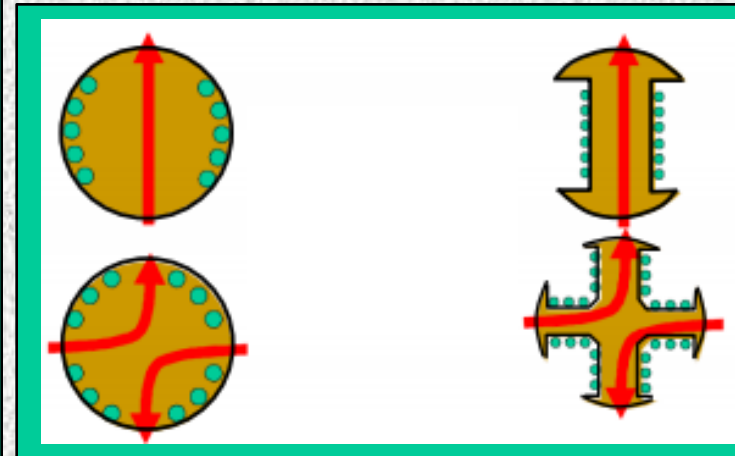
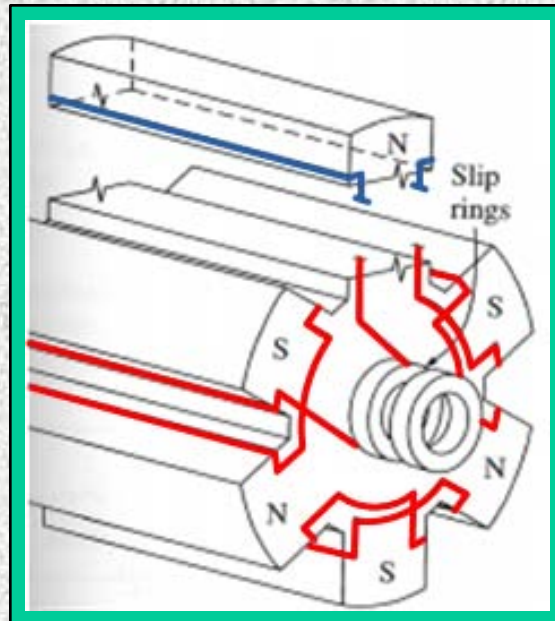
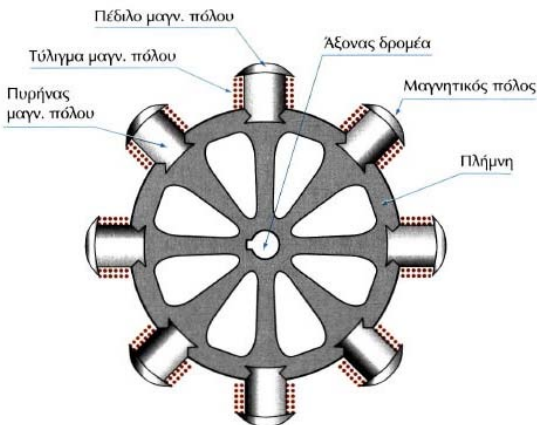
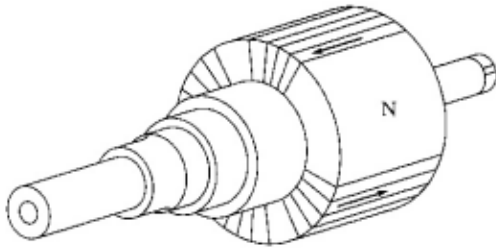


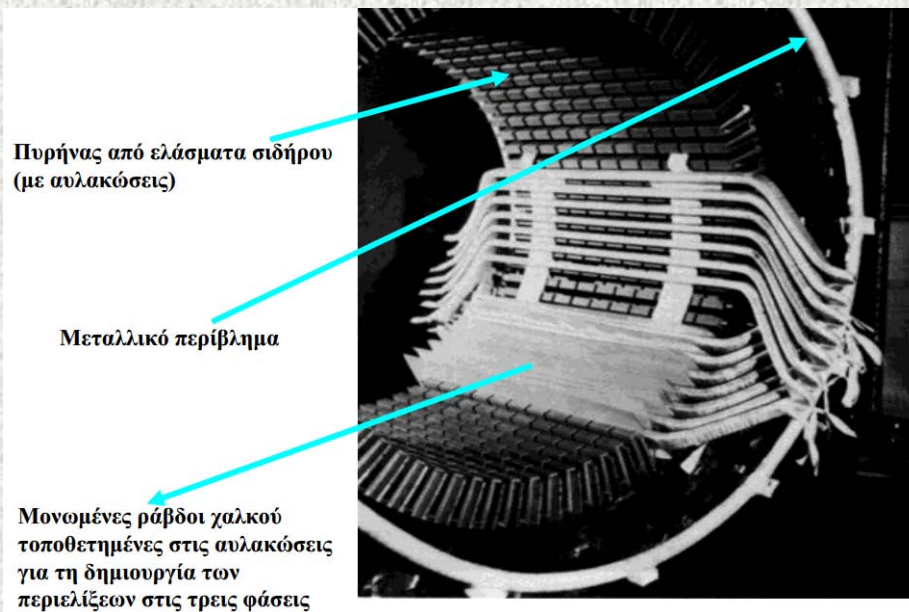
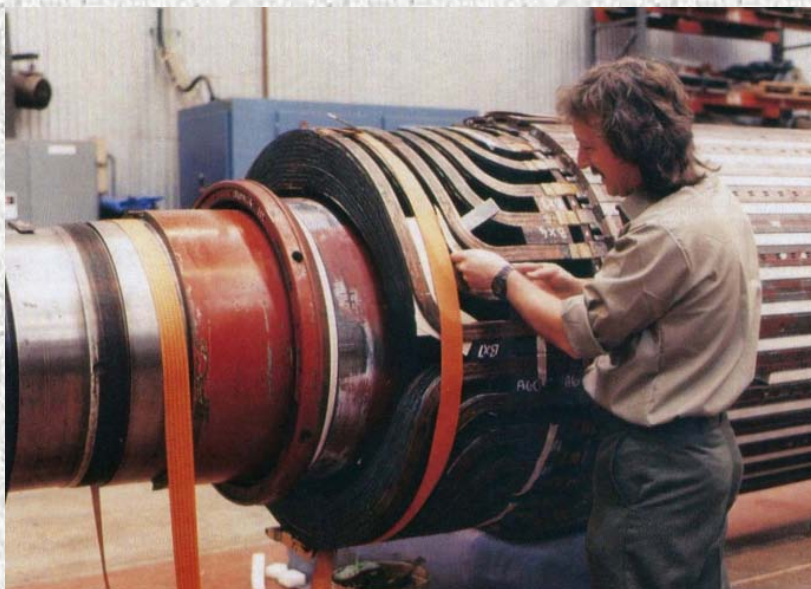
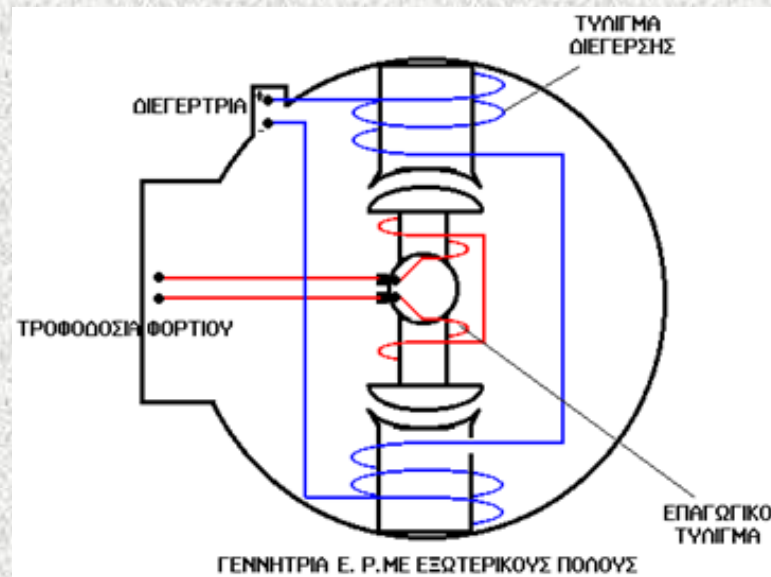
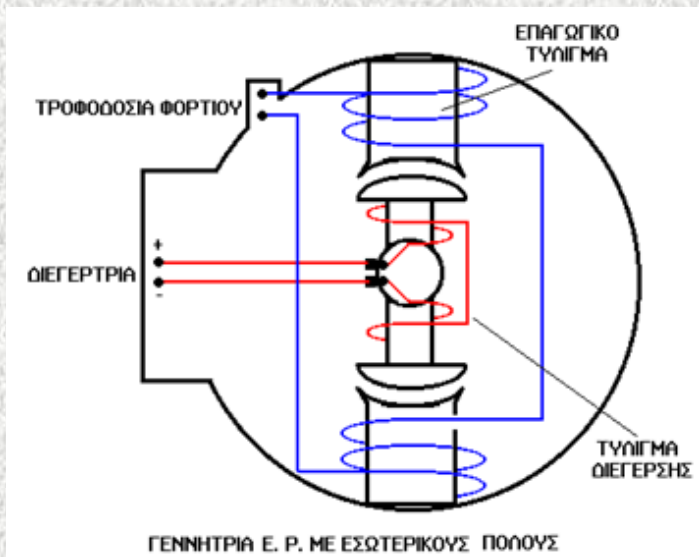
ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

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**.





ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

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** σε σχέση με τις μηχανές έκτυπων πόλων.

Οι δρομείς των μηχανών ομοιόμορφου διάκενου είναι **μεγαλύτερου ενεργού μήκους** και **μικρότερης διαμέτρου**, από τους αντίστοιχους δρομείς των μηχανών με έκτυπους πόλους (για τον περιορισμό των φυγοκεντρικών δυνάμεων αλλά και τη 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 που εξαρτώνται από τον αριθμό των μαγνητικών πόλων των τυλιγμάτων και από τη συχνότητα των ρευμάτων του τυλίγματος τυμπάνου).

Σε αντίθεση λοιπόν με τις ασύγχρονες μηχανές, στις **σύγχρονες μηχανές** η **ολίσθηση** του δρομέα είναι **μηδενική**. Δηλαδή, το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής και ο δρομέας, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, **στρέφονται με την ίδια ταχύτητα**.

Οι σύγχρονες μηχανές, χρησιμοποιούνται κυρίως ως γεννήτριες και λιγότερο ως κινητήρες. (π.χ. Αντλητικούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς)

Βασικό πλεονέκτημα σύγχρονης γεννήτριας

Εύκολη ρύθμιση της ενεργού και της άεργης ισχύος.

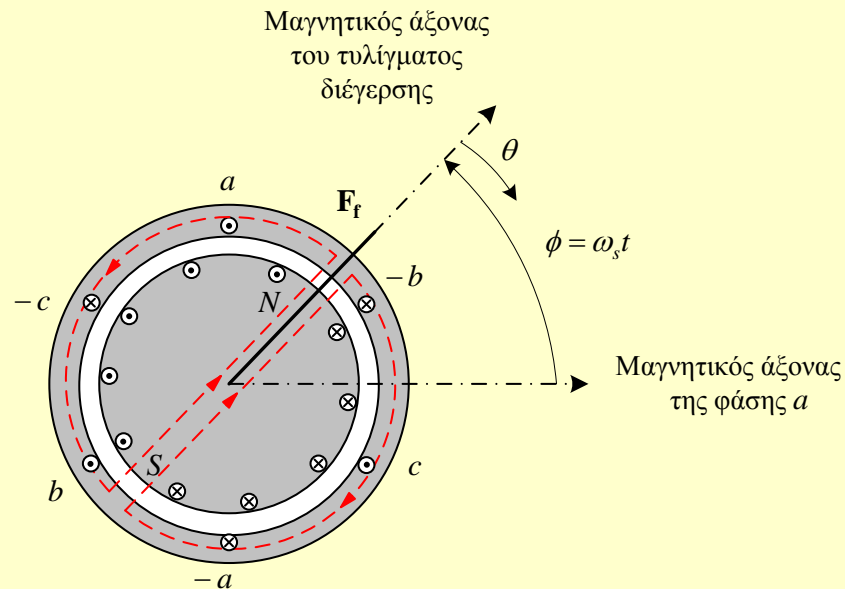
Χαρακτηριστικό των σύγχρονων κινητήρων

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** («επιπλέον» 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



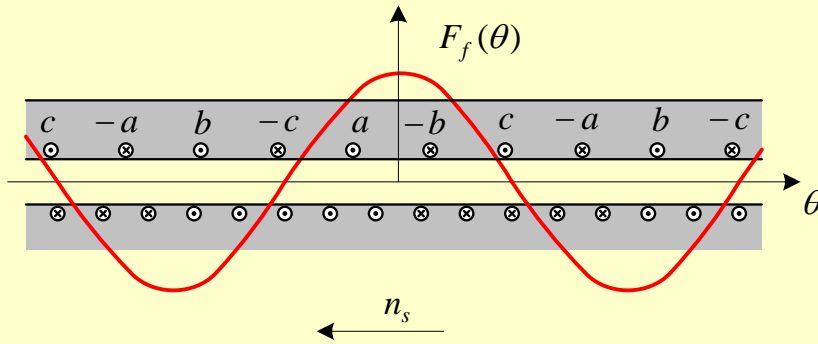
Τύλιγμα τύμπανου βρίσκεται στο **στάτη** (τρία επιμέρους όμοια 1Φ διανεμημένα τυλίγματα ένα για κάθε φάση, με τους μαγνητικούς τους άξονες μετατιθέμενους στο χώρο κατά 120 ηλεκτ. μοίρες).

Τύλιγμα του πεδίου ή διέγερσης βρίσκεται στο **δρομέα** (τροφοδοτείται με Σ.Ρ. μέσω ψηκτρών οι οποίες ολισθαίνουν σε δακτυλίους κατάλληλα τοποθετημένους στο δρομέα). Η διάταξη αυτή επιβάλλεται για κατασκευαστικούς λόγους, κυρίως γιατί το ρεύμα του πεδίου είναι συνήθως πολύ μικρότερο από το ρεύμα του τύμπανου και ως εκ τούτου είναι πλεονεκτικότερη η τοποθέτηση του τυλίγματος χαμηλής ισχύος στο δρομέα.

Κύματα χώρου μαγνητεγερτικών δυνάμεων τυλιγμάτων στάτη και δρομέα

Θεμελιώδη συνιστώσα χωρικής κατανομής της (Μ.Ε.Δ.) του τυλιγματος του δρομέα

Μαγνητικός άξονας τυλιγματος διέγερσης

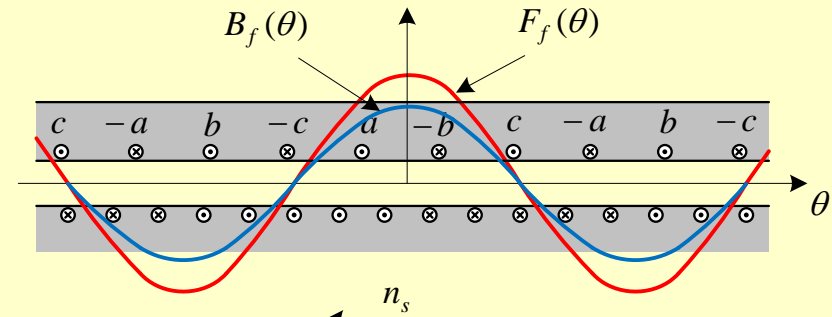


Φορά περιστροφής δρομέα

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

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

Μαγνητικός άξονας τυλιγματος διέγερσης



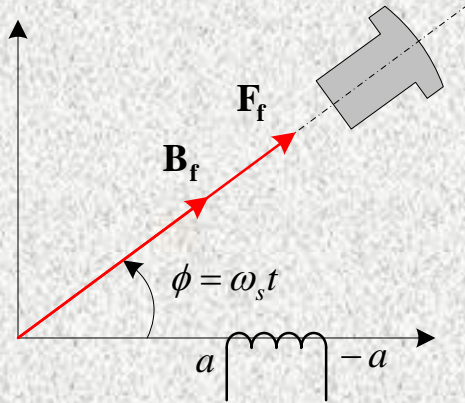
Φορά περιστροφής δρομέα

Ο δρομέας, κινείται με τη σύγχρονη ταχύτητα, από κινητήρα συνδεδεμένο στον άξονα. Αγνοώντας φαινόμενα κορεσμού του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος και λαμβάνοντας υπόψη τη σταθερότητα της μαγνητικής αντίστασης περί την περιφέρεια του διακένου, η **ακτινική διανομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής** μπορεί να παρασταθεί με αρκετά καλή προσέγγιση 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**, στις μηχανές μπορεί να καταστεί κατά προσέγγιση ημιτονοειδές, με κατάλληλη διαμόρφωση του προσώπου των πόλων.

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

Διανυσματική μέθοδος παράστασης των ημιτονοειδών καμπυλών των κυμάτων χώρου



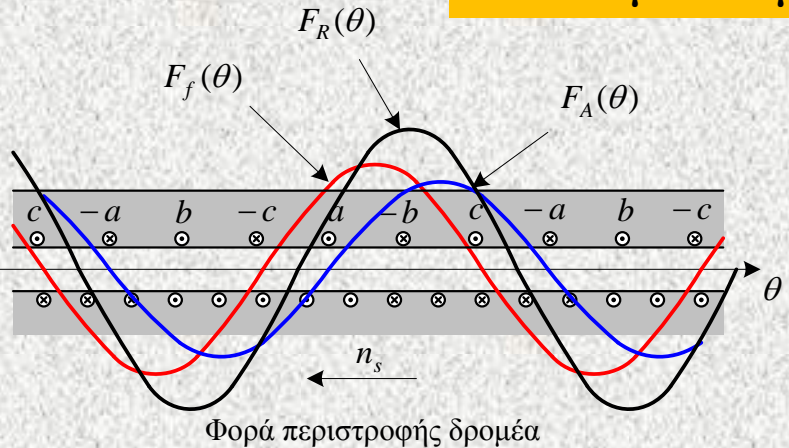
Με αναφορά στο μαγνητικό άξονα της φάσης ($\alpha - \alpha$) Μόλις τροφοδοτηθεί ο στάτης από **συμμετρικό σύστημα ρευμάτων**, δημιουργείται **στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο** σταθερού πλάτους που στρέφεται με τη n_s .
Θεωρούμε τώρα και το **μαγνητικό πεδίο** που δημιουργείται από τα ρεύματα τυμπάνου, καθώς και το **συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο** στο διάκενο, κατά την υπό φορτίο λειτουργία της μηχανής.

Λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις θεμελιώδεις συνιστώσες χώρου των Μ.Ε.Δ. των τυλιγμάτων των επιμέρους φάσεων, η **τιμή κορυφής (μέγιστη τιμή) της συνισταμένης Μ.Ε.Δ.** είναι

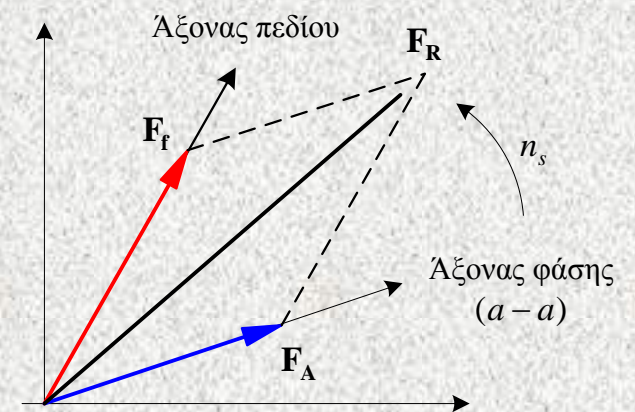
$$F_{Am} = \frac{3}{2} \left(\frac{4}{\pi} K_{wa} \frac{N_{ph}}{P} \right) I_m$$

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, τη χρονική στιγμή κατά την οποία η Μ.Ε.Δ. της κάθε φάσης έχει τη μέγιστη θετική τιμή της.

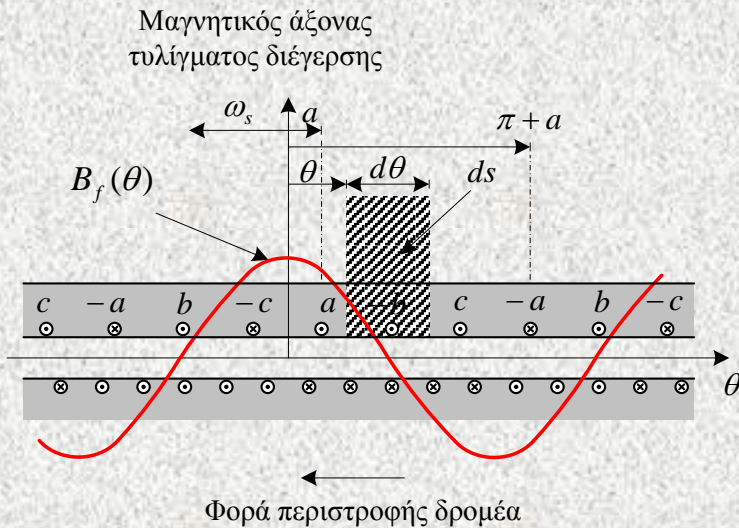
Συνιστάμενο θεμελιώδες κύμα Μ.Ε.Δ. στο διάκενο της μηχανής



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



Ανάπτυξη τάσης και ροπής



Με αναφορά το μαγνητικό άξονα της φάσης ($\alpha - \alpha$) του τυλίγματος του στάτη παρατηρούμε ότι, το θεμελιώδες κύμα πυκνότητας μαγνητικής ροής του δρομέα περιστρέφεται με τη n_s . Μιας και οι επαγόμενες τάσεις στο τύλιγμα τυμπάνου, εξαρτώνται από τη σχετική κίνηση του πεδίου του δρομέα και των αγωγών του τυλίγματος τυμπάνου, μπορούμε **ισοδύναμα** να θεωρήσουμε το πεδίο του δρομέα ακίνητο στο χώρο και το τύλιγμα τυμπάνου να περιστρέφεται με ταχύτητα ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς περιστροφής.

Καθώς λοιπόν ο δρομέας περιστρέφεται, το θεμελιώδες κύμα πυκνότητας μαγνητικής ροής σαρώνει τις πλευρές του πηνίου α και $-\alpha$.

Μαγνητική ροή ανά πόλο στο τύλιγμα της φάσης ($\alpha - \alpha$) του στάτη

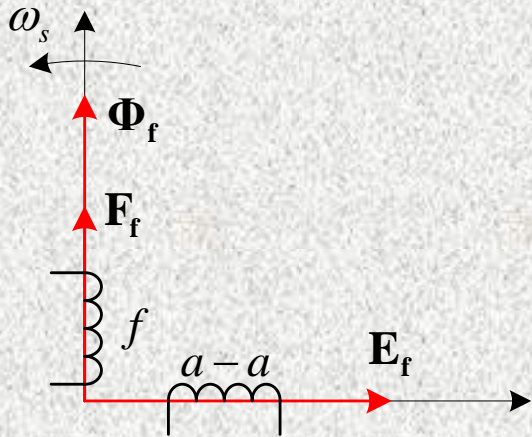
$$\varphi_{af} = -\Phi_f \sin \omega t \quad \text{όπου} \quad \Phi_f = \frac{4}{P} B_{fm} l r$$

Η επαγόμενη τάση στο τύλιγμα της φάσης ($\alpha - \alpha$), είναι γνωστή ως **τάση διέγερσης** και με βάση το νόμο του Faraday είναι

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

Με ενεργό τιμή

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

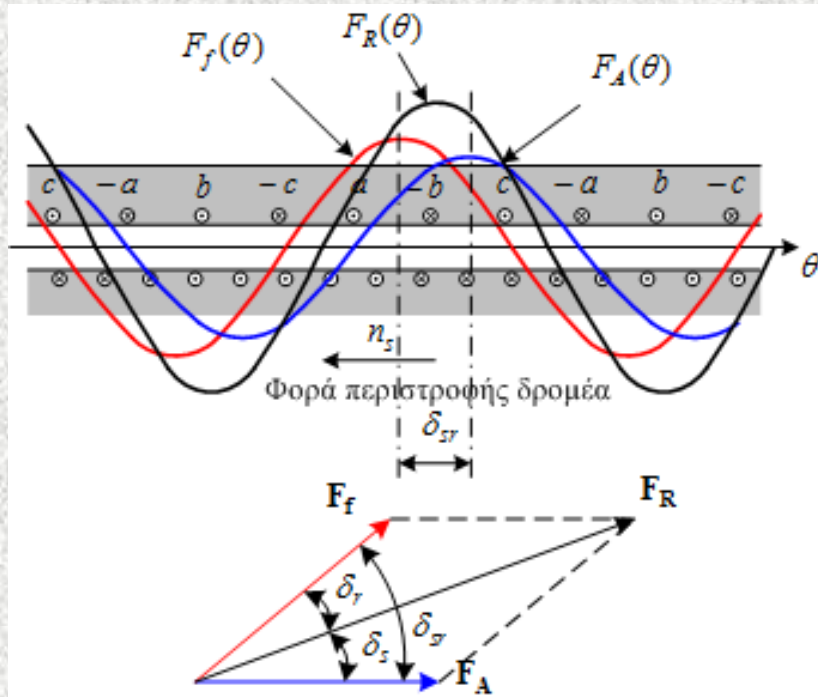


Η μαγνητική ροή (διάνυσμα) του πεδίου, προηγείται της επαγόμενης τάσης στη φάση ($a-a$), κατά 90° ηλεκτρικές μοίρες.

Το χωρικό κύμα της Μ.Ε.Δ. του πεδίου, περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα.

Όταν η μέγιστη θετική τιμή του κύματος συμπίπτει με το μαγνητικό άξονα της φάσης ($a-a$), η πεπλεγμένη μαγνητική ροή λ_a έχει τη μέγιστη τιμή της. Επομένως, μπορεί η Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος του δρομέα, σε σχέση με το τύλιγμα του στάτη να θεωρηθεί, σε φάση με τη μαγνητική ροή του τυλίγματος διέγερσης.

Υπό φορτίο λειτουργία της σύγχρονης μηχανής και σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης,



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.

Στην προσπάθεια των δύο πεδίων να ευθυγραμμίσουν τους μαγνητικούς τους άξονες, οφείλεται η **ανάπτυξη ροπής**, η οποία στην περίπτωση του **κινητήρα** αποτελεί κινούσα ροπή και στην περίπτωση της **γεννήτριας** αντιδρώσα ροπή.

Ανάπτυξη τάσης και ροπής

Η **παραγόμενη ροπή** είναι ανάλογη του γινομένου των μέγιστων τιμών των θεμελιωδών συνιστωσών των χωρικών κατανομών των μαγνητεγερτικών δυνάμεων στάτη και δρομέα, καθώς επίσης και του ημιτόνου της γωνίας των αξόνων των δύο πεδίων.

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

Επίσης η **παραγόμενη ροπή** μπορεί να θεωρηθεί ως το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου με κάθε ένα από τα συνιστώντα πεδία στάτη και δρομέα ξεχωριστά

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

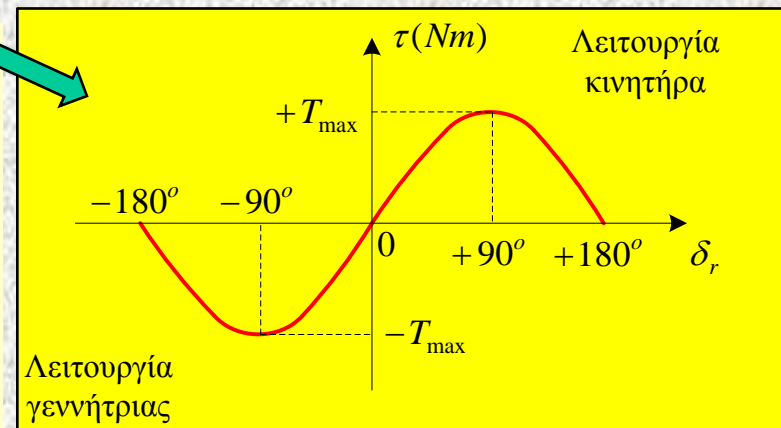
$$\tau = -\left(\frac{P}{2}\right) \frac{\mu_o \pi D l}{2g} F_{Am} F_{Rm} \sin \delta_s$$

Μια επίσης αρκετά χρήσιμη εναλλακτική έκφραση για την **παραγόμενη ροπή**, είναι με τη χρήση 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 κατ' επέκταση **σταθερό ρεύμα** στο τύλιγμα διέγερσης και η **Μ.Ε.Δ.** του δρομέα παραμένει **σταθερή**. Συνεπώς, οι απαιτήσεις σε ροπή κατά την υπό φορτίο λειτουργία της σύγχρονης μηχανής, αναλαμβάνονται αποκλειστικά από τη **μεταβολή της γωνίας δ_r** , η οποία και χαρακτηρίζεται σαν **γωνία ροπής**.



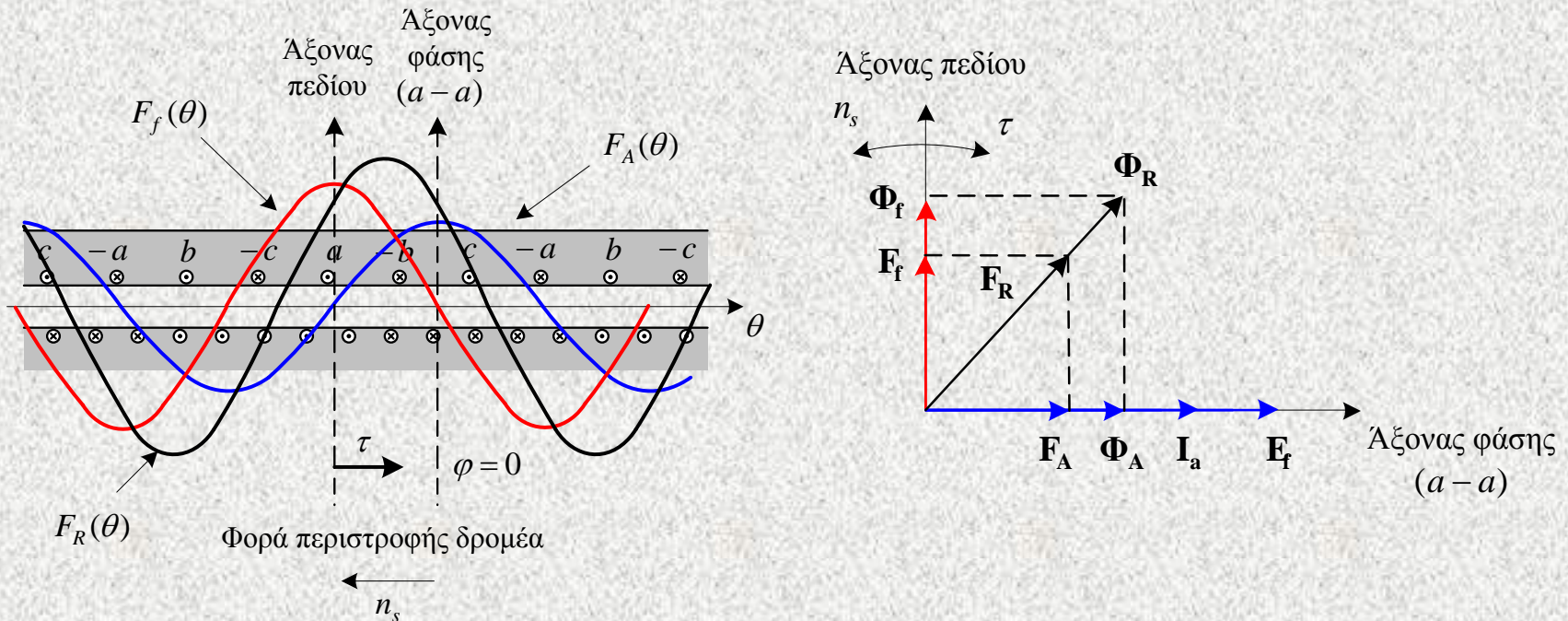
Κύματα Μ.Ε.Δ. πυκνότητας μαγνητικής ροής και τάσης

Σύγχρονη γεννήτρια-ωμική φόρτιση

Η επαγόμενη τάση διέγερσης και το ρεύμα τυμπάνου στη φάση ($a - a$), έχουν την ίδια θετική κατεύθυνση.

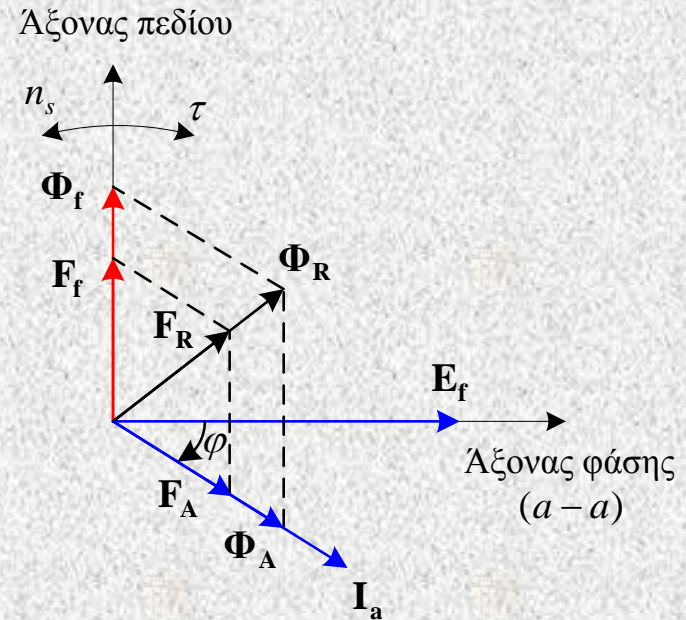
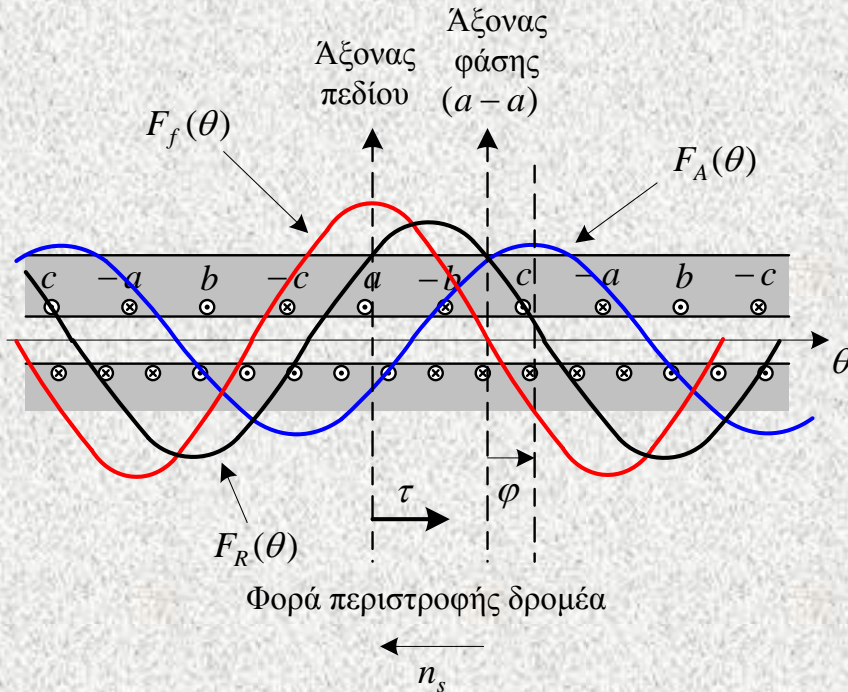
Η φασική απόκλιση μεταξύ της τάσης διέγερσης και του ρεύματος τυμπάνου σε κάθε φάση είναι **μηδενική**, το ρεύμα τυμπάνου εμφανίζει τη μέγιστη τιμή του τη ίδια χρονική στιγμή που και η επαγόμενη τάση εμφανίζει τη μέγιστη τιμή της.

- 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 από το αντίστοιχο κύμα χώρου της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος τυμπάνου της φάσης ($a - a$) κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες.



Σύγχρονη γεννήτρια-επαγωγική φόρτιση

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



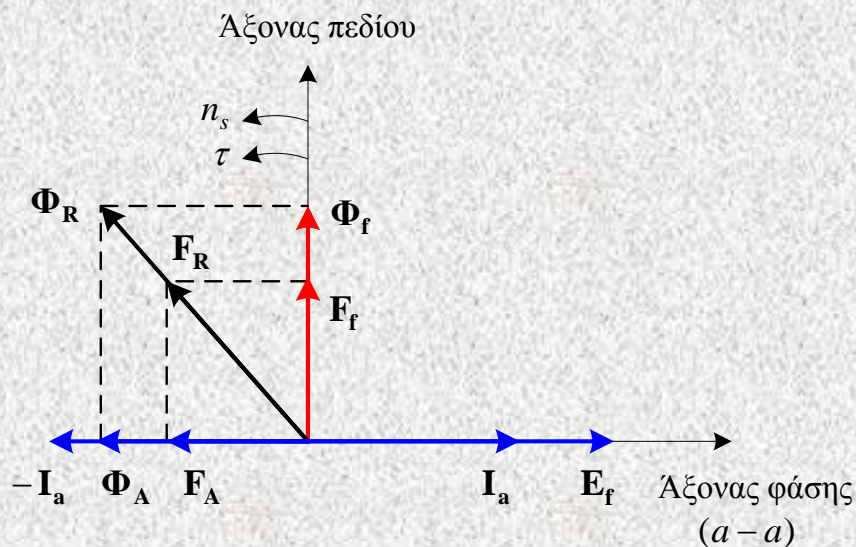
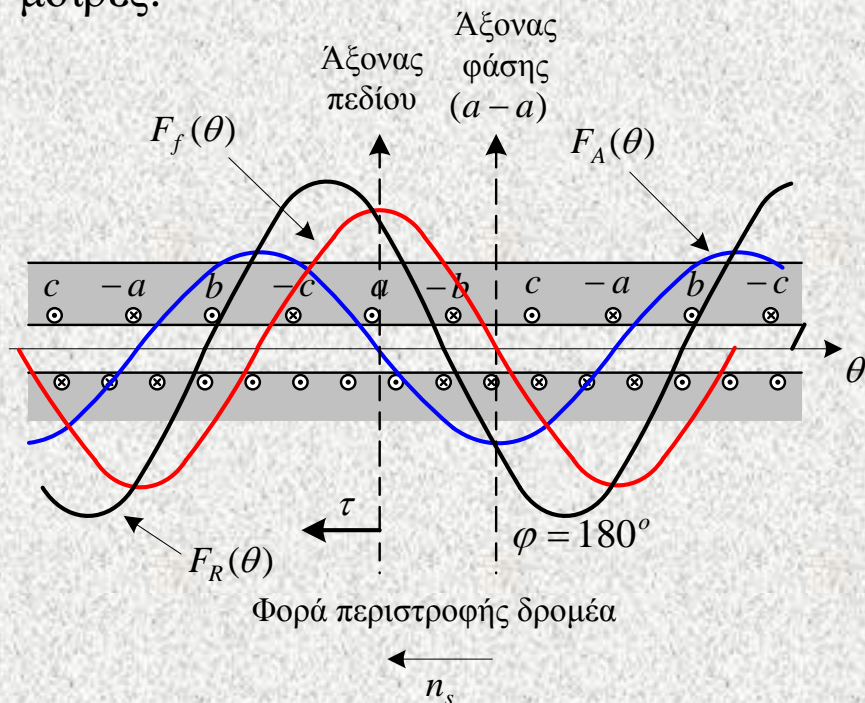
Σύγχρονος κινητήρας-ωμική φόρτιση

Λειτουργία κινητήρα: Η επαγόμενη τάση διέγερσης και το ρεύμα τυμπάνου στη φάση $(a-a)$, έχουν αντίθετη κατεύθυνση.

Ωμικός συντελεστής ισχύος: Η φασική απόκλιση μεταξύ της τάσης διέγερσης και του ρεύματος τυμπάνου σε κάθε φάση είναι **μηδενική**, το ρεύμα τυμπάνου εμφανίζει τη μέγιστη θετική τιμή του την ίδια χρονική στιγμή που και η επαγόμενη τάση εμφανίζει τη μέγιστη θετική τιμή της, αλλά με αντίθετη φορά.

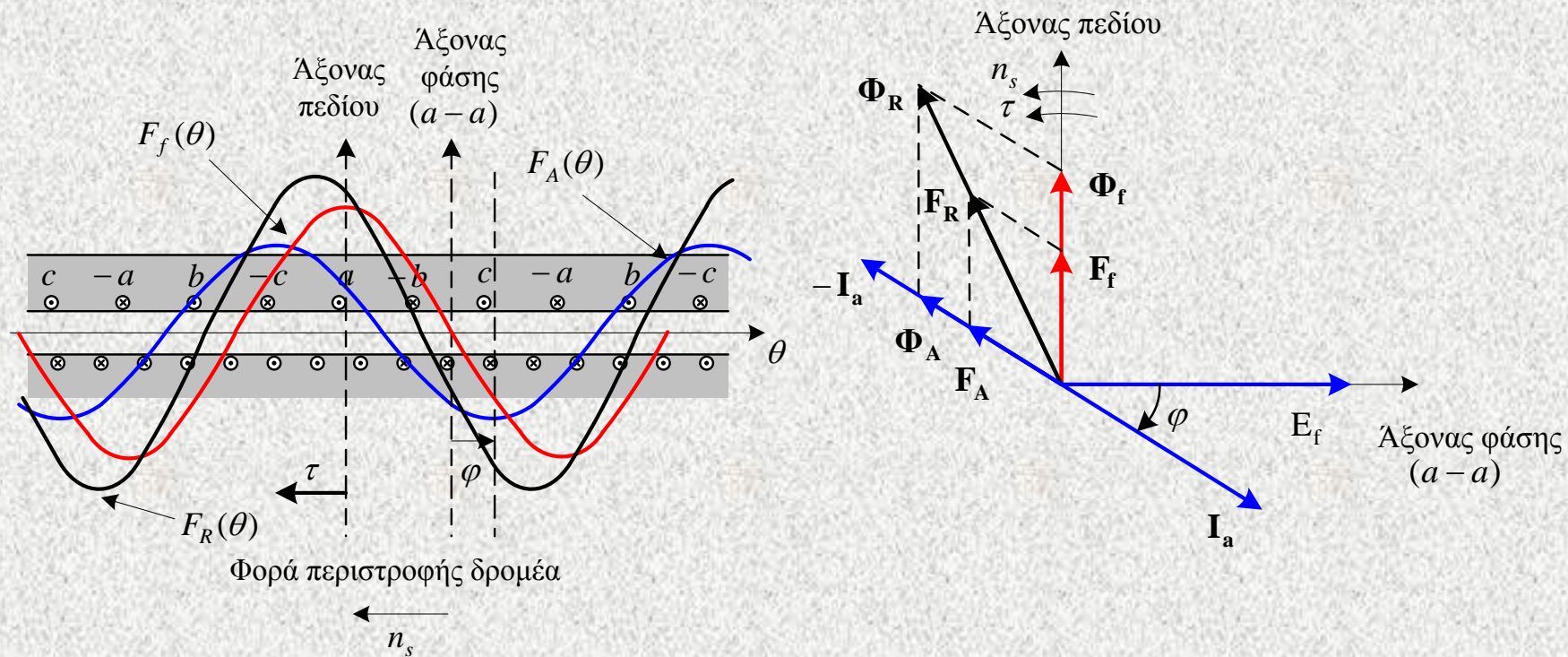
Τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, το κύμα της Μ.Ε.Δ. του δρομέα **προηγείται** χρονικά της τάσης διέγερσης κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες.

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 της φάσης $(a-a)$ κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες.



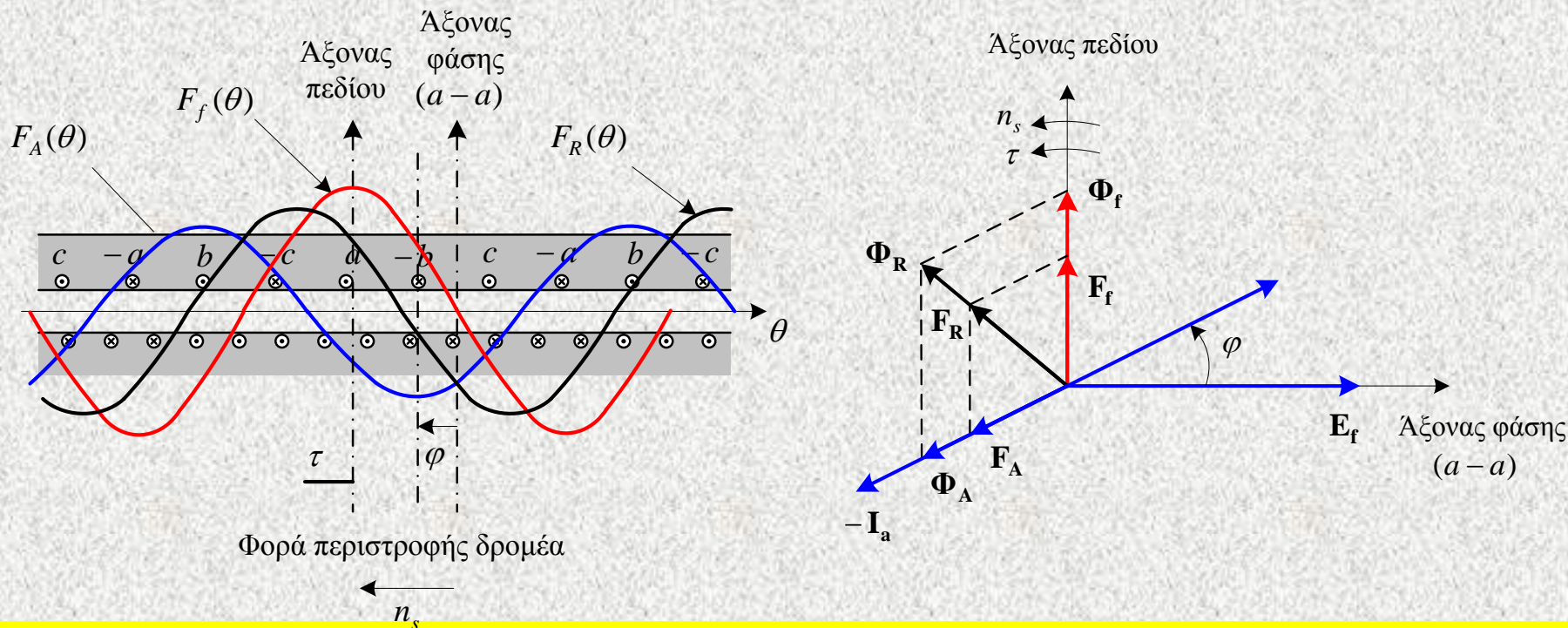
Σύγχρονος κινητήρας-επαγωγική φόρτιση

Το ρεύμα τυμπάνου **καθυστερεί** ως προς την τάση διέγερσης κατά μια γωνία έστω φ . Το κύμα της Μ.Ε.Δ. του στάτη **προηγείται** από το αντίστοιχο κύμα της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος του δρομέα κατά γωνία $(90 - \varphi)$ 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 ίση με $(90 + \varphi)$ 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, με αποτέλεσμα **οι άξονες των θεμελιωδών συνιστωσών των Μ.Ε.Δ. του πεδίου και της αντίδρασης του τυλίγματος τυμπάνου να διαφέρουν κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες** και τα παραστατικά τους διανύσματα είναι **κάθετα** στο χώρο.

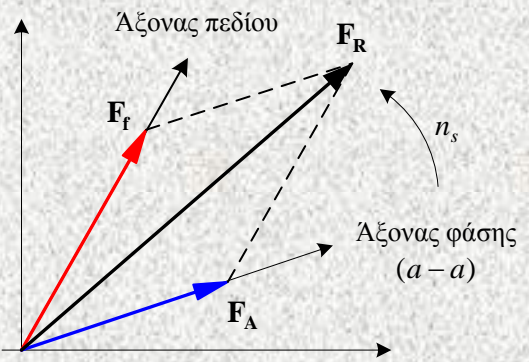
Λειτουργία γεννήτριας με συντελεστή ισχύος επαγωγικό και λειτουργία κινητήρα με συντελεστή ισχύος χωρητικό: Η διαφορά φάσης μεταξύ των θεμελιωδών συνιστωσών των κυμάτων χώρου των Μ.Ε.Δ. διέγερσης και τυμπάνου είναι **μεγαλύτερη των 90 ηλεκτρικών μοιρών**. Η σύγχρονη μηχανή στις περιπτώσεις αυτές, λειτουργεί σε **υπερδιέγερση** για να αντισταθμίσει την απομαγνητίζουσα αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου. Αποτέλεσμα αυτού, είναι το μέγεθος της συνισταμένης Μ.Ε.Δ. στο διάκενο της μηχανής να είναι **μικρότερο** από το αντίστοιχο μέγεθος της Μ.Ε.Δ. του 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**. Στην περίπτωση αυτή, το μαγνητικό πεδίο που προέρχεται από την αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου ασκεί μαγνητίζουσα επίδραση, με αποτέλεσμα 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.



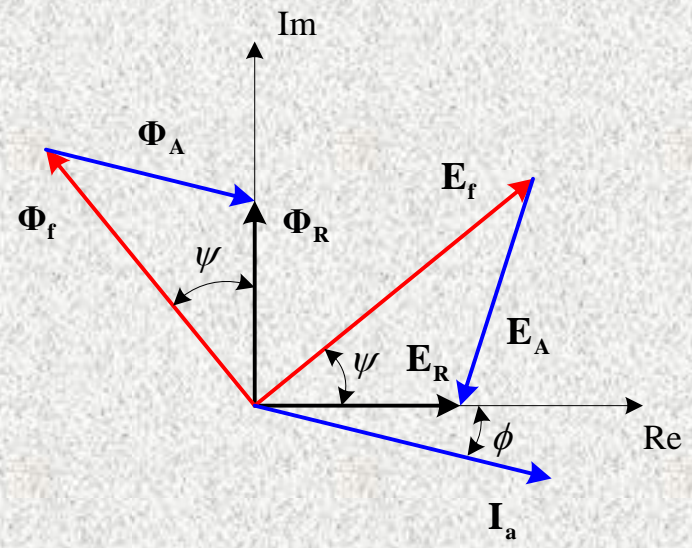
Εάν **αμεληθούν** τα φαινόμενα κορεσμού του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος και επειδή η μαγνητική ροή είναι ανάλογη της μαγνητεγερτικής δύναμης, η **μαγνητική ροή ανά πόλο στο διάκενο** προκύπτει από το **διανυσματικό άθροισμα** των επιμέρους μαγνητικών ροών ανά πόλο των τυλιγμάτων πεδίου και τυμπάνου.

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

Η **επαγόμενη Η.Ε.Δ. κατά την υπό φορτίο λειτουργία** λόγω της συνισταμένης Μ.Ε.Δ. στο διάκενο, είναι γνωστή σαν **τάση διακένου** και **καθυστερεί** της αντίστοιχης μαγνητικής ροής κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες.

$$E_R = E_f + E_A$$

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

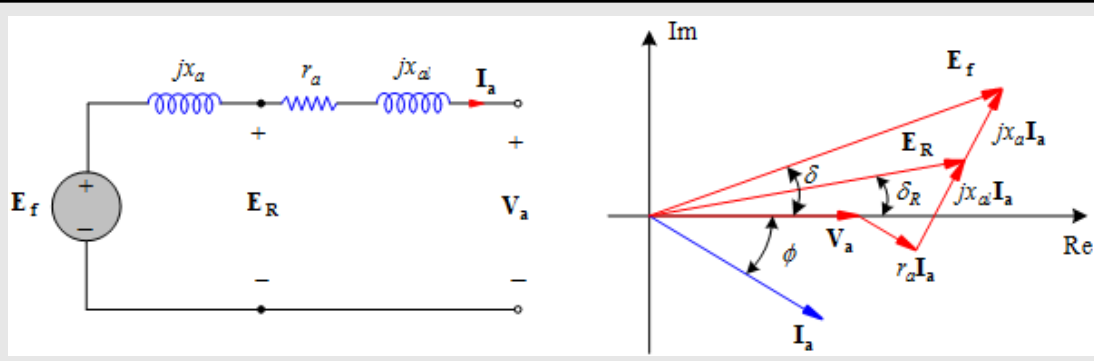


r_a = ωμική αντίσταση ανά φάση του τυλίγματος τυμπάνου.

x_{al} = επαγωγικής αντίδρασης σκέδασης, σε σειρά με την ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου. (Η **μαγνητική ροή σκέδασης του τυλίγματος τυμπάνου**, δηλαδή η συνιστώσα της παραγόμενης ροής από το ρεύμα του τυλίγματος τυμπάνου η οποία δεν εμπλέκεται με το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα, **δεν συμμετέχει στη διαδικασία της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής της ενέργειας, αλλά εμφανίζεται σαν μια πτώση τάσης στο ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση της μηχανής μέσω της x_{al}**)

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** . Εάν αμεληθούν τα φαινόμενα κορεσμού του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος

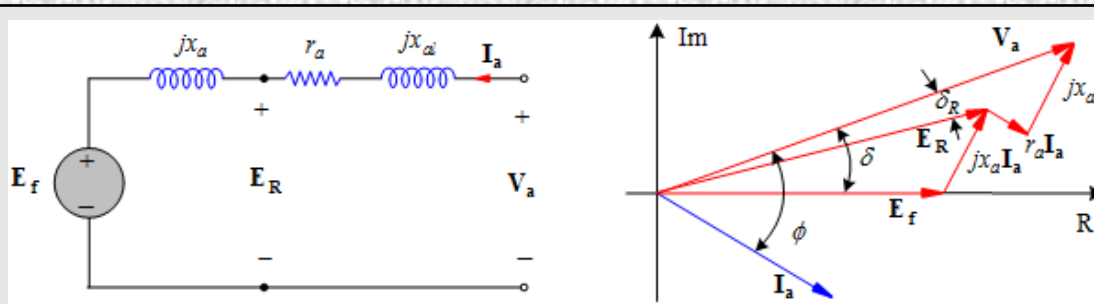
$$E_A = -jK_A \Phi_A = -jx_a I_a$$



Λειτουργία Γεννήτριας

$$E_R = V_a + (r_a + jx_{al}) I_a$$

$$E_f = E_R + jx_a I_a = V_a + I_a (r_a + jx_s)$$



Λειτουργία Κινητήρα

$$E_R = V_a - (r_a + jx_{al}) I_a$$

$$E_f = E_R - jx_a I_a = V_a - I_a (r_a + jx_s)$$

$x_s = x_a + x_{al}$ = σύγχρονη επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου (λαμβάνει υπόψη της τη συνολική μαγνητική ροή μαγνήτισης και σκέδασης που οφείλεται στα ρεύματα και των τριών φάσεων).

Διερεύνηση της αντίδρασης του τυλίγματος τυμπάνου

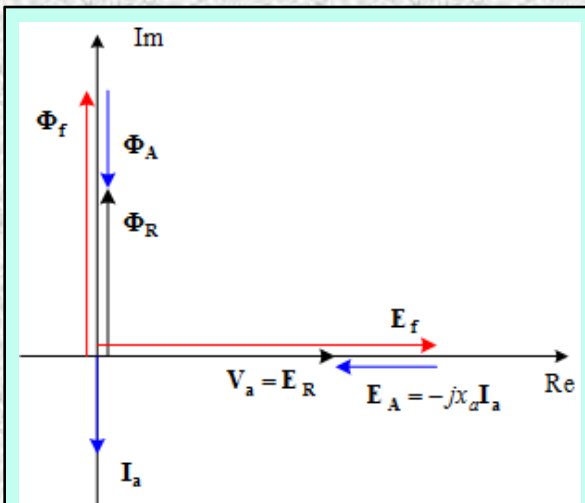
Η αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου, έχει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία της σύγχρονης μηχανής.

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

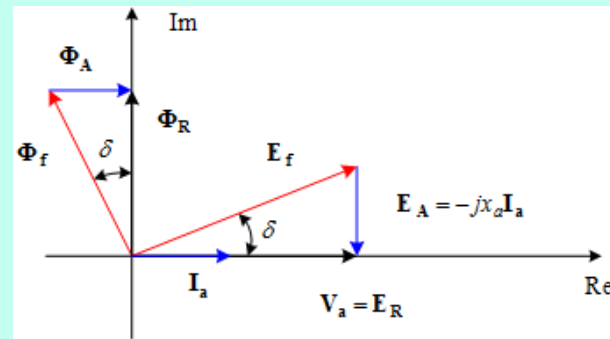
Λειτουργία Κινητήρα: εμφανίζουν **διαφορά φάσης 180** ηλεκτρικών μοιρών.

Η επίδραση της αντίδρασης τυμπάνου σχετίζεται άμεσα με το **συντελεστή ισχύος** με τον οποίο λειτουργεί η μηχανή.

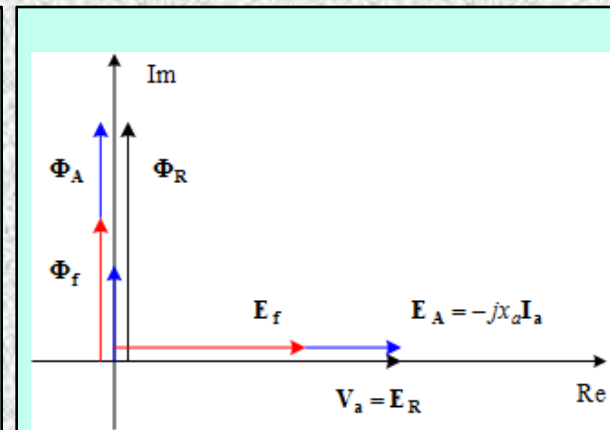
Για λόγους απλοποίησης αμελείται η πτώση τάσης στην ωμική αντίσταση και στην αντίδραση σκέδασης του τυλίγματος τυμπάνου. Δηλαδή $V_a = E_R$



Μηδενικός Σ.Ι. μεταπορείας



Μοναδιαίος Σ.Ι.

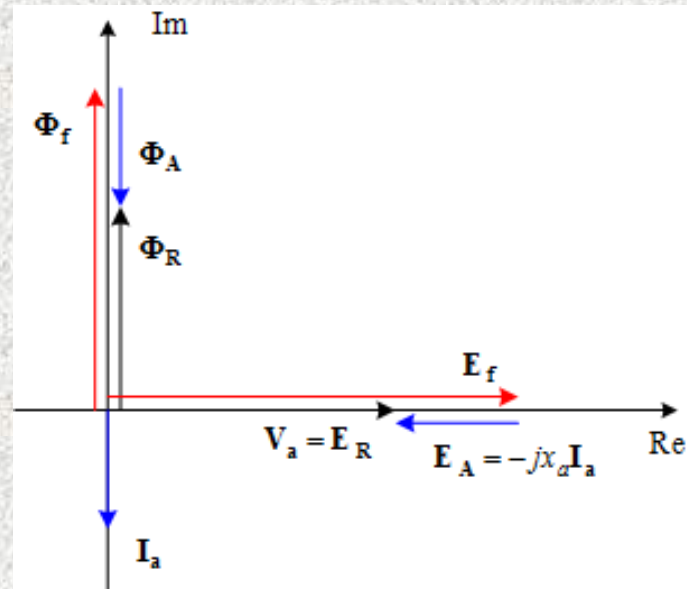


Μηδενικός Σ.Ι. προπορείας

Λειτουργία γεννήτριας με μηδενικό Σ.Ι. μεταπορείας (Επαγωγική φόρτιση)

Η αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου (Φ_R) έχει **καθαρά απομαγνητίζουσα επίδραση**, καθόσον 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 την εξασφάλιση της ονομαστικής τιμής της τάσης ακροδεκτών στις συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης, η σύγχρονη γεννήτρια θα πρέπει να λειτουργεί σε **υπερδιέγερση**, δηλαδή με αυξημένο ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης για την απαιτούμενη αύξηση της τάσης διέγερσης.

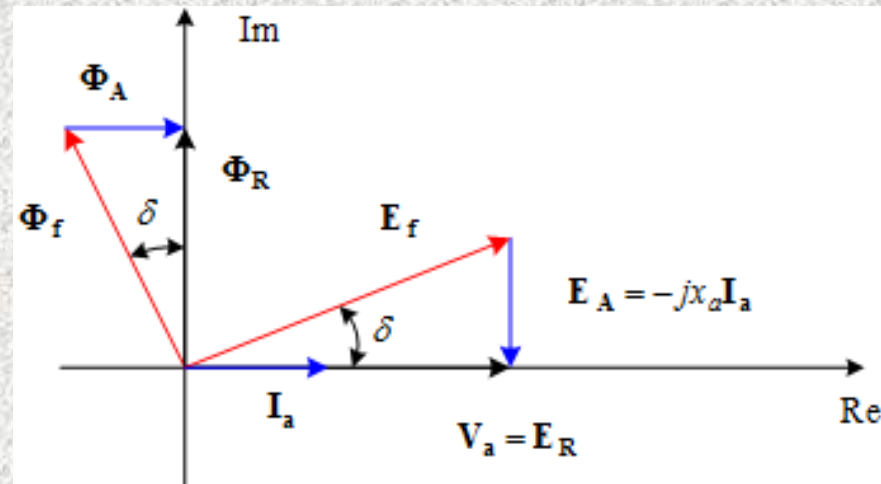


Λειτουργία γεννήτριας με μοναδιαίο Σ.Ι.

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), μεγέθους **αρκετά μικρότερου της κάθετης συνιστώσας με απομαγνητίζουσα επίδραση**.

Για λειτουργία με καθαρά ωμικό φορτίο, η σύγχρονη γεννήτρια δέχεται **τη μικρότερη απομαγνητίζουσα επίδραση από το τύλιγμα τυμπάνου**.

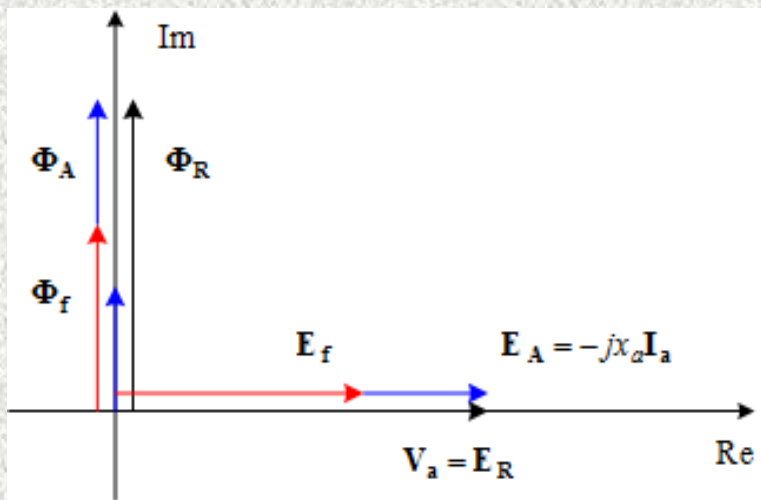
Η **τάση διέγερσης** κατά τη λειτουργία με ωμική φόρτιση χαρακτηρίζεται ως **κανονική διέγερση** και απαιτεί για ονομαστική τάση στους ακροδέκτες, μικρότερο ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης σε σχέση με την καθαρά επαγωγική φόρτιση.



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).

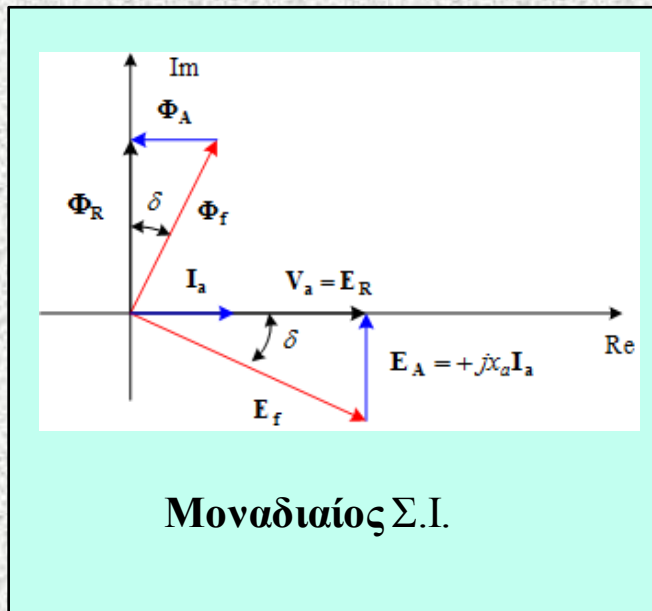
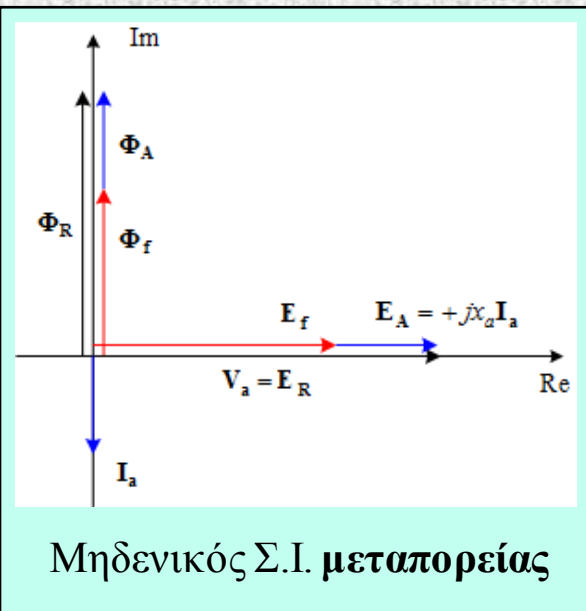
Η αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου για τη συγκεκριμένη φόρτιση της σύγχρονης γεννήτριας, έχει καθαρά **μαγνητίζουσα** επίδραση και η μηχανή λειτουργεί σε **υποδιέγερση**. Δηλαδή, για την επίτευξη της ονομαστικής τάσης ακροδεκτών για το ίδιο μέγεθος του ρεύματος, απαιτείται **μικρότερο ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης** σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη φόρτισης.



Λειτουργία Κινητήρα

Στη 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.

Επομένως, **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.

Αντίθετα, 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.

Ισχύς και Ροπή μηχανής κυλινδρικού δρομέα

Συνήθως, η σύγχρονη μηχανή ανεξάρτητα από το είδος της λειτουργίας της (σαν γεννήτρια ή σαν κινητήρας), **συνδέεται σε άπειρο ζυγό** (σύστημα σταθερής τάσης και συχνότητας, το οποίο της εξασφαλίζει σταθερή ταχύτητα περιστροφής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας).

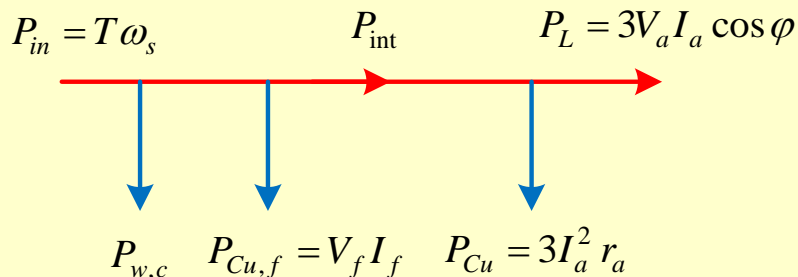
Υπάρχει ένα **όριο στη μέγιστη ισχύ** που μπορεί να αποδώσει η σύγχρονη μηχανή (για λειτουργία γεννήτριας ή κινητήρα) στο φορτίο, χωρίς να διατρέχει τον κίνδυνο της απώλειας του συγχρονισμού της.

Απώλειες Σύγχρονης μηχανής

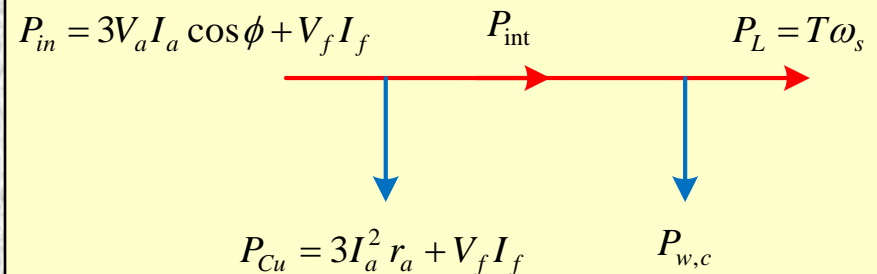
- **Μηχανικές** (αφορούν τις απώλειες τριβών και ανεμισμού, οι οποίες συνήθως θεωρούνται σταθερές και ανεξάρτητες της ταχύτητας περιστροφής. Στις μηχανικές απώλειες, ενσωματώνουμε συνήθως και τις απώλειες πυρήνα).
- **Ηλεκτρικές** (αφορούν στις απώλειες χαλκού στα τυλίγματα διέγερσης και τυμπάνου)

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

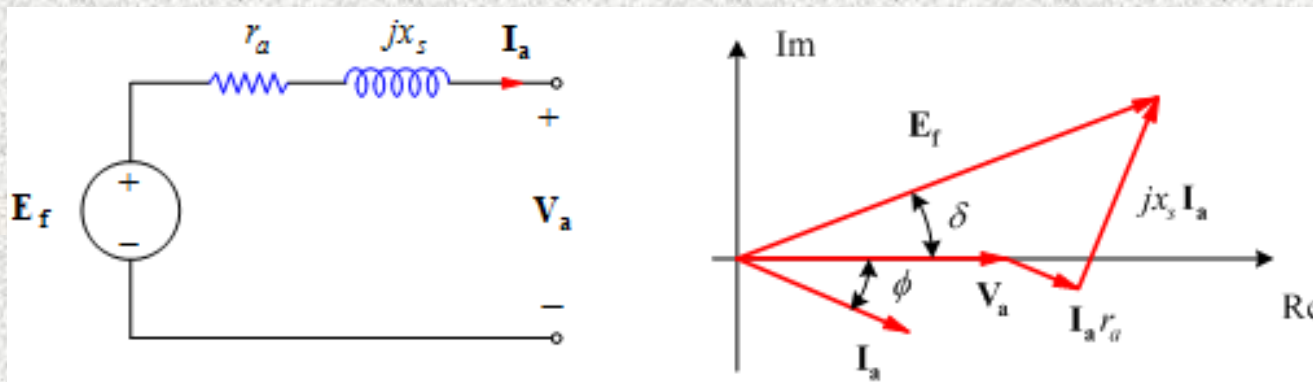
Λειτουργία Γεννήτριας



Λειτουργία Κινητήρα



Λειτουργία Γεννήτριας



Εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ισχύς

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

Το ρεύμα τυμπάνου

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

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

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

Ισχύς εξόδου της γεννήτριας δηλαδή η ισχύς που αποδίδεται στο φορτίο

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

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

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

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

Λειτουργία Γεννήτριας

Αγνοώντας την ωμική αντίσταση στο τύλιγμα τυμπάνου, μιας και στις **σύγχρονες μηχανές μεγάλης ισχύος** με αρκετά καλή προσέγγιση ισχύει ότι $r_a \ll x_s$

Απλοποιημένες οι σχέσεις είναι:

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

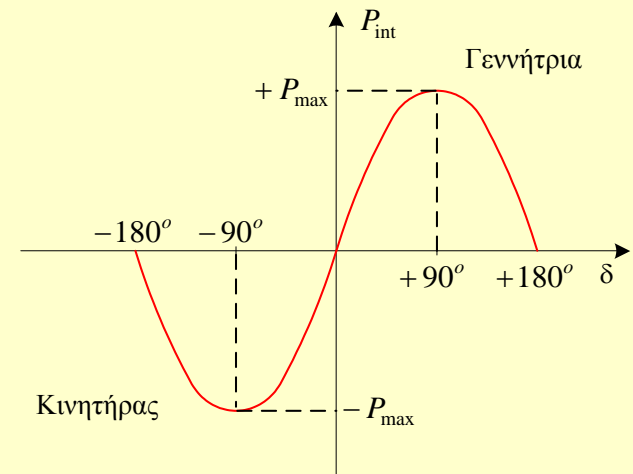
$$Q_{\text{int}} = 3 \left(\frac{E_f^2}{z_s} - \frac{E_f V_a}{z_s} \cos \delta \right)$$

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

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

Ισχύς αποσυγχρονισμού ή **στατικό όριο ευστάθειας** (αντιπροσωπεύει τη **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**.

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



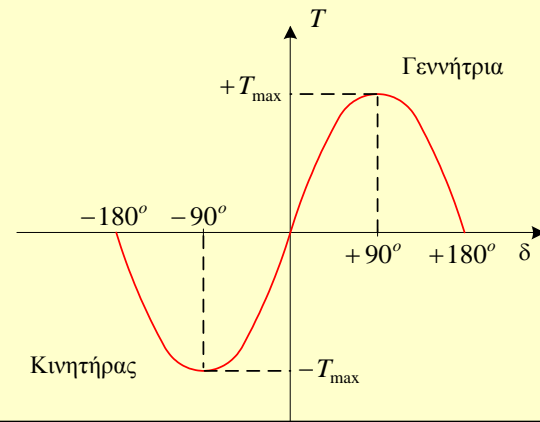
Εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ροπή

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

όπου

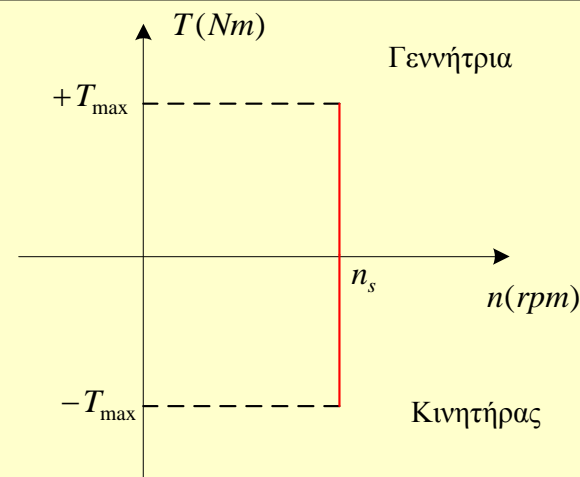
$$T_{\text{max}} = \frac{3}{\omega_s} \frac{E_f V_a}{x_s}$$

Η εσωτερική ισχύς όσο και η εσωτερική ροπή, μεταβάλλονται **ημιτονικά** με τη γωνία φορτίου. Οι οριακές τιμές φόρτισης T_{max} και P_{max} , ανεξάρτητα από το είδος λειτουργίας, είναι γνωστές ως **στατικά όρια ευστάθειας**, καθότι η υπέρβαση τους έχει σαν αποτέλεσμα τον **αποσυγχρονισμό** της μηχανής.



Για σύνδεση της μηχανής σε **άπειρο σύστημα**, όπου η τάση τροφοδοσίας του τυλίγματος τυμπάνου παραμένει **σταθερή** και για σταθερό ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης το οποίο με τη σειρά του συνεπάγεται **σταθερή επαγόμενη τάση διέγερσης**, οι μεταβολές απαιτήσεων σε ροπή **αναλαμβάνονται εξ' ολοκλήρου από τη μεταβολή της γωνίας φορτίου**.

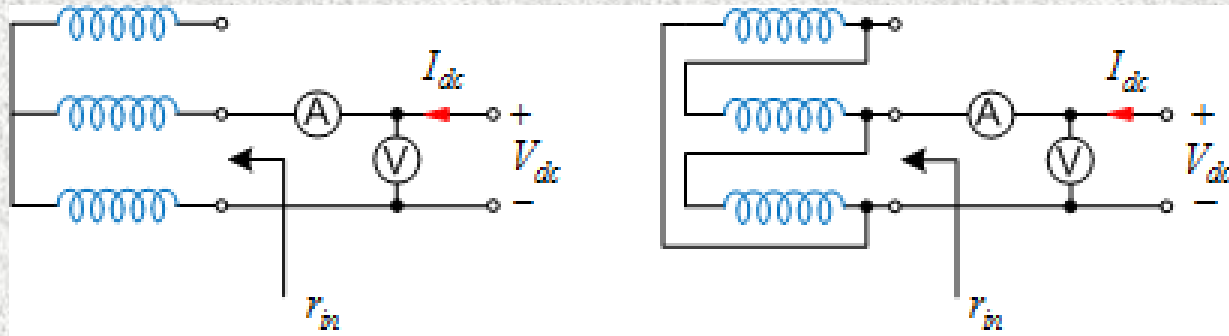
Για **σταθερή ταχύτητα περιστροφής** (σταθερή συχνότητα των τάσεων τροφοδοσίας), οποιαδήποτε αύξηση είτε του μεγέθους της τάσης τροφοδοσίας είτε του ρεύματος του πεδίου, έχει σαν αποτέλεσμα των **αύξηση των στατικών ορίων ευστάθειας της εσωτερικής ισχύος και της εσωτερικής ροπής**. Για **σταθερή ταχύτητα περιστροφής**, η **χαρακτηριστική ροπής-στροφών** είναι μια **ευθεία παράλληλη στον κατακόρυφο άξονα**.



Υπολογισμός παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος

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, τιμής τέτοιας ώστε το **απορροφούμενο ρεύμα** να μη υπερβαίνει το αντίστοιχο ονομαστικό ρεύμα.



Για συνδεσμολογία αστέρα

$$r_{in} = 2r_a$$

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

Για συνδεσμολογία τρίγωνο

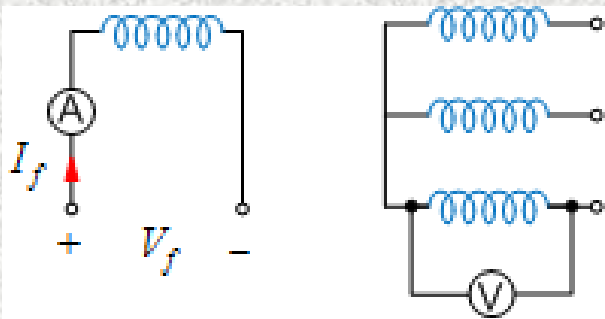
$$r_{in} = r_a // 2r_a = \frac{2r_a}{3}$$

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

Σύγχρονη αντίδραση σκέδασης τυλίγματος τυμπάνου

Ο υπολογισμός της σύγχρονης αντίδρασης του τυλίγματος τυμπάνου, απαιτεί δύο **δοκιμές**, κατά τη διάρκεια των οποίων η μηχανή στρέφεται στη **σύγχρονη ταχύτητα**. Η πρώτη από αυτές, γίνεται με **ανοιχτοκυκλωμένο** το τύλιγμα τυμπάνου και η δεύτερη με **βραχυκυκλωμένο**.

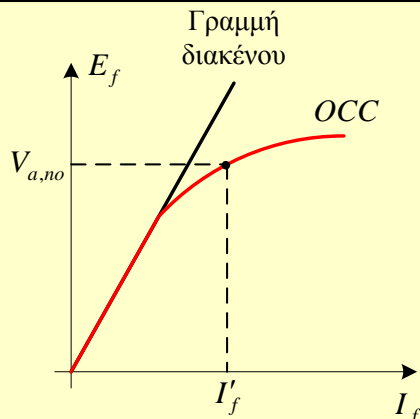
Χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος



Η μηχανή στρέφεται στη n_s , με το τύλιγμα τυμπάνου **ανοιχτοκυκλωμένο**. Αυξάνουμε **σταδιακά** το I_f και μετράμε την **επαγόμενη φασική τάση** στο τύλιγμα τυμπάνου.

Στην εν κενώ λειτουργία, δηλαδή για μηδενικό ρεύμα τυμπάνου, η **επαγόμενη τάση** στο τύλιγμα τυμπάνου είναι ίση με την τάση διέγερσης, $V_a (I_a = 0) = E_f$

Η καμπύλη, $E_f = f(I_f) |_{I_a=0}$, είναι γνωστή σαν **χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος (OCC)**



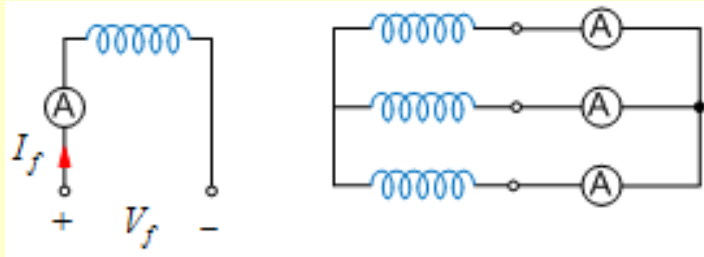
Η χαρακτηριστική, αντικατοπτρίζει το **φαινόμενο κορεσμού του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος**. Στην αρχή, το φαινόμενο του κορεσμού είναι αμελητέο και πρακτικά όλη η **Μ.Ε.Δ. καταναλίσκεται στις μαγνητικές αντιστάσεις των διακένων**.

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.

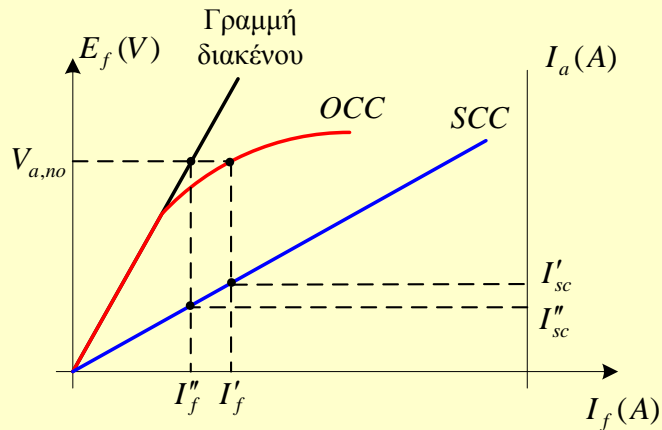
Η **μηχανική ισχύς**, καλύπτει τις λεγόμενες **απώλειες κενού φορτίου** (μηχανικές απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού, καθώς και τις μαγνητικές απώλειες του πυρήνα). Για **σταθερή ταχύτητα περιστροφής**, οι **μηχανικές απώλειες παραμένουν σταθερές**. Αντίθετα, οι απώλειες του πυρήνα, **εξαρτώνται άμεσα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

Χαρακτηριστική Βραχυκύκλωσης

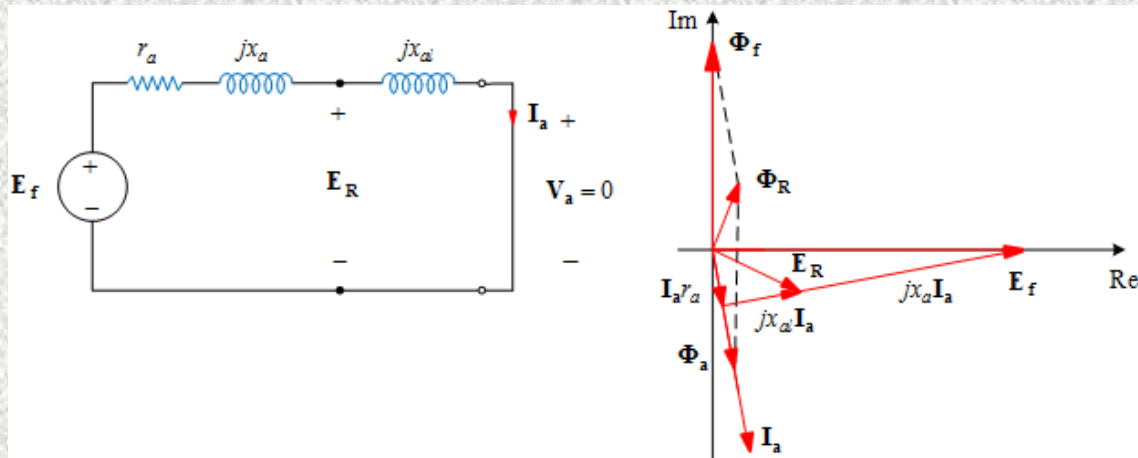


Η μηχανή στρέφεται στη **σύγχρονη ταχύτητα**, με το τύλιγμα τυμπάνου βραχυκυκλωμένο. Αυξάνουμε σταδιακά το ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης, μέχρις ότου το ρεύμα τυμπάνου φτάσει μια μέγιστη τιμή, **περίπου τη διπλάσια της ονομαστικής**.

Η καμπύλη, $I_a = f(I_f)|_{V_a=0}$, είναι γνωστή σαν **χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης (SCC)**



Η χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης είναι **γραμμική**, διότι δεν υπεισέρχονται φαινόμενα κορεσμού του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος. Πράγματι, λόγω του ότι $r_a \ll x_s$, πρακτικά κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης, όλη η επαγόμενη τάση διέγερσης εφαρμόζεται στα άκρα της σύγχρονης αντίδρασης.



Το ρεύμα βραχυκύκλωσης στο τύλιγμα τυμπάνου είναι **έντονα επαγωγικό** και καθυστερεί ως προς την τάση διέγερσης σχεδόν κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες, με αποτέλεσμα να ασκεί καθαρά **απομαγνητίζουσα** επίδραση.

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**. Αμελώντας την πτώση τάση στην ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου.

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

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

Ορίζουμε δύο τιμές για τη **σύγχρονη σύνθετη αντίσταση**, την **κορεσμένη** και την **ακόρεστη** τιμή

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

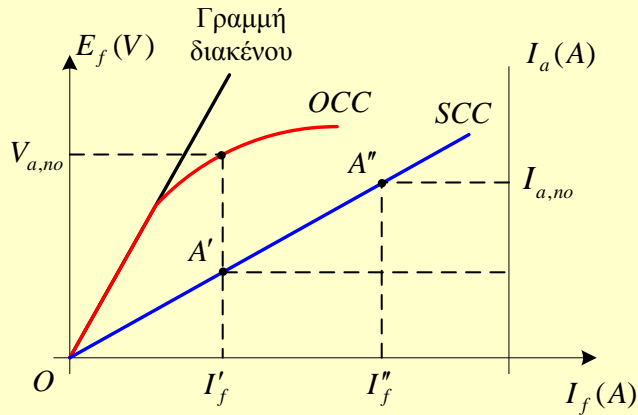
$$z_{s,unsat} = \frac{V_{a,no}}{I''_{sc}} \Big|_{I_f=I''_f}$$

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

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

Σε μηχανές μεγάλης ισχύος μπορεί να αμεληθεί η ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου, επομένως, ο λόγος βραχυκύκλωσης θα ισούται με το αντίστροφο της ανά μονάδα τιμής της κορεσμένης σύγχρονης αντίδρασης.

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

Συμπέρασμα: Μικρή τιμή του SCR συνεπάγεται μεγάλη τιμή της α.μ. σύγχρονης αντίδρασης και αντίστροφα. Επειδή η σύγχρονη αντίδραση, καθορίζεται κατά κύριο λόγο από την επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου, υπάρχει άμεση εξάρτηση του **λόγου βραχυκύκλωσης** από το **μήκος διακένου** του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος. Αύξηση του μήκους του διακένου, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της επαγωγικής αντίδρασης του τυλίγματος τυμπάνου, με αποτέλεσμα την **αύξηση του λόγου βραχυκύκλωσης**, καθώς επίσης και την **αύξηση του στατικού ορίου ευστάθειας**.

Λειτουργία υπό φορτίο – καμπύλες V

Σε μια σύγχρονη μηχανή, η ανταλλαγή **πραγματικής ισχύος** με το ηλεκτρικό δίκτυο, ελέγχεται μέσω της **μηχανικής ισχύος** στον άξονα, ενώ η **άεργη ισχύς** ελέγχεται μέσω του **ρεύματος της διέγερσης**.

Ο **συντελεστής ισχύος**, εξαρτάται και αυτός άμεσα από το **ρεύμα διέγερσης**. Εάν αμελήσουμε την ωμική αντίσταση στο τύλιγμα τυμπάνου, για λειτουργία υπό σταθερό φορτίο και με την προϋπόθεση ότι η μηχανή είναι συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό.

$$T = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_a E_f}{x_s} \sin \delta \Rightarrow E_f \sin \delta = \text{σταθ.}$$

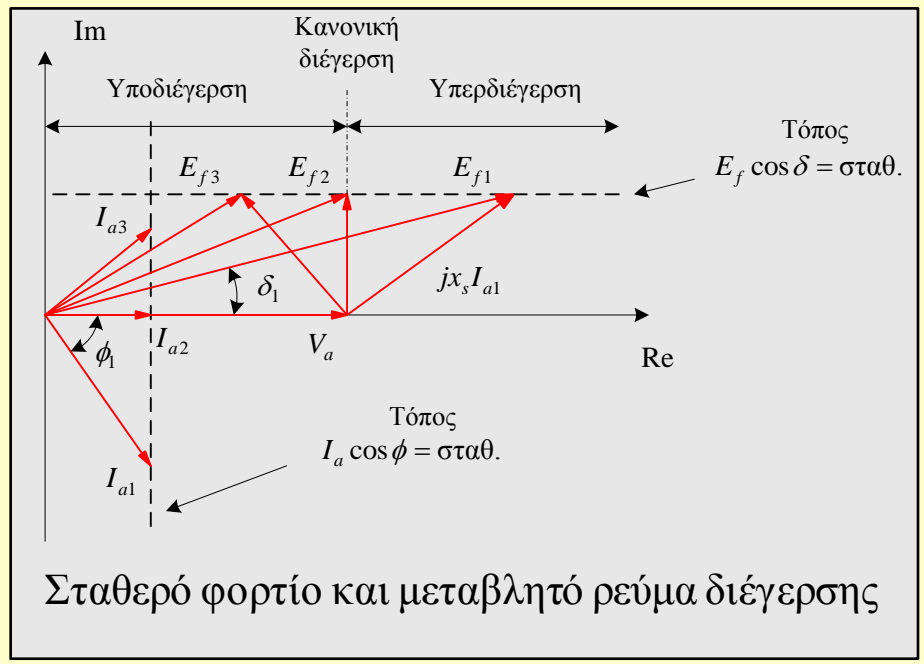
Λειτουργία με σταθερό φορτίο: οποιαδήποτε μεταβολή στην τάση διέγερσης λόγω μεταβολής του ρεύματος του πεδίου, θα έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της γωνίας κατά τέτοιο τρόπο ώστε το γινόμενο (**$E_f \sin \delta$**) να παραμείνει σταθερό.

Εάν αμεληθούν οι ηλεκτρικές απώλειες στο τύλιγμα τυμπάνου

$$I_a \cos \varphi = \text{σταθ.}$$

Δηλαδή, οποιαδήποτε 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**.

Λειτουργία σύγχρονης γεννήτριας



Λειτουργία σε υπερδιέγερση

$I_f \downarrow \rightarrow E_f \downarrow \rightarrow \text{γωνία } \phi \uparrow$. Ταυτόχρονα $I_a \downarrow \rightarrow \cos \phi \uparrow$
(τείνει από RL σε καθαρό R)

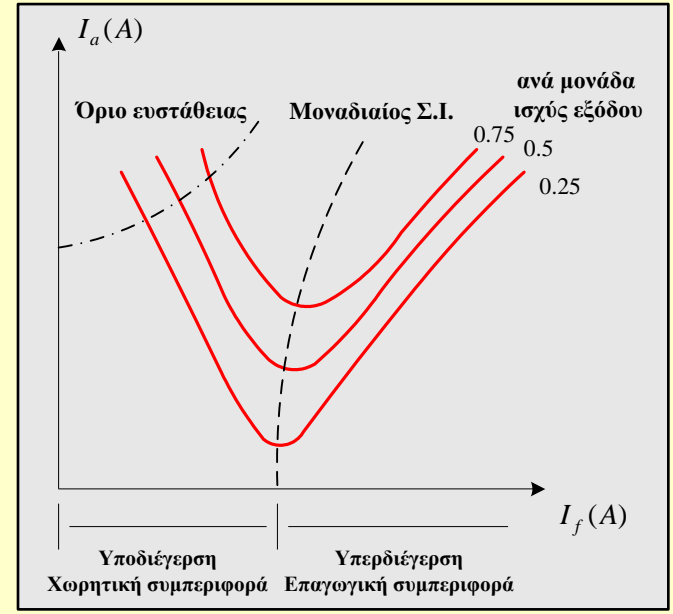
Κανονική διέγερση

Το μέτρο του I_a εμφανίζει την ελάχιστη τιμή του. Περαιτέρω $I_a \downarrow$, έχει σαν αποτέλεσμα την υποδιέγερση της γεννήτριας και την επιπρόσθετη αύξηση της γωνίας φορτίου. Ο Σ.Ι. αρχίζει να μειώνεται, αλλά είναι πλέον RC, καθώς το ρεύμα στο τύλιγμα τυμπάνου προηγείται της αντίστοιχης τάσης τυμπάνου.

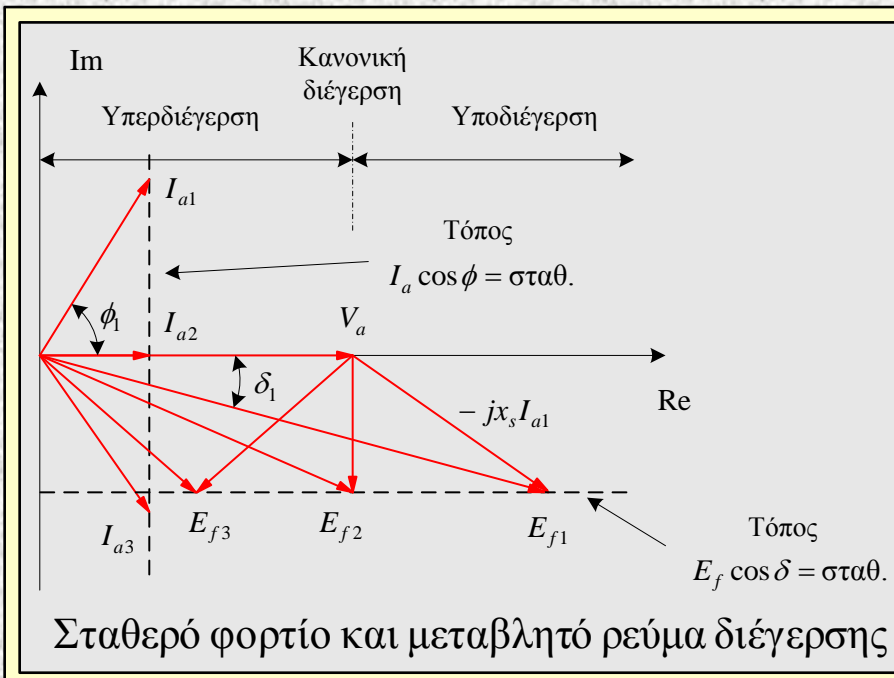
Στην περιοχή της **υποδιέγερσης**, $I_a \uparrow$ επειδή $I_f \downarrow$

Η συνεχής μείωση του μέτρου της επαγόμενης τάσης διέγερσης που προκαλείται λόγω της μείωσης του ρεύματος διέγερσης, έχει σαν αποτέλεσμα τη **συνεχή μείωση του στατικού ορίου ευστάθειας**. 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 επαγόμενη στο τύλιγμα τυμπάνου τάση διέγερσης, έχει τη μικρότερη τιμή της και βρίσκεται στον κατακόρυφο άξονα.



Λειτουργία σύγχρονου κινητήρα



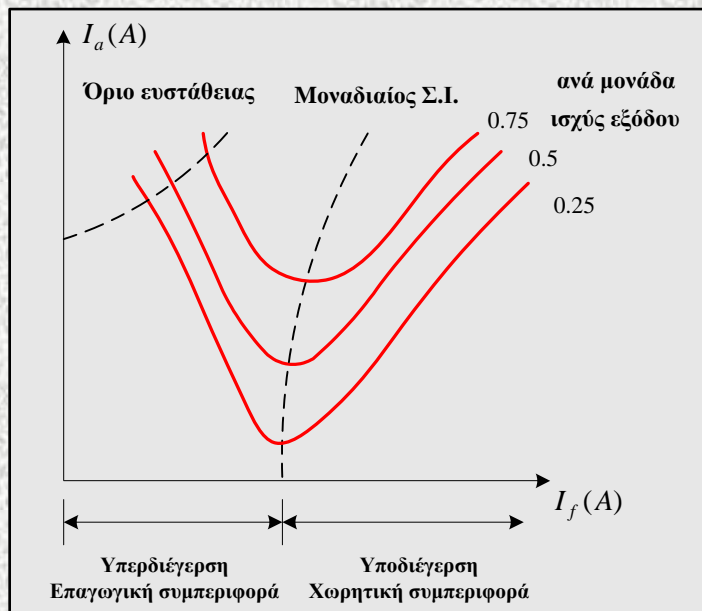
Αμελώντας την r_a , η $P_{in} = P_{em}$.

Λειτουργία σε υπερδιέγερση (με σταθερό φορτίο)

$E_f \uparrow \rightarrow$ γωνία $\phi \downarrow$. Η $V_f \uparrow$ (για $V_a = \text{σταθ.}$) $\rightarrow I_a \uparrow$ και τη 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

$I_f \downarrow \rightarrow E_f \downarrow \rightarrow$ γωνία $\phi \uparrow$. Ταυτόχρονα $I_a \uparrow \rightarrow$ αύξηση της φασικής του απόκλισης με τη V_a



Κανονική διέγερση

Το μέτρο του I_a εμφανίζει την μικρότερη τιμή του. Και είναι συμφασικό με τη τάση τυμπάνου ($\Sigma.I = 1$)
Στην περιοχή της **υποδιέγερσης**, $I_a \uparrow$ επειδή $I_f \downarrow$

Συμπεράσματα

Λειτουργία σύγχρονης γεννήτριας

Σε κατάσταση **υπερδιέγερσης** λοιπόν, η γεννήτρια τροφοδοτεί το φορτίο με **συντελεστή ισχύος μεταφορείας**, σε **κανονική διέγερση** με **μοναδιαίο συντελεστή ισχύος** και σε **υποδιέγερση** με **συντελεστή ισχύος προπορείας**.

Σε **κανονική διέγερση** οι καμπύλες V εμφανίζουν απόλυτο ελάχιστο.

Λειτουργία σύγχρονου κινητήρα

Σε κατάσταση **υπερδιέγερσης** ο κινητήρας εμφανίζει **χωρητική συμπεριφορά** που σημαίνει ότι ο **συντελεστής ισχύος είναι προπορείας**.

Σε κατάσταση **υποδιέγερσης**, ο κινητήρας εμφανίζει **επαγωγική συμπεριφορά** που σημαίνει ότι ο **συντελεστής ισχύος είναι μεταφορείας**.

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

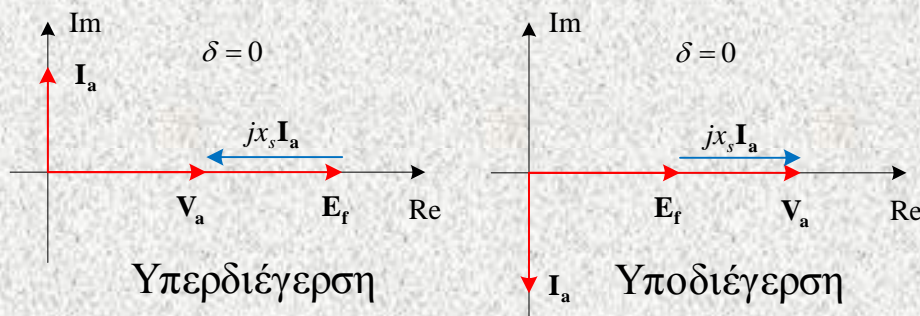
Για λειτουργία **χωρίς φορτίο**, η ροή πραγματικής ισχύος από το ηλεκτρικό στο μηχανικό σύστημα είναι μηδενική. Στην περίπτωση αυτή, η γωνία φορτίου $\delta = 0$ και αν αμελήσουμε και τις διαφορές απώλειες $\rightarrow I_a = 0$. Από ισοδύναμο κύκλωμα:

$$V_a = E_a$$

Για $f = \text{σταθ.}$ των τάσεων τροφοδοσίας, οι $n = \text{σταθ.}$ και στην περίπτωση αυτή η τάση διέγερσης εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από το ρεύμα διέγερσης.

Η μεταβολή του ρεύματος διέγερσης, θα έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή της τάσης διέγερσης και τη δημιουργία ενός ρεύματος στο τύλιγμα τυμπάνου.

$$I_a = \frac{V_a - E_a}{jx_s}$$



Μιας και η γωνία φορτίου εξακολουθεί να είναι μηδενική, δηλαδή τα διανύσματα των τάσεων διέγερσης και τυμπάνου είναι συμφασικά, το ρεύμα τυμπάνου συνεισφέρει μόνο σε άεργο ισχύ.

Κατάσταση υπερδιέγερσης, η ισχύς στην είσοδο:

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

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

Κατάσταση υπερδιέγερσης, το ρεύμα τύμπανου καθυστερεί ως προς την τάση κατά 90° και ο κινητήρας εμφανίζει **επαγωγική συμπεριφορά**. Η μιγαδική ισχύς στην είσοδο του κινητήρα στη συγκεκριμένη λειτουργική κατάσταση:

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

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

Η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας (συνεχή λειτουργία στη μόνιμη κατάσταση), καθορίζεται από:

- τα **θερμικά όρια φόρτισης**,
- τα **μηχανικά όρια φόρτισης** και
- τα **όρια στατικής ευστάθειας**

Θερμικά όρια φόρτισης

Ηλεκτρικές απώλειες των τυλιγμάτων διέγερσης και τυμπάνου (θέτουν ένα όριο στη **μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του ρεύματος**).

$$P_{Cu,max} = 3I_{a,max}^2 r_a + I_{f,max}^2 r_f$$

Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα στο τύλιγμα τυμπάνου, καθορίζει κατά βάση και τη **μέγιστη φαινόμενη ισχύ της σύγχρονης μηχανής (Ονομαστική ισχύς)**, η οποία εγγυάται την ασφαλή από άποψη υπερθέρμανσης, συνεχή λειτουργία της μηχανής.

$$S_{no} = \sqrt{3} V_{p,no} I_{a,max} = 3 V_{ph,no} I_{a,no}$$

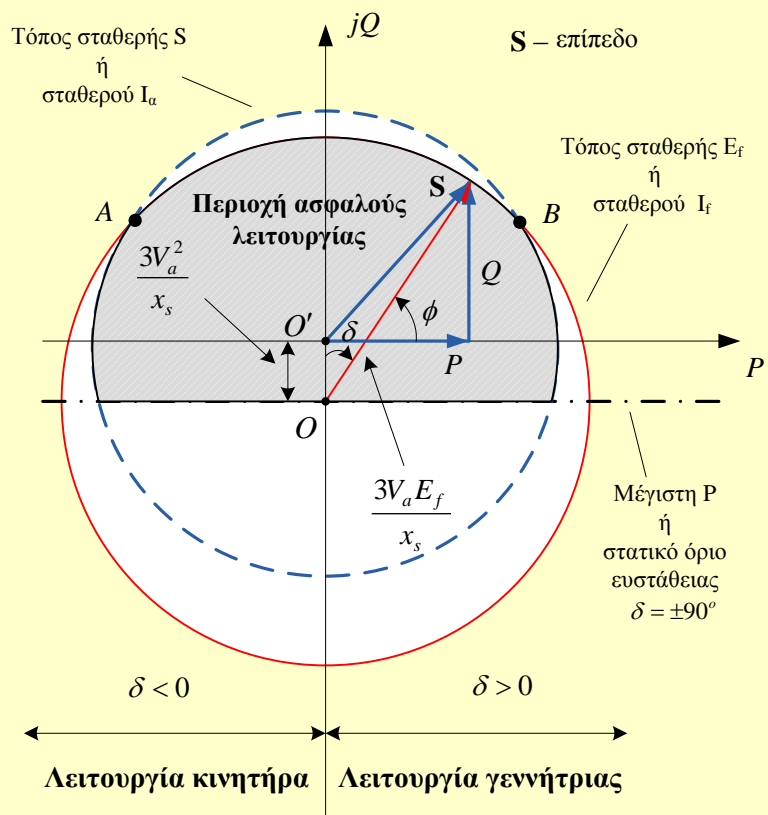
Μηχανικά όρια φόρτισης

Επειδή $\mathbf{n}_s = c\mathbf{t}$, τα μηχανικά όρια περιορίζονται στη **μέγιστη ροπή**.

Πρακτικά σημαίνει ότι, ο **περιορισμός της μέγιστης ισχύος** καθορίζεται αποκλειστικά και μόνο από τα **θερμικά όρια φόρτισης**. Υψηλά ρεύματα στο τύλιγμα τυμπάνου, μπορούν να οδηγήσουν σε **αυξημένες P_{Cu}** , με αποτέλεσμα τη **σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας** στο εσωτερικό της μηχανής και την **έντονη καταπόνηση των μονώσεων των τυλιγμάτων**. Στην αύξηση της θερμοκρασίας, συντελούν δευτερευόντως και οι **P_{Cu} στο τύλιγμα διέγερσης** και οι **πάσης φύσης μηχανικές απώλειες**.

Στην περίπτωση που η μηχανή είναι εφοδιασμένη με **συστήματα ψύξης**, τα **όρια φόρτισης** καθώς επίσης και το **εμβαδόν της ασφαλούς περιοχής λειτουργίας αυξάνουν σημαντικά**.

Περιοχές ασφαλούς λειτουργίας (Γεωμετρικοί τόποι μεγεθών)



Μιγαδική ισχύς στους ακροδέκτες του τυλίγματος τυμπάνου

$$S = P + jQ = 3 \frac{V_a E_f}{x_s} \sin \delta + j \left(\frac{3V_a E_f}{x_s} \cos \delta - \frac{3V_a^2}{x_s} \right)$$

Για **σταθερή ταχύτητα περιστροφής**, η επαγόμενη E_f στο τύλιγμα τυμπάνου, **εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο** από το I_f .

Ο κύκλος με κέντρο O και ακτίνα $3V_a E_f / x_s$, αντιστοιχεί στο γεωμετρικό τόπο των σημείων σταθερής E_f και κατ' επέκταση, στο γεωμετρικό τόπο των σημείων σταθερού I_f .

Ο κύκλος με κέντρο O' και ακτίνα το μέτρο $S=3V_a I_a$ της μιγαδικής ισχύος, αντιστοιχεί στο γεωμετρικό τόπο των σημείων σταθερού ρεύματος στο τύλιγμα τυμπάνου.

Γραμμοσκιασμένη περιοχή

Περικλείεται μέσα στις περιοχές που καθορίζονται από τα **μέγιστα επιτρεπόμενα I_f και I_a** από άποψη θερμικής φόρτισης (για συνεχή λειτουργία) και την **οριζόντια περιοχή του στατικού ορίου ευστάθειας**. Τα ρεύματα αυτά, για ονομαστικές τάσεις στα τυλίγματα, **αντιπροσωπεύουν τα αντίστοιχα ονομαστικά ρεύματα της μηχανής**.

Τα **σημεία τομής A και B** των δύο γεωμετρικών τόπων των I_f και I_a , προσδιορίζουν τα δυο βέλπιστα λειτουργικά σημεία για λειτουργία κινητήρα και γεννήτριας αντίστοιχα, διότι επιτυγχάνεται η **μέγιστη χρησιμοποίηση από άποψη ισχύος των δύο κυκλωμάτων**.

Η συνεχής λειτουργία της σύγχρονης μηχανής εντός των ορίων της γραμμοσκιασμένης περιοχής (**περιοχή ασφαλούς λειτουργίας**), εγγυάται ότι δεν θα εμφανιστούν φαινόμενα έντονης υπερθέρμανσης στα τυλίγματα στάτη και δρομέα, τα οποία θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην καταστροφή των μονώσεων.

Η **μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία** στα τυλίγματα, εξαρτάται από το είδος της μόνωσης. Όσο καλύτερης ποιότητας είναι η χρησιμοποιούμενη μόνωση, τόσο μεγαλύτερα είναι τα επιτρεπόμενα όρια θερμικής φόρτισης και το **εμβαδόν της περιοχής ασφαλούς λειτουργίας**.

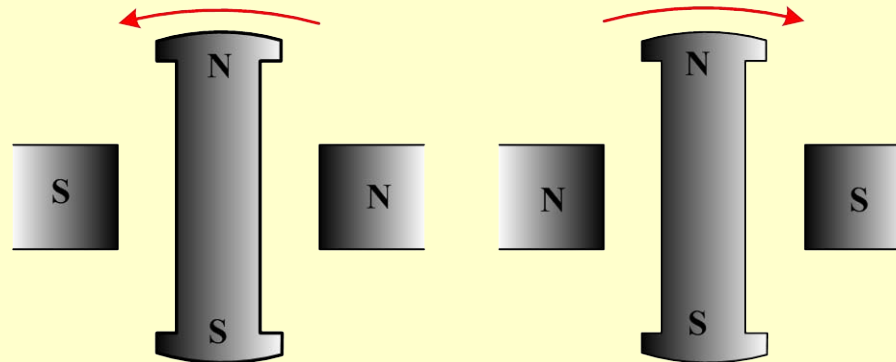
Προφανώς, για **μικρά χρονικά διαστήματα**, είναι δυνατή η λειτουργία της σύγχρονης μηχανής έξω από τα επιτρεπόμενα μέγιστα όρια χωρίς προβλήματα.

Εκκίνηση σύγχρονου κινητήρα

Στις σύγχρονες μηχανές, το τύλιγμα της διέγερσης κατά βάση βρίσκεται στο δρομέα και τροφοδοτείται με Σ.Ρ. και το τριφασικό τύλιγμα τυμπάνου στο στάτη.

Το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα, εφόσον ο δρομέας είναι ακίνητος, είναι **στάσιμο στο χώρο**, σε αντίθεση με το μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος τυμπάνου το οποίο περιστρέφεται με τη n_s , με αποτέλεσμα η **μέση παραγόμενη ροπή εκκίνησης να είναι μηδενική**.

Πρακτικά αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, λόγω της μεγάλης αδράνειας των στρεφόμενων μαζών, ο δρομέας αδυνατεί να παρακολουθήσει την κίνηση του μαγνητικού πεδίου του στάτη, με αποτέλεσμα να **δέχεται σε κάθε ημιπερίοδο της εναλλασσόμενης τάσης, ροπή διαφορετικής κατεύθυνσης**.



Εκκίνηση σύγχρονου κινητήρα

Η εναλλαγή της διεύθυνσης της ασκούμενης ηλεκτρικής ροπής στο δρομέα σε κάθε περίοδο της εναλλασσόμενης τάσης, αντί την περιστροφή προκαλεί μια δόνηση στο δρομέα, η οποία με τη σειρά της μπορεί να προκαλέσει έντονα **φαινόμενα υπερθέρμανσης** στον κινητήρα.

- ✦ Όταν ο κινητήρας στρέφεται με τη n_s , τότε **συντηρείται η περιστροφή**, διότι στην περίπτωση αυτή η **αλλαγή της φοράς του ρεύματος στο τύλιγμα τυμπάνου**, συμπίπτει με την **αλλαγή της θέσης των πόλων του δρομέα** και έτσι **αναπτύσσεται ροπή μιας κατεύθυνσης**.
- ✦ Όταν η **ταχύτητα περιστροφής** του δρομέα είναι **λίγο μικρότερη** από τη n_s , αναπτύσσεται και πάλι **ροπή μιας κατεύθυνσης** η οποία επιταχύνει το δρομέα στη **σύγχρονη ταχύτητα**. Η ταχύτητα αυτή είναι γνωστή ως **κρίσιμη ταχύτητα**, εξαρτάται άμεσα από τη ροπή αδράνειας των στρεφόμενων μαζών του δρομέα και είναι **διαφορετική σε κάθε κινητήρα**.
- ✦ Όταν η **ταχύτητα περιστροφής** είναι **μεγαλύτερη** από την **κρίσιμη ταχύτητα** ο κινητήρας **συγχρονίζεται** από μόνος του, ενώ στην περίπτωση που είναι **μικρότερη** δεν καταφέρνει να συγχρονιστεί και η **ταχύτητα του σταδιακά ελαττώνεται μέχρι το μηδενισμό της**.

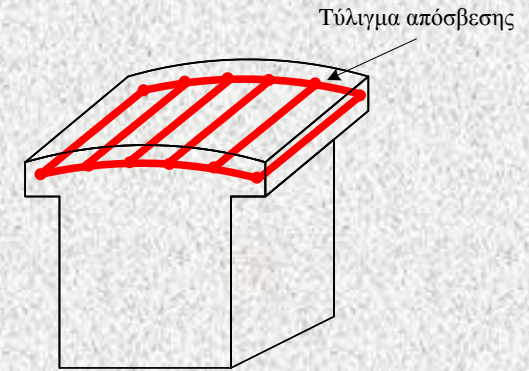
Συμπέρασμα: Ο σύγχρονος κινητήρας δεν ξεκινά από μόνος του και χρειάζεται βοηθητικά μέσα για την εκκίνηση του

Βασικές μέθοδοι για την εκκίνηση των σύγχρονων κινητήρων

- Μέσω **αντιστροφή AC/DC/AC** με τη μεταβολή του μεγέθους της συχνότητας των τάσεων τροφοδοσίας και
- με τη χρήση **τυλιγμάτων απόσβεσης** σαν ασύγχρονος κινητήρας.

Χρήση τυλιγμάτων απόσβεσης

Το **τύλιγμα απόσβεσης**, είναι στην ουσία ένα πρόσθετο τύλιγμα **κλωβού** το οποίο τοποθετείται σε ειδικά αυλάκια στα πέλματα των μαγνητικών πόλων του δρομέα. Με τη χρήση των πρόσθετων τυλιγμάτων απόσβεσης, ο σύγχρονος κινητήρας διαθέτει **πλέον ροπή εκκίνησης**, καθόσον **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**.

- ✦ Όταν ο **κινητήρας πλησιάσει τη n_s** , αποσυνδέεται η ωμική αντίσταση και το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται με την **ονομαστική του τάση**.
- ✦ Με την προϋπόθεση ότι η **ταχύτητα περιστροφής** είναι **μεγαλύτερη** από την αντίστοιχη **οριακή ταχύτητα**, επιτυγχάνεται το μαγνητικό κύκλωμα των πόλων των τυλιγμάτων στάτη και δρομέα και ο κινητήρας **αυτοσυγχρονίζεται**.
- ✦ Στη n_s δεν επάγονται τάσεις και ρεύματα στα τυλίγματα απόσβεσης, καθόσον δεν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ των αγωγών των συγκεκριμένων τυλιγμάτων και του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του τυλίγματος τυμπάνου, με **αποτέλεσμα τα τυλίγματα απόσβεσης να παραμένουν ανενεργά**.

Τα τυλίγματα απόσβεσης **βελτιώνουν και την ευστάθεια της μηχανής**

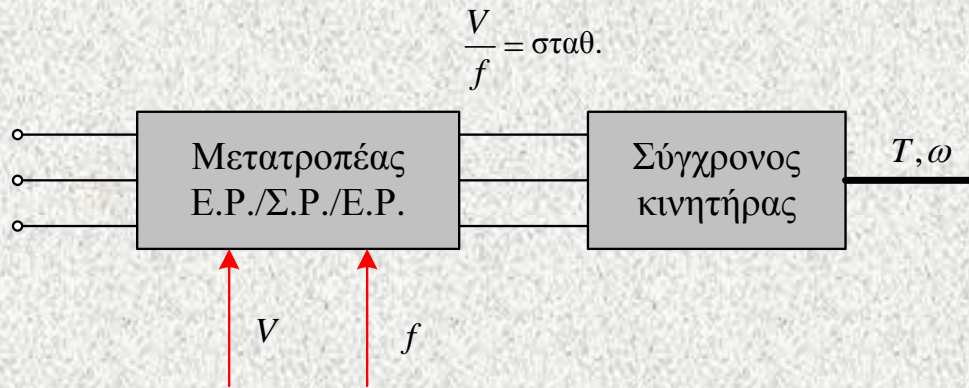
Στην περίπτωση του **ηλεκτρικού κινητήρα**, δρουν **ανασταλτικά** σε οποιεσδήποτε **μεταβολές του φορτίου** που τείνουν να **μεταβάλλουν την ταχύτητα περιστροφής** σε διαφορετική τιμή από τη **σύγχρονη ταχύτητα**.

Στην περίπτωση της **γεννήτριας**, συμβάλλουν στη **σταθεροποίηση της τάσης** στους ακροδέκτες του τυλίγματος τυμπάνου καθώς επίσης και στη **ταχύτητα περιστροφής**.

Χρήση αντιστροφέα με ρύθμιση της συχνότητας

Η συγκεκριμένη μέθοδος εκκίνησης, απαιτεί τη χρήση ενός **μετατροπέα AC/DC/AC**.

Για την **αποδοτικότερη** χρησιμοποίηση των **μαγνητικών χαρακτηριστικών του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος**, η **μεταβολή της συχνότητας** συνοδεύεται και από ταυτόχρονη **μεταβολή του μεγέθους της τάσης** τροφοδοσίας, έτσι ώστε η μαγνητική ροή στο διάκενο να διατηρείται στη μέγιστη δυνατή τιμή (ρύθμιση του λόγου **V/f**)

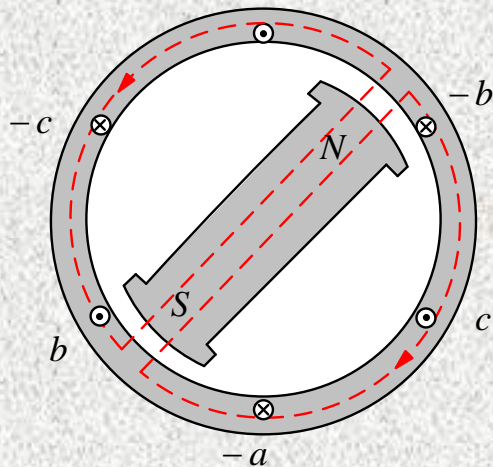


Η **χαμηλή συχνότητα** των τάσεων τροφοδοσίας και η αντίστοιχη **χαμηλή ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου** του τυλίγματος τυμπάνου ($V/f = ct.$), παρέχει τη δυνατότητα στις στρεφόμενες μάζες του δρομέα να υπερνικήσουν τη μηχανική αδράνεια και οι πόλοι του τυλίγματος του δρομέα να ακολουθήσουν τους στρεφόμενους πόλους του τυλίγματος του στάτη. Με την ομαλή αύξηση της συχνότητας, ο κινητήρας φέρεται σταδιακά στη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής.

Μηχανές έκτυπων πόλων

Το **τύλιγμα τυμπάνου** των μηχανών με έκτυπους πόλους, είναι **κατασκευαστικά** το ίδιο με εκείνο των μηχανών με ομοιόμορφο διάκενο.

Οι έκτυποι πόλοι **εισαγάγουν μια ανομοιομορφία στο διάκενο**, με αποτέλεσμα η **μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος να μην είναι πλέον σταθερή** γύρω από την περιφέρεια του διακένου.



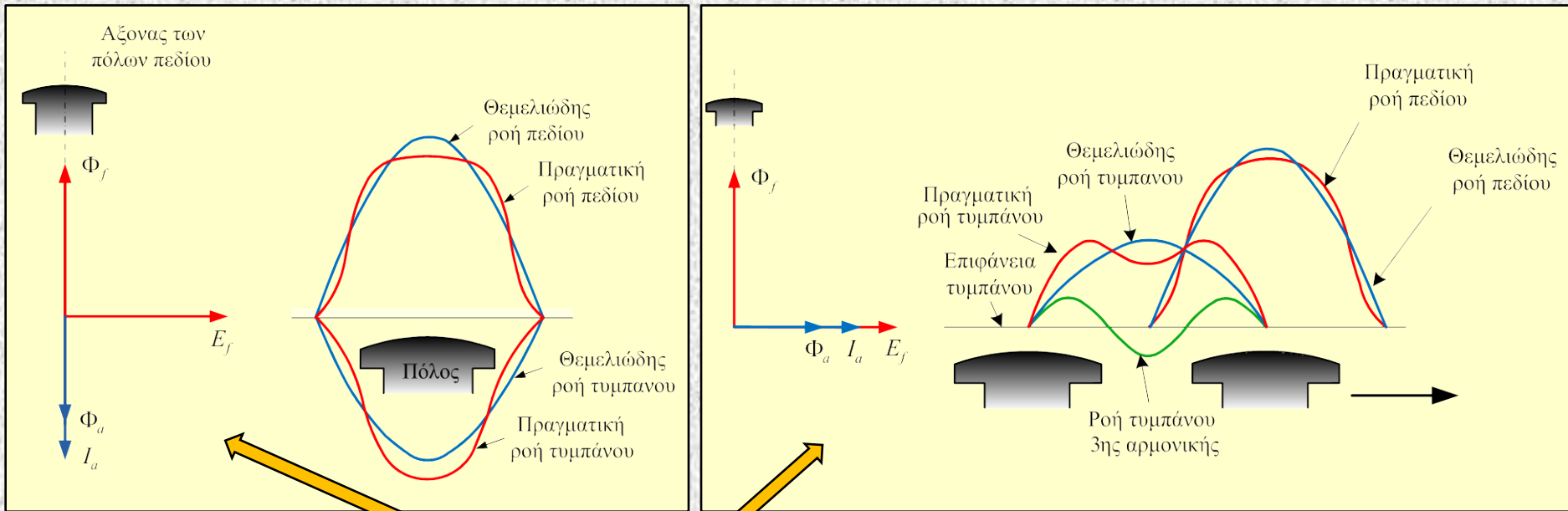
- Η **μικρότερη τιμή της μαγνητικής αντίστασης**, θα εμφανίζεται στους άξονες των μαγνητικών πόλων και
- Η **μεγαλύτερη τιμή της μαγνητικής αντίστασης** στους άξονες μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων.

Η **ανομοιομορφία αυτή του διακένου**, έχει σαν αποτέλεσμα την **εξάρτηση της μαγνητικής ροής του τυλίγματος τυμπάνου από τη γωνιακή θέση του δρομέα**.

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)

Μηχανές έκτυπων πόλων

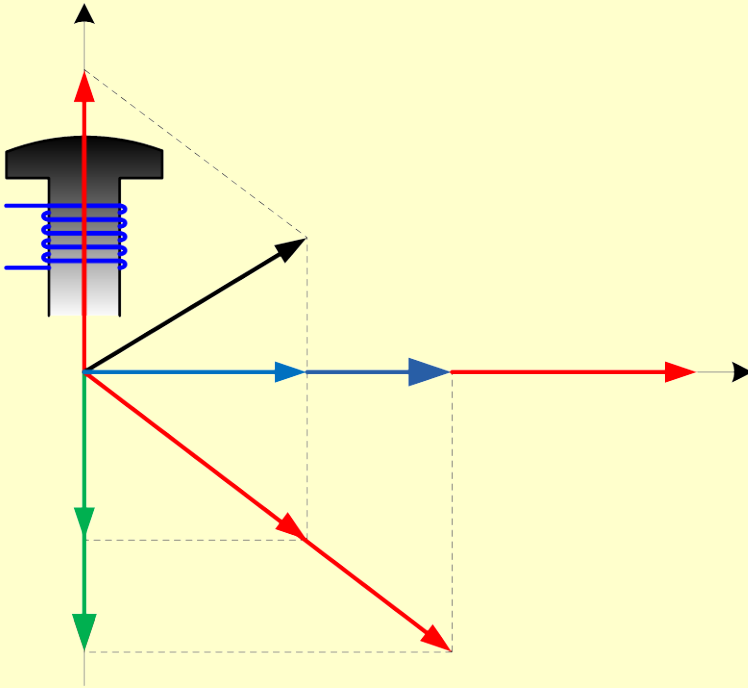


Η θεμελιώδης συνιστώσα της μαγνητικής ροής της αντίδρασης του τυλίγματος τυμπάνου στο χώρο μεταξύ δυο μαγνητικών πόλων, όπου η αντίστοιχη συνισταμένη μαγνητική ροή είναι κάθετη στον άξονα του πεδίου (δηλαδή το ρεύμα τυμπάνου είναι συμφασικό με την τάση διέγερσης), είναι **μικρότερη** από ότι στην περίπτωση που η γωνία μεταξύ των μαγνητικών ροών του πεδίου και της αντίδρασης τυμπάνου είναι σε διαφορά φάσης 180° (όπου η φασική απόκλιση του ρεύματος τυμπάνου και της επαγόμενης τάσης διέγερσης είναι 90°).

Επομένως, η αντίδραση μαγνήτισης είναι μικρότερη, όταν το ρεύμα τυμπάνου είναι σε μηδενική φάση χρόνου με την τάση διέγερσης, από ότι όταν είναι σε φάση χρόνου 90° .

Η επίδραση των έκτυπων πόλων, λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση του ρεύματος τυμπάνου I_a σε δύο συνιστώσες, η μια σε φάση χρόνου 90° και η άλλη **συμφασική**, με την τάση διέγερσης E_f

$$I_a = I_d + I_q$$



Η Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος τυμπάνου **αναλύεται σε δύο συνιστώσες**, η μια από αυτές είναι **παράλληλη** με τον άξονα του πεδίου και η άλλη είναι **κάθετη**.

Οπότε, η μηχανή με έκτυπους πόλους γίνεται **ισοδύναμη** με **δύο υποθετικές μηχανές ομοίμορφου διακένου** 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**.

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

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

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

x_d = **σύγχρονη αντίδραση ορθού άξονα** (ο λόγος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης αντίδρασης τυμπάνου λόγω της θεμελιώδους συνιστώσας ορθού άξονα του ρεύματος τυμπάνου)

x_q = **σύγχρονη αντίδραση εγκάρσιου ή κατακόρυφου άξονα** (ο λόγος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης αντίδρασης τυμπάνου λόγω της θεμελιώδους συνιστώσας εγκάρσιου άξονα του ρεύματος τυμπάνου, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και για ονομαστική συχνότητα).

Με την υπόθεση ότι η αντίδραση σκέδασης του τυλίγματος τυμπάνου είναι **ανεξάρτητη** από τη θέση του δρομέα

$$x_d = x_l + x_{ad}$$

$$x_q = x_l + x_{aq}$$

x_{ad} = αντίδραση μαγνήτισης τυλίγματος τυμπάνου ορθού άξονα, (Ω)

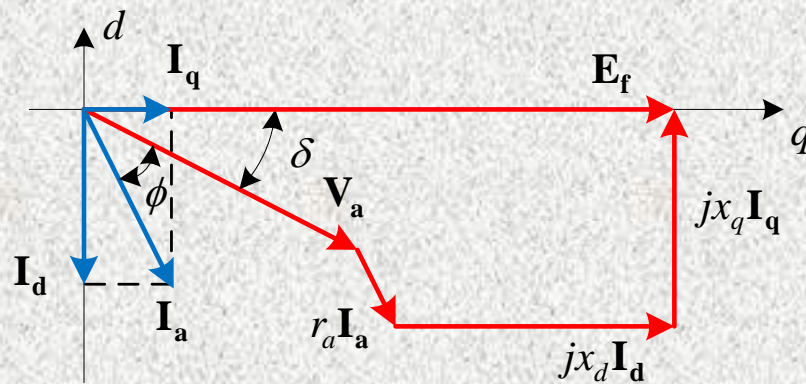
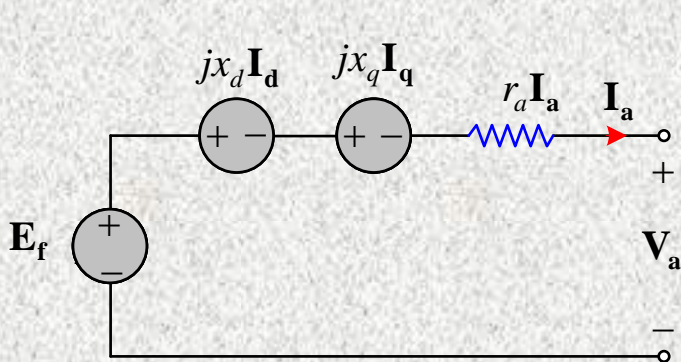
x_{aq} = αντίδραση μαγνήτισης τυλίγματος τυμπάνου εγκάρσιου άξονα, (Ω)

x_l = αντίδραση σκέδασης τυλίγματος τυμπάνου, (Ω)

Λόγω της **μεγαλύτερης τιμής της μαγνητικής αντίστασης του εγκάρσιου άξονα**

$$x_d > x_q$$

Σύγχρονη γεννήτρια με έκτυπους πόλους



$$\mathbf{E}_f = \mathbf{V}_a + r_a \mathbf{I}_a + jx_d \mathbf{I}_d + jx_q \mathbf{I}_q$$

$$I_q = I_a \cos(\phi + \delta)$$

$$I_d = I_a \sin(\phi + \delta)$$

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

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

Σύγχρονη γεννήτρια με έκτυπους πόλους

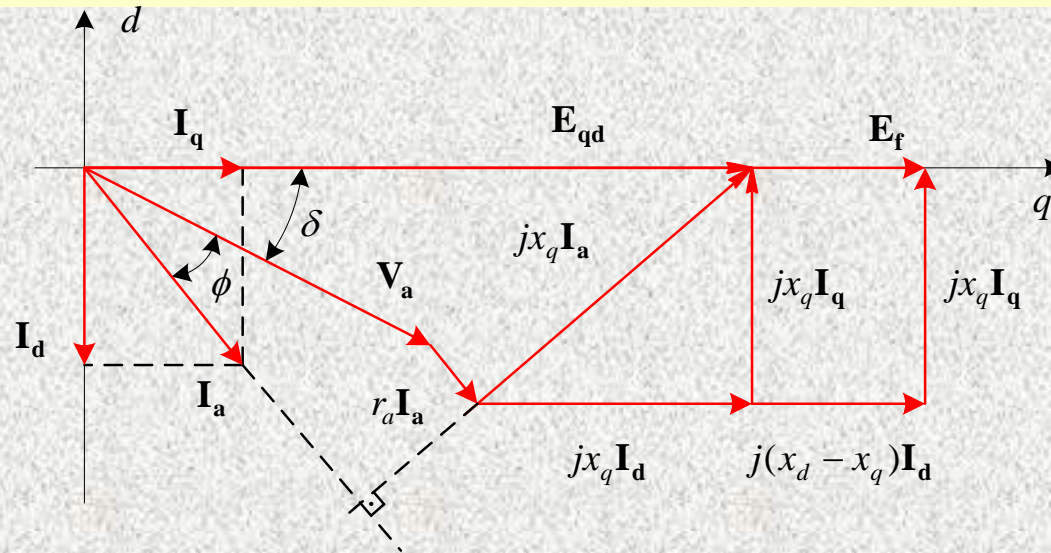
Συνήθως για **λειτουργία γεννήτριας**, είναι γνωστή η **τάση ακροδεκτών** και από τις **συνθήκες φόρτισης**, το **ρεύμα** και ο **συντελεστής ισχύος του φορτίου**. Αυτό που δεν είναι γνωστό για την παραπέρα ανάλυση της μηχανής, είναι η **γωνία ροπής ή γωνία φορτίου δ** .

$$\mathbf{E}_f = \mathbf{V}_a + r_a \mathbf{I}_a + j(x_d - x_q) \mathbf{I}_d + jx_q \mathbf{I}_d + jx_q \mathbf{I}_q = \mathbf{E}_{qd} + j(x_d - x_q) \mathbf{I}_d$$

όπου

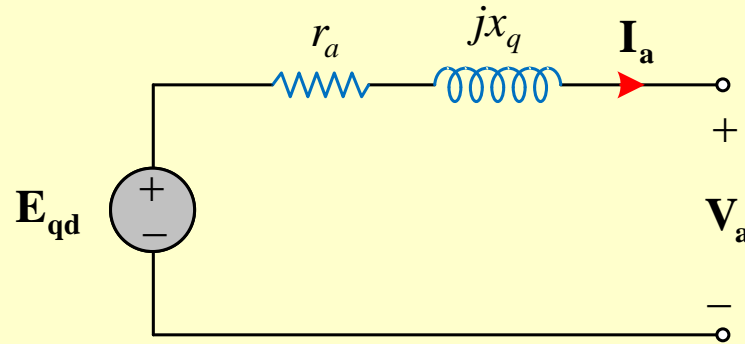
$$\mathbf{E}_{qd} = \mathbf{V}_a + r_a \mathbf{I}_a + jx_q \mathbf{I}_a$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι, το διάνυσμα \mathbf{E}_{dq} είναι **συγγραμμικό** με την τάση διέγερσης \mathbf{E}_f οπότε και το διάνυσμα \mathbf{E}_{dq} θα βρίσκεται επίσης στον οριζόντιο άξονα, δηλαδή θα είναι **συμφασικό** με την τάση διέγερσης. Έχοντας γνωστή την **τάση ακροδεκτών** του τυλίγματος τυμπάνου της γεννήτριας και τα **χαρακτηριστικά του φορτίου**, μας δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού της **γωνίας φορτίου δ**



Η φάση των διανυσμάτων E_f και E_{dq} , είναι ενδεικτική της θέσης του εγκάρσιου άξονα και κατ' επέκταση της **μηχανικής θέσης του δρομέα**.

Στις περιπτώσεις διερεύνησης της στατικής ευστάθειας σύγχρονης μηχανής με έκτυπους πόλους, εάν αμεληθούν φαινόμενα κορεσμού, η σύγχρονη μηχανή μπορεί να παρασταθεί, με μια ρυθμιζόμενη Η.Ε.Δ. E_{dq} σε σειρά με τη σύγχρονη αντίδραση του κατακόρυφου άξονα και την ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου

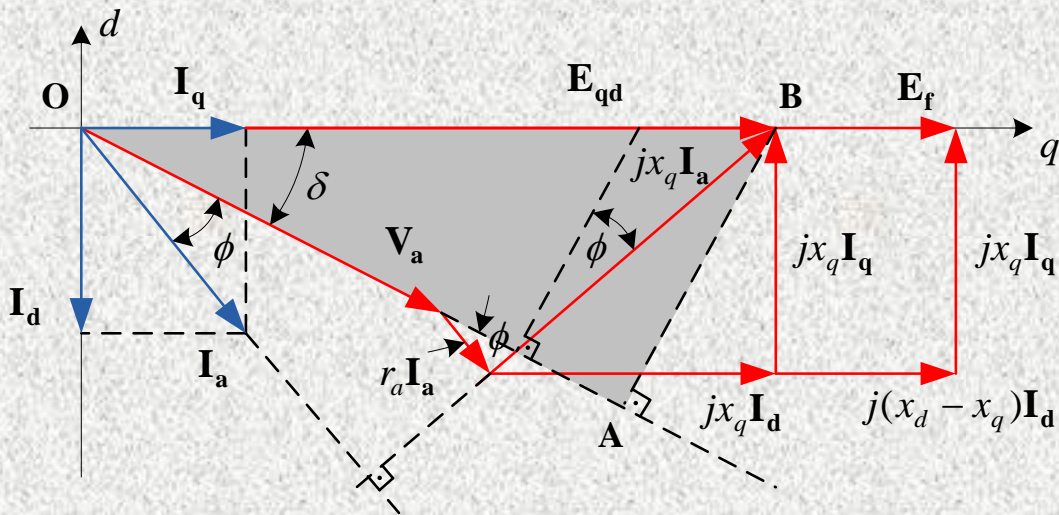


Στην περίπτωση αυτή η παράσταση της μηχανής με έκτυπους πόλους, είναι **όμοια με την αντίστοιχη της μηχανής κυλινδρικού δρομέα**. Βέβαια η χρήση του μοντέλου αυτού απαιτεί την από καιρού εις καιρό ρύθμιση της τιμής της E_{dq} , ώστε να ισχύει η σχέση

$$E_{qd} = E_f - (x_d - x_q)I_d$$

Στην περίπτωση όπου $x_d \approx x_q$ (μηχανή κυλινδρικού δρομέα), τότε ισχύει ότι $E_{qd} = E_f$

Εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού της γωνίας φορτίου



$$(OA) = V_a + r_a I_a \cos \phi + x_q I_a \sin \phi$$

$$(AB) = x_q I_a \cos \phi - r_a I_a \sin \phi$$

$$\tan \delta = \frac{(AB)}{(OA)} = \frac{x_q I_a \cos \phi - r_a I_a \sin \phi}{V_a + r_a I_a \cos \phi + x_q I_a \sin \phi}$$

Εάν αμελήσουμε την πτώση τάσης στην ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου

$$I_d = \frac{E_f - V_a \cos \delta}{x_d} \quad I_q = \frac{V_a \sin \delta}{x_q}$$

$$V_a \sin \delta = x_q I_a (\cos \phi \cos \delta - \sin \phi \sin \delta)$$

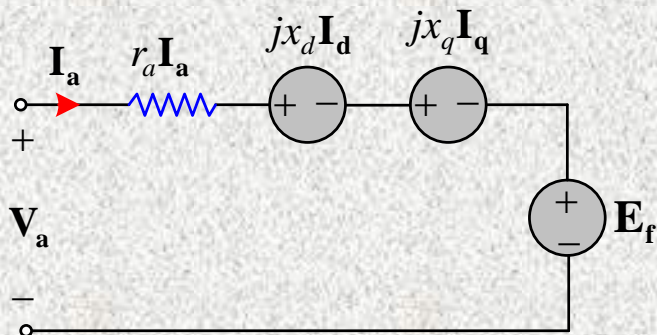
Διαιρώντας και τα δύο μέρη με $\cos \delta$ και επιλύοντας ως προς τη γωνία φορτίου δ

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

Προφανώς, η γωνία φορτίου δ προκύπτει εύκολα και από την, θέτοντας όπου $r_a = 0$

Σύγχρονος κινητήρας με έκτυπους πόλους

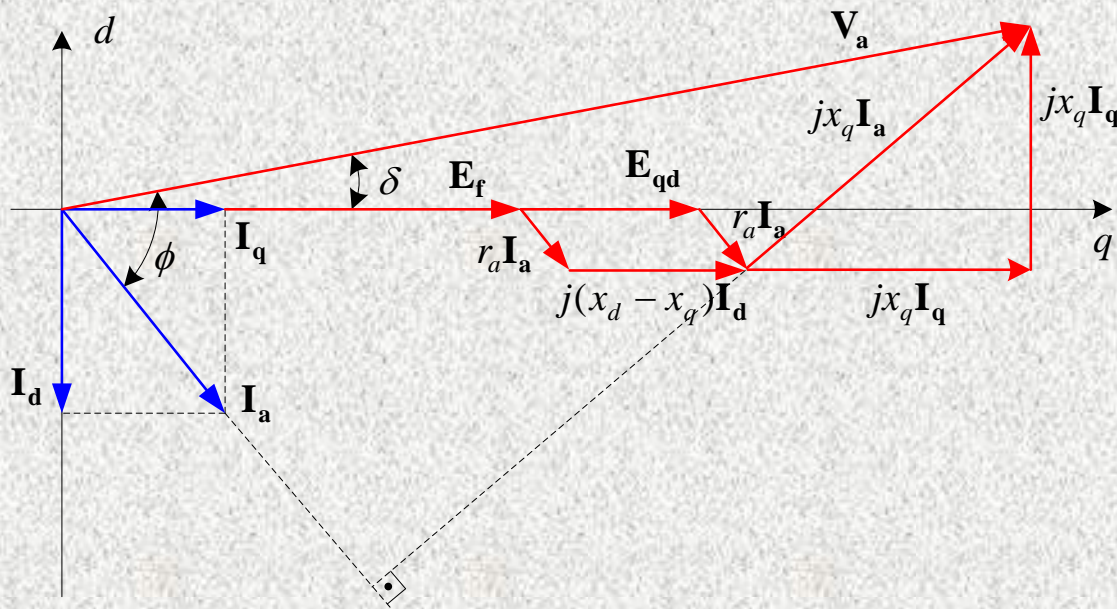
Το **ισοδύναμο κύκλωμα** για λειτουργία **κινητήρα**, είναι απόλυτα όμοιο με εκείνο που αντιστοιχεί σε λειτουργία **γεννήτριας**, με τη μόνη διαφορά στην **αντιστροφή της φοράς του I_a**



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

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

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



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

Εσωτερική ισχύς και ροπή

Μιγαδική ισχύς στους ακροδέκτες του τυλίγματος τυμπάνου

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

Εάν αμεληθεί η R_a , η **πραγματική ισχύς** στους ακροδέκτες του τυλίγματος τυμπάνου θα ισούται με την **εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ισχύ** της μηχανής

$$P_{\text{int}} = 3\text{Re}\{V_a I_a^*\} = 3\text{Re}\{V_a I_d^* + V_a I_q^*\} \Rightarrow$$

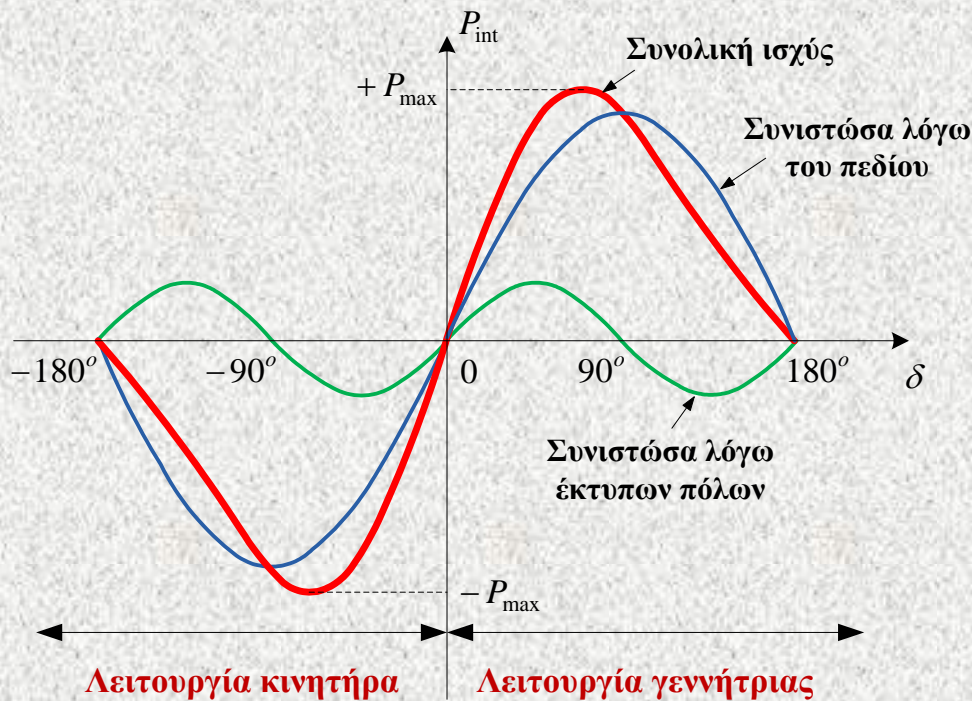
$$P_{\text{int}} = \frac{3V_a E_f}{x_d} \sin \delta + \frac{3V_a^2 (x_d - x_q)}{2x_d x_q} \sin 2\delta$$

Ο **πρώτος όρος** είναι ίδιος με την P_{int} μιας μηχανής κυλινδρικού δρομέα και οφείλεται στην **αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων** των τυλιγμάτων στάτη και δρομέα.

Ο **δεύτερος όρος**, είναι ανεξάρτητος του I_f και οφείλεται στην **ανομοιομορφία της μαγνητικής αντίστασης** περί την περιφέρεια του διακένου που δημιουργείται λόγω των έκτυπων πόλων (**ροπή μαγνητικής αντίστασης**).

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

Στην περίπτωση όπου $x_d = x_q$ ο δεύτερος όρος μηδενίζεται



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 δύο ακρότατων τιμών $\pm P_{\max}$ έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ευαισθησίας στις οποιεσδήποτε 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 θεμελιώδους συνιστώσας χώρου της Φ_R για μηχανή με έκτυπους πόλους, εξαρτάται από τη σχετική θέση του δρομέα σε σχέση με τον άξονα της μέγιστης τιμής της χωρικής κατανομής της θεμελιώδους συνιστώσας της συνισταμένης Μ.Ε.Δ..

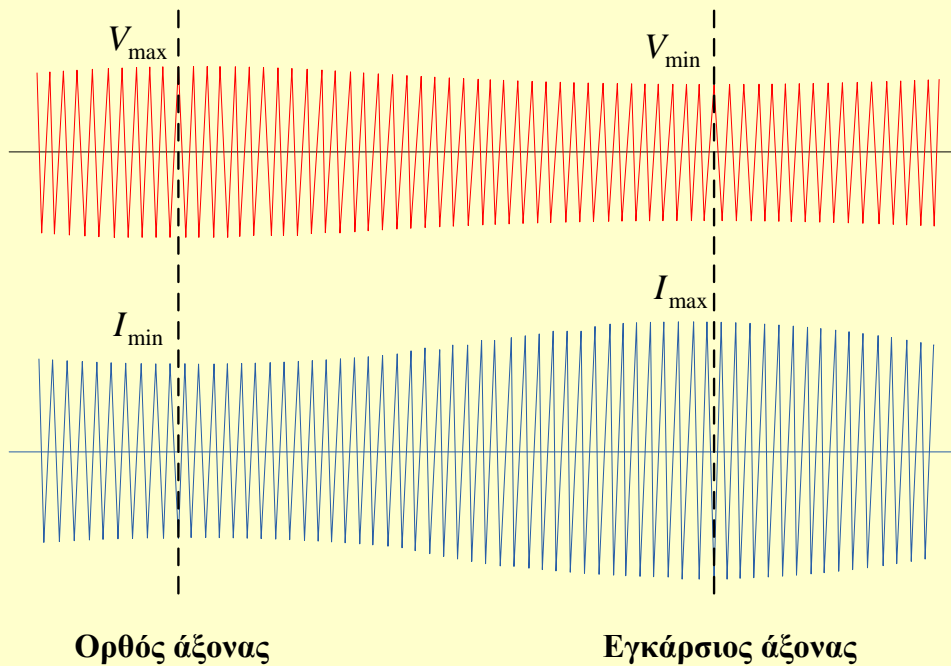
Το μέγεθος της μαγνητικής ροής, εμφανίζει:

- ✓ τη **μεγαλύτερη τιμή** του στην περίπτωση που ο ορθός άξονας του δρομέα ταυτίζεται με τον άξονα της συνισταμένης Μ.Ε.Δ. και
- ✓ 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**. Με τις συνθήκες αυτές, το στρεφόμενο κύμα της θεμελιώδους συνιστώσας της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος τυμπάνου, ολισθαίνει αργά περνώντας τους πόλους του πεδίου με την ταχύτητα ολίσθησης.



Το I_a διαμορφώνεται σύμφωνα με τη **συχνότητα ολίσθησης** που επιβάλλει η κινητήρια μηχανή.

Το I_{\max} εμφανίζεται όταν ο **εγκάρσιος άξονας του δρομέα συμπίπτει** με τον άξονα της συνισταμένης Μ.Ε.Δ. και το I_{\min} όταν ο **ορθός άξονας του δρομέα συμπίπτει** με τον άξονα της συνισταμένης Μ.Ε.Δ..

Η διαμόρφωση των τάσεων τροφοδοσίας του τυλίγματος τυμπάνου στη συχνότητα ολίσθησης, οφείλεται προφανώς στη **σύνθετη αντίσταση των γραμμών τροφοδοσίας του τυλίγματος**.

Στην περίπτωση που η **συχνότητα ολίσθησης είναι αρκετά μικρή**, οι ακρότατες τιμές της τάσης και του ρεύματος τυμπάνου, μπορούν να μετρηθούν και με τη χρήση **κλασικών οργάνων** (βολτομέτρου και αμπερομέτρου αντίστοιχα).

Με βάση τα παλμογραφήματα της τάσης και του ρεύματος τυμπάνου που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη δοκιμή, οι **σύγχρονες αντιδράσεις x_d και x_q του ορθού και εγκάρσιου άξονα**, είναι:

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

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

Μειονέκτημα της μεθόδου ολίσθησης: Σημαντικά σφάλματα μπορούν να εισαχθούν κατά τον πειραματικό υπολογισμό στην περίπτωση που 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 την τροφοδότηση των καταναλωτών με περισσότερες της μιας συγχρόνων γεννητριών οι οποίες λειτουργούν παράλληλα.

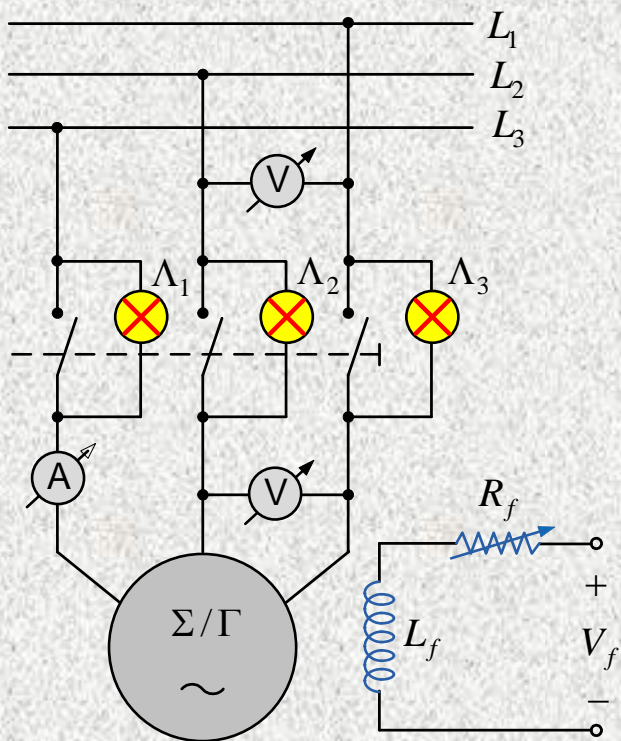
- ✦ Η ποιότητα της εξυπηρέτησης των καταναλωτών (ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος, αύξηση της αξιοπιστίας στη συνέχεια της τροφοδότησης),
- ✦ Η μείωση του κόστους λειτουργίας των μονάδων παραγωγής,
- ✦ Λόγοι συντήρησης του εξοπλισμού

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

Η πρώτη συνθήκη, ελέγχεται **μέσω βολτομέτρου** συνδεδεμένου στους ακροδέκτες της γεννήτριας και του δικτύου.

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**.

Τρίτης συνθήκη: Η προς παραλληλισμό γεννήτρια έχει την αυτή διαδοχή φάσης με το δίκτυο, όταν και οι **τρεις λυχνίες ανάβουν ή σβήνουν συγχρόνως**. Εάν όμως δεν συμβαίνει αυτό και **οι λυχνίες ανάβουν και σβήνουν η μία μετά την άλλη**, σημαίνει ότι η διαδοχή των φάσεων είναι **αντίστροφη** και πρέπει να εναλλαχθούν δύο οποιεσδήποτε συνδέσεις μεταξύ των φάσεων.