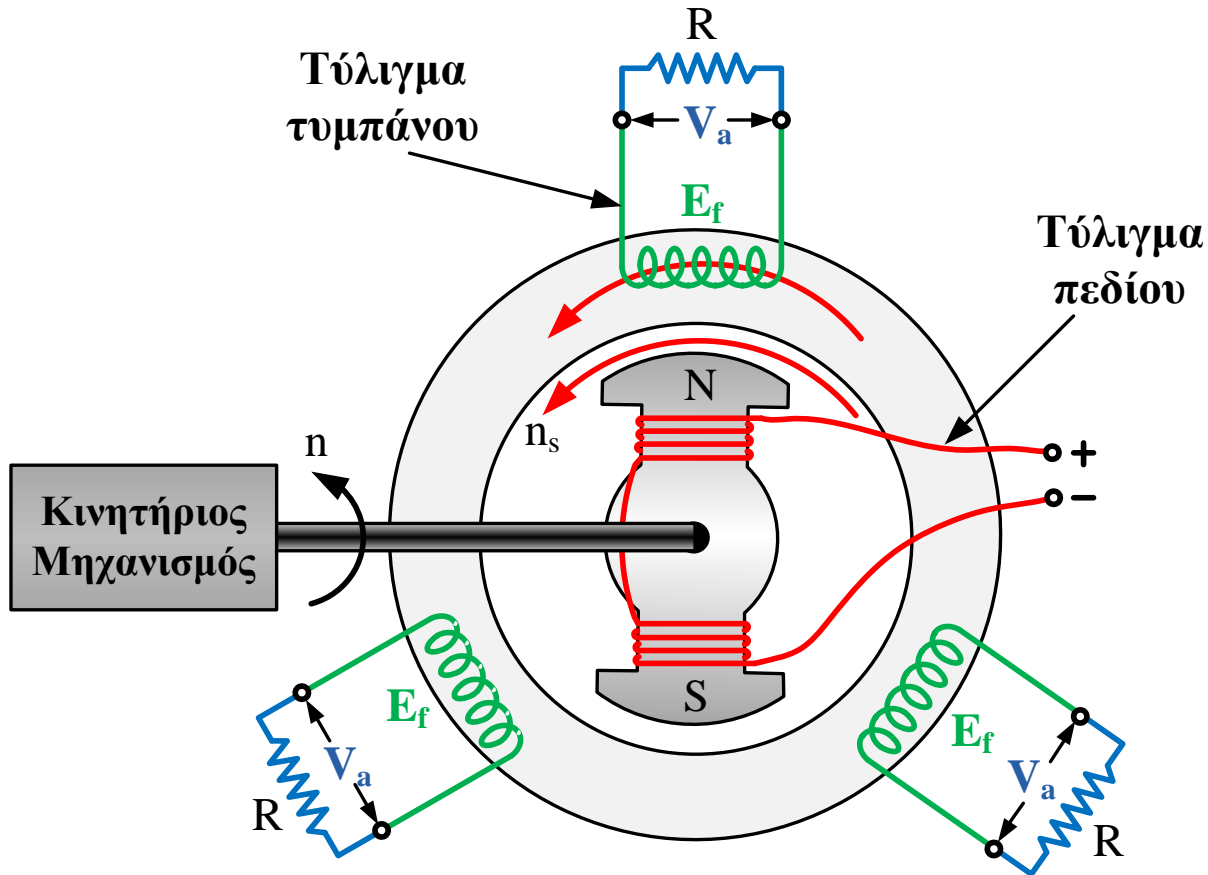


Τύλιγμα τύμπανου βρίσκεται στο **στάτη** (τρία επιμέρους όμοια 1Φ διανεμημένα τυλίγματα ένα για κάθε φάση, με τους μαγνητικούς τους άξονες μετατιθέμενους στο χώρο κατά 120 ηλεκτ. μοίρες).

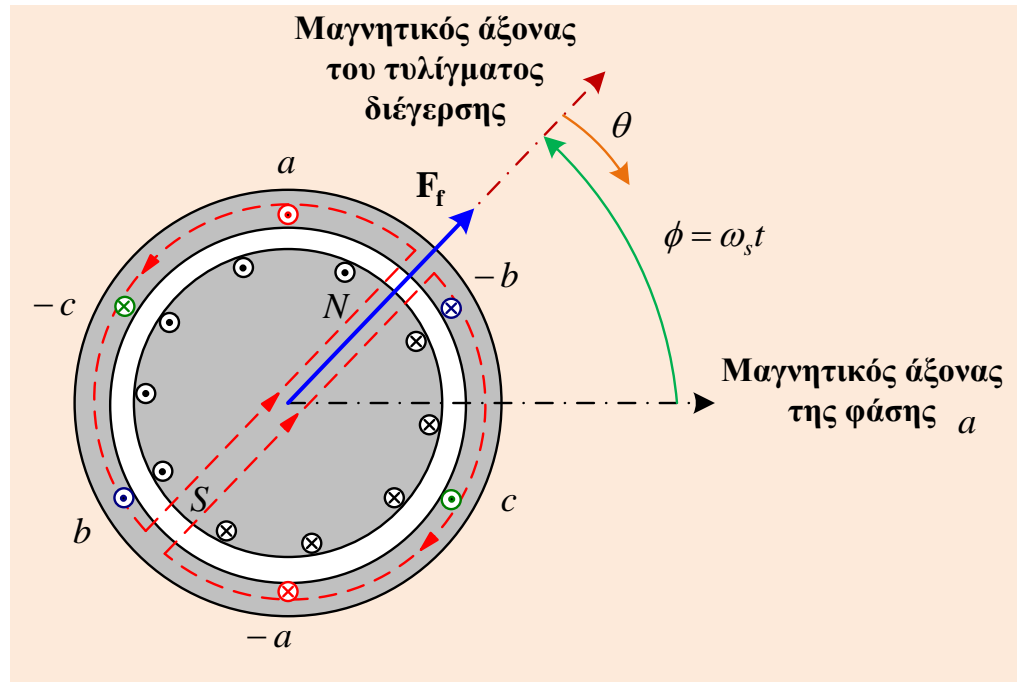
Τύλιγμα του πεδίου ή διέγερσης βρίσκεται στο **δρομέα** (τροφοδοτείται με Σ.Ρ. μέσω ψηκτρών οι οποίες ολισθαίνουν σε δακτυλίους κατάλληλα τοποθετημένους στο δρομέα).



Λειτουργία Γεννήτριας

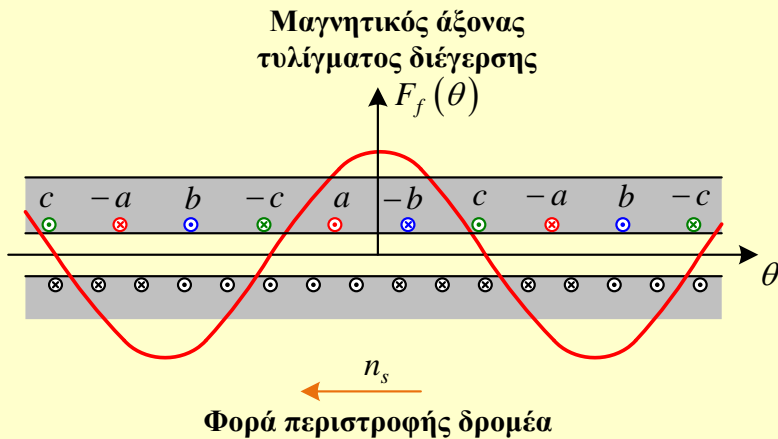


Κύματα χώρου μαγνητεγερτικών τυλιγμάτων στάτη και δρομέα



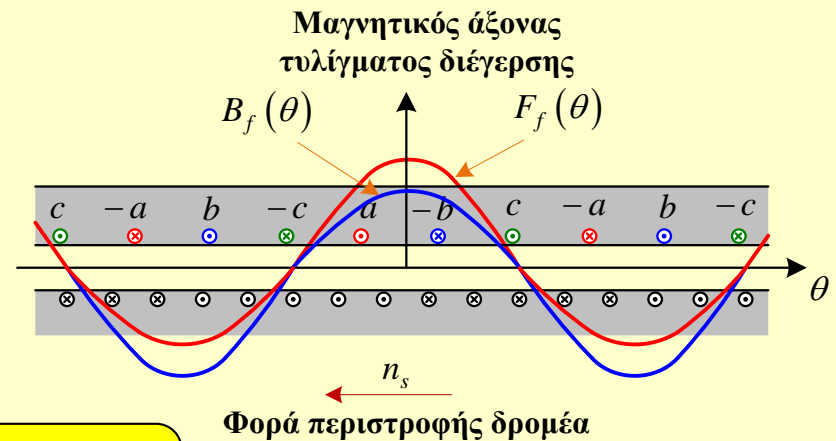
- **Τύλιγμα τύμπανου:** Βρίσκεται στο **στάτη** (τρία επιμέρους όμοια 1Φ διανεμημένα τυλίγματα ένα για κάθε φάση, με τους μαγνητικούς τους άξονες μετατιθέμενους στο χώρο κατά 120 ηλεκτ. μοίρες).
- **Τύλιγμα του πεδίου ή διέγερσης:** Βρίσκεται στο **δρομέα** (τροφοδοτείται με Σ.Ρ. μέσω ψηκτρών οι οποίες ολισθαίνουν σε δακτυλίους κατάλληλα τοποθετημένους στο δρομέα).

Θεμελιώδη συνιστώσα της (Μ.Ε.Δ.) του τυλίγματος του δρομέα



$$F_f(\theta) = \frac{4}{\pi} K_{wf} \frac{N_f}{P} I_f \cos \theta = F_{fm} \cos \theta$$

Θεμελιώδεις συνιστώσες κυμάτων χώρου της πυκνότητας μαγνητικής ροής και της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος διέγερσης



- Ο δρομέας, κινείται με τη σύγχρονη ταχύτητα, από κινητήρα συνδεδεμένο στον άξονα.
- Η **ακτινική διανομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής** μπορεί να παρασταθεί από την αντίστοιχη **θεμελιώδη συνιστώσα χώρου**, η οποία είναι σε φάση με το κύμα χώρου της Μ.Ε.Δ.
- Το **κύμα πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής**, μπορεί να καταστεί κατά προσέγγιση ημιτονοειδές, με κατάλληλη διαμόρφωση του προσώπου των πόλων.

$$B_f(\theta) = B_{fm} \cos \theta$$

- Μόλις τροφοδοτηθεί ο στάτης από **συμμετρικό σύστημα ρευμάτων**, δημιουργείται **στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο** σταθερού πλάτους που στρέφεται με τη n_s .

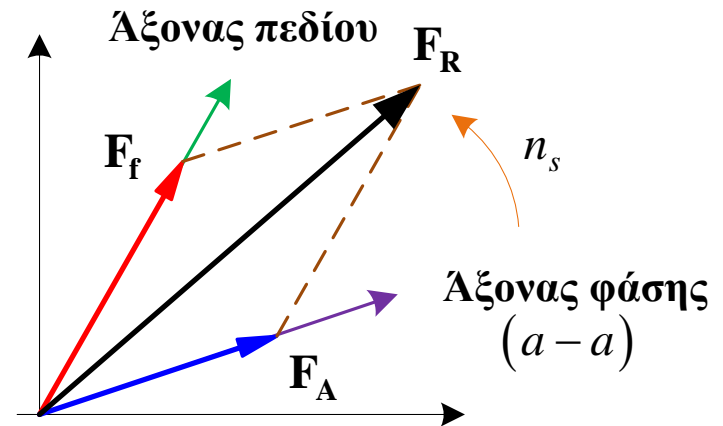
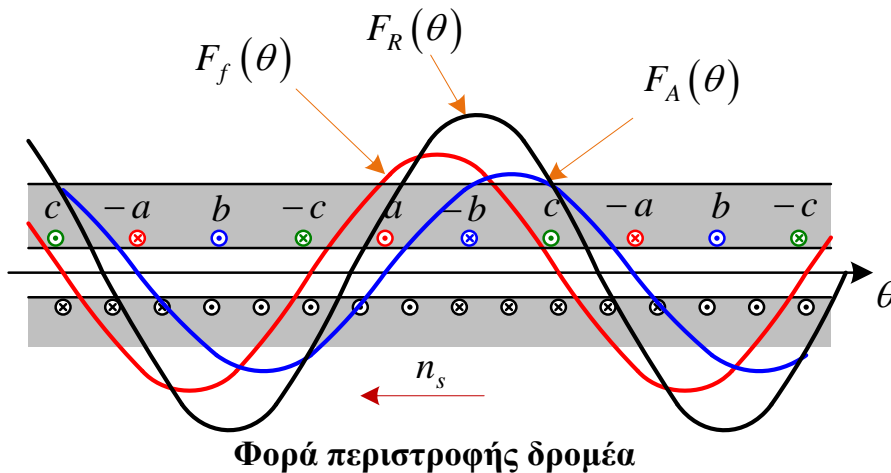
Μέγιστη τιμή της συνισταμένης Μ.Ε.Δ.

$$F_{Am} = \frac{3}{2} \left(\frac{4}{\pi} K_{wa} \frac{N_{ph}}{P} \right) I_m$$

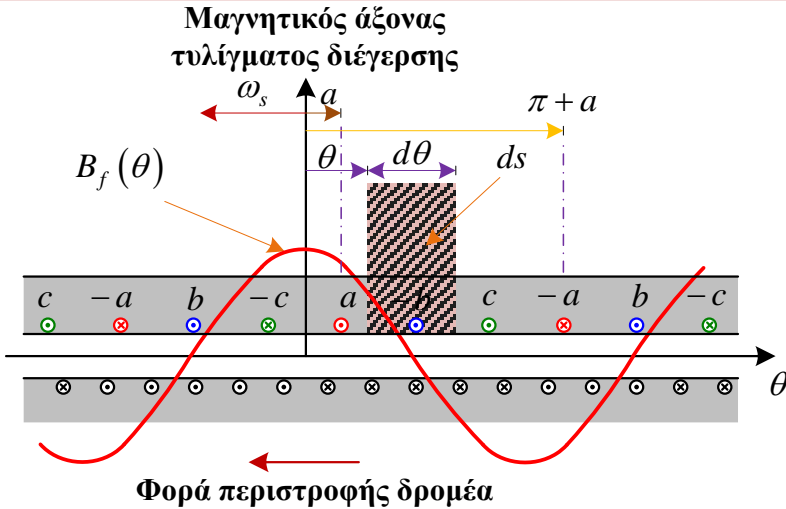
- Το κύμα αυτό, είναι γνωστό ως **αντίδραση τυμπάνου** και είναι **στάσιμο**.
- Η **κορυφή του κύματος χώρου της Μ.Ε.Δ.** του τυλίγματος τυμπάνου ταυτίζεται με το μαγνητικό άξονα της κάθε μίας φάσης

Συνιστάμενο θεμελιώδες κύμα Μ.Ε.Δ. στο διάκενο της μηχανής

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_A$$



Ανάπτυξη τάσης



- Το θεμελιώδες κύμα πυκνότητας μαγνητικής ροής του δρομέα **περιστρέφεται με τη n_s** .
- Το πεδίο του δρομέα είναι ακίνητο στο χώρο και το **τύλιγμα τυμπάνου** περιστρέφεται με **ταχύτητα ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς περιστροφής**.

Μαγνητική ροή ανά πόλο στο τύλιγμα μιας φάσης

$$\varphi_{af} = -\Phi_f \sin \omega t$$

όπου

$$\Phi_f = \frac{4}{P} B_{fm} l r$$

Τάση διέγερσης: Η επαγόμενη τάση στο τύλιγμα μιας φάσης

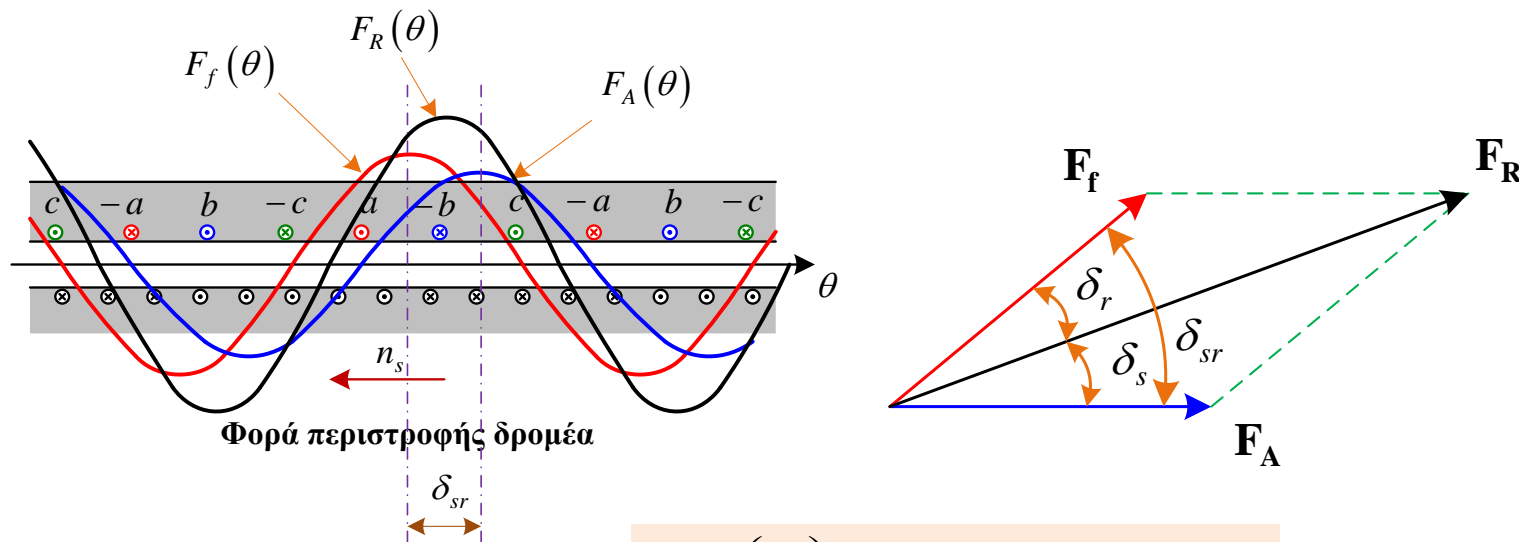
$$e_{af} = -\frac{d\lambda_{af}}{dt} = -N_{ph} \Phi_f \frac{d}{dt} (-\sin \omega t) = N_{ph} \Phi_f \cos \omega t = E_m \cos \omega t$$

Με ενεργό τιμή

$$E_f = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_{ph} \Phi_f}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_{ph} \Phi_f$$

Ανάπτυξη ροπής

- Τα μαγνητικά πεδία των τυλιγμάτων **διέγερσης** και **τυμπάνου** στρέφονται με την ίδια n_s και την ίδια φορά περιστροφής, σχηματίζοντας μια σταθερή γωνία μεταξύ τους. Η γωνία αυτή, καθορίζεται από το **Σ.Ι.** υπό τον οποίο λειτουργεί η μηχανή.
- **Ανάπτυξη ροπής:** Στην προσπάθεια των δύο πεδίων να ευθυγραμμίσουν τους μαγνητικούς τους άξονες.
 - ✓ Στην περίπτωση του **κινητήρα** αποτελεί **κινούσα ροπή**
 - ✓ Στην περίπτωση της **γεννήτριας** **αντιδρώσα ροπή**.



Παραγόμενη ροπή

$$\tau = -\left(\frac{P}{2}\right) \frac{\mu_o \pi D l}{2g} F_{fm} F_{Am} \sin \delta_{sr}$$

Παραγόμενη ροπή: Το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του συνισταμένου μαγνητικού πεδίου με κάθε ένα από τα συνιστώσα πεδία στάτη και δρομέα ξεχωριστά

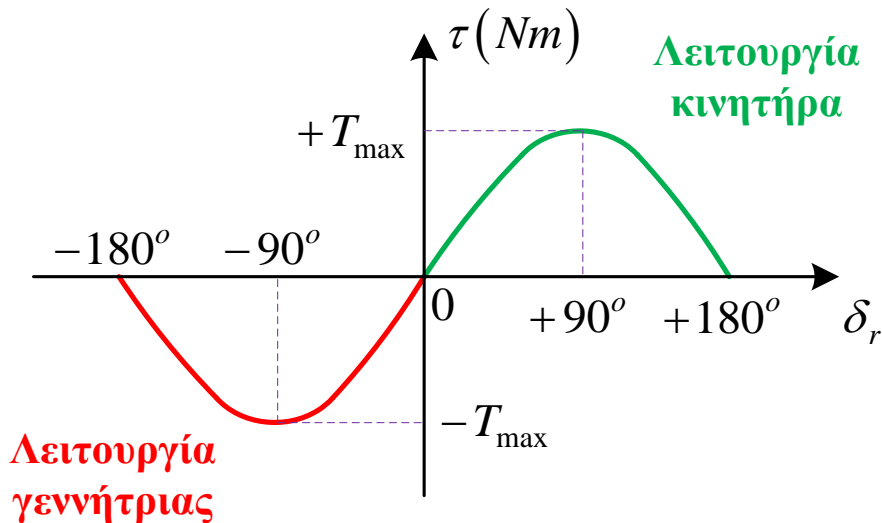
$$\tau = -\left(\frac{P}{2}\right) \frac{\mu_o \pi D l}{2g} F_{fm} F_{Rm} \sin \delta_r$$

$$\tau = -\left(\frac{P}{2}\right) \frac{\mu_o \pi D l}{2g} F_{Am} F_{Rm} \sin \delta_s$$

Εναλλακτική έκφραση για την παραγόμενη ροπή: Μέσω της συνισταμένης μαγνητικής ροής.

$$\tau = -\frac{\pi}{2} \left(\frac{P}{2}\right)^2 \Phi_R F_{fm} \sin \delta_r$$

$$\tau = -\frac{\pi}{2} \left(\frac{P}{2}\right)^2 \Phi_R F_{Am} \sin \delta_s$$

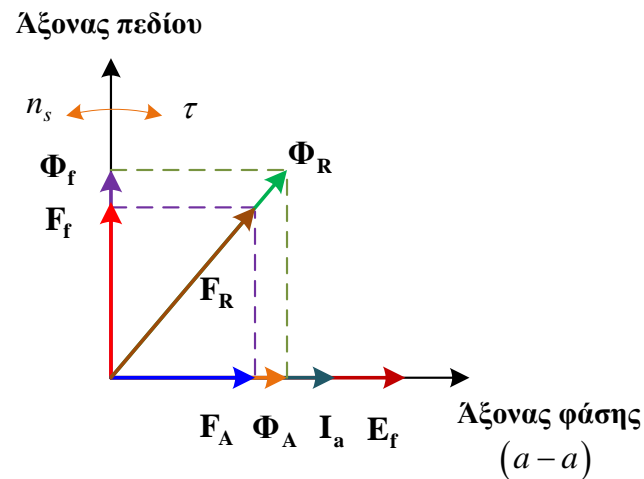
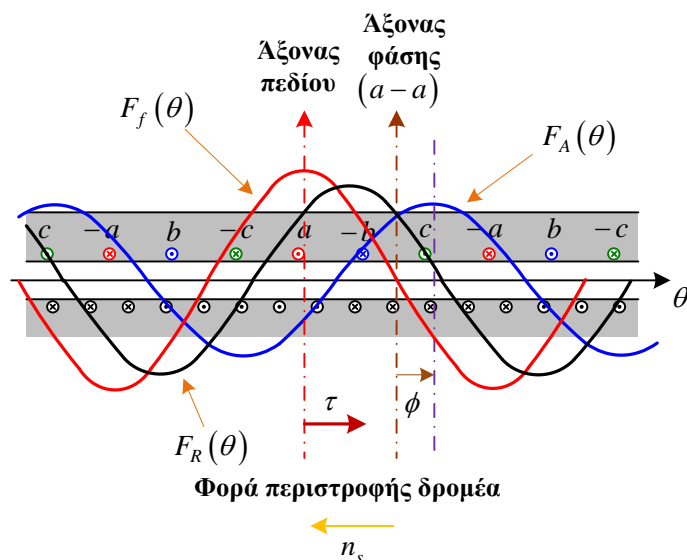


- Για σταθερή τάση τροφοδοσίας και σταθερό ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης η Μ.Ε.Δ. του δρομέα παραμένει **σταθερή**.
- Οι **απαιτήσεις σε ροπή** κατά την υπό φορτίο λειτουργία, αναλαμβάνονται αποκλειστικά από τη **μεταβολή της γωνίας δ_r (γωνία ροπής)**.

Κύματα Μ.Ε.Δ. πυκνότητας μαγνητικής ροής και τάσης

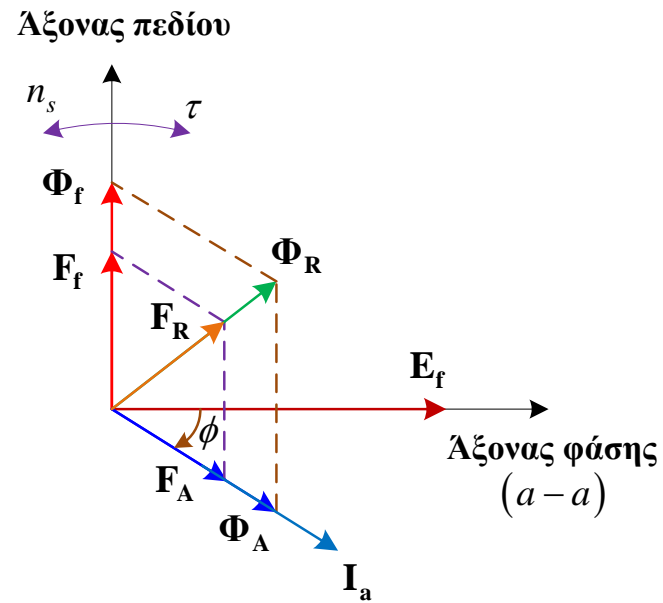
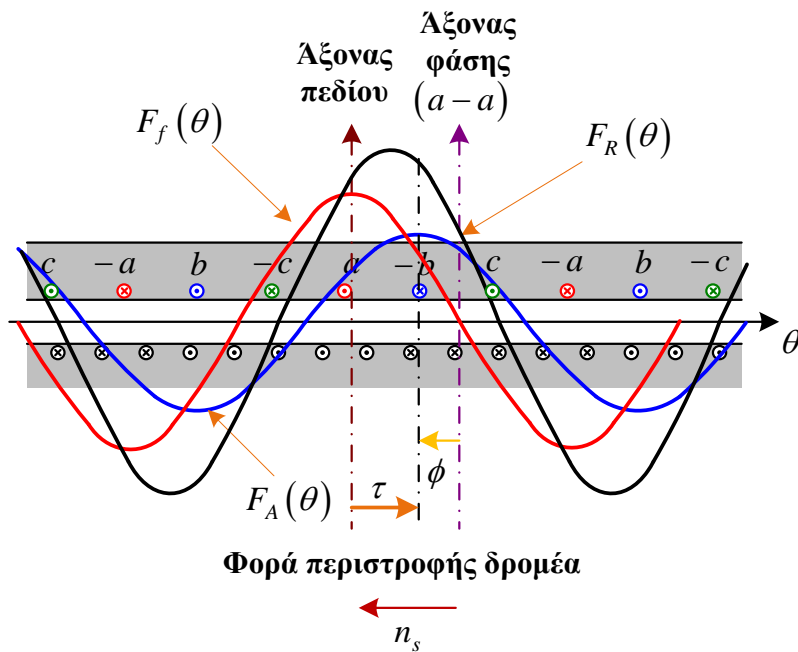
Σύγχρονη γεννήτρια-ωμική φόρτιση

- Η επαγόμενη τάση διέγερσης και το ρεύμα τυμπάνου μιας φάσης, έχουν την **ίδια θετική κατεύθυνση**.
- Η **φασική απόκλιση** μεταξύ της τάσης διέγερσης και του ρεύματος τυμπάνου σε κάθε φάση είναι **μηδενική**
 - ✓ Το κύμα της Μ.Ε.Δ. του δρομέα προηγείται χρονικά της τάσης διέγερσης κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες.
 - ✓ Το κύμα χώρου της Μ.Ε.Δ. του πεδίου διέγερσης προηγείται του τυλίγματος τυμπάνου μιας φάσης κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες.



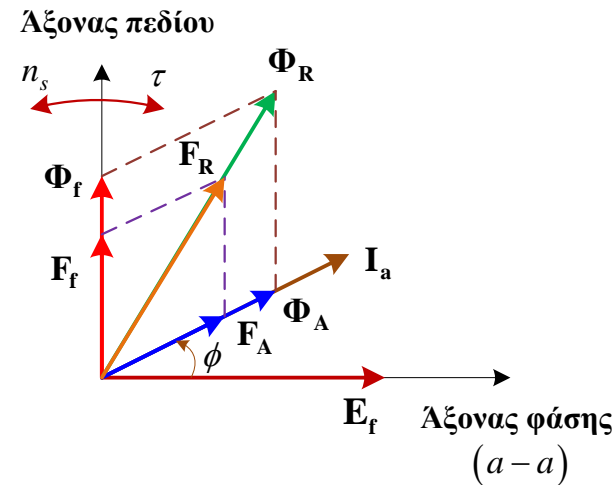
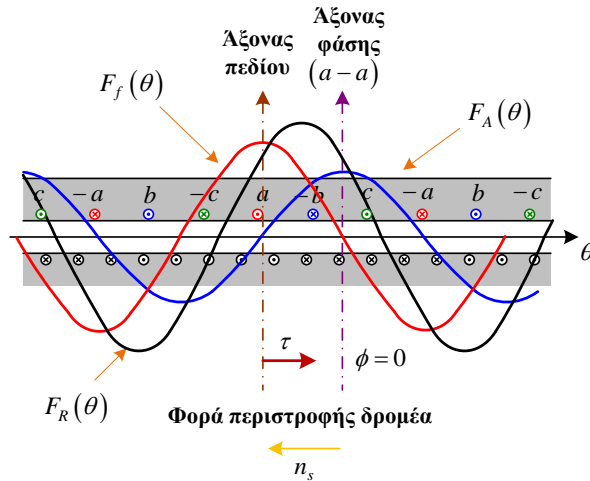
Σύγχρονη γεννήτρια-επαγωγική φόρτιση

- Το ρεύμα τυμπάνου **καθυστερεί** ως προς την τάση διέγερσης κατά μια **γωνία ϕ** .
- Το κύμα Μ.Ε.Δ. του δρομέα **προηγείται** από το αντίστοιχο κύμα της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος τυμπάνου κατά **γωνία $(90 + \phi)$** ηλεκτρικές μοίρες



Σύγχρονη γεννήτρια-χωρητική φόρτιση

- Το ρεύμα τυμπάνου προηγείται έναντι της τάσης διέγερσης κατά μια **γωνία ϕ** .
- Ο άξονας της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος τυμπάνου **βρίσκεται μπροστά** από το μαγνητικό άξονα μιας φάσης, **γωνία ϕ** ηλεκτρικές μοίρες.
- Το κύμα της Μ.Ε.Δ. του δρομέα, **προηγείται** από το αντίστοιχο κύμα της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος τυμπάνου, **γωνία ίση με $(90 - \phi)$** ηλεκτρικές μοίρες.



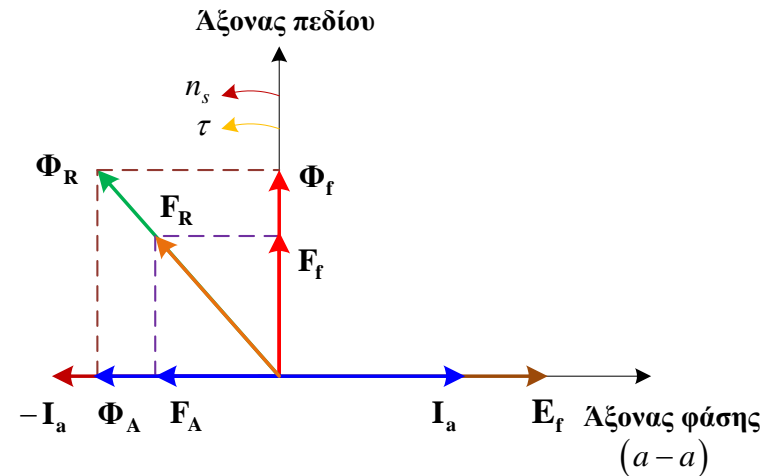
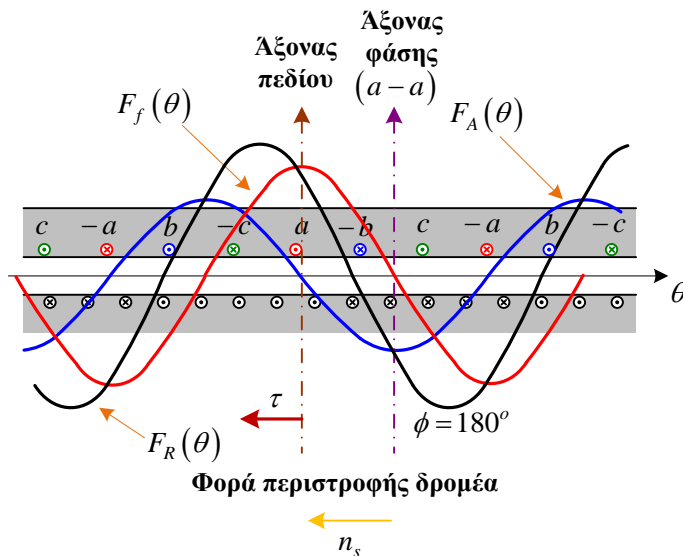
Για **λειτουργία γεννήτριας** και ανεξάρτητα από τις συνθήκες φόρτισης, **το μαγνητικό πεδίο του δρομέα προηγείται από το μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος τυμπάνου.**

Η **αναπτυσσομένη ηλεκτρομαγνητική ροπή** και στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις **αντιτίθεται στην κίνηση, με αποτέλεσμα την ανάγκη απορρόφησης μηχανικής ισχύος για τη συντήρηση της κίνησης**

Σύγχρονος κινητήρας-ωμική φόρτιση

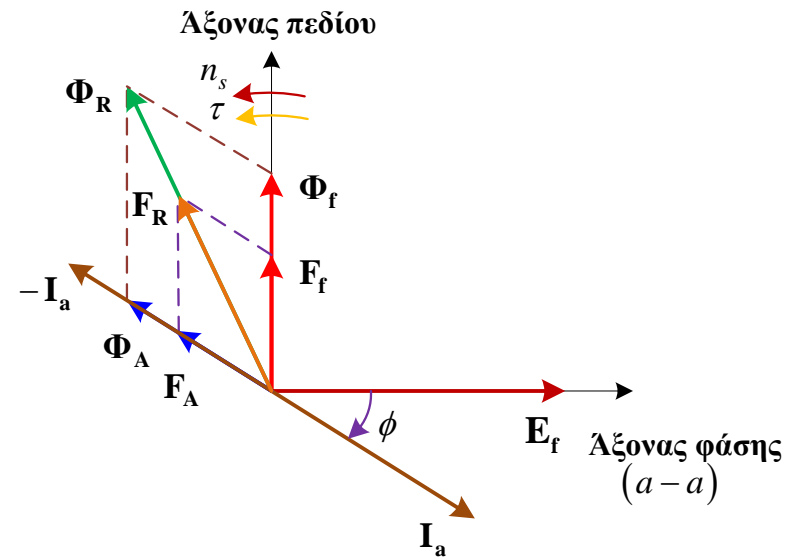
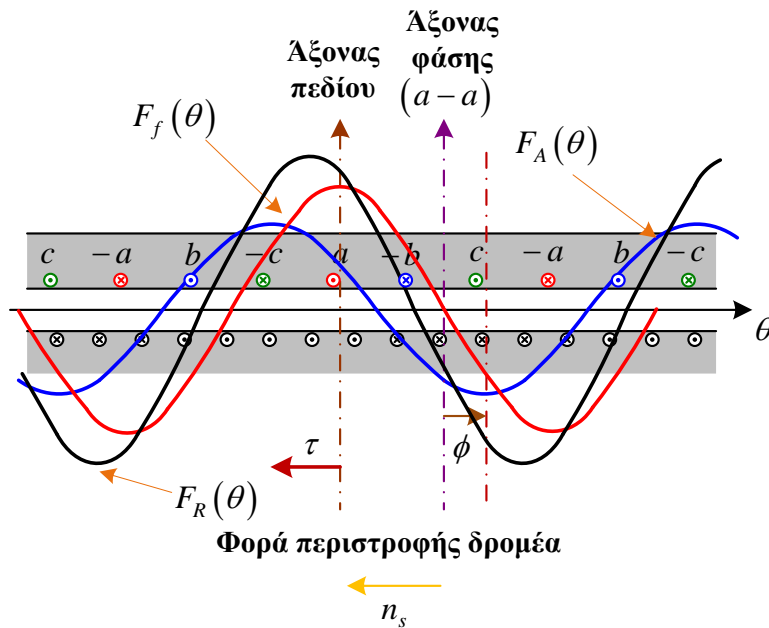
Λειτουργία κινητήρα: Η επαγόμενη τάση διέγερσης και το ρεύμα τυμπάνου μιας φάσης, έχουν αντίθετη κατεύθυνση.

- Η **φασική απόκλιση** μεταξύ της τάσης διέγερσης και του ρεύματος τυμπάνου σε κάθε φάση είναι **μηδενική**.
- Το κύμα της Μ.Ε.Δ. του δρομέα **προηγείται** χρονικά της τάσης διέγερσης κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες.
- Το κύμα χώρου της Μ.Ε.Δ. του πεδίου διέγερσης **καθυστερεί** σε σχέση με το αντίστοιχο κύμα χώρου της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος τυμπάνου μιας φάσης κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες.



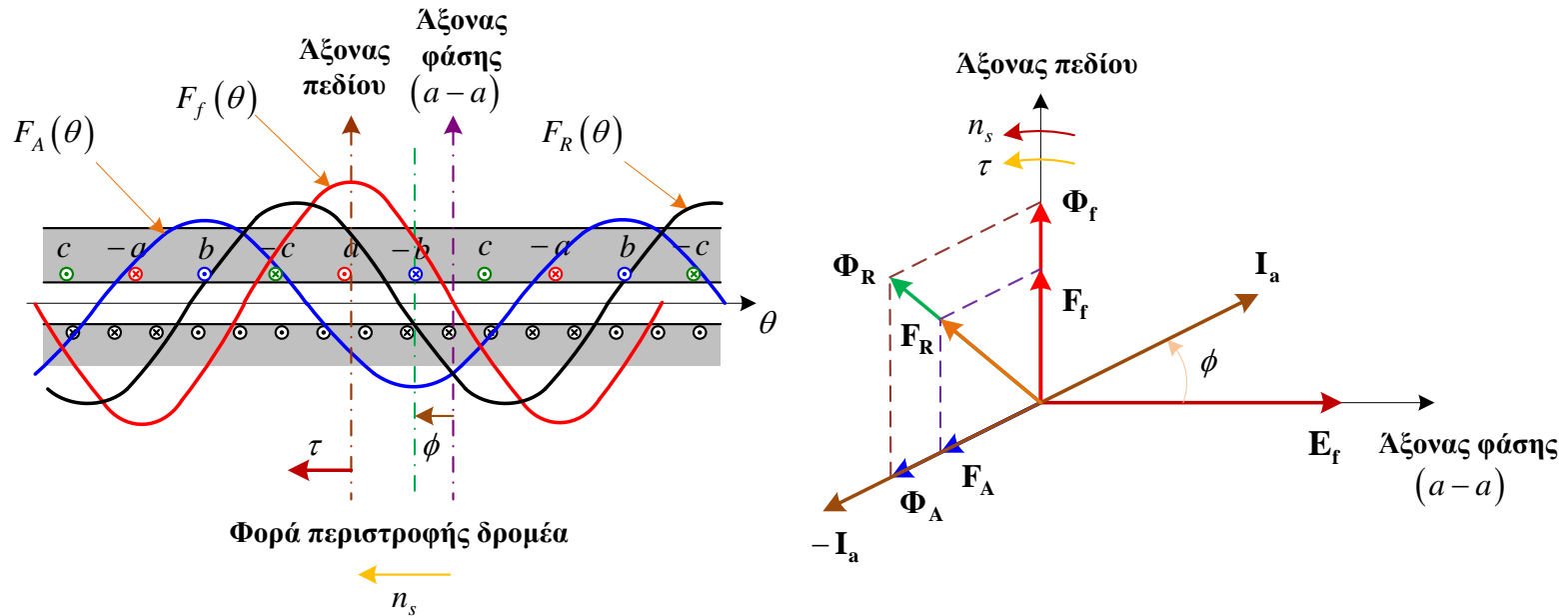
Σύγχρονος κινητήρας-επαγωγική φόρτιση

- Το ρεύμα τυμπάνου **καθυστερεί** ως προς την τάση διέγερσης κατά μια **γωνία ϕ** .
- Το κύμα της Μ.Ε.Δ. του στάτη **προηγείται** από το αντίστοιχο κύμα της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος του δρομέα κατά **γωνία $(90 - \phi)$** ηλεκτρικές μοίρες.



Σύγχρονος κινητήρας-χωρητική φόρτιση

- Το ρεύμα τυμπάνου **προηγείται** έναντι της τάσης διέγερσης κατά μια **γωνία ϕ** .
- Το κύμα της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος τυμπάνου, **προηγείται** από το αντίστοιχο κύμα της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος του πεδίου, **γωνία $(90 + \phi)$** ηλεκτρικές μοίρες.



Για **λειτουργία κινητήρα** και ανεξάρτητα από τις συνθήκες φόρτισης, το μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος τυμπάνου **προηγείται** από το μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος του πεδίου. Η αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή και στις τρεις περιπτώσεις έχει τη φορά της κίνησης, με αποτέλεσμα την **παραγωγή μηχανικής ισχύος για τη συντήρηση της κίνησης**

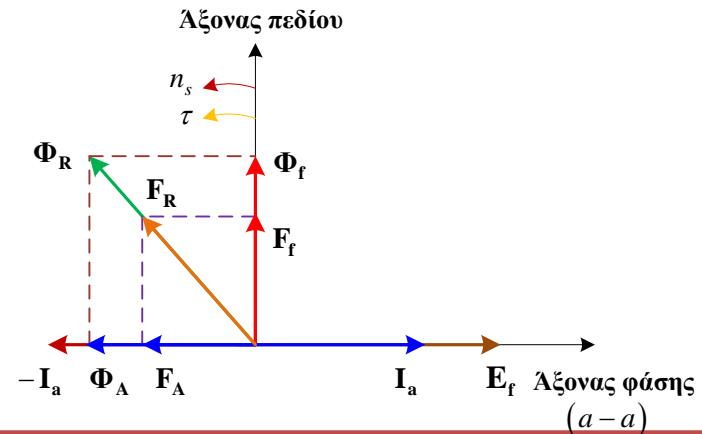
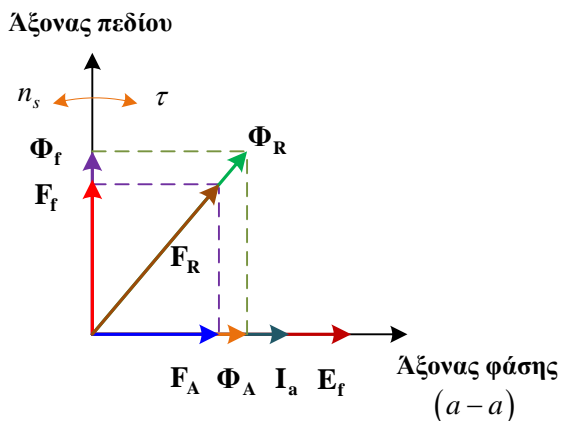
Κανονική διέγερση: Η τάση διέγερσης που αντιστοιχεί σε **ωμική φόρτιση** της σύγχρονης μηχανής (μοναδιαίος συντελεστής ισχύος)

Λειτουργία σε υπερδιέγερση: Η τάση διέγερσης έχει **μεγαλύτερη** τιμή από εκείνη της κανονικής διέγερσης.

Λειτουργία σε υποδιέγερση: Η τάση διέγερσης έχει **μικρότερη** τιμή από εκείνη της κανονικής διέγερσης.

Λειτουργία γεννήτριας και κινητήρα με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος:

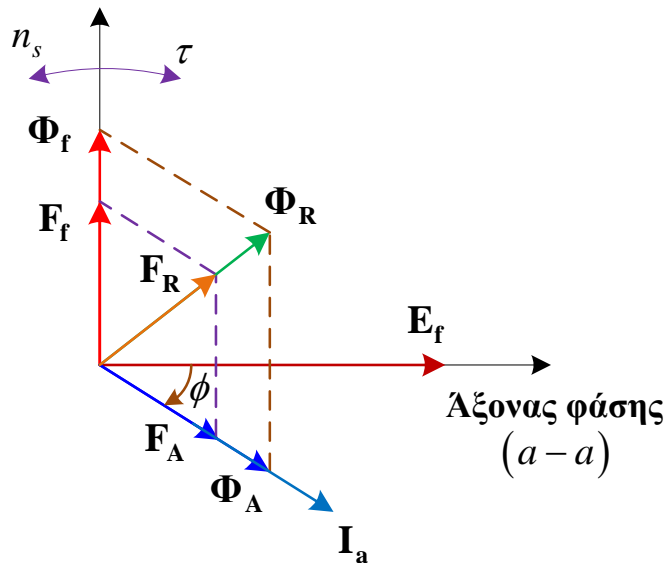
- Η κορυφή του κύματος της θεμελιώδης συνιστώσας της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος τυμπάνου βρίσκεται στο **μέσον της απόστασης** μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων του πεδίου της διέγερσης
- Οι άξονες των θεμελιωδών συνιστωσών των Μ.Ε.Δ. του πεδίου και της αντίδρασης του τυλίγματος τυμπάνου **διαφέρουν κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες** και τα παραστατικά τους διανύσματα είναι **κάθετα** στο χώρο.



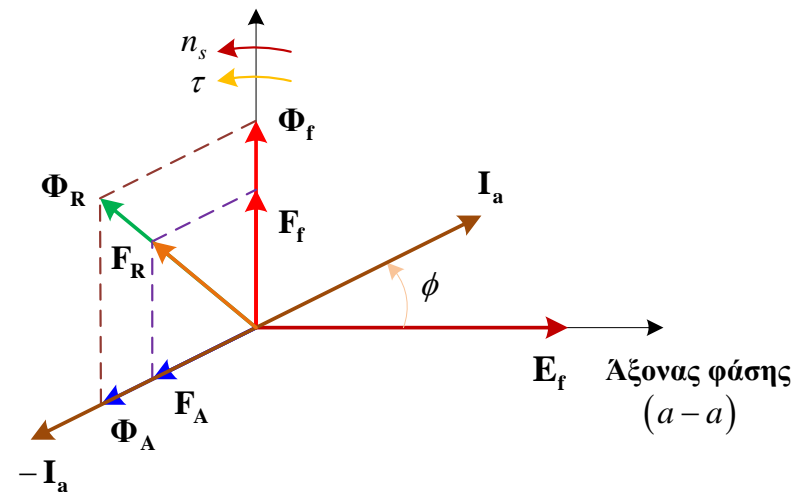
Λειτουργία γεννήτριας με συντελεστή ισχύος επαγωγικό και λειτουργία κινητήρα με συντελεστή ισχύος χωρητικό

- Η **διαφορά φάσης** μεταξύ των θεμελιωδών συνιστωσών των κυμάτων χώρου των Μ.Ε.Δ. διέγερσης και τυμπάνου είναι **μεγαλύτερη των 90 ηλεκτρικών μοιρών**.
- Η σύγχρονη μηχανή, λειτουργεί σε **υπερδιέγερση** για να αντισταθμίσει την απομαγνητίζουσα αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου.
- Το μέγεθος της **συνισταμένης Μ.Ε.Δ.** στο διάκενο της μηχανής να είναι **μικρότερο** από το αντίστοιχο μέγεθος της Μ.Ε.Δ. του πεδίου.

Άξονας πεδίου

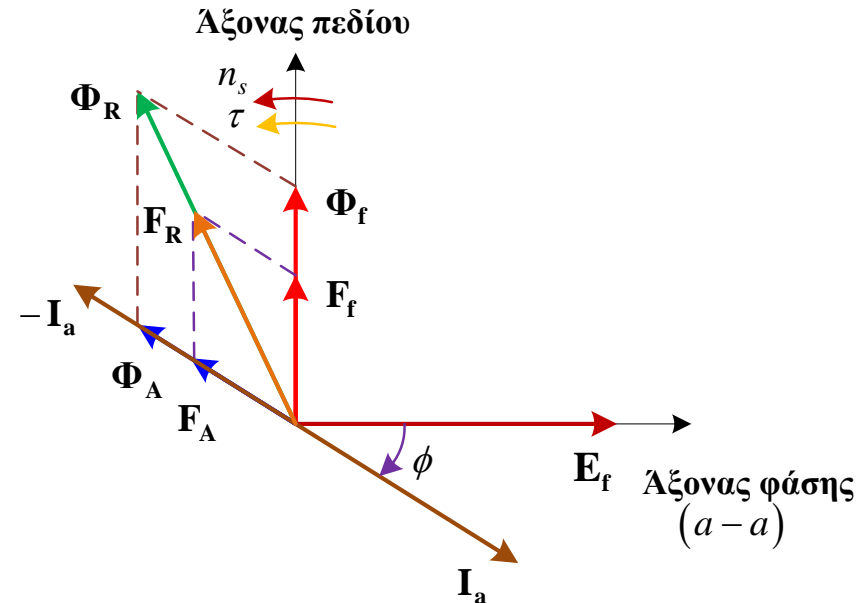
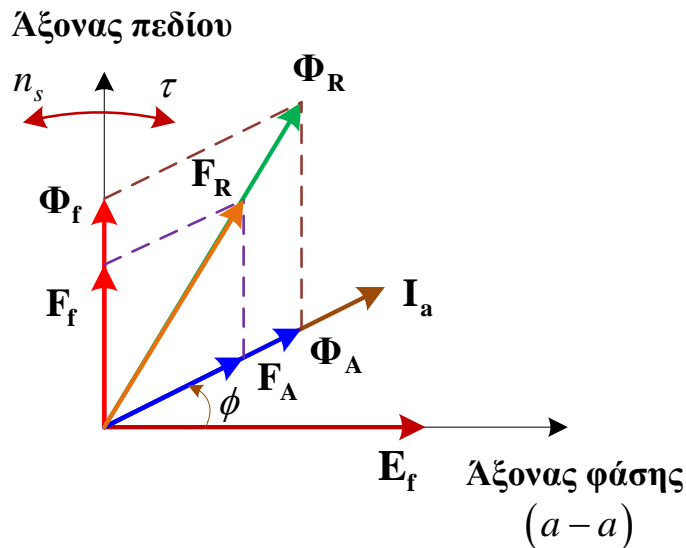


Άξονας πεδίου

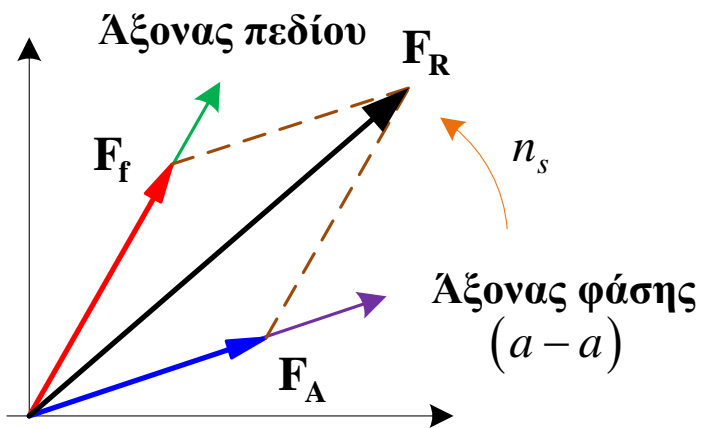


Λειτουργία γεννήτριας με συντελεστή ισχύος χωρητικό και για λειτουργία κινητήρα με συντελεστή ισχύος επαγωγικό

- Η **διαφορά φάσης** μεταξύ των θεμελιωδών συνιστωσών των κυμάτων χώρου των Μ.Ε.Δ. διέγερσης και τυμπάνου είναι **μικρότερη των 90 ηλεκτρικών μοιρών**.
- Το μαγνητικό πεδίο που προέρχεται από την αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου ασκεί **μαγνητίζουσα επίδραση**,
- Το μέγεθος της συνισταμένης Μ.Ε.Δ. στο διάκενο της μηχανής να είναι **μεγαλύτερο** από το αντίστοιχο μέγεθος της Μ.Ε.Δ. του πεδίου.



Ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής κυλινδρικού δρομέα



- Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, τα μαγνητικά πεδία των τυλιγμάτων πεδίου και τυμπάνου, περιστρέφονται και τα δύο **με την ίδια κατεύθυνση με τη σύγχρονη ταχύτητα**.
- Για **λειτουργία γεννήτριας**, το πεδίο της διέγερσης προηγείται του πεδίου της αντίδρασης τυμπάνου, ενώ για **λειτουργία κινητήρα έπεται**.
- Η θεμελιώδης συνιστώσα της συνισταμένης Μ.Ε.Δ. στο διάκενο, προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα των θεμελιωδών συνιστωσών των Μ.Ε.Δ. των τυλιγμάτων του πεδίου και τυμπάνου.

Η **μαγνητική ροή ανά πόλο στο διάκενο** προκύπτει από το **διανυσματικό άθροισμα** των επιμέρους μαγνητικών ροών ανά πόλο των τυλιγμάτων πεδίου και τυμπάνου.

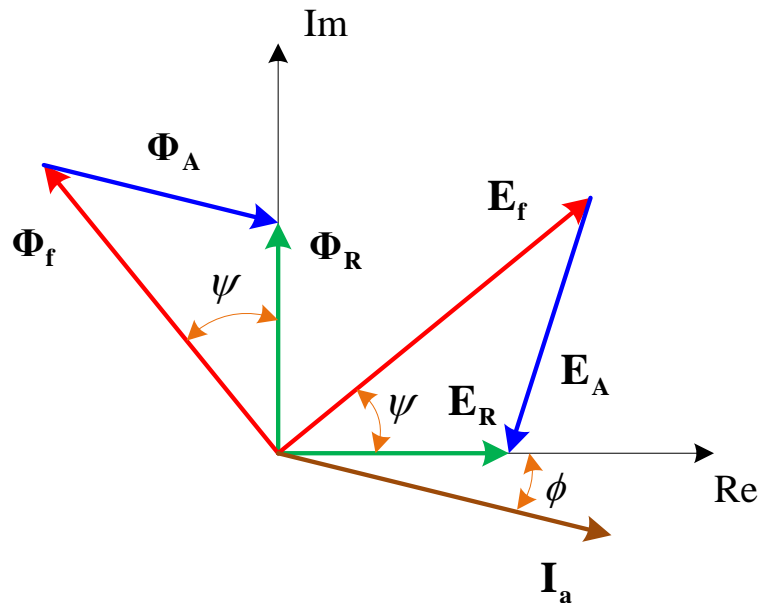
$$\Phi_R = \Phi_f + \Phi_A$$

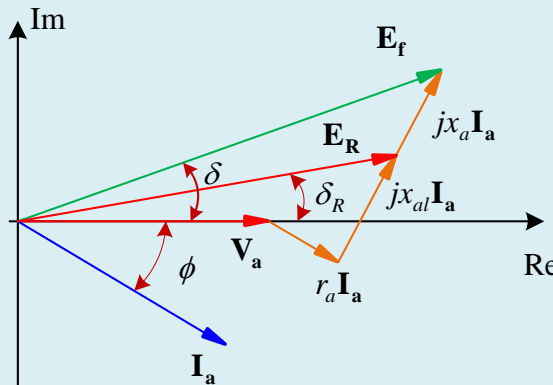
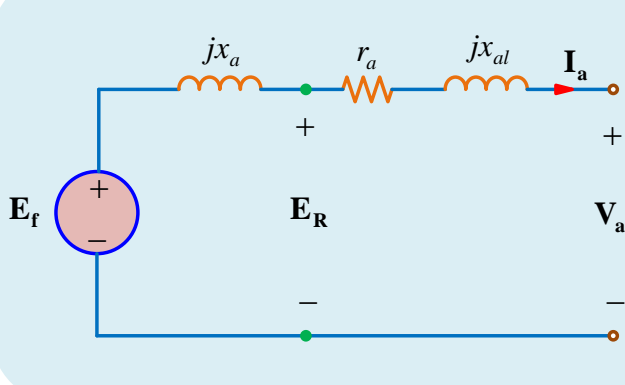
Τάση διακένου: Η επαγόμενη Η.Ε.Δ. κατά την υπό φορτίο λειτουργία λόγω της συνισταμένης Μ.Ε.Δ. στο διάκενο και **καθυστερεί** της αντίστοιχης μαγνητικής ροής κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες.

$$\mathbf{E}_R = \mathbf{E}_f + \mathbf{E}_A$$

E_R = επαγόμενη Η.Ε.Δ. λόγω της Φ_R (τάση διακένου), (V)

E_A = επαγόμενη Η.Ε.Δ. λόγω της Φ_A , (V)

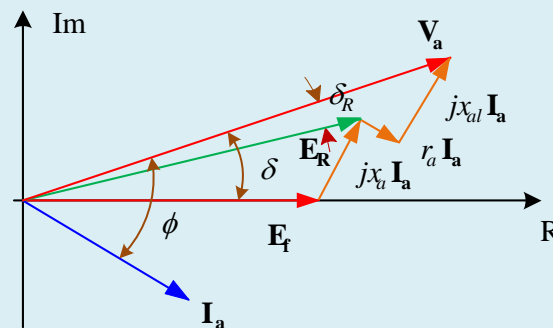
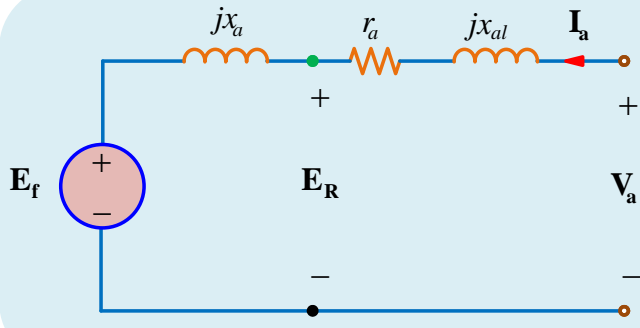




Λειτουργία Γεννήτριας

$$\mathbf{E}_R = \mathbf{V}_a + (r_a + jx_{al})\mathbf{I}_a$$

$$\mathbf{E}_f = \mathbf{E}_R + jx_a\mathbf{I}_a = \mathbf{V}_a + \mathbf{I}_a(r_a + jx_s)$$



Λειτουργία Κινητήρα

$$\mathbf{E}_R = \mathbf{V}_a - (r_a + jx_{al})\mathbf{I}_a$$

$$\mathbf{E}_f = \mathbf{E}_R - jx_a\mathbf{I}_a = \mathbf{V}_a - \mathbf{I}_a(r_a + jx_s)$$

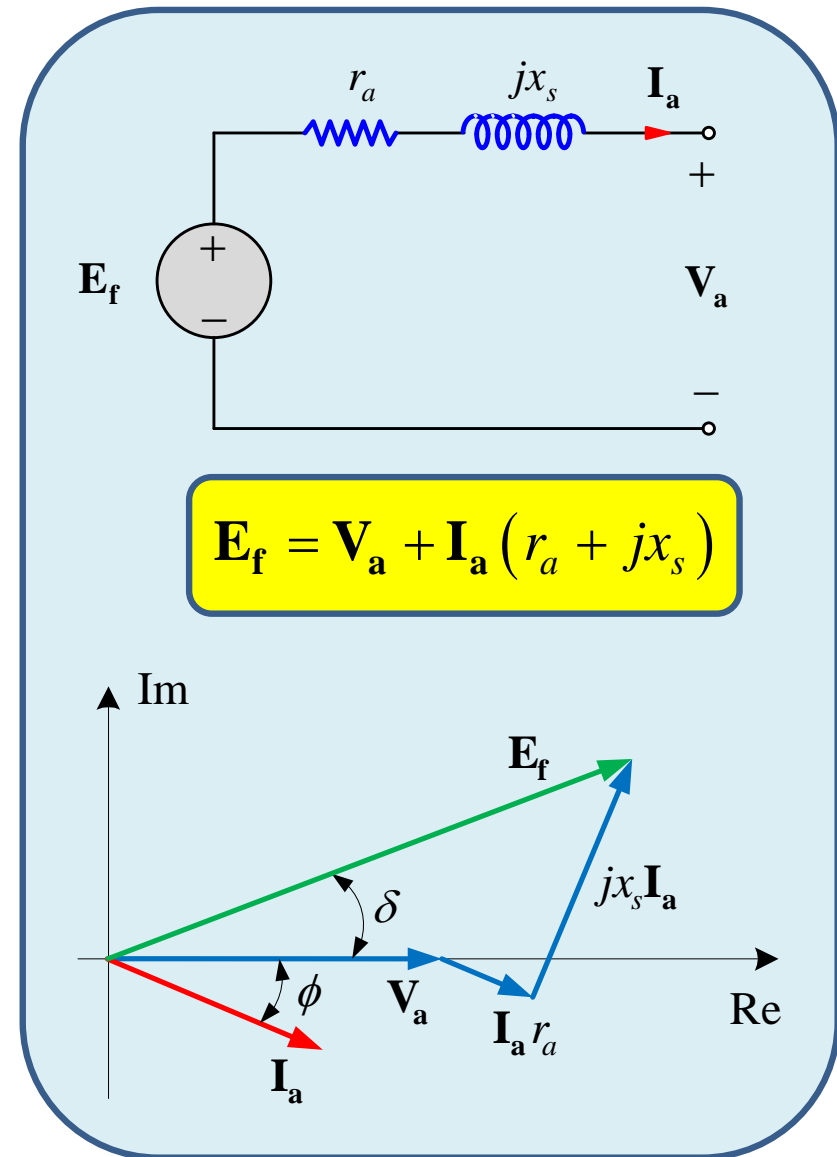
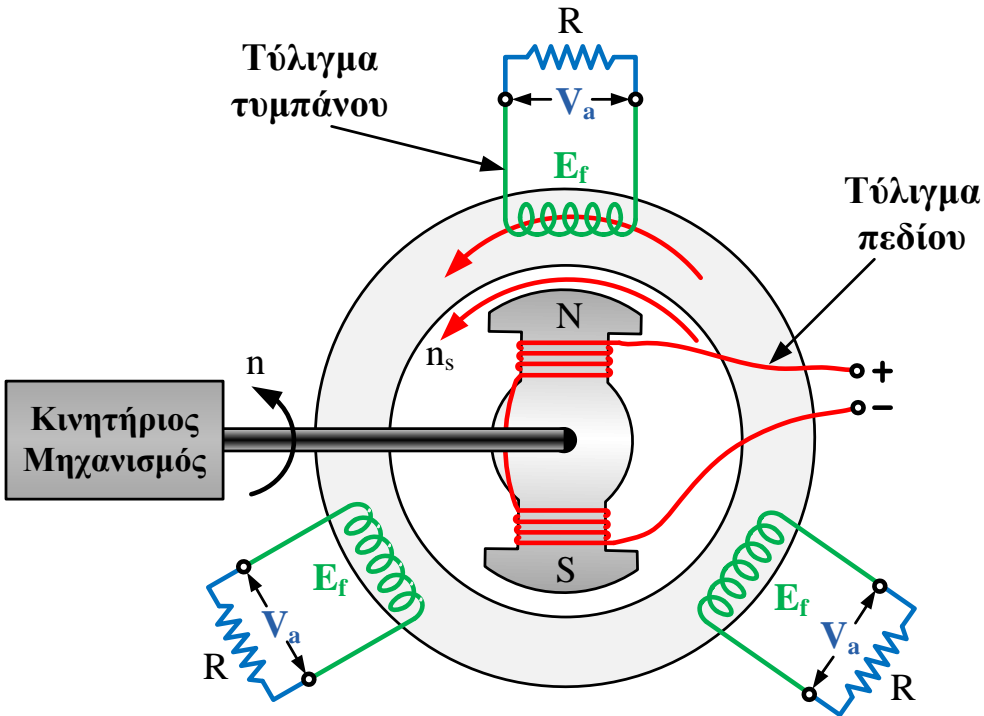
Η **επαγόμενη Η.Ε.Δ. E_A** λόγω της αντίδρασης του τυλίγματος τυμπάνου, καθυστερεί κατά 90 ηλεκτρ. μοίρες σε σχέση με το διάνυσμα της μαγνητικής ροής Φ_A ή του ρεύματος τυμπάνου I_a .

$$\mathbf{E}_A = -jK_A \Phi_A = -jx_a \mathbf{I}_a$$

Σύγχρονη επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου

$$x_s = x_a + x_{al}$$

Λειτουργία Γεννήτριας

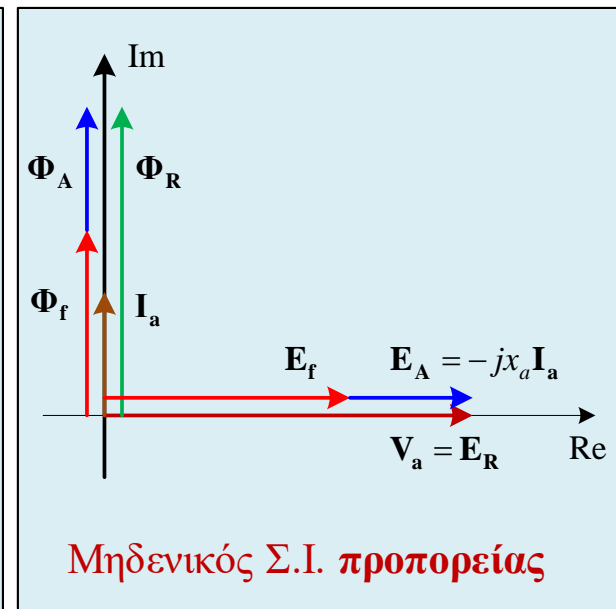
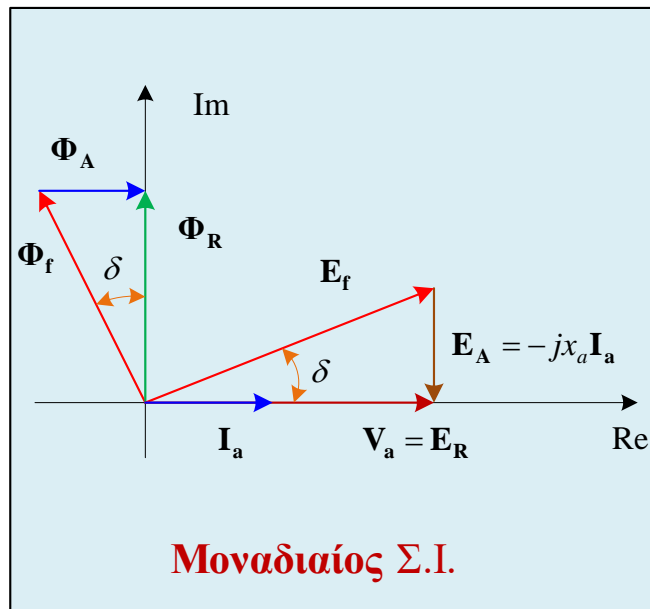
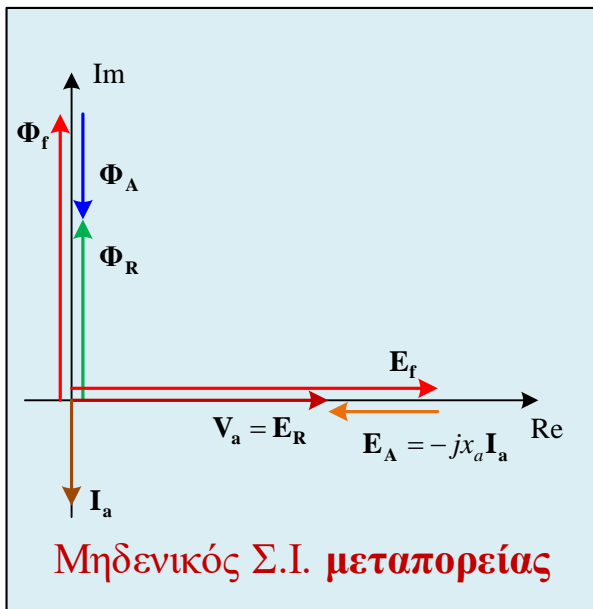


Διερεύνηση της αντίδρασης του τυλίγματος τυμπάνου

Λειτουργία Γεννήτριας: Τα παραστατικά διανύσματα χρόνου της μαγνητικής ροής της αντίδρασης τυμπάνου και του ρεύματος τυμπάνου είναι σε **φάση**

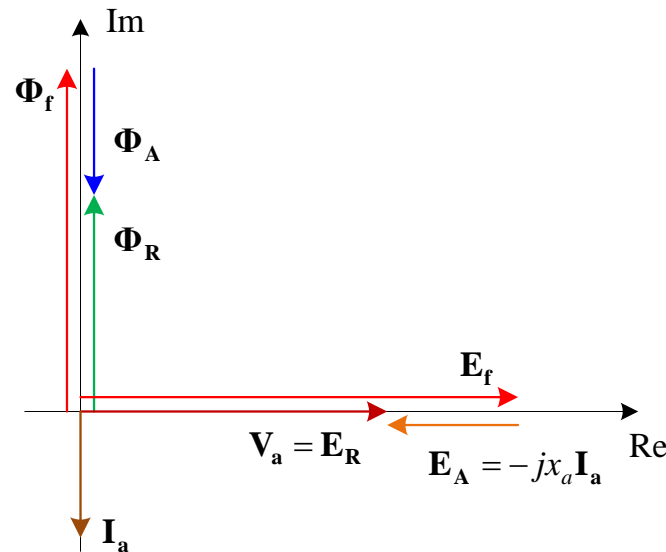
Λειτουργία Κινητήρα: Εμφανίζουν **διαφορά φάσης 180** ηλεκτρικών μοιρών.

- Η επίδραση της αντίδρασης τυμπάνου σχετίζεται άμεσα με το **συντελεστή ισχύος** με τον οποίο λειτουργεί η μηχανή.
- Για λόγους απλοποίησης αμελείται η πτώση τάσης στην ωμική αντίσταση και στην αντίδραση σκέδασης του τυλίγματος τυμπάνου.



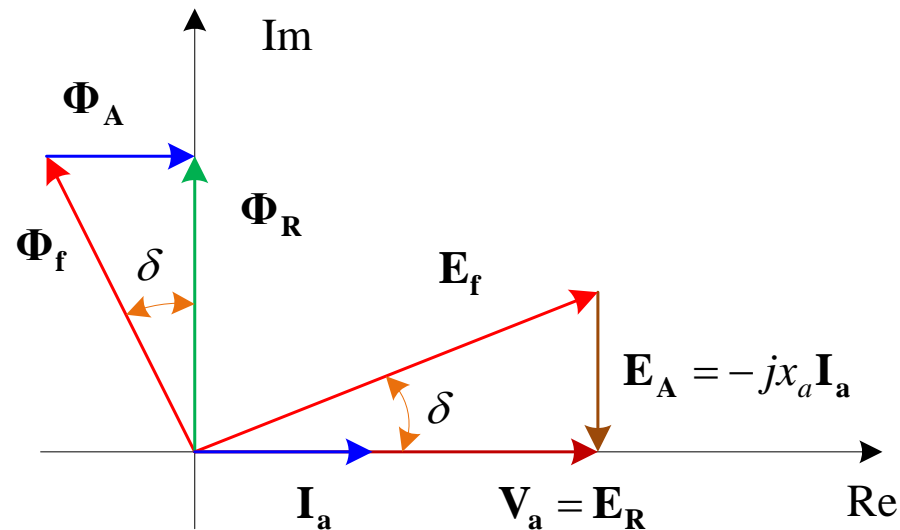
Λειτουργία γεννήτριας με μηδενικό $\Sigma.Ι.$ μεταπορείας (Επαγωγική φόρτιση)

- Η αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου (Φ_R) έχει **καθαρά απομαγνητίζουσα επίδραση**, καθώς η μαγνητική ροή του τυλίγματος τυμπάνου (Φ_A) έχει διαφορά φάσης 180 ηλεκτρικές μοίρες σε σχέση με τη μαγνητική ροή του τυλίγματος της διέγερσης (Φ_f).
- Για ονομαστική τάση ακροδεκτών η σύγχρονη γεννήτρια θα πρέπει να λειτουργεί σε **υπερδιέγερση**, δηλαδή με αυξημένο ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης για την απαιτούμενη αύξηση της τάσης διέγερσης



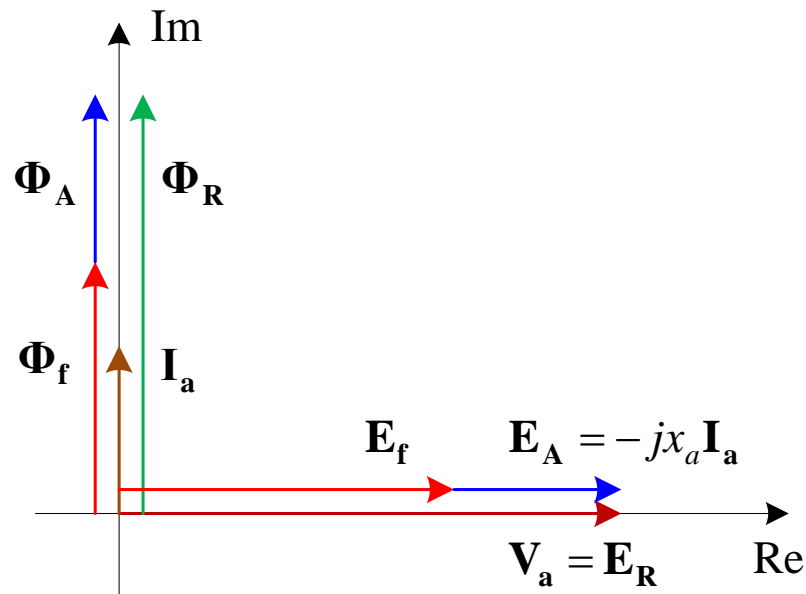
Λειτουργία γεννήτριας με μοναδιαίο Σ.Ι.

- Για **καθαρά ωμική φόρτιση**, το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του τυλίγματος τυμπάνου (Φ_A) μπορεί να αναλυθεί σε μια **συνιστώσα κάθετη** στο διάνυσμα της μαγνητικής ροής του πεδίου (Φ_f) και σε μια δεύτερη **συνιστώσα παράλληλη** με το διάνυσμα της κύριας μαγνητικής ροής (Φ_R), με **απομαγνητίζουσα επίδραση**.
- Η σύγχρονη γεννήτρια δέχεται τη **μικρότερη απομαγνητίζουσα επίδραση από το τύλιγμα τυμπάνου**.
- Η **τάση διέγερσης** χαρακτηρίζεται ως **κανονική διέγερση** και απαιτεί για ονομαστική τάση στους ακροδέκτες, **μικρότερο ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης** σε σχέση με την **καθαρά επαγωγική φόρτιση**.



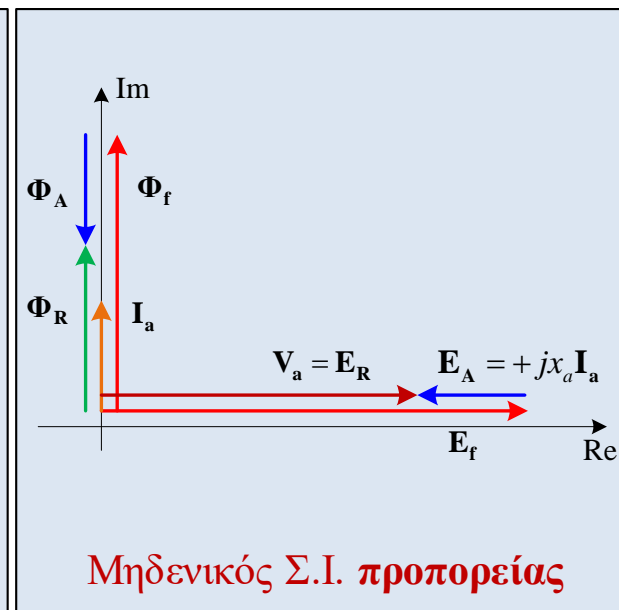
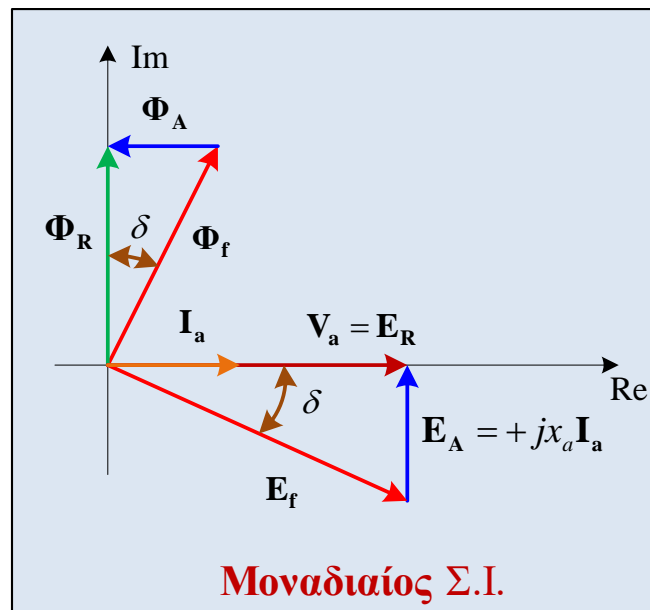
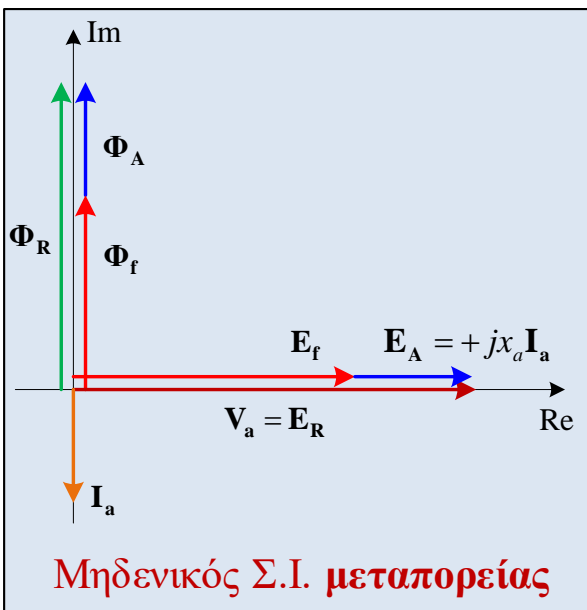
Λειτουργία γεννήτριας με μηδενικό Σ.Ι. προπορείας (Χωρητική φόρτιση)

- Η μαγνητική ροή του τυλίγματος τυμπάνου (Φ_A) είναι σε **φάση** με τη μαγνητική ροή του τυλίγματος της διέγερσης (Φ_f).
- Η αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου της γεννήτριας, έχει καθαρά **μαγνητίζουσα** επίδραση και η μηχανή λειτουργεί σε **υποδιέγερση**.
- Για ονομαστική τάση ακροδεκτών για το ίδιο μέγεθος του ρεύματος, απαιτείται **μικρότερο ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης** σε σχέση με **τα υπόλοιπα είδη φόρτισης**.



Λειτουργία Κινητήρα

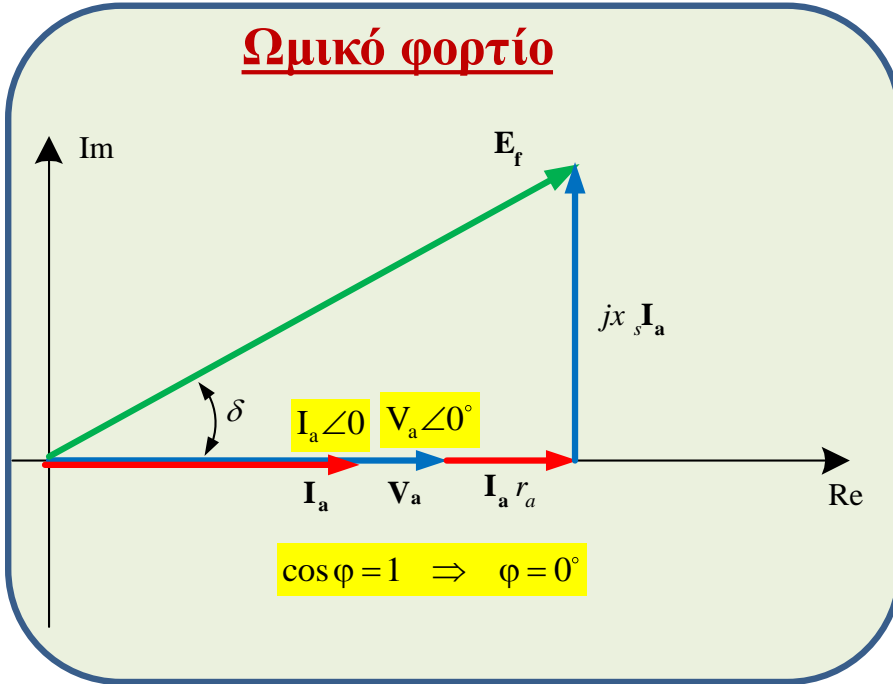
- Τα παραστατικά διανύσματα της Μ.Ε.Δ. και της παραγόμενης μαγνητικής ροής τα οποία μεταξύ τους είναι σε φάση χρόνου, **διαφέρουν κατά 180 ηλεκτρικές μοίρες σε σχέση με το παραστατικό διάνυσμα του ρεύματος τυμπάνου.**
- Για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας σε σχέση με το Σ.Ι., η **αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου ασκεί στο διάκενο της μηχανής ακριβώς την αντίθετη επίδραση** σε σχέση με τη λειτουργία της γεννήτριας.



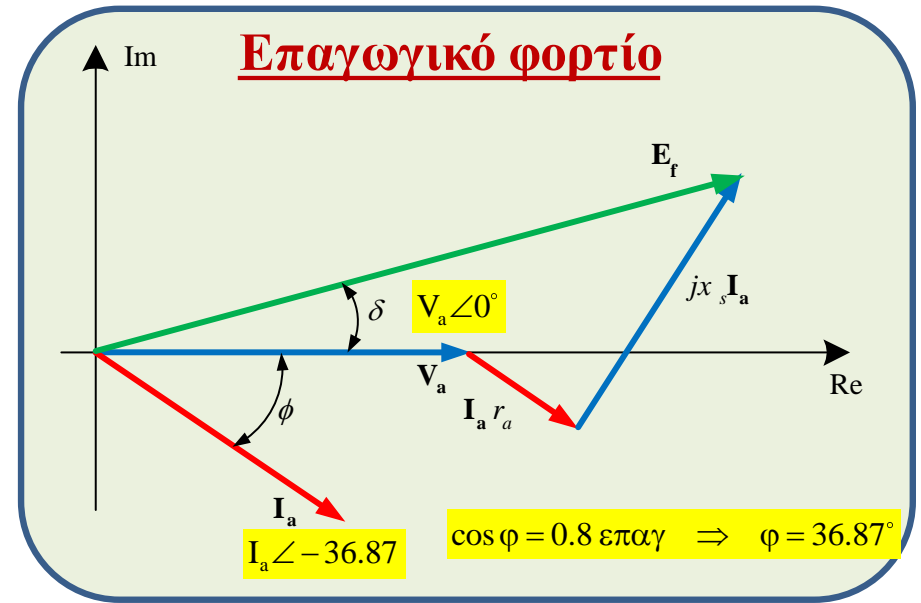
Συμπεράσματα

- Για **λειτουργία της σύγχρονης μηχανής σαν γεννήτρια** η οποία τροφοδοτεί φορτίο με **Σ.Ι. επαγωγικό** και για **λειτουργία κινητήρα** ο οποίος απορροφά ηλεκτρική ισχύ στην είσοδο του με **Σ.Ι χωρητικό**, οι δύο συνιστώσες της μαγνητικής ροής του πεδίου (κάθετη και παράλληλη σε σχέση με το αντίστοιχο διάνυσμα της μαγνητικής ροής του πεδίου), ασκούν **μαγνητίζουσα** και **απομαγνητίζουσα** επίδραση αντίστοιχα.
- Για **λειτουργία της σύγχρονης μηχανής σαν γεννήτρια** η οποία τροφοδοτεί φορτίο με **Σ.Ι. χωρητικό** και για **λειτουργία κινητήρα** ο οποίος απορροφά ηλεκτρική ισχύ στην είσοδο του με **Σ.Ι επαγωγικό**, οι δύο συνιστώσες της μαγνητικής ροής του πεδίου (κάθετη και παράλληλη σε σχέση με το αντίστοιχο διάνυσμα της μαγνητικής ροής του πεδίου), ασκούν **απομαγνητίζουσα** και **μαγνητίζουσα** επίδραση αντίστοιχα.

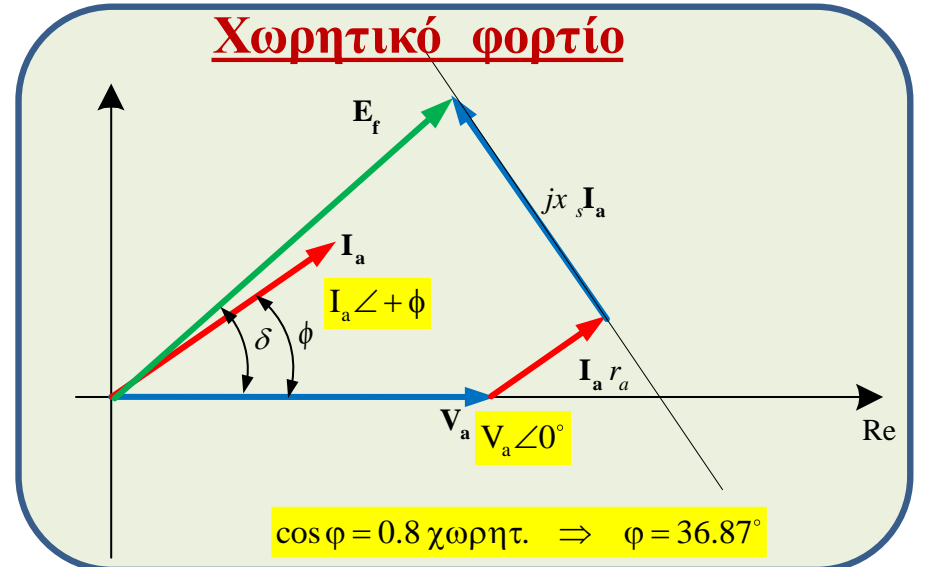
Ωμικό φορτίο



Επαγωγικό φορτίο



Χωρητικό φορτίο

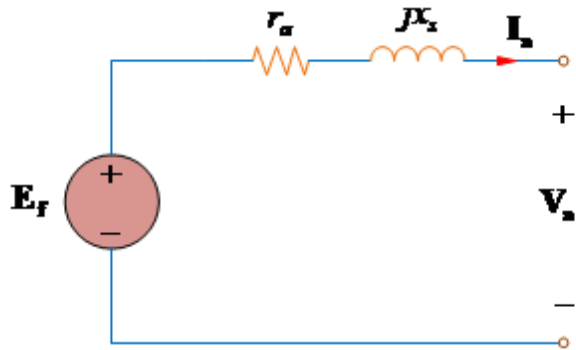


Παράδειγμα

Τριφασική σύγχρονη γεννήτρια ομοιόμορφου διάκενου συνδεδεμένη σε αστέρα, $230/400V$ – $10KVA$ – $50Hz$, έχει ωμική αντίσταση στο τύλιγμα τυμπάνου $r_a = 0.5\Omega$ και σύγχρονη αντίδραση $x_s = 3.5\Omega$ ανά φάση. Να προσδιοριστεί η ρύθμιση της τάσης (εκατοστιαία πτώση τάσης) για ονομαστική λειτουργία, για τις παρακάτω συνθήκες φόρτισης:

1. Συντελεστής ισχύος 0.8 επαγωγικός.
2. Συντελεστής ισχύος μοναδιαίος.
3. Συντελεστής ισχύος 0.8 χωρητικός.

Λύση



Το **ονομαστικό ρεύμα**, είναι:

$$I_{a,no} = \frac{S_{no}}{\sqrt{3}V_{a,no}} = \frac{10000VA}{\sqrt{3} \times 400V} = 14.43A$$

Για λειτουργία με **$\Sigma I = 0.8$ επαγ.**, το **ρεύμα τυμπάνου θα καθυστερεί της τάσης, γωνία** ίση με

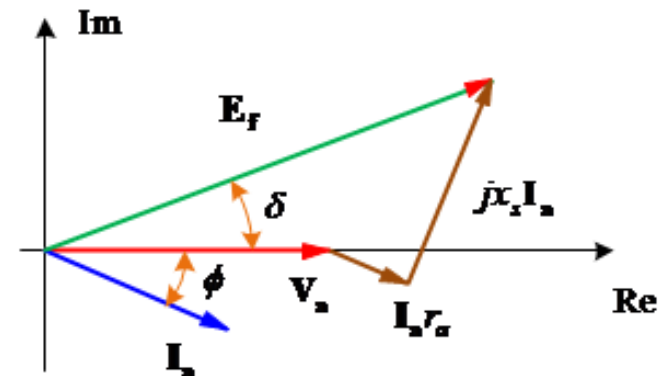
$$\phi = \cos^{-1}(0.8) = 36.87^\circ$$

Με βάση τον νόμο τάσεων του Kirchhoff, η **τάση διέγερσης** είναι

$$E_f = V_a + I_a(r_a + jx_s) = 230 \angle 0^\circ + 14.43 \angle -36.87^\circ \times (0.5 + j3.5) = 268.51 \angle 7.72^\circ V$$

Ρύθμιση της τάσης για τις συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης

$$VR(\%) = \frac{E_f - V_a}{V_a} \times 100 = \frac{268.51 - 230}{230} \times 100 = 16.74\%$$



Στην περίπτωση της **ωμικής φόρτισης**, το ρεύμα τυμπάνου είναι **συμφασικό με την τάση**.

$$\phi = \cos^{-1}(1.0) = 0.0^\circ$$

Θεωρώντας την τάση του τυλίγματος τυμπάνου ως αναφορά, είναι

$$\mathbf{V}_a = 230 \angle 0^\circ \text{ V}$$

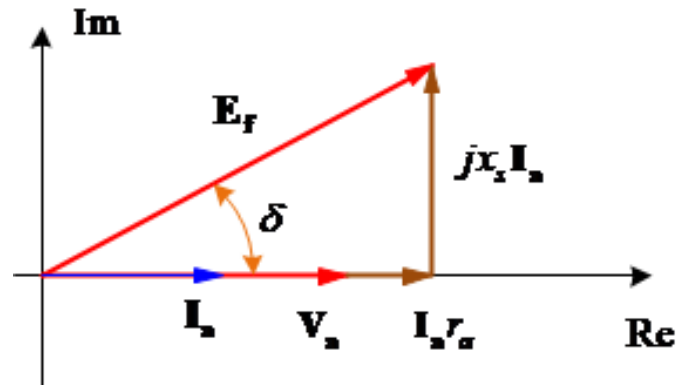
$$\mathbf{I}_a = 14.43 \angle 0^\circ \text{ A}$$

Η **τάση διέγερσης** είναι

$$\mathbf{E}_f = \mathbf{V}_a + \mathbf{I}_a (r_a + jx_s) = 230 \angle 0^\circ + 14.43 \angle 0^\circ \times (0.5 + j3.5) = 242 \angle 12^\circ \text{ V}$$

Η **ρύθμιση της τάσης** για τις συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης, έχει την τιμή

$$VR(\%) = \frac{E_f - V_a}{V_a} \times 100 = \frac{242 - 230}{230} \times 100 = 5.22\%$$



Για λειτουργία με $\Sigma I=0.8$ χωρ., το ρεύμα τυμπάνου προηγείται της τάσης ακροδεκτών, γωνία ίση με

$$\phi = \cos^{-1}(0.8) = 36.87^\circ$$

Θεωρώντας την τάση του τυλίγματος τυμπάνου ως αναφορά, είναι

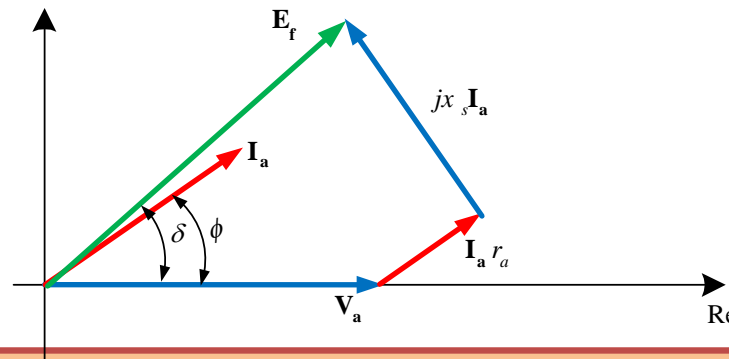
$$\mathbf{V}_a = 230 \angle 0^\circ \text{ V} \quad \text{και} \quad \mathbf{I}_a = 14.43 \angle +36.87^\circ \text{ A}$$

Με βάση τον νόμο τάσεων του Kirchhoff, η τάση διέγερσης είναι

$$\mathbf{E}_f = \mathbf{V}_a + \mathbf{I}_a (r_a + jx_s) = 230 \angle 0^\circ + 25.1 \angle +36.87^\circ \times (0.5 + j3.5) = 210.28 \angle 12.28^\circ \text{ V}$$

Η ρύθμιση της τάσης για τις συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης, είναι

$$VR(\%) = \frac{E_f - V_a}{V_a} \times 100 = \frac{210.28 - 230}{230} \times 100 = -8.57\%$$



ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΞΑΣΚΗΣΗ

Άσκηση

Σύγχρονη τριφασική γεννήτρια, 5MVA, 11KV, 60Hz συνδεδεμένη σε αστέρα, έχει σύγχρονη αντίδραση 17.08Ω ενώ αμελείται η ωμική αντίσταση. Η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό και λειτουργεί σε ονομαστικό φορτίο με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγωγικό. Ο ζυγός έχει τη δυνατότητα να προσφέρει ή να καταναλώνει οποιαδήποτε ποσά ενεργού και άεργης ισχύος, χωρίς καμιά μεταβολή στην τάση ή τη συχνότητα λειτουργίας του.

Να βρεθούν:

1. Η τιμή του ρεύματος τυμπάνου της γεννήτριας I_a στις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας της
2. Η τιμή της τάσης E_f που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της γεννήτριας στις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας της.
3. Η γωνία ροπής και να σχεδιαστεί το διανυσματικό διάγραμμα.

Άσκηση

Τριφασική σύγχρονη γεννήτρια σύνδεσης τριγώνου 2KV, 200 KVA λειτουργεί υπό τάση 1.8KV και τροφοδοτεί φορτίο 170 KW με συντελεστή ισχύος 0.7 χωρητικό. Αν η σύγχρονη αντίδραση ανά φάση είναι 10Ω , να βρεθούν:

1. Η τάση διέγερσης
2. Η ένταση ρεύματος γραμμής
3. Να γίνει το διανυσματικό διάγραμμα

Άσκηση

Σύγχρονη τριφασική γεννήτρια σε συνδεσμολογία αστέρα, $10KV$, $6MVA$, $\cos\phi=0.8$ επαγ., έχει σύγχρονη αντίδραση 23Ω ενώ η αντίσταση τυμπάνου αμελείται.

Να βρεθούν:

Η γωνία φορτίου δ γνωρίζοντας ότι η τάση διέγερσης στην εν κενώ λειτουργία είναι $24.4KV$.

Εκφράσεις ισχύος και ροπής μηχανής κυλινδρικού δρομέα

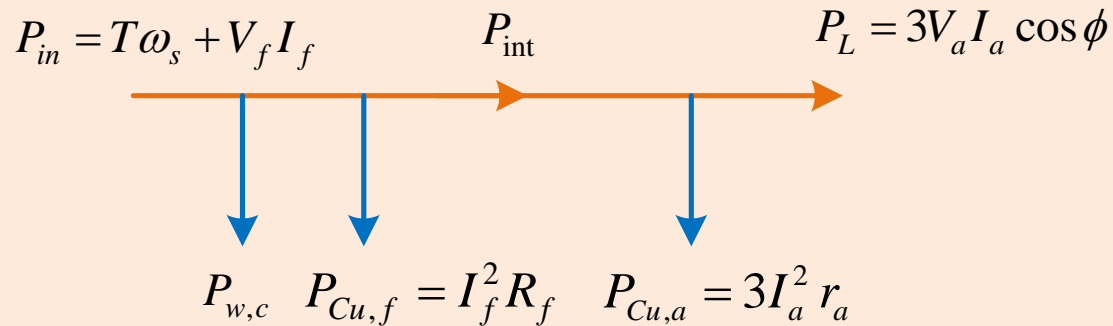
- Η σύγχρονη μηχανή ανεξάρτητα από το είδος της λειτουργίας της (σαν γεννήτρια ή σαν κινητήρας), συνήθως **συνδέεται σε άπειρο ζυγό** (σύστημα σταθερής τάσης και συχνότητας, το οποίο της εξασφαλίζει σταθερή ταχύτητα περιστροφής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας).
- Υπάρχει ένα **όριο στη μέγιστη ισχύ** που μπορεί να αποδώσει η σύγχρονη μηχανή (για λειτουργία γεννήτριας ή κινητήρα) στο φορτίο, χωρίς να διατρέχει τον κίνδυνο της απώλειας του συγχρονισμού της.

Απώλειες Σύγχρονης μηχανής

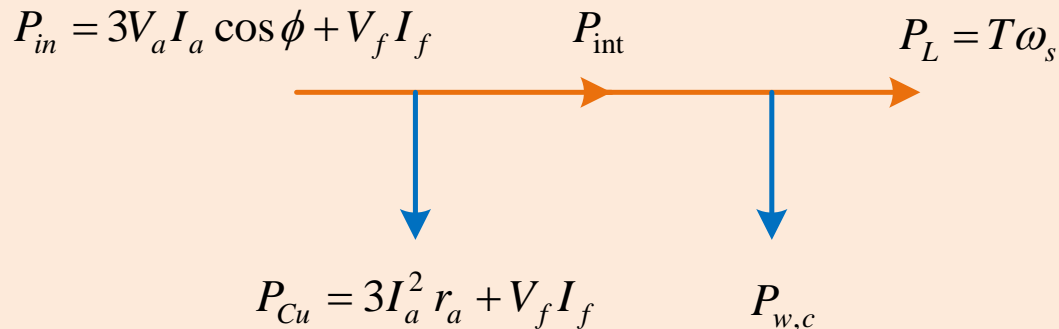
- **Μηχανικές:** (Απώλειες τριβών και ανεμισμού, οι οποίες συνήθως θεωρούνται σταθερές και ανεξάρτητες της ταχύτητας περιστροφής. Στις μηχανικές απώλειες, ενσωματώνουμε συνήθως και τις απώλειες πυρήνα).
- **Ηλεκτρικές:** (Απώλειες χαλκού στα τυλίγματα διέγερσης και τυμπάνου)

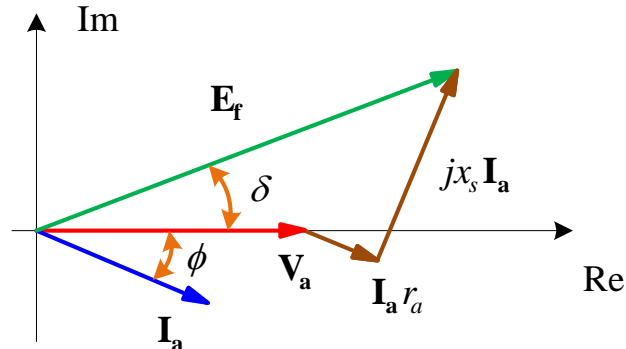
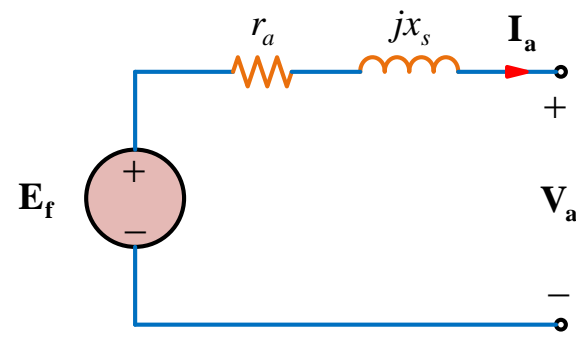
Διαγράμματα ροής της ισχύος για τις δύο λειτουργικές καταστάσεις της σύγχρονης μηχανής

Λειτουργία Γεννήτριας



Λειτουργία Κινητήρα





Ρεύμα τυμπάνου

$$\mathbf{I}_a = \frac{\mathbf{E}_f - \mathbf{V}_a}{r_a + jx_s} = \frac{\mathbf{E}_f - \mathbf{V}_a}{\mathbf{z}_s}$$

Εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ισχύς

$$P_{\text{int}} = 3 \operatorname{Re} \{ \mathbf{E}_f \mathbf{I}_a^* \}$$

$$P_{\text{int}} = \operatorname{Re} \{ \mathbf{S}_{\text{int}} \} = 3 \left(\frac{E_f^2}{z_s} \cos \phi - \frac{E_f V_a}{z_s} \cos(\delta + \phi) \right)$$

$$Q_{\text{int}} = \operatorname{Im} \{ \mathbf{S}_{\text{int}} \} = 3 \left(\frac{E_f^2}{z_s} \sin \phi - \frac{E_f V_a}{z_s} \sin(\delta + \phi) \right)$$

$$P_{\text{int}} = P_L + 3I_a^2 r_a$$

$$Q_{\text{int}} = Q_L + 3I_a^2 x_s$$

Ισχύς εξόδου της γεννήτριας (Ισχύς που αποδίδεται στο φορτίο)

$$P_L = \operatorname{Re} \{ \mathbf{S}_L \} = 3 \left(\frac{V_a E_f}{z_s} \cos(\phi - \delta) - \frac{V_a^2}{z_s} \cos \phi \right)$$

$$Q_L = \operatorname{Im} \{ \mathbf{S}_L \} = 3 \left(\frac{V_a E_f}{z_s} \sin(\phi - \delta) - \frac{V_a^2}{z_s} \sin \phi \right)$$

Απλοποιημένες σχέσεις: Επειδή $r_a \ll x_s$

$$P_{\text{int}} = P_L = 3 \frac{V_a E_f}{x_s} \sin \delta = P_{\text{max}} \sin \delta$$

Για σταθερή διέγερση και σταθερή τάση τροφοδοσίας, η **εσωτερική ισχύς** είναι αποκλειστικά και μόνο **συνάρτηση της γωνίας ροπής** (ή γωνίας φορτίου).

$$Q_{\text{int}} = 3 \left(\frac{E_f^2}{z_s} - \frac{E_f V_a}{z_s} \cos \delta \right)$$

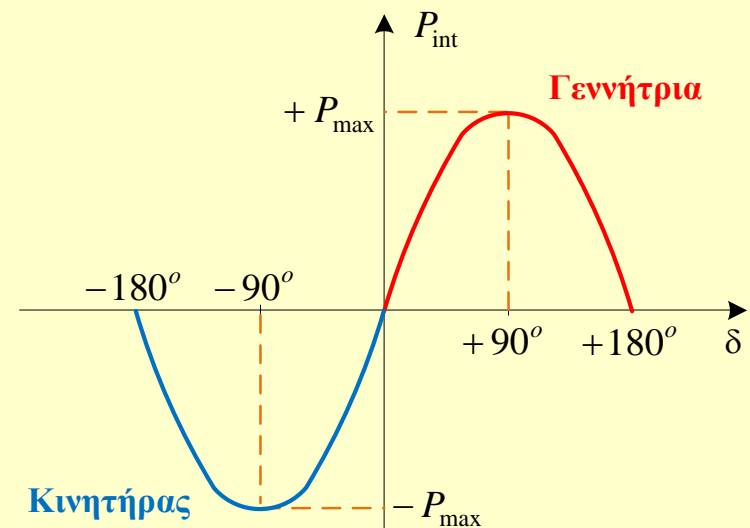
$$Q_L = 3 \left(\frac{V_a E_f}{z_s} \cos \delta - \frac{V_a^2}{z_s} \right)$$

Ισχύς αποσυγχρονισμού ή **στατικό όριο ευστάθειας:**

(Η μέγιστη εσωτερική ισχύ που μπορεί να αποδώσει η σύγχρονη μηχανή ανεξάρτητα από το είδος της λειτουργίας της).

Κάθε προσπάθεια για απόδοση **μεγαλύτερης ισχύος**, θα οδηγήσει σε **αποσυγχρονισμό**.

$$P_{\text{max}} = \frac{3E_f V_a}{x_s}$$



Εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ροπή

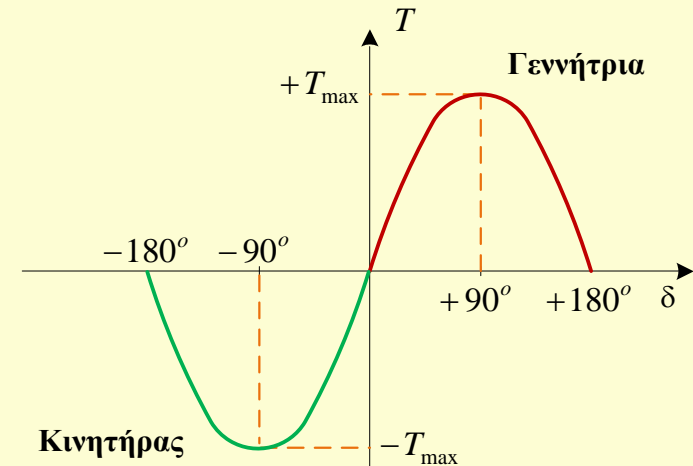
$$T = \frac{P_{\text{int}}}{\omega_s} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_a E_f}{x_s} \sin \delta = T_{\text{max}} \sin \delta$$

όπου

$$T_{\text{max}} = \frac{3}{\omega_s} \frac{E_f V_a}{x_s}$$

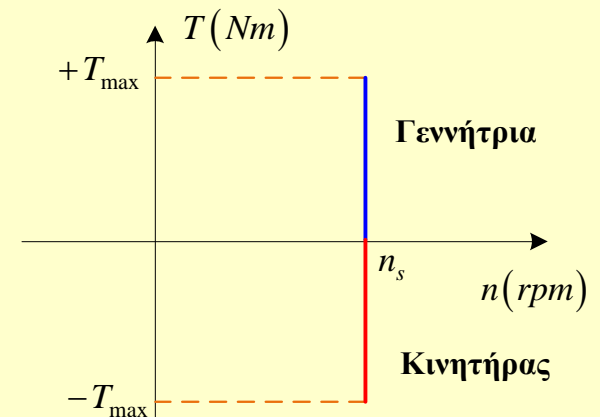
Μεταβάλλεται **ημιτονικά** με τη **γωνία φορτίου**.

- Οι οριακές τιμές φόρτισης T_{max} και P_{max} , είναι γνωστές ως **στατικά όρια ευστάθειας**.
- Η υπέρβαση τους έχει σαν αποτέλεσμα τον **αποσυγχρονισμό** της μηχανής.
- Για σύνδεση σε **άπειρο σύστημα**, οι μεταβολές απαιτήσεων σε ροπή αναλαμβάνονται εξ' ολοκλήρου από τη μεταβολή της **γωνίας φορτίου**.



Χαρακτηριστική ροπής-στροφών

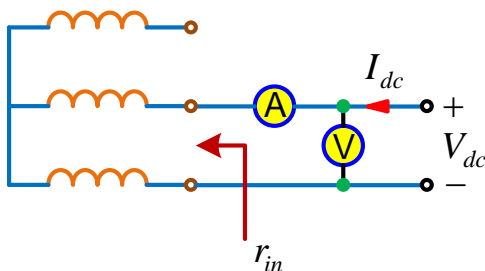
Για σταθερή ταχύτητα περιστροφής, οποιαδήποτε αύξηση είτε του μεγέθους της **τάσης τροφοδοσίας** είτε του **ρεύματος του πεδίου**, έχει σαν αποτέλεσμα των **αύξηση των στατικών ορίων ευστάθειας της εσωτερικής ισχύος και της εσωτερικής ροπής**.



Υπολογισμός παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος μηχανής κυλινδρικού δρομέα

Ωμική αντίσταση τυλίγματος τυμπάνου

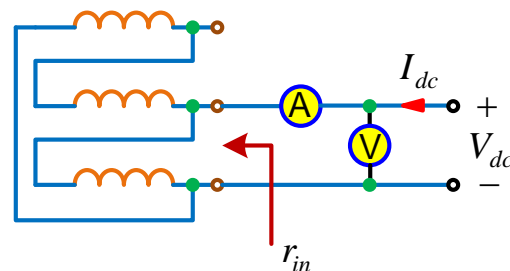
- Για τον υπολογισμό της ωμικής αντίστασης του τυλίγματος τυμπάνου, η μηχανή είναι σε **στάση**.
- Εφαρμόζουμε μια **συνεχή τάση** στους δύο από τους τρεις ακροδέκτες του τυλίγματος τυμπάνου, έτσι ώστε το **απορροφούμενο ρεύμα** να μη υπερβαίνει το αντίστοιχο **ονομαστικό ρεύμα**.



Συνδεσμολογία αστέρα

$$r_{in} = 2r_a$$

$$r_a = \frac{r_{in}}{2} = \frac{V_{dc}}{2I_{dc}}$$



Συνδεσμολογία τρίγωνο

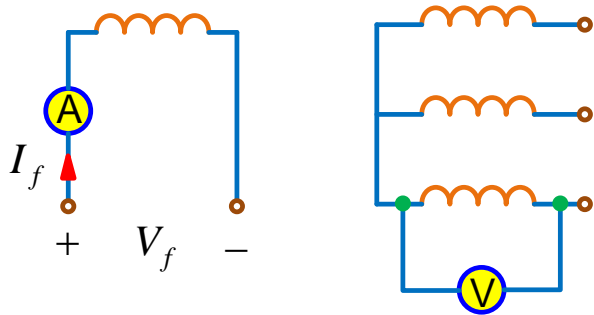
$$r_{in} = r_a // 2r_a = \frac{2r_a}{3}$$

$$r_a = \frac{3r_{in}}{2} = \frac{3V_{dc}}{2I_{dc}}$$

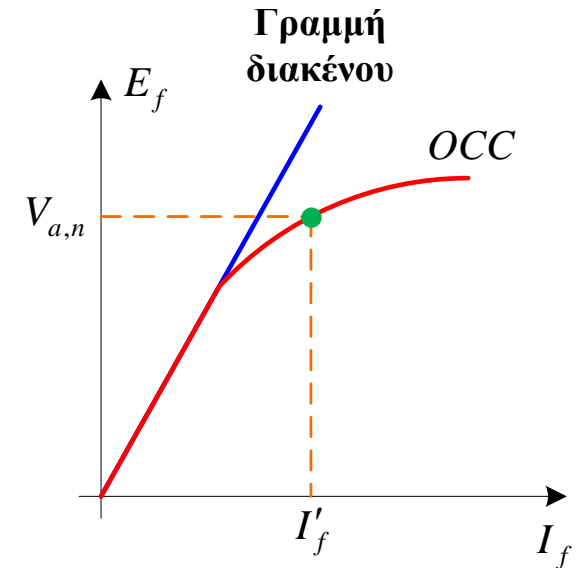
Σύγχρονη αντίδραση σκέδασης τυλίγματος τυμπάνου

Χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος (OCC)

$$E_f = f(I_f) |_{I_a=0}$$



$$V_a(I_a = 0) = E_f$$



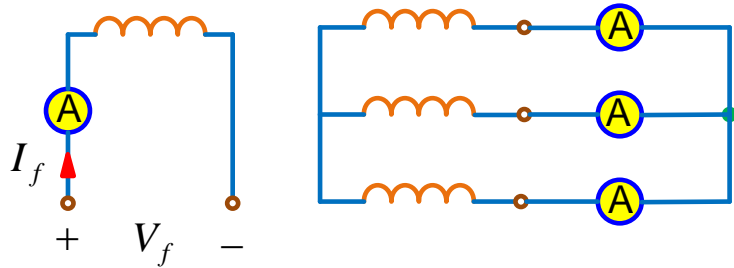
Η χαρακτηριστική, αντικατοπτρίζει το **φαινόμενο κορεσμού του σιδηρο-μαγνητικού κυκλώματος**.

- Το γραμμικό τμήμα, είναι γνωστό ως **γραμμή διακένου**.
- Με την αύξηση του I_f , παρατηρείται ταχεία αύξηση των μη γραμμικών αντιστάσεων των μεταλλικών μερών της μηχανής λόγω του **κορεσμού του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος**.

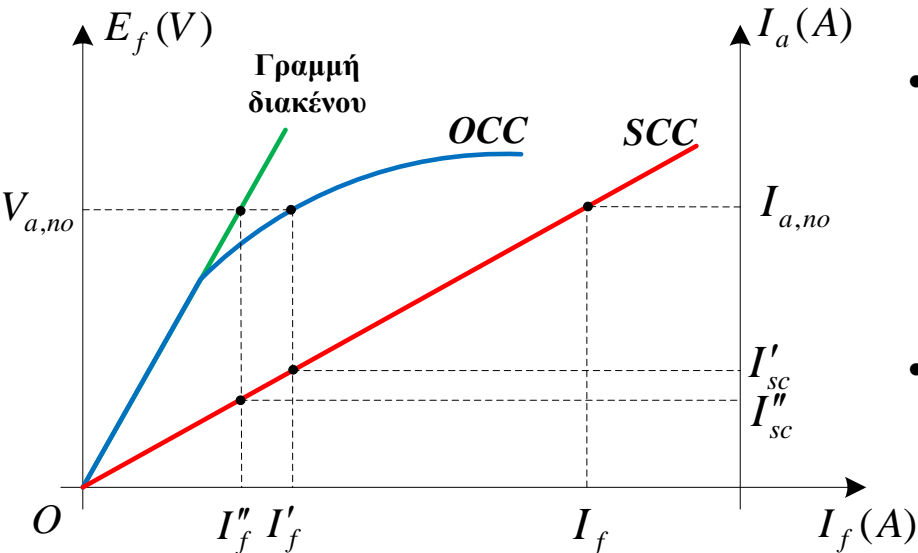
- Η μηχανική ισχύς, καλύπτει τις λεγόμενες **απώλειες κενού φορτίου** (μηχανικές απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού, καθώς και τις μαγνητικές απώλειες του πυρήνα).
- Για σταθερή ταχύτητα περιστροφής, οι **μηχανικές απώλειες παραμένουν σταθερές**.
- Οι απώλειες του πυρήνα, εξαρτώνται άμεσα από το **μέγεθος της μαγνητικής ροής** και κατ' επέκταση από το **μέγεθος της επαγόμενης τάσης**.

Χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης (SCC)

$$I_a = f(I_f) |_{V_a=0}$$



- Η μηχανή στρέφεται στη **σύγχρονη ταχύτητα**, με το τύλιγμα τυμπάνου **βραχυκυκλωμένο**.
- Αυξάνουμε σταδιακά το ρεύμα στο **τύλιγμα διέγερσης**, έως ότου το ρεύμα τυμπάνου φτάσει μια μέγιστη τιμή, περίπου τη **διπλάσια της ονομαστικής**.



- Η χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης είναι **γραμμική**, διότι **δεν υπεισέρχονται φαινόμενα κορεσμού** του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος.
- Επειδή $r_a \ll x_s$, όλη η **επαγόμενη τάση διέγερσης** εφαρμόζεται στα άκρα της **σύγχρονης αντίδρασης**.

Συνήθως, η **αντίδραση σκέδασης** αποτελεί το 10-20% της τιμής της **σύγχρονης αντίδρασης**, με αποτέλεσμα, η **επαγόμενη τάση διακένου** να είναι το 10-20% της αντίστοιχης τιμής της **τάσης διέγερσης**.

$$\frac{E_R}{E_f} \Big|_{V_a=0} = \frac{I_a x_{al}}{I_a x_s} = \frac{x_{al}}{x_s}$$

Αν το **ρεύμα τυμπάνου στο βραχυκύκλωμα** μπορεί να φτάσει και στο 150% της ονομαστικής τιμής του, η μηχανή **λειτουργεί σε ακόρεστη κατάσταση**, με αποτέλεσμα τη **γραμμική εξάρτηση μεταξύ των ρευμάτων πεδίου και τυμπάνου**.

Κορεσμένη και την **ακόρεστη** τιμή της **σύγχρονης σύνθετης αντίστασης**

$$z_{s,sat} = \frac{V_{a,no}}{I'_{sc}} \Big|_{I_f=I'_f}$$

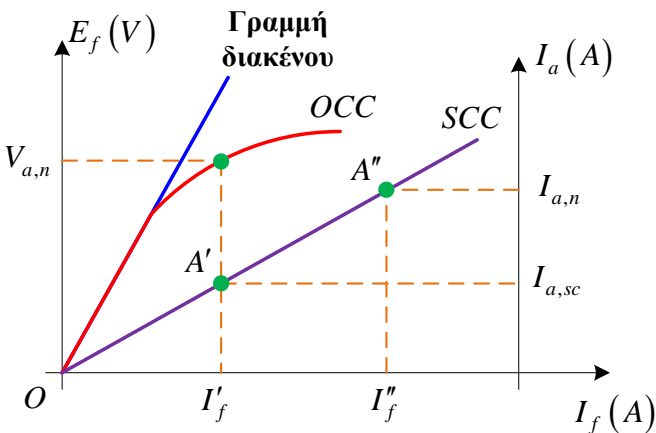
$$z_{s,unsat} = \frac{V_{a,no}}{I''_{sc}} \Big|_{I_f=I''_f}$$

Κορεσμένη και **ακόρεστη** σύγχρονη αντίδραση

$$x_{s,sat} = \sqrt{z_{s,sat}^2 - r_a^2}$$

$$x_{s,unsat} = \sqrt{z_{s,unsat}^2 - r_a^2}$$

Λόγος βραχυκύκλωσης



Λόγος βραχυκύκλωσης (SCR). Ο λόγος του ρεύματος πεδίου που απαιτείται για ονομαστική τάση στο τυλίγμα τυμπάνου **κατά τη λειτουργία χωρίς φορτίο**, προς το ρεύμα του πεδίου που απαιτείται για **ονομαστικό ρεύμα τυμπάνου σε βραχυκύκλωμα**.

$$SCR = \frac{I'_f}{I''_f}$$

Ο **λόγος βραχυκύκλωσης** ισούται με το **αντίστροφο της α.μ. τιμής της κορεσμένης σύγχρονης αντίστασης**

$$SCR = \frac{1}{z_{s,sat} (pu)}$$

Αν αμεληθεί η ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου, ο **λόγος βραχυκύκλωσης** θα ισούται με το **αντίστροφο της ανά μονάδα τιμής της κορεσμένης σύγχρονης αντίδρασης**.

$$SCR = \frac{1}{x_{s,sat} (pu)}$$

Συμπεράσματα

- Μικρή τιμή του SCR συνεπάγεται **μεγάλη τιμή της α.μ. σύγχρονης αντίδρασης** και **αντίστροφα**.
- Άμεση εξάρτηση του **λόγου βραχυκύκλωσης** από το **μήκος διακένου**
- Αύξηση του μήκους του διακένου, μειώνει την επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου, με αποτέλεσμα την **αύξηση του λόγου βραχυκύκλωσης**, καθώς επίσης και την **αύξηση του στατικού ορίου ευστάθειας**.

Λειτουργία υπό φορτίο – καμπύλες V

- Η ανταλλαγή **πραγματικής ισχύος** με το ηλεκτρικό δίκτυο, ελέγχεται μέσω της **μηχανικής ισχύος στον άξονα**
- Η **άεργη ισχύς** ελέγχεται μέσω του **ρεύματος της διέγερσης**.
- Ο **συντελεστής ισχύος**, εξαρτάται και αυτός άμεσα από το **ρεύμα διέγερσης**.

Εάν $r_a = 0$, υπό σταθερό φορτίο και με τη μηχανή **συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό**, η μεταβολή στην τάση διέγερσης λόγω μεταβολής του ρεύματος του πεδίου, θα έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της γωνίας κατά τέτοιο τρόπο ώστε το γινόμενο ($E_f \sin \delta$) **να παραμείνει σταθερό**.

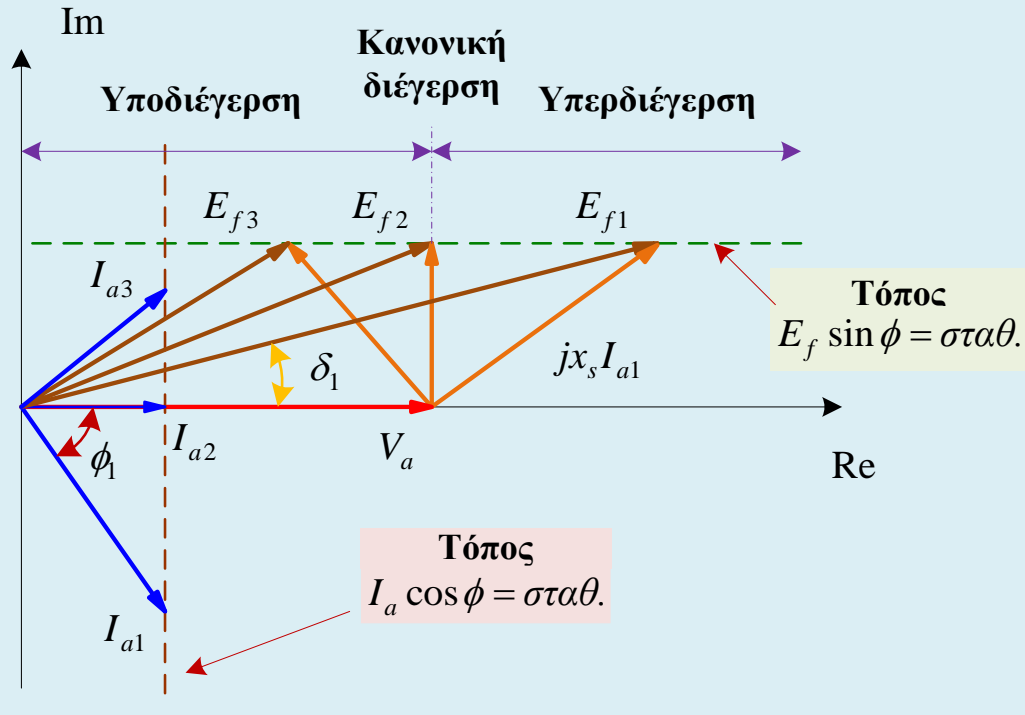
$$E_f \sin \delta = \text{σταθ.}$$

Η μεταβολή του μέτρου του ρεύματος στο τύλιγμα τυμπάνου, συνοδεύεται από αντίστοιχη μεταβολή της φασικής απόκλισης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος τυμπάνου, ώστε η **προβολή του ρεύματος στον άξονα της τάσης να παραμείνει σταθερή**.

$$I_a \cos \varphi = \text{σταθ.}$$

Λειτουργία Γεννήτριας

Σταθερό φορτίο και μεταβλητό ρεύμα διέγερσης



Η συνεχής μείωση του μέτρου της E_f που προκαλείται λόγω της μείωσης του I_f , έχει σαν αποτέλεσμα τη **συνεχή μείωση του στατικού ορίου ευστάθειας.**

Λειτουργία σε υπερδιέγερση

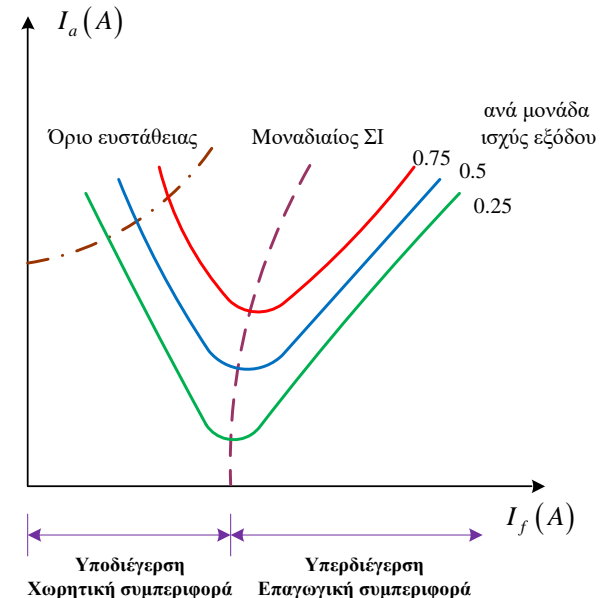
$I_f \downarrow \rightarrow E_f \downarrow \rightarrow \text{γωνία } \delta \uparrow$.
Ταυτόχρονα $I_a \downarrow \rightarrow \cos \phi \uparrow$

Κανονική διέγερση

Το I_a εμφανίζει την ελάχιστη τιμή του.

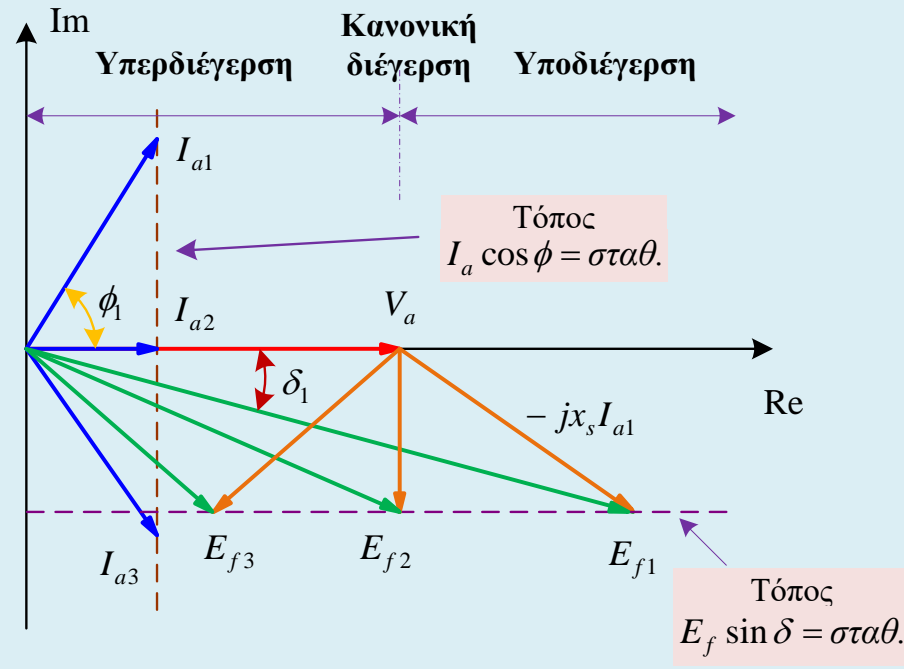
Λειτουργία σε υποδιέγερση

Περεταίρω $I_f \downarrow$ και γωνία $\delta \uparrow$.
Ο Σ.Ι. \downarrow , αλλά είναι πλέον RC.
Επίσης $I_a \uparrow$ επειδή $I_f \downarrow$



Λειτουργία Κινητήρα

Σταθερό φορτίο και μεταβλητό ρεύμα διέγερσης



Λειτουργία σε υπερδιέγερση

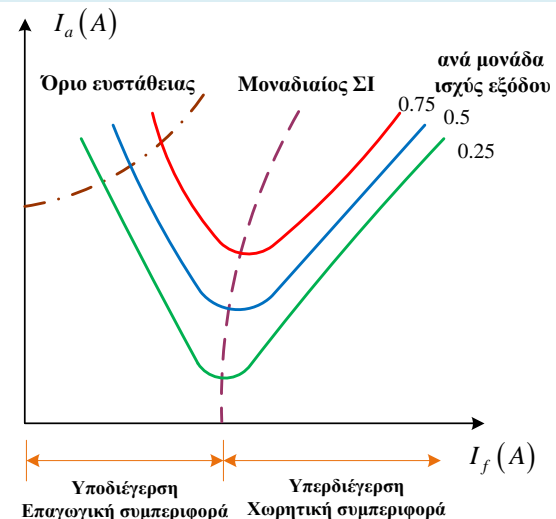
$E_f \uparrow \rightarrow \gamma\omega\nu\acute{\iota}\alpha \delta \downarrow$. Η $E_f \uparrow$ (για $V_a = \text{σταθ.}$) $\rightarrow I_a \uparrow$ όπως επίσης και η μεταβολή της φασικής του απόκλισης με την V_a , ώστε η προβολή του στον άξονα της τάσης να παραμείνει **σταθερή** μιας και η αποδιδόμενη ισχύς παραμένει **σταθερή**.

Λειτουργία σε υποδιέγερση

$I_f \downarrow \rightarrow E_f \downarrow \rightarrow \gamma\omega\nu\acute{\iota}\alpha \delta \uparrow$. Ταυτόχρονα $I_a \uparrow \rightarrow$ αύξηση της φασικής του απόκλισης με τη V_a

Κανονική διέγερση

Το I_a εμφανίζει την μικρότερη τιμή του.



Συμπεράσματα

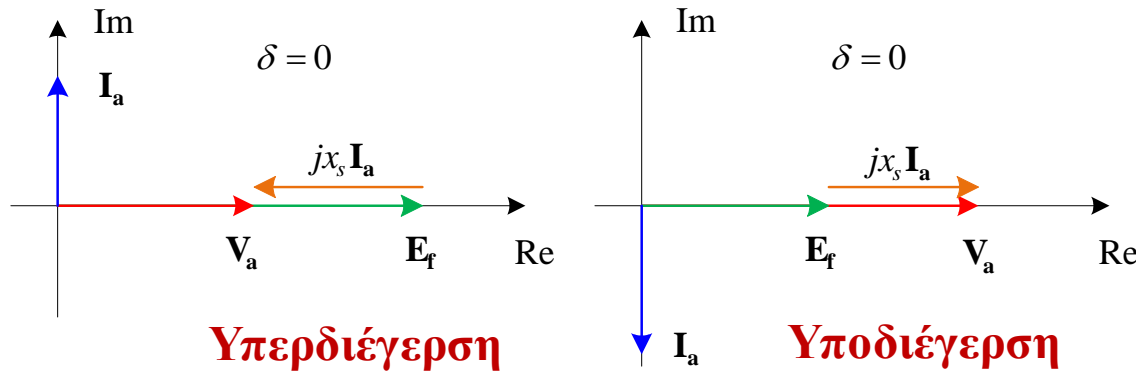
Λειτουργία σύγχρονης γεννήτριας

- **Υπερδιέγερση:** Η γεννήτρια τροφοδοτεί το φορτίο με συντελεστή ισχύος **μεταπορείας**
- **Κανονική διέγερση:** με **μοναδιαίο** συντελεστή ισχύος
- **Υποδιέγερση:** με συντελεστή ισχύος **προπορείας**.
- Σε **κανονική διέγερση** οι καμπύλες V εμφανίζουν **απόλυτο ελάχιστο**.

Λειτουργία σύγχρονου κινητήρα

- **Υπερδιέγερση:** Ο κινητήρας εμφανίζει **χωρητική συμπεριφορά** που σημαίνει ότι ο συντελεστής ισχύος είναι **προπορείας**.
- **Υποδιέγερση:** Ο κινητήρας εμφανίζει **επαγωγική συμπεριφορά** που σημαίνει ότι ο συντελεστής ισχύος είναι **μεταπορείας**.
- Όπως και στην περίπτωση της γεννήτριας, η **ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή του ρεύματος διέγερσης για λόγους ευστάθειας**, είναι εκείνη για την οποία η γωνία φορτίου γίνεται ίση με **90** ηλεκτρικές μοίρες. Στη συγκεκριμένη οριακή κατάσταση, από άποψη **ευστάθειας**, η τάση διέγερσης έχει τη μικρότερη τιμή της και βρίσκεται στον κατακόρυφο άξονα.

Χρήση του σύγχρονου κινητήρα για αντιστάθμιση



Όταν $\delta = 0$, τα διανύσματα των τάσεων διέγερσης και τυμπάνου είναι **συμφασικά**, το ρεύμα τυμπάνου συνεισφέρει μόνο σε **άεργο ισχύ**.

Κατάσταση υπερδιέγερσης: $S_{in} = V_a I_a^* = 3V_a \angle 0^\circ \times I_a \angle -90^\circ = -j3V_a I_a$

Ο σύγχρονος κινητήρας συμπεριφέρεται ως **ιδανικός πυκνωτής**, παράγοντας **επαγωγική άεργο ισχύ**. Για το λόγο αυτό, ονομάζεται και **σύγχρονος πυκνωτής**.

Κατάσταση υπερδιέγερσης: $S_{in} = V_a I_a^* = 3V_a \angle 0^\circ \times I_a \angle +90^\circ = +j3V_a I_a$

Ο κινητήρας εμφανίζει **επαγωγική συμπεριφορά**. Ο κινητήρας συμπεριφέρεται σαν ένα **καθαρά επαγωγικό φορτίο**, παράγοντας **χωρητική άεργο ισχύ**.

Στις σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και στις μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, λειτουργούν **σύγχρονοι κινητήρες χωρίς φορτίο**, με αποκλειστικό σκοπό τη ρύθμιση του Σ.Ι., παρέχοντας τη δυνατότητα και για **χωρητική** και για **επαγωγική αντιστάθμιση**.

Περιοχές ασφαλούς λειτουργίας

- **Θερμικά όρια φόρτισης**
- **Μηχανικά όρια φόρτισης**
- **Όρια στατικής ευστάθειας**

Θερμικά όρια φόρτισης

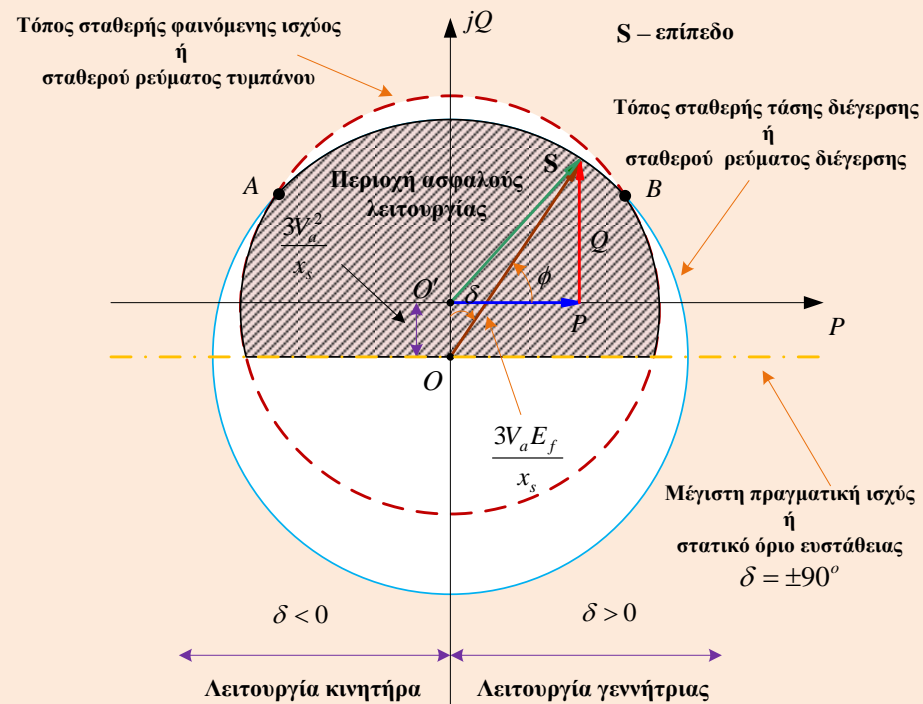
- **Ηλεκτρικές απώλειες στα τυλιγμάτων διέγερσης και τυμπάνου**
- **Μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα στο τύλιγμα τυμπάνου**

Μηχανικά όρια φόρτισης

- **Μέγιστη ροπή**
- **Υψηλά ρεύματα στο τύλιγμα τυμπάνου**

Άεργη ισχύς προς την πραγματική ισχύ στο μιγαδικό επίπεδο, μέσω των προβολών του διανύσματος της μιγαδικής ισχύος:

Γεωμετρικοί τόποι των μεγεθών (μέγιστο ρεύμα τυμπάνου, μέγιστο ρεύμα διέγερσης, μέγιστη ισχύς κ.λ.π.), με βάση τους οποίους θα καθοριστεί η **περιοχή της ασφαλούς λειτουργίας**.



Εκκίνηση σύγχρονου κινητήρα

Η μέση παραγόμενη ροπή εκκίνησης είναι μηδενική.

- Το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα, είναι **στάσιμο στο χώρο**, σε αντίθεση με το μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος τυμπάνου το οποίο **περιστρέφεται με τη n_s** .
- Ο δρομέας δέχεται σε κάθε ημιπερίοδο **ροπή διαφορετικής κατεύθυνσης** η οποία προκαλεί έντονα **φαινόμενα υπερθέρμανσης** στον κινητήρα.

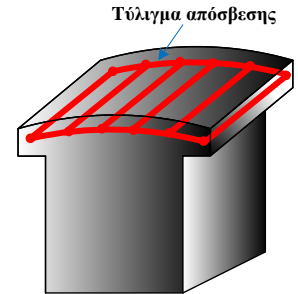
- ✓ Όταν ο κινητήρας στρέφεται με τη n_s , **αναπτύσσεται ροπή μιας κατεύθυνσης.**
- ✓ Όταν ο κινητήρας στρέφεται με **λίγο μικρότερη ταχύτητα** από τη n_s , αναπτύσσεται και πάλι ροπή μιας κατεύθυνσης η οποία επιταχύνει το δρομέα στη n_s (**κρίσιμη ταχύτητα**).
- ✓ Όταν ο κινητήρας στρέφεται με μεγαλύτερη από την **κρίσιμη ταχύτητα** ο κινητήρας **συγχρονίζεται** από μόνος του
- ✓ Όταν ο κινητήρας στρέφεται με μικρότερη από την **κρίσιμη ταχύτητα** δεν καταφέρνει να συγχρονιστεί και η **ταχύτητα του σταδιακά ελαττώνεται μέχρι το μηδενισμό της.**

Συμπέρασμα: Ο σύγχρονος κινητήρας δεν ξεκινά από μόνος του και χρειάζεται **βοηθητικά μέσα για την εκκίνηση του**

Βασικές μέθοδοι για την εκκίνηση των σύγχρονων κινητήρων

Χρήση τυλίγματος απόσβεσης

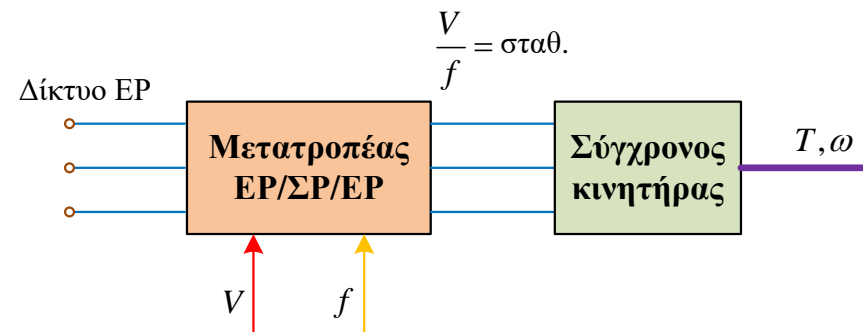
Πρόσθετο τύλιγμα **κλωβού** σε ειδικά αυλάκια στα πέλματα των μαγνητικών πόλων του δρομέα. (**Ξεκινά σαν ασύγχρονος κινητήρας**). Για την **αποφυγή υπερτάσεων** και **ανάπτυξη ροπής εκκίνησης**, το τύλιγμα διέγερσης βραχυκυκλώνεται μέσω κατάλληλης ωμικής αντίστασης και λειτουργεί σαν **τύλιγμα κλωβού**.



- Ο **κινητήρας πλησιάζει τη n_s** : Αποσυνδέεται η ωμική αντίσταση και το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση.
- Η ταχύτητα περιστροφής είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη οριακή ταχύτητα, ο κινητήρας **αυτοσυγχρονίζεται**.
- Ο κινητήρας **κινείται με n_s** : Δεν επάγονται τάσεις και ρεύματα στα τυλίγματα απόσβεσης, με αποτέλεσμα τα τυλίγματα απόσβεσης να παραμένουν **ανενεργά**.

Χρήση αντιστροφέα με ρύθμιση της συχνότητας

Μέσω **μετατροπέα AC/DC/AC** (ρύθμιση του λόγου **V/f**)

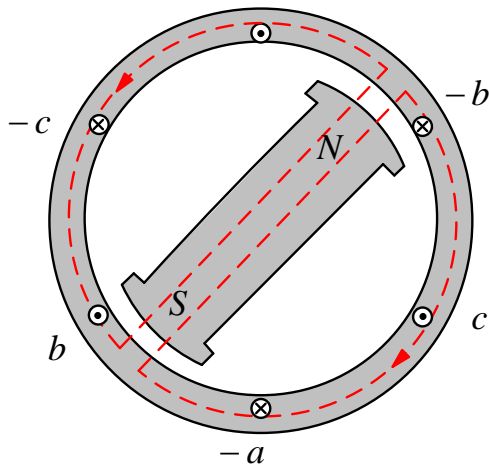


Μηχανές έκτυπων πόλων

Τύλιγμα τυμπάνου: Κατασκευαστικά το ίδιο με εκείνο των μηχανών με ομοιόμορφο διάκενο.

Έκτυποι πόλοι: Εισαγάγουν **ανομοιομορφία στο διάκενο**, με αποτέλεσμα:

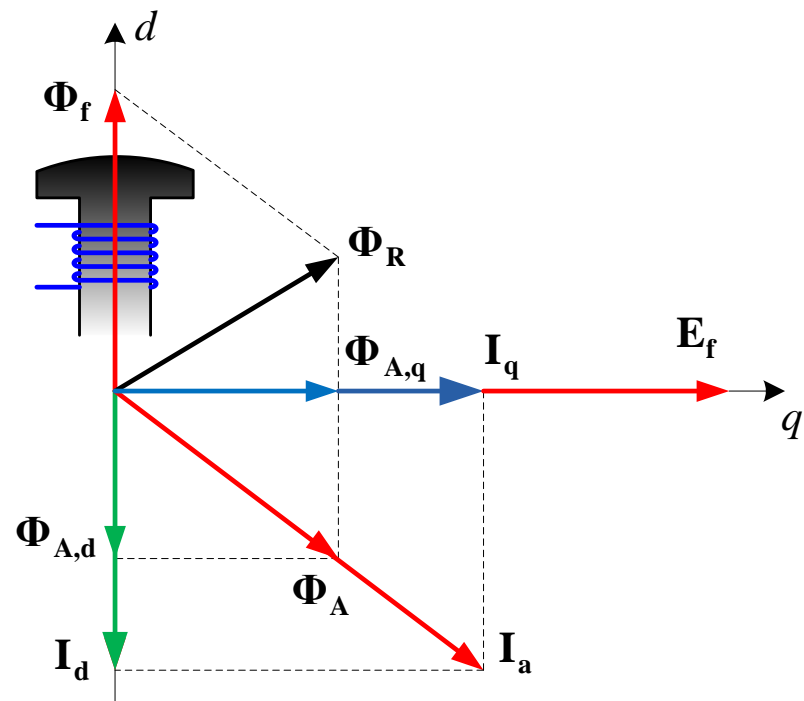
- Η **μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος** να μην είναι πλέον σταθερή στο διάκενο.
- Η **μαγνητική ροή του τυλίγματος τυμπάνου** εξαρτάται από τη **γωνιακή θέση του δρομέα**.



- Η **μικρότερη τιμή της μαγνητικής αντίστασης**, θα εμφανίζεται στους άξονες των μαγνητικών πόλων
- Η **μεγαλύτερη τιμή της μαγνητικής αντίστασης** στους άξονες μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων.

Ορθός άξονας: Ο άξονας κατά μήκος του άξονα του πόλου του δρομέα και

Εγκάρσιος άξονας: ο άξονας ο κάθετος στον ορθό άξονα (άξονας μεταξύ δύο διαδοχικών μαγνητικών πόλων)



- Η Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος τυμπάνου **αναλύεται σε δύο συνιστώσες**, η μια είναι **παράλληλη** με τον άξονα του πεδίου και η άλλη είναι **κάθετη**.
- Η μηχανή με έκτυπους πόλους είναι **ισοδύναμη** με **δύο υποθετικές μηχανές ομοιόμορφου διάκενου** οι οποίες λειτουργούν ταυτόχρονα, με **διαφορετικά όμως μήκη διακένου**.
- Το διάκενο που σχετίζεται με τον **ορθό άξονα**, θα είναι **μικρότερο** από το αντίστοιχο που σχετίζεται με τον **κατακόρυφο άξονα**, επειδή και η **αντίστοιχη μαγνητική αντίσταση** είναι **μικρότερη**.

$$\mathbf{E}_A = \mathbf{E}_d + \mathbf{E}_q$$

$$\mathbf{E}_d = -jx_d \mathbf{I}_d$$

$$\mathbf{E}_q = -jx_q \mathbf{I}_q$$

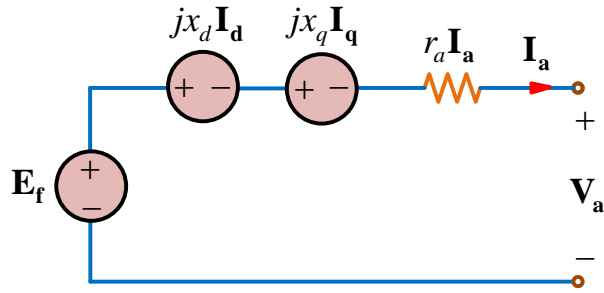
Λόγω της μεγαλύτερης τιμής της μαγνητικής αντίστασης του εγκάρσιου άξονα

$$x_d > x_q$$

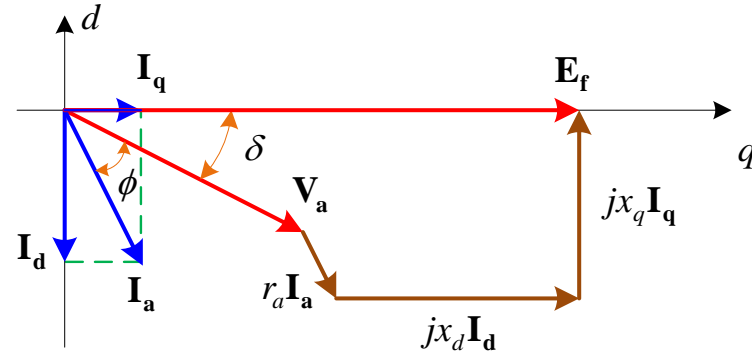
x_d = σύγχρονη αντίδραση ορθού άξονα

x_q = σύγχρονη αντίδραση εγκάρσιου ή κατακόρυφου άξονα

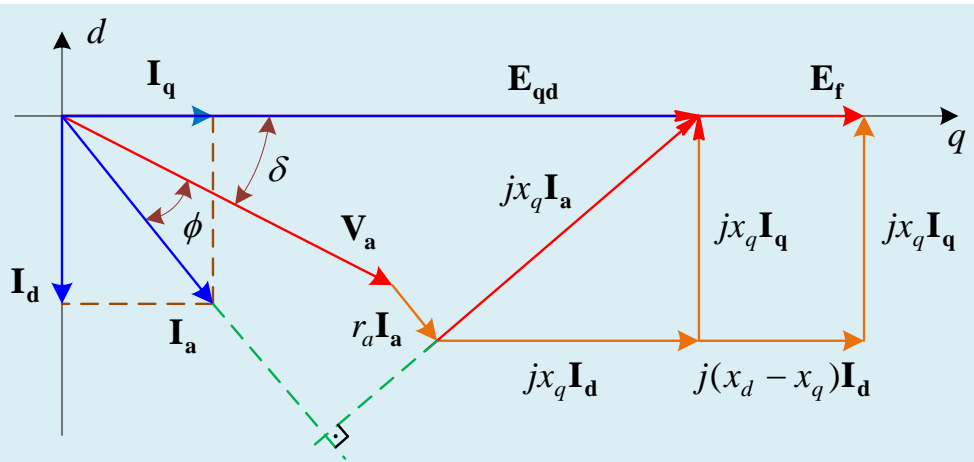
Σύγχρονη γεννήτρια με έκτυπους πόλους



$$E_f = V_a + r_a I_a + jx_d I_d + jx_q I_q$$



$$I_q = I_a \cos(\phi + \delta) \quad I_d = I_a \sin(\phi + \delta)$$



$$E_f = V_a \cos \delta + r_a I_q + x_d I_d$$

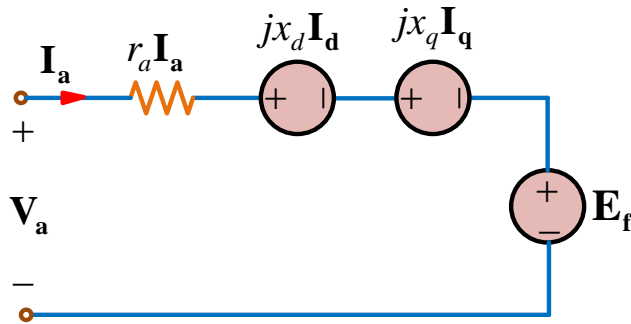
$$V_a \sin \delta + r_a I_d = x_q I_q$$

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{I_a X_q \cos \phi}{V_a + I_a X_q \sin \phi} \right)$$

Για **λειτουργία γεννήτριας**, είναι γνωστή η **τάση ακροδεκτών** και από τις **συνθήκες φόρτισης**, το **ρεύμα** και ο **ΣΙ** του φορτίου. Άγνωστη είναι η **γωνία ροπής ή γωνία φορτίου δ** .

Σύγχρονος κινητήρας με έκτυπους πόλους

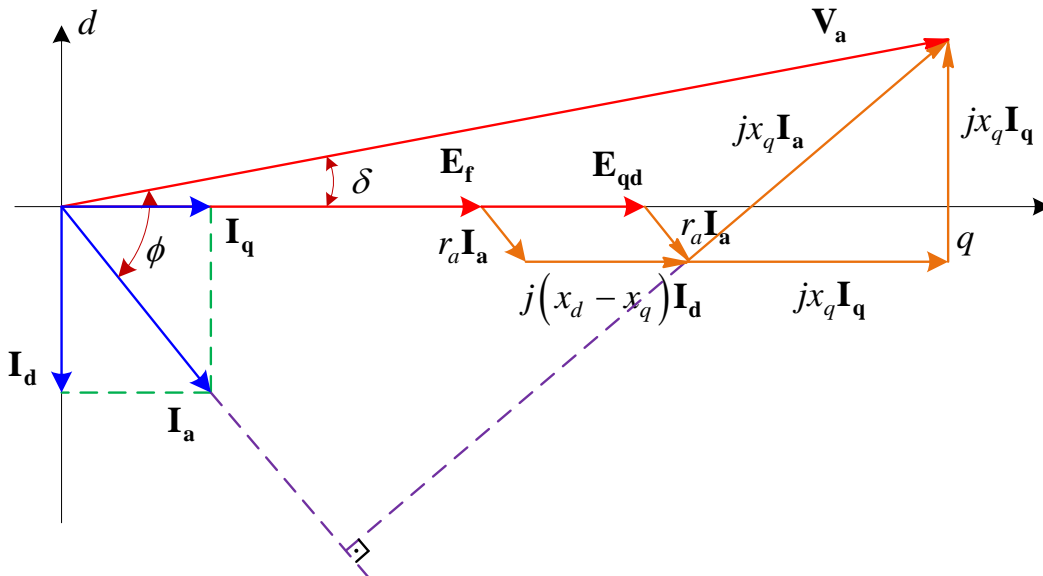
Το ισοδύναμο κύκλωμα για λειτουργία **κινητήρα**, είναι απόλυτα όμοιο με εκείνο που αντιστοιχεί σε λειτουργία **γεννήτριας**, με τη μόνη διαφορά στην **αντιστροφή** της φοράς του I_a



$$V_a = E_f + r_a I_a + jx_d I_d + jx_q I_q$$

$$V_a = E_{qd} + r_a I_a + jx_q I_a$$

$$E_{qd} = E_f + j(x_d - x_q) I_a$$



Γωνία ροπής δ

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{I_a X_q \cos \phi}{V_a - I_a X_q \sin \phi} \right)$$

Εσωτερική ισχύς και ροπή

Μιγαδική ισχύς στους ακροδέκτες του τυλίγματος τυμπάνου

$$S = 3V_a I_a^* = 3V_a (I_d + I_q)^* = 3(V_a I_d^* + V_a I_q^*) = P + jQ$$

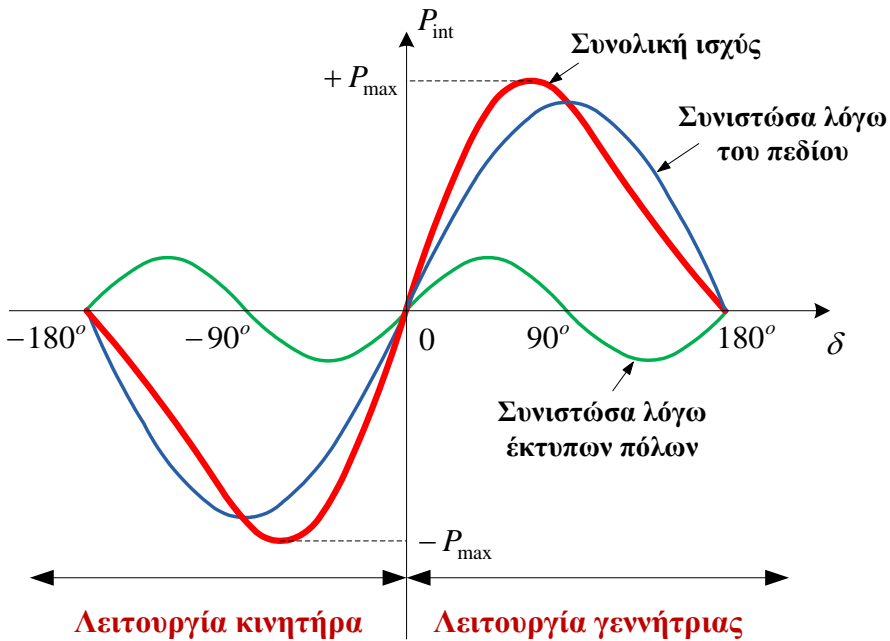
Εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ισχύ (για $r_a=0$)

$$P_{\text{int}} = \frac{3V_a E_f}{x_d} \sin \delta + \frac{3V_a^2 (x_d - x_q)}{2x_d x_q} \sin 2\delta$$

Ο **πρώτος όρος** είναι ίδιος με την P_{int} μιας μηχανής κυλινδρικού δρομέα

Ο **δεύτερος όρος**, είναι ανεξάρτητος του **ρεύματος** του **πεδίου** και οφείλεται στην ανομοιομορφία της μαγνητικής αντίστασης στο διάκενο.

Ο **σύγχρονος κινητήρας με έκτυπους πόλους**, μπορεί να λειτουργήσει και με **ταχύτητα μηδενική διέγερση σαν κινητήρας μαγνητικής αντίστασης στη σύγχρονη** εφόσον βέβαια οι απαιτήσεις του φορτίου σε ροπή εξακολουθούν να καλύπτονται από την παραγόμενη ροπή λόγω της μαγνητικής αντίστασης.



- Λόγω της συνιστώσας της ισχύος που οφείλεται στους έκτυπους πόλους, η P_{\max} είναι **μεγαλύτερη** από την αντίστοιχη μηχανή κυλινδρικού δρομέα, για την ίδια τάση διέγερσης.
- Η **αύξηση της κλίσης** της χαρακτηριστικής, στην περιοχή μεταξύ των $\pm P_{\max}$ έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της **ευαισθησίας** στις μεταβολές του φορτίου, **αυξάνοντας παράλληλα την ταχύτητα απόκρισης**.

Εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ροπή

$$T = \frac{P_{\text{int}}}{\omega_s} = \frac{3V_a E_f}{\omega_s X_d} \sin \delta + \frac{3V_a^2}{2\omega_s} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \sin 2\delta$$

Προσδιορισμός των αντιδράσεων ορθού και εγκάρσιου άξονα

Το **μέγεθος της μαγνητικής ροής**, εμφανίζει:

- ✓ τη **μεγαλύτερη τιμή** του όταν ο ορθός άξονας του δρομέα ταυτίζεται με τον άξονα της συνισταμένης Μ.Ε.Δ.
- ✓ τη **μικρότερη τιμή**, στην περίπτωση που ο εγκάρσιος άξονας του πεδίου ταυτίζεται με τον άξονα της συνισταμένης Μ.Ε.Δ.

Οι σύγχρονες αντιδράσεις x_d και x_q του ορθού και εγκάρσιου άξονα, αντιπροσωπεύουν την **αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου** στις δύο ακραίες χαρακτηριστικές θέσεις του δρομέα.

Μέθοδος της ολίσθησης για τον υπολογισμό των αντιδράσεων του τυλίγματος τυμπάνου

Ο δρομέας στρέφεται με τη βοήθεια κινητήρα σε μια ταχύτητα λίγο διαφορετική από τη n_s , με το τύλιγμα του πεδίου **ανοιχτοκυκλωμένο**.

$$x_d = \frac{V_{\max}}{I_{\min}}$$

$$x_q = \frac{V_{\min}}{I_{\max}}$$

Μειονέκτημα της μεθόδου ολίσθησης: Σημαντικά σφάλματα παρουσιάζονται αν η μηχανή διαθέτει τυλίγματα αντιστάθμισης, λόγω των επαγόμενων ρευμάτων σε αυτά.

Για την αποφυγή των επιδράσεων αυτών, επιβάλλεται η **συχνότητα ολίσθησης να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη**.

Παραλληλισμός σύγχρονης γεννήτριας με το δίκτυο

Λόγοι που επιβάλλουν τον παραλληλισμό

- ✚ Η ποιότητα της εξυπηρέτησης των καταναλωτών (ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος, αύξηση της αξιοπιστίας στη συνέχεια της τροφοδότησης),
- ✚ Η μείωση του κόστους λειτουργίας των μονάδων παραγωγής,
- ✚ Λόγοι συντήρησης του εξοπλισμού

Προϋποθέσεις για τον παραλληλισμό μιας γεννήτριας στο δίκτυο

1. Οι φασικές/πολικές τάσεις της υπό ένταξη γεννήτριας στο ηλεκτρικό σύστημα (δίκτυο), θα πρέπει να **είναι ίσες σε μέγεθος με τις αντίστοιχες τάσεις του δικτύου**

$$V'_1 = V_1 = V'_2 = V_2 = V'_3 = V_3$$

2. Η συχνότητα των τάσεων της γεννήτριας, θα πρέπει να είναι **ίση με τη συχνότητα των τάσεων του δικτύου**

$$f' = f$$

3. Η διαδοχή των φάσεων της υπό ένταξη γεννήτριας, να **ταυτίζεται με τη διαδοχή των φάσεων του δικτύου.**

4. Η φασική απόκλιση μεταξύ των αντίστοιχων φασικών/πολικών τάσεων, να είναι **μηδενική.**

$$\angle(\mathbf{V}'_j, \mathbf{V}_j) = 0 \quad , \quad j = 1, 2, 3$$

Πρώτη συνθήκη:

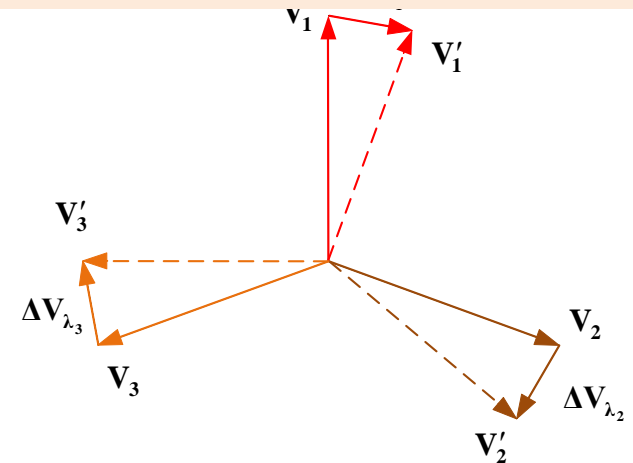
Ο έλεγχος γίνεται **μέσω βολτομέτρου**

- Οι υπόλοιπες τρεις συνθήκες, ελέγχονται συγχρόνως με τη βοήθεια των λεγόμενων **πλοηγών λυχνιών**, οι οποίες συνδέονται στους ακροδέκτες του διακόπτη και σε κάθε φάση.
- Η μέθοδος αυτή, χρησιμοποιεί τη λεγόμενη **συνδεσμολογία σβέσης**.

Δεύτερη συνθήκη:

Στην περίπτωση που $f' \neq f$, επιβάλλεται στις πλοηγές λυχνίες μια **συνισταμένη τάση**, συχνότητας ίσης με το ημίθροισμα των συχνοτήτων δικτύου και γεννήτριας, ενώ τα πλάτη αυτής μεταβάλλονται με **συχνότητα ίση με την ημιδιαφορά των δύο συχνοτήτων**.

Οι **λυχνίες παρουσιάζουν διακυμάνσεις στην ένταση του φωτός**. Οι διακυμάνσεις αυτές γίνονται τόσο **βραδύτερες**, όσο περισσότερο πλησιάζει η συχνότητα της γεννήτριας προς τη συχνότητα του δικτύου.



Εφόσον υπάρχει **διαφορά συχνοτήτων**, τότε **μεταβάλλονται οι στροφές της κινητήριας μηχανής του ζεύγους**, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο μηδενισμός της διαφοράς αυτής.

Τρίτη συνθήκη

- Οι **τρεις λυχνίες ανάβουν ή σβήνουν συγχρόνως**: Η προς παραλληλισμό γεννήτρια έχει την αυτή διαδοχή φάσης με το δίκτυο
- Οι **λυχνίες ανάβουν και σβήνουν η μία μετά την άλλη**: Η διαδοχή των φάσεων είναι αντίστροφη και πρέπει να εναλλαγούν δύο οποιεσδήποτε συνδέσεις μεταξύ των φάσεων.

