



**ΕΜΠ**

*Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)*

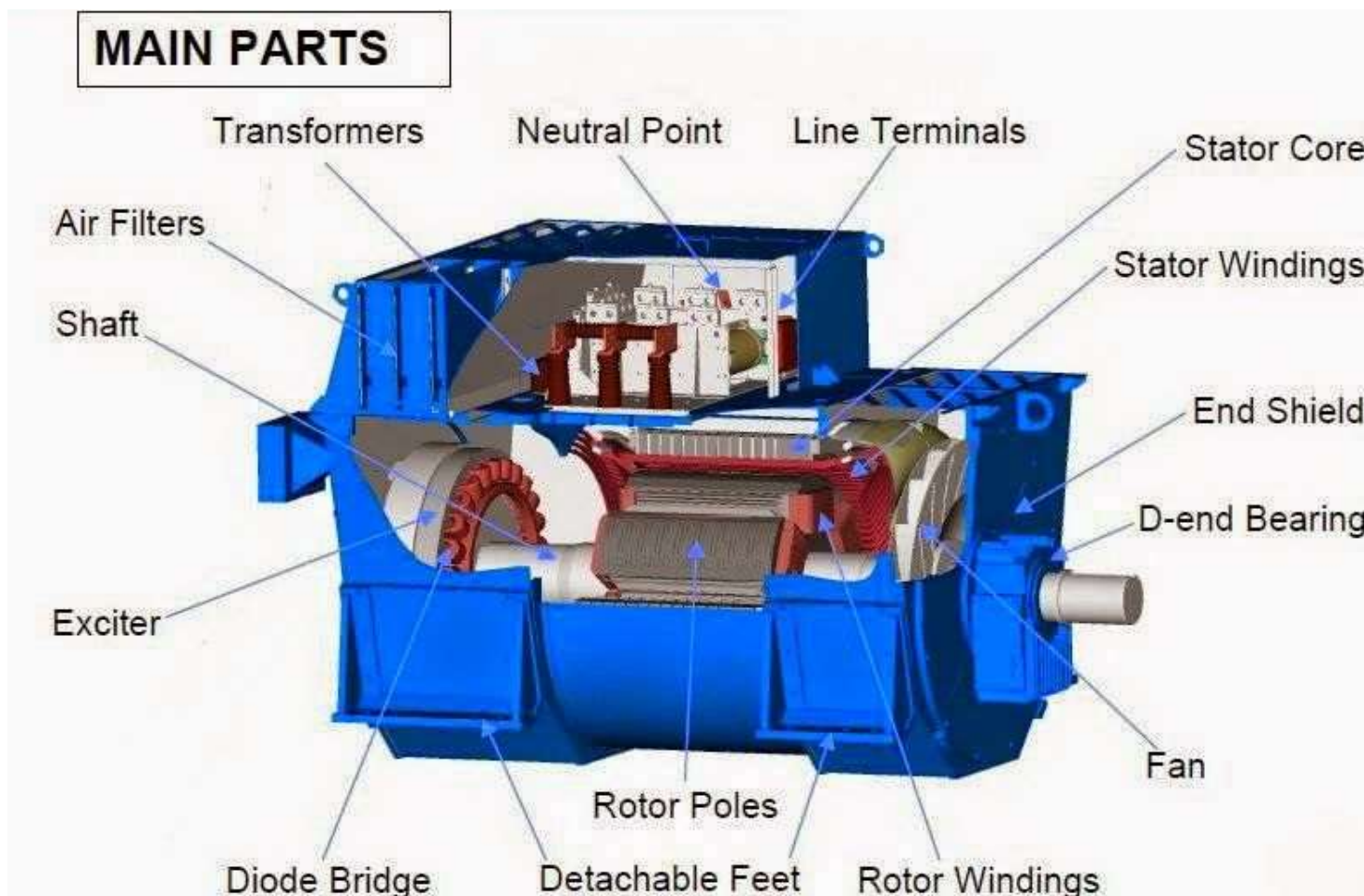
# **Σύγχρονη Μηχανή**

*Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου*

*Καθ. ΕΜΠ*



## Σύγχρονη Μηχανή





## Σύγχρονη Μηχανή

- Στάτης με 3Φ τύλιγμα ΕΡ συχνότητας  $\omega_e \rightarrow$  Πεδίο στρεφόμενο με τη σύγχρονη ταχύτητα  $\omega_s = \frac{\omega_e}{P/2}$
- Δρομέας κυλινδρικός ή έκτυπων πόλων. Διαθέτει τύλιγμα με διέγερση ΣΡ.
- Δρομέας στρέφεται με  $\omega_m = \omega_s$
- Πεδία στάτη και δρομέα στρέφονται στο διάκενο με την ίδια ταχύτητα  $\omega_s$   
 $\rightarrow$  Αλληλεπίδραση πεδίων και ανάπτυξη ροπής



## Εξίσωση τάσεων-ρευμάτων τυμπάνου

Από παράδειγμα διφασικής μηχανής, τάση στη φάση α:

$$U_a = r_s \sqrt{2} I \cos \omega t - \omega L_s \sqrt{2} I \sin \omega t - \omega M I_f \sin(\omega t - \delta)$$

Με phazors:

$$\tilde{V}_a = r_s \tilde{I}_a + j X_s \tilde{I}_a + \tilde{E}_f$$

$I_a$ : ρεύμα τυμπάνου (σύμβαση κινητήρα)

$r_s$ : αντίσταση τυλίγματος τυμπάνου

$X_s = \omega L_s = \omega(L_a + L_l) = X_a + X_l$ : σύγχρονη αντίδραση

$X_a$ : αντίδραση μαγνητίσεως τυμπάνου

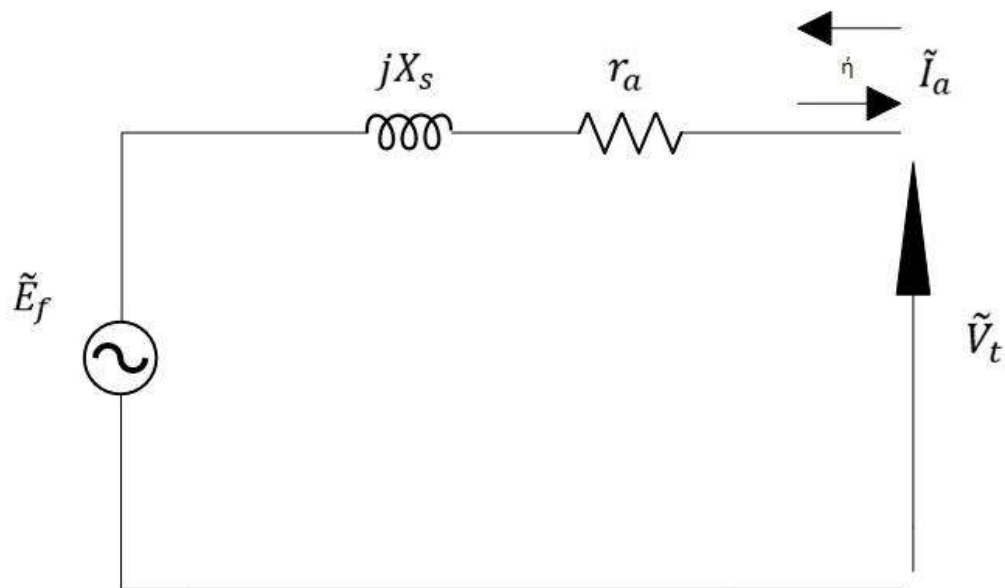
$X_l$ : αντίδραση σκεδάσεως τυμπάνου

$E_f$ : τάση/ΗΕΔ διεγέρσεως που επάγεται στο τύμπανο από στρεφόμενο πεδίο του δρομέα (ανάλογη διέγερσης και ταχύτητας περιστροφής)

$$\begin{array}{c} \text{AC τάση} \rightarrow \\ \text{(ενεργός τιμή)} \end{array} E_f = \frac{\omega M}{\sqrt{2}} I_f \leftarrow \begin{array}{c} \text{DC ρεύμα} \\ \end{array}$$



## Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικής σύγχρονης μηχανής

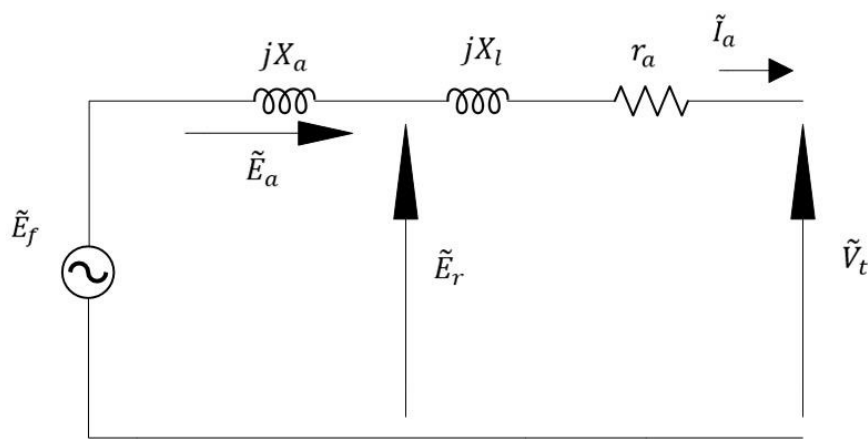


**Σύμβαση γεννήτριας:** ρεύμα  $\tilde{I}_a$  εξερχόμενο των ακροδεκτών

$$\tilde{V}_t = \tilde{E}_f - (r_a + jX_s)\tilde{I}_a$$

**Σύμβαση κινητήρα:** ρεύμα  $\tilde{I}_a$  εισερχόμενο στους ακροδέκτες

$$\tilde{V}_t = \tilde{E}_f + (r_a + jX_s)\tilde{I}_a$$



### Εναλλακτική μορφή ισοδυναμίου

**Τάση διακένου  $\tilde{E}_r = \tilde{E}_f + \tilde{E}_a$ :** τάση που επάγεται στο τύμπανο από το συνιστάμενο πεδίο στο διάκενο

**ΗΕΔ αντιδράσεως τυμπάνου  $E_a = X_a I_a$ :** τάση που επάγεται στο τύμπανο από το στρεφόμενο πεδίο στάτη, το οποίο δημιουργούν τα ρεύματα τυμπάνου



Σύμβολο	Τυπική τιμή
$r_a$ : αντίσταση τυμπάνου (ή $r_s$ )	$\sim 0,01 \text{ } \alpha\mu$
$X_s = X_a + X_l$ : σύγχρονη αντίδραση	$\sim 1,0 - 2,0 \text{ } \alpha\mu$
$X_l$ : αντίδραση σκεδάσεως	$\sim 0,1 \text{ } \alpha\mu$

Σύμβολο	Περιγραφή
$\tilde{E}_r = \tilde{E}_f + \tilde{E}_a = \tilde{V}_t + (r_a + jX_s)\tilde{I}_a$ (για σύμβαση γεννήτριας)	<b>Τάση διακένου</b> (επάγεται από συνιστάμενο πεδίο $\Phi_{sr}$ στο τύμπανο) $E_r \sim \omega\Phi_{sr}$
$\tilde{I}_a$	<b>Ρεύμα τυμπάνου</b> (φορά κινητήρα-γεννήτριας)
$\tilde{V}_t$	<b>Τάση ακροδεκτών</b>
$E_f = \frac{\omega M}{\sqrt{2}} I_f$	<b>Τάση διέγερσης</b> : εξάρτηση από $I_f$ και $\omega$

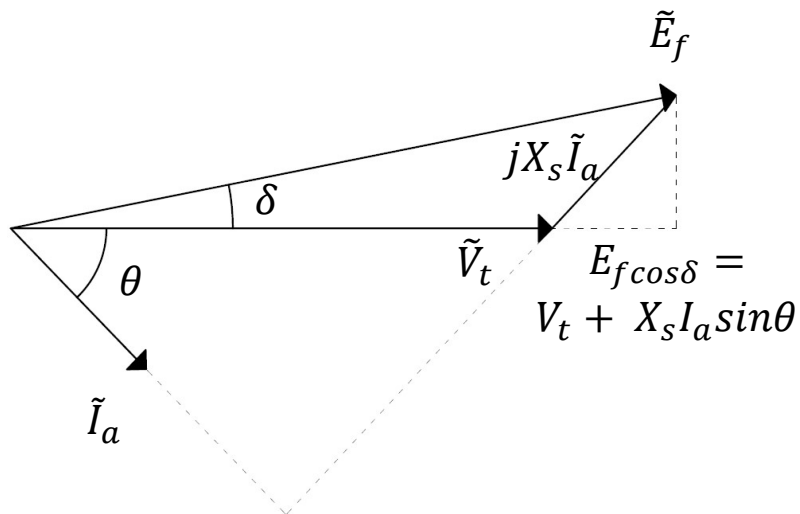
Σημ.: Αλλαγή ταχύτητας περιστροφής  $\rightarrow$  αλλαγή συχνότητας  $\rightarrow$  μεταβολή των  $X = \omega L$



## Γεννήτρια σε υπερδιέγερση (απλουστευμένο διάγραμμα)

$$\tilde{E}_f = \tilde{V}_t + jX_s \tilde{I}_a$$

Σύμβαση γεννήτριας για  $\tilde{I}_a$



Σύμβαση μέτρησης γωνίας  $\delta$ : από  $\tilde{V}_t \rightarrow \tilde{E}_f$   
(θετική όταν  $\tilde{E}_f$  προηγείται της  $\tilde{V}_t$ )

### Βασικές διαπιστώσεις

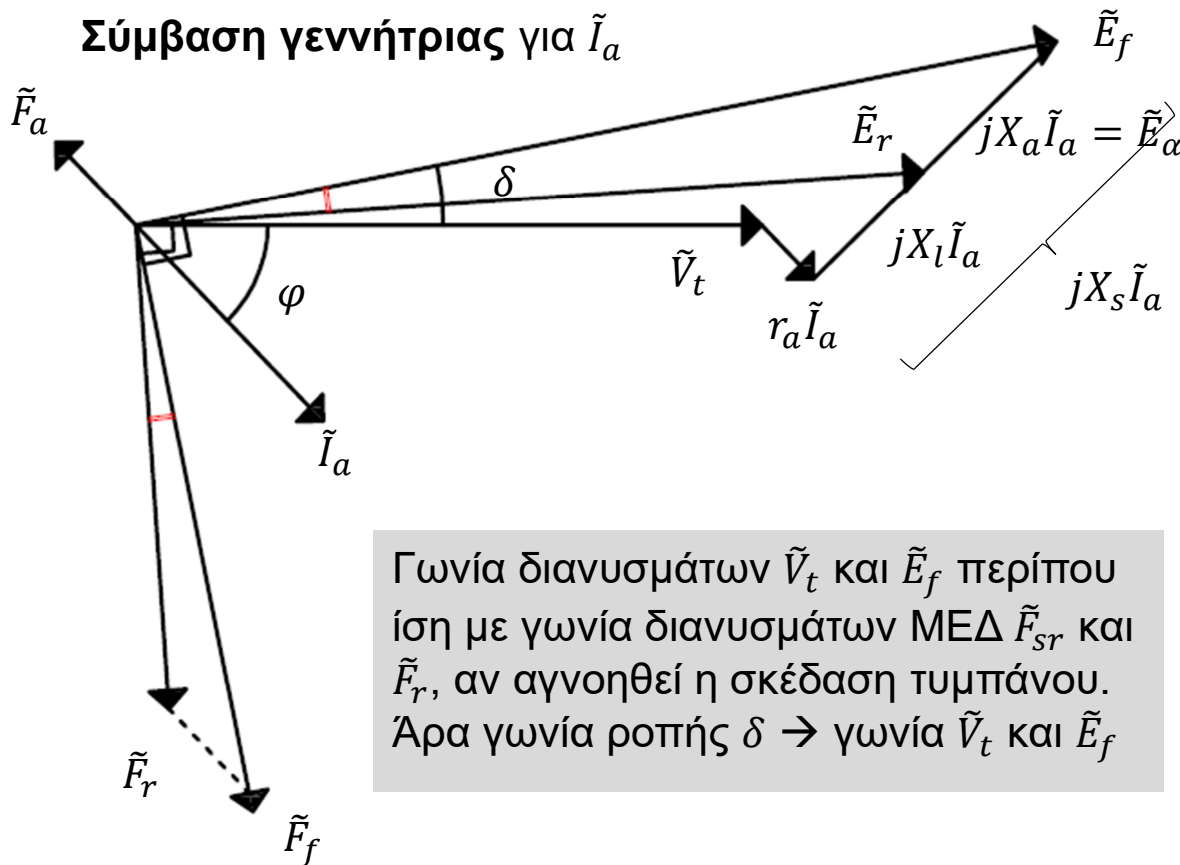
- Λειτουργία γεννήτριας:  
 $E_f$  προπορεύεται της  $V_t$  ( $\delta > 0$ )
- $\tilde{I}_a$  μεταπορεύεται τάσης  $\tilde{V}_t$   
**Παραγωγή αέργου ισχύος**  
(τροφοδότηση επαγωγικού φορτίου)
- **Υπερδιέγερση**  
Υψηλή τάση διέγερσης ( $E_f \cos \delta > V_t$ )



## Διανυσματικό διάγραμμα: Γεννήτρια σε υπερδιέγερση

$$\tilde{E}_f = \tilde{V}_t + (r_a + jX_s)\tilde{I}_a$$

Σύμβαση γεννήτριας για  $\tilde{I}_a$



Γωνία διανυσμάτων  $\tilde{V}_t$  και  $\tilde{E}_f$  περίπου ίση με γωνία διανυσμάτων ΜΕΔ  $\tilde{F}_{sr}$  και  $\tilde{F}_r$ , αν αγνοηθεί η σκέδαση τυμπάνου. Άρα γωνία ροπής  $\delta \rightarrow$  γωνία  $\tilde{V}_t$  και  $\tilde{E}_f$

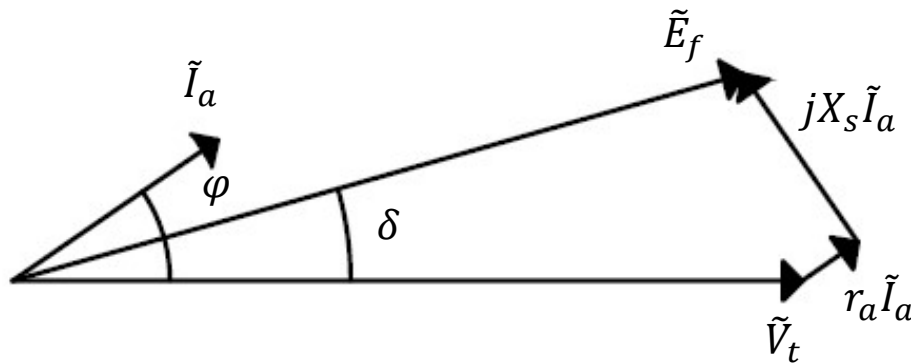
### Βασικές διαπιστώσεις

- Λειτουργία γεννήτριας:  $E_f$  προπορεύεται της  $V_t$  ( $\delta > 0$ )
- $\tilde{I}_a$  μεταπορεύεται τάσης  $\tilde{V}_t$   
**Παραγωγή αέργου ισχύος**  
(τροφοδότηση επαγωγικού φορτίου)
- **Υπερδιέγερση**  
Υψηλή τάση διέγερσης  
( $E_f \cos \delta > V_t$ )





## Γεννήτρια σε υποδιέγερση



$$\tilde{E}_f = \tilde{V}_t + (r_a + jX_s)\tilde{I}_a$$

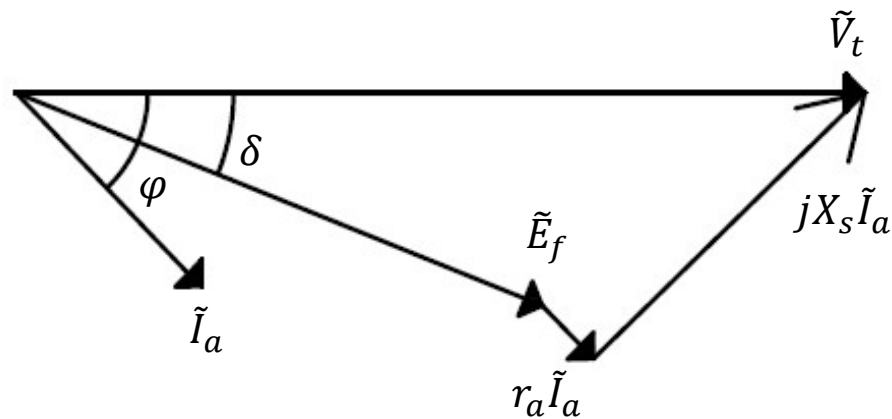
Σύμβαση γεννήτριας για  $\tilde{I}_a$

### Βασικές διαπιστώσεις

- Λειτουργία γεννήτριας:  
 $E_f$  προπορεύεται της  $V_t$  ( $\delta > 0$ )
- $\tilde{I}_a$  προπορεύεται τάσης  $\tilde{V}_t$   
**Κατανάλωση αέργου ισχύος**  
(τροφοδότηση χωρητικού φορτίου)
- **Υποδιέγερση:**  
Χαμηλή τάση διέγερσης  
( $E_f \cos \delta < V_t$ )



## Κινητήρας σε υποδιέγερση



$$\tilde{V}_t = \tilde{E}_f + (r_a + jX_s)\tilde{I}_a$$

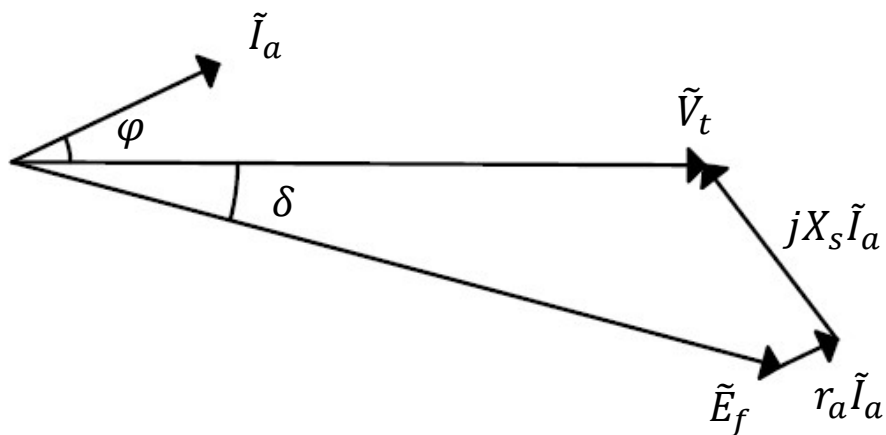
Σύμβαση κινητήρα για  $\tilde{I}_a$

### Βασικές διαπιστώσεις

- Λειτουργία κινητήρα:  $E_f$  μεταπορεύεται της  $V_t$  ( $\delta < 0$ )
- $\tilde{I}_a$  μεταπορεύεται της  $\tilde{V}_t$ : **κατανάνωση αέργου ισχύος** (φορτίο επαγωγικού Σ.Ι.)
- **Υποδιέγερση**: Χαμηλή τάση διέγερσης ( $E_f \cos \delta < V_t$ )



## Κινητήρας σε υπερδιέγερση



$$\tilde{V}_t = \tilde{E}_f + (r_a + jX_s)\tilde{I}_a$$

Σύμβαση κινητήρα για  $\tilde{I}_a$

### Βασικές διαπιστώσεις

- Λειτουργία κινητήρα:  
 $E_f$  μεταπορεύεται της  $V_t$  ( $\delta < 0$ )
- $\tilde{I}_a$  προπορεύεται τάσης  $\tilde{V}_t$   
**Παραγωγή αέργου ισχύος**  
(φορτίο χωρητικού Σ.Ι.)
- **Υπερδιέγερση:**  
Υψηλή τάση διέγερσης  
( $E_f \cos \delta > V_t$ )



## Γενικές διαπιστώσεις

**ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ:** Θετική γωνία ροπής  $\delta$  ( $E_f$  προπορεύεται της  $V_t$ )

**ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ:** Αρνητική γωνία ροπής  $\delta$  ( $E_f$  μεταπορεύεται της  $V_t$ )

**Ροή ενεργού ισχύος** στη σύγχρονη μηχανή εξαρτάται από τη γωνία ροπής

**ΥΠΕΡΔΙΕΓΕΡΜΕΝΗ** σύγχρονη μηχανή: παράγει άεργο ισχύ

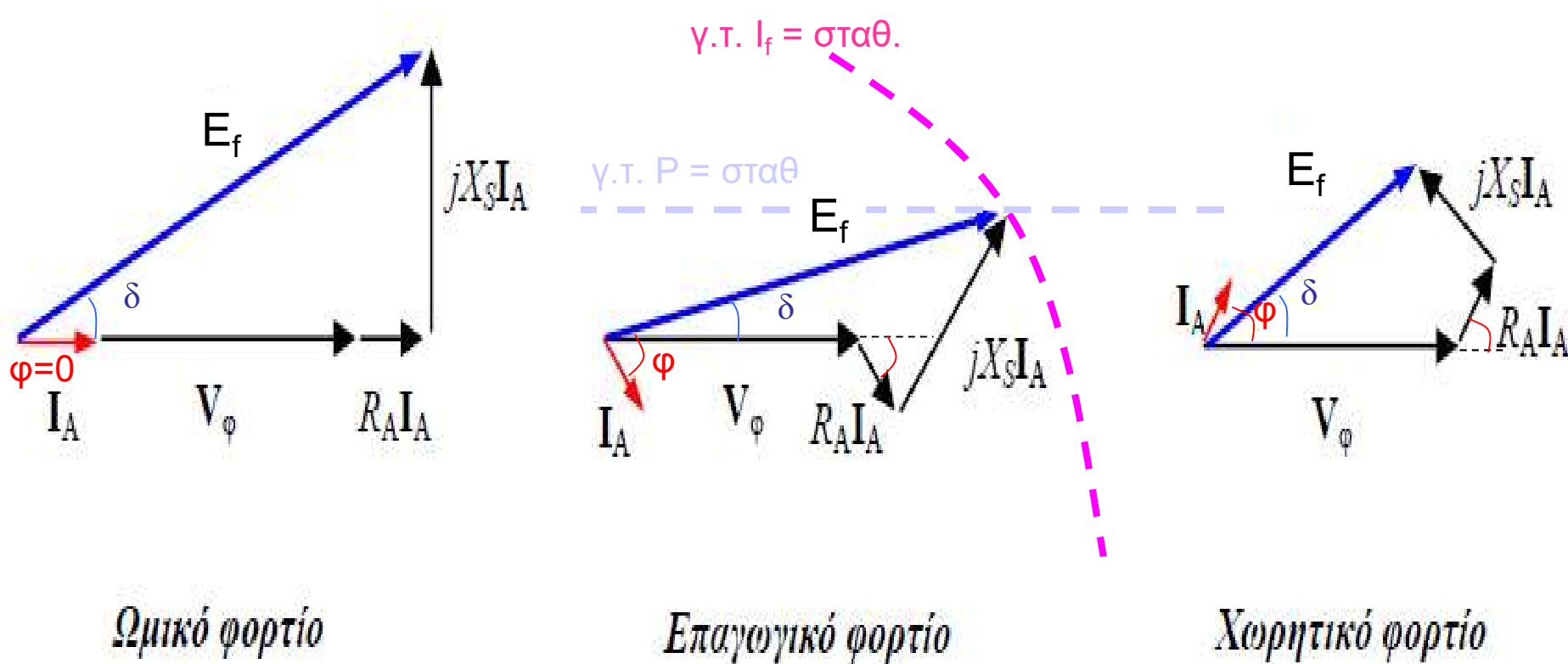
**ΥΠΟΔΙΕΓΕΡΜΕΝΗ** σύγχρονη μηχανή: καταναλώνει άεργο ισχύ

(ισχύει για γεννήτρια ή κινητήρα)

**Έλεγχος άεργου ισχύος** (ισοδύναμα του συντελεστή ισχύος) της σύγχρονης μηχανής γίνεται μέσω της διέγερσης

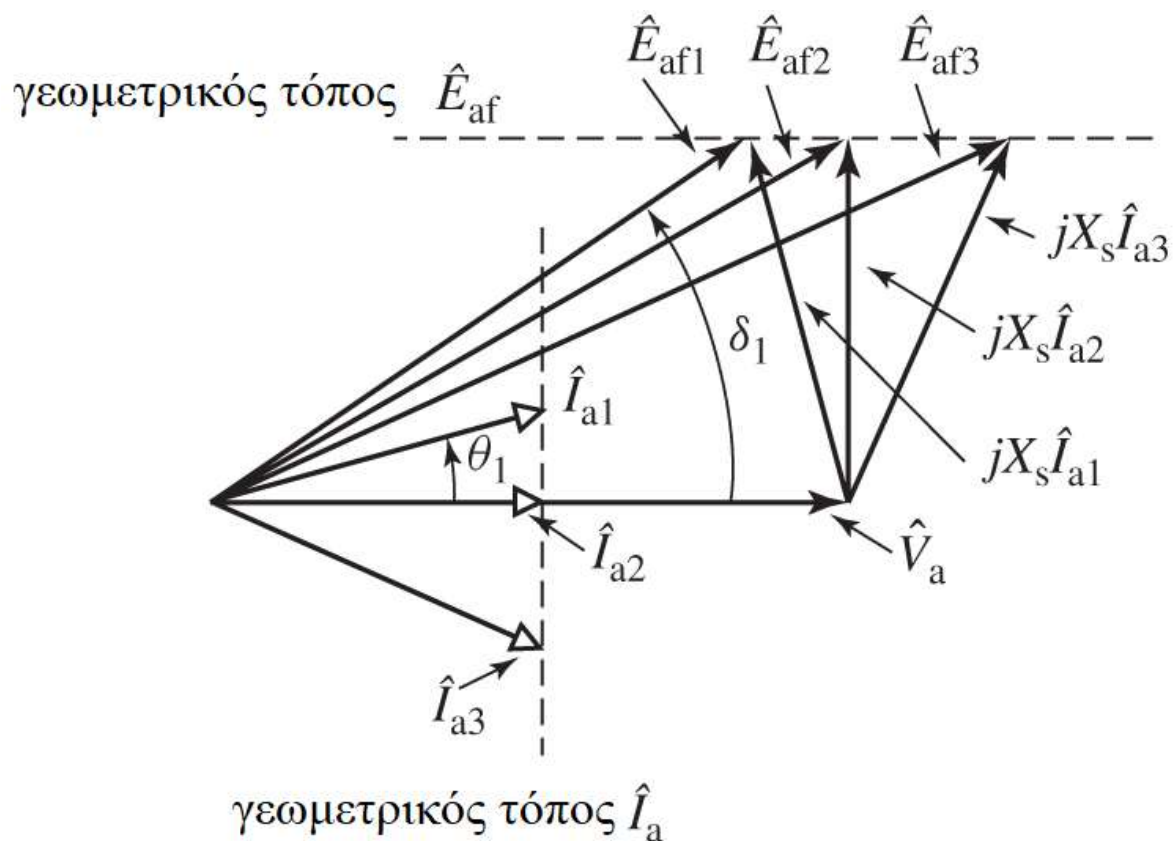


## Διανυσματικά διαγράμματα γεννήτριας για διάφορους τύπους φορτίου



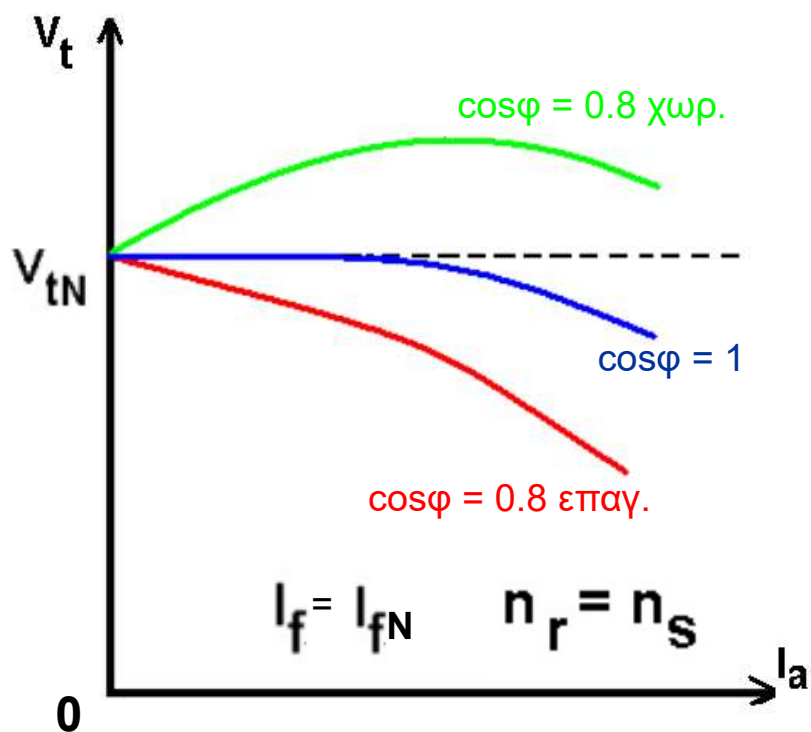


## Μεταβολή διεγέρσεως γεννήτριας συνδεδεμένης σε ζυγούς σταθερής τάσεως με σταθερή κινητήρια ροπή

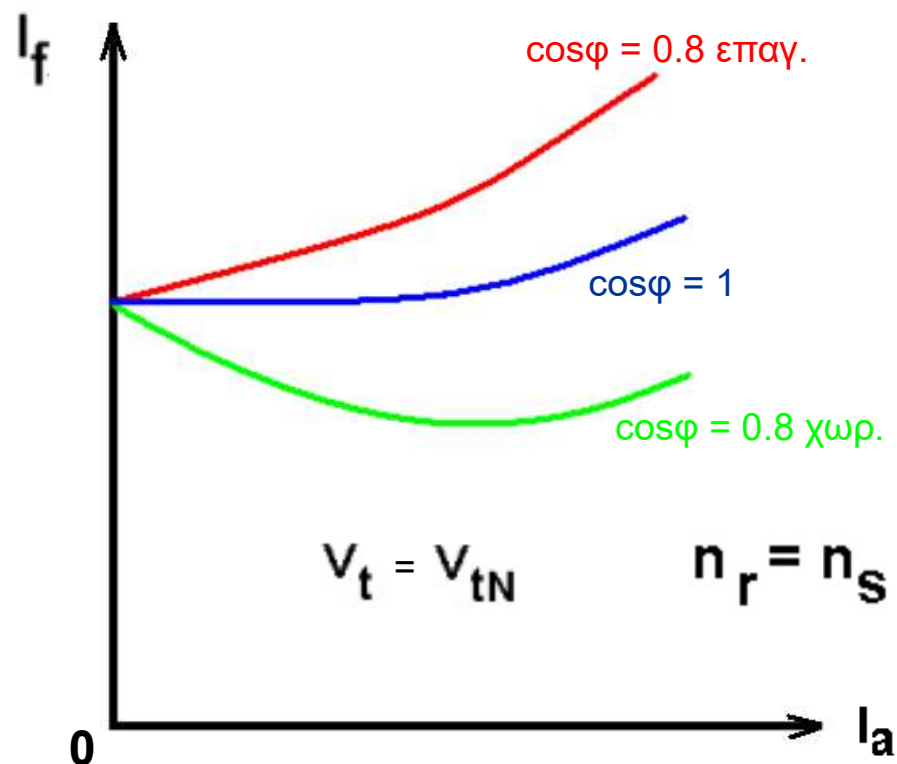




## Απομονωμένη Λειτουργία Σύγχρονης Γεννήτριας



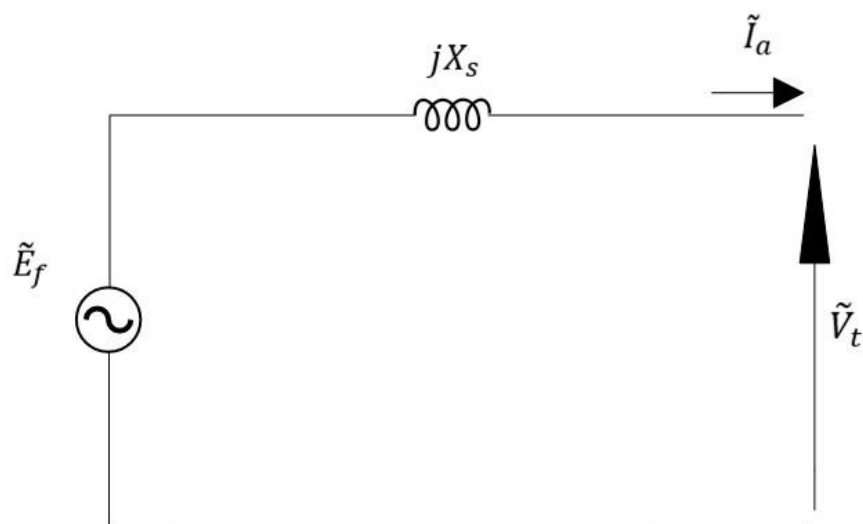
Χαρακτηριστικές φορτίσεως



Χαρακτηριστικές ρυθμίσεως



## Σχέση ισχύος – γωνίας $\delta$ (γωνία ισχύος/ροπής), $P = P(\delta)$

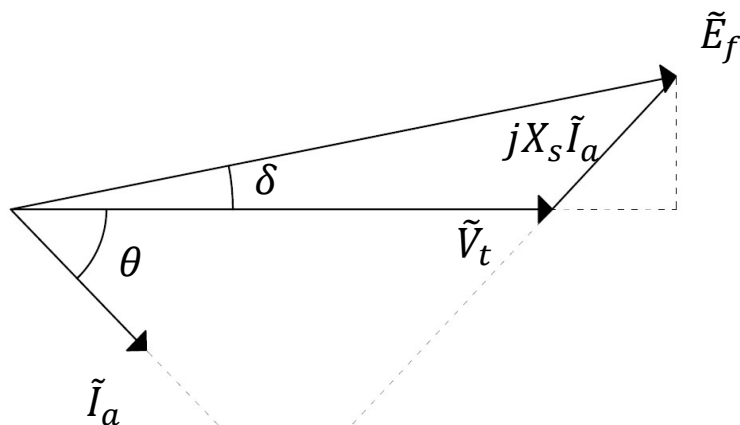


- Όλα τα μεγέθη είναι σε α.μ.
- Σύμβαση γεννήτριας
- Αμελητέα αντίσταση τυμπάνου

$$\tilde{S}_t = P_t + jQ_t = \tilde{V}_t \cdot \tilde{I}_a^*$$

$$\tilde{E}_f = \tilde{V}_t + jX_s \tilde{I}_a$$

$$\Rightarrow \tilde{S}_t = \tilde{V}_t \cdot \frac{\tilde{E}_f^* - \tilde{V}_t^*}{-jX_s}$$



Γωνία  $\delta$ : από  $\tilde{V}_t \rightarrow \tilde{E}_f$   
(θετική για λειτουργία γεννήτριας  $\rightarrow \tilde{E}_f$  προηγείται της  $\tilde{V}_t$ )





Αναφορά η  $\tilde{V}_t$ :  $\tilde{V}_t = V_t \angle 0^\circ$ . Τότε  $\tilde{E}_f = E_f(\cos\delta + j\sin\delta)$  και:

$$\tilde{S}_t = j \cdot \frac{V_t E_f (\cos\delta - j\sin\delta) - V_t^2}{X_s} \Rightarrow$$

$$\tilde{S}_t = \frac{V_t E_f (j\cos\delta + \sin\delta) - jV_t^2}{X_s} \Rightarrow$$

$$\tilde{S}_t = \frac{V_t E_f}{X_s} \sin\delta + j \frac{V_t E_f \cos\delta - V_t^2}{X_s} = P + jQ$$

$$P = \frac{V_t E_f}{X_s} \sin\delta$$

$$Q = \frac{V_t E_f}{X_s} \cos\delta - \frac{V_t^2}{X_s}$$

Σχέσεις για **ανά μονάδα τιμές** και **σύμβαση γεννήτριας**



Σε απόλυτα μεγέθη (και σύμβαση γεννήτριας):

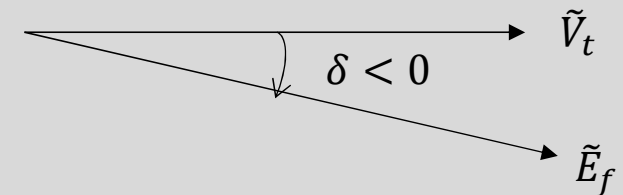
$$P = \frac{3V_t^\varphi E_f^\varphi}{X_s} \sin\delta = \frac{V_t^\pi E_f^\pi}{X_s} \sin\delta$$

$\varphi$ : φασικά μεγέθη  
 $\pi$ : πολικά μεγέθη

$$Q = \frac{3V_t^\varphi E_f^\varphi}{X_s} \cos\delta - \frac{3V_t^{\varphi^2}}{X_s} = \frac{V_t^\pi E_f^\pi}{X_s} \cos\delta - \frac{V_t^{\pi^2}}{X_s}$$

### Λειτουργία κινητήρα (απορρόφηση ενεργού ισχύος)

Σχέσεις  $P(\delta)$  εφαρμόζονται κανονικά με  $P < 0$  και  $\delta < 0$  ( $\tilde{V}_t$  προπορεύεται της  $\tilde{E}_f$ )

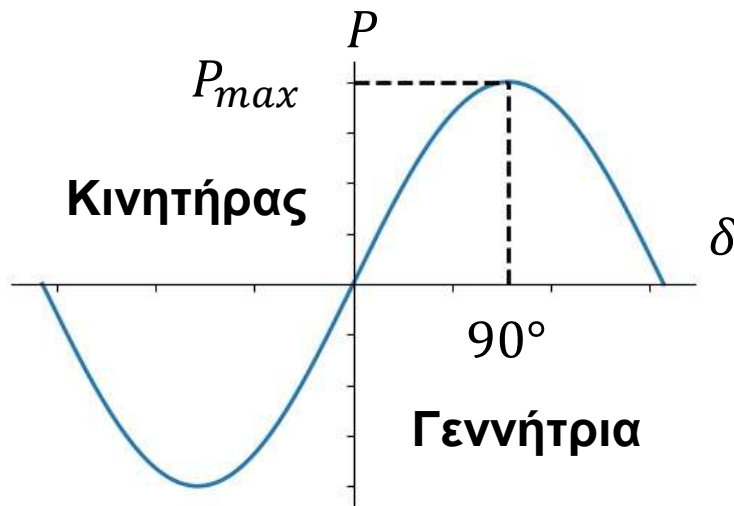


### Απορρόφηση αέργου ισχύος (υποδιέγερση)

Σχέσεις  $Q(\delta)$  εφαρμόζονται με  $Q < 0$



## Χαρακτηριστική ισχύος – γωνίας ισχύος, $P = P(\delta)$ ΣΜ σε άπειρο ζυγό ( $V_t = \text{σταθ}$ )



$$P = \frac{V_t E_f}{X_s} \sin \delta$$

$\delta$ : γωνία ισχύος/ροπής της μηχανής

Γεννήτρια:  $\delta > 0 \Leftrightarrow \tilde{E}_f$  προηγείται της  $\tilde{V}_t$

Κινητήρας:  $\delta < 0 \Leftrightarrow \tilde{E}_f$  έπεται της  $\tilde{V}_t$

**Ισχύς αποσυγχρονισμού** (για σταθερή  $V_t$  και δεδομένη  $E_f$ )

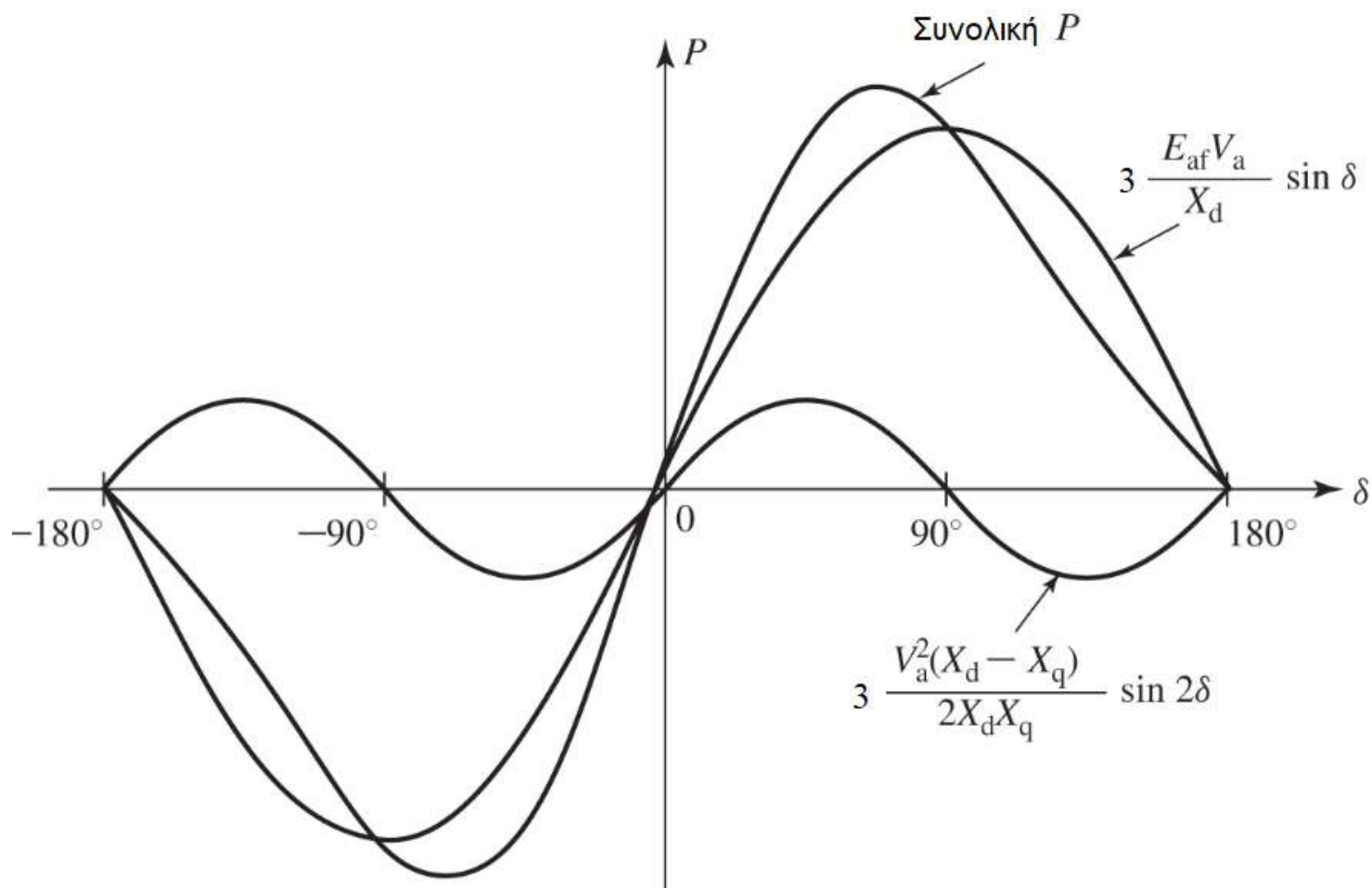
Max ισχύς (όριο στατικής ευστάθειας):  $P_{max} = \frac{V_t E_f}{X_s}$  για  $\delta = \pm 90^\circ$

Για  $\delta > 90^\circ$ : αποσυγχρονισμός (ταχύτητα δρομέα  $\neq$  σύγχρονης)

Συνήθως  $P_{max} \sim 2 - 2.5$  α.μ.  $\rightarrow$  Σε κανονική λειτουργία  $\delta$  χαμηλή (π.χ.  $\sim 30^\circ$ )



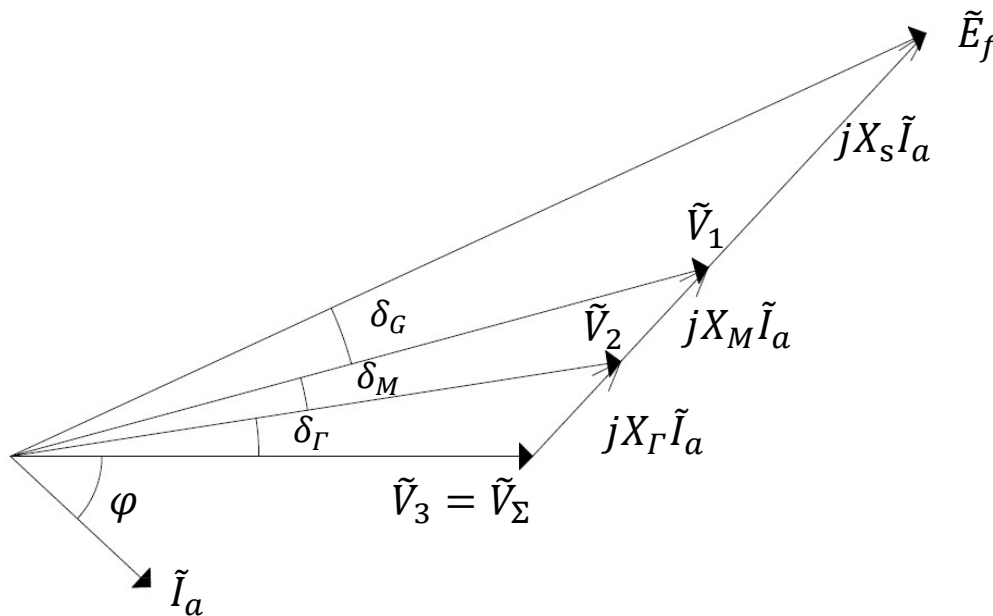
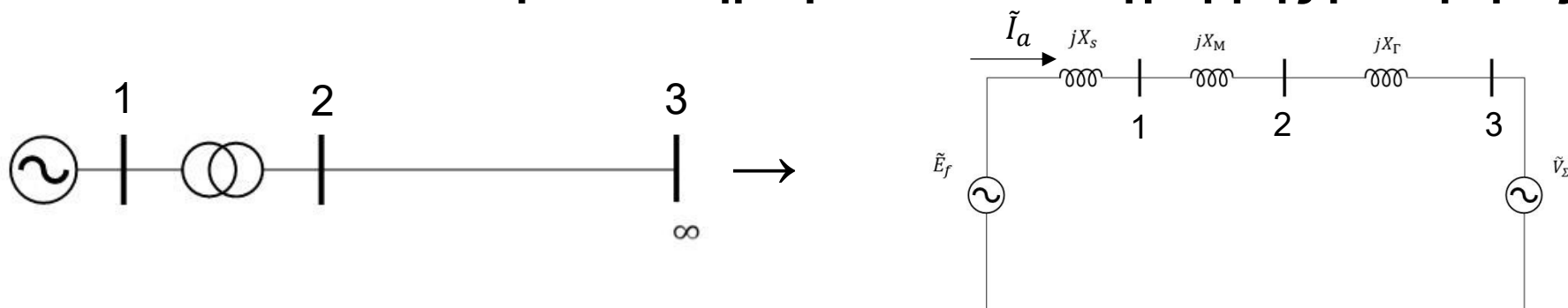
## Χαρακτηριστική Ενεργού Ισχύος – Γωνίας Ροπής Σύγχρονων Μηχανών Έκτυπου Δρομέα





## Εφαρμογή σε πιο σύνθετες περιπτώσεις

### 1. Σ/Γ συνδέεται σε άπειρο σύστημα μέσω Μ/Σ και γραμμής μεταφοράς





### Διακινούμενη ενεργός ισχύς:

$$P = \frac{E_f V_k}{X_k} \sin \delta_k$$

όπου  $k$  οποιοσδήποτε ζυγός από τους 1, 2 ή 3, αρκεί να χρησιμοποιηθεί:

- Η αντίστοιχη γωνία  $\delta_k$  μεταξύ τάσης  $V_k$  και της  $E_f$
- Η αντίδραση  $X_k$  που παρεμβάλλεται μεταξύ της ΗΕΔ  $E_f$  και του ζυγού  $k$

Παράδειγμα:

$$P = \frac{E_f V_1}{X_S} \sin \delta_G = \frac{V_1 V_2}{X_M} \sin \delta_M = \frac{V_1 V_3}{X_M + X_\Gamma} \sin(\delta_M + \delta_\Gamma) = \frac{E_f V_3}{X_S + X_M + X_\Gamma} \sin(\delta_G + \delta_M + \delta_\Gamma)$$

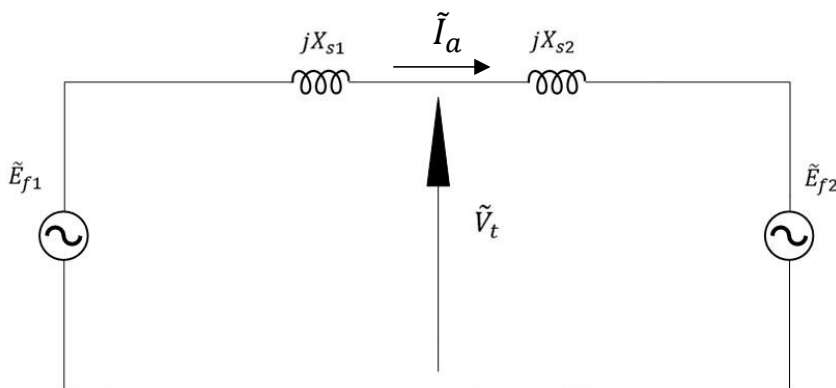
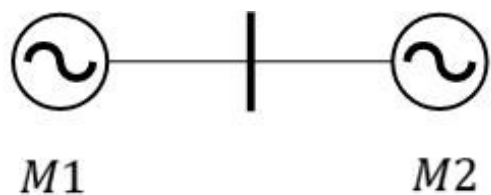
### Μέγιστη ισχύς (αποσυγχρονισμού της γεννήτριας):

$$P_{max} = \frac{E_f V_\Sigma}{X_S + X_M + X_\Gamma}$$

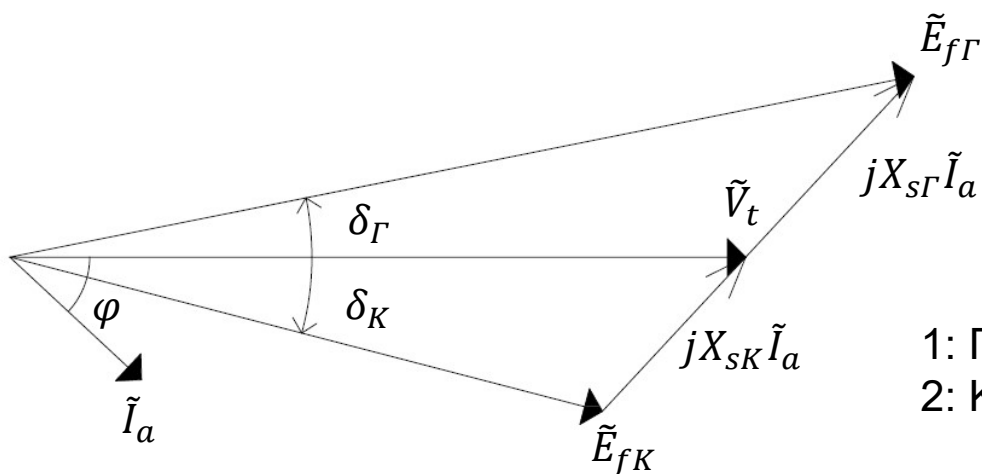
- Χρησιμοποιούνται οι σταθερές τάσεις στα άκρα του συστήματος, οι οποίες δεν εξαρτώνται από τη διακινούμενη ισχύ



## 2. Σύγχρονη γεννήτρια τροφοδοτεί σύγχρονο κινητήρα



$$P_{max} = \frac{E_{f1}E_{f2}}{X_{s1} + X_{s2}}$$



1: Γεννήτρια (Γ)  
2: Κινητήρας (Κ)



## Σύγχρονη μηχανή σε άπειρο ζυγό

- Έλεγχος **αέργου ισχύος** ( $Q$ )  $\leftrightarrow$  Μεταβολή **ρεύματος διέγερσης**
  - **Υπερδιέγερση**: παραγωγή αέργου ισχύος
  - **Υποδιέγερση**: κατανάλωση ή απορρόφηση αέργου ισχύος
- Έλεγχος **ενεργού ισχύος** ( $P$ )  $\leftrightarrow$  Μεταβολή **μηχανικής ισχύος** στον άξονα
  - Γωνία ισχύος  $\delta$  δεν είναι μεταβλητή ελέγχου

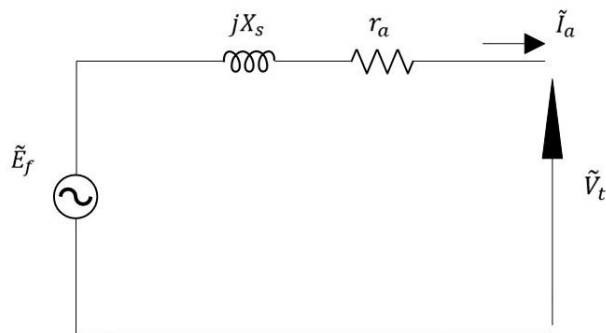
## Σύγχρονη γεννήτρια σε απομονωμένη λειτουργία

- Μεταβολή **ρεύματος διέγερσης**  $\rightarrow$  Ρύθμιση **τάσης** ακροδεκτών
  - Συντελεστής ισχύος επιβάλλεται από εξωτερικό φορτίο
- Μεταβολή **μηχανικής ισχύος**  $\rightarrow$  Ρύθμιση **συχνότητας**
  - Ρυθμιστές τάσεως και στροφών/συχνότητας απαραίτητοι





## Ισχύς και Ροπή



Ηλεκτρομαγνητική ισχύς και ροπή (εσωτερική ισχύς ή ισχύς διακένου)

$$P_{em} = \text{Re}\{\tilde{E}_f \cdot \tilde{I}_a^*\} = T_{em}\omega_s$$

$$\omega_s = \frac{\omega_e}{P/2}: \text{Σύγχρονη ταχύτητα}$$

$$r_a \approx 0 \rightarrow P_{em} = P_t = \frac{V_t E_f}{X_s} \sin\delta$$

Μηχανική ισχύς και ροπή:

$$P_m = T_m \cdot \omega_s$$

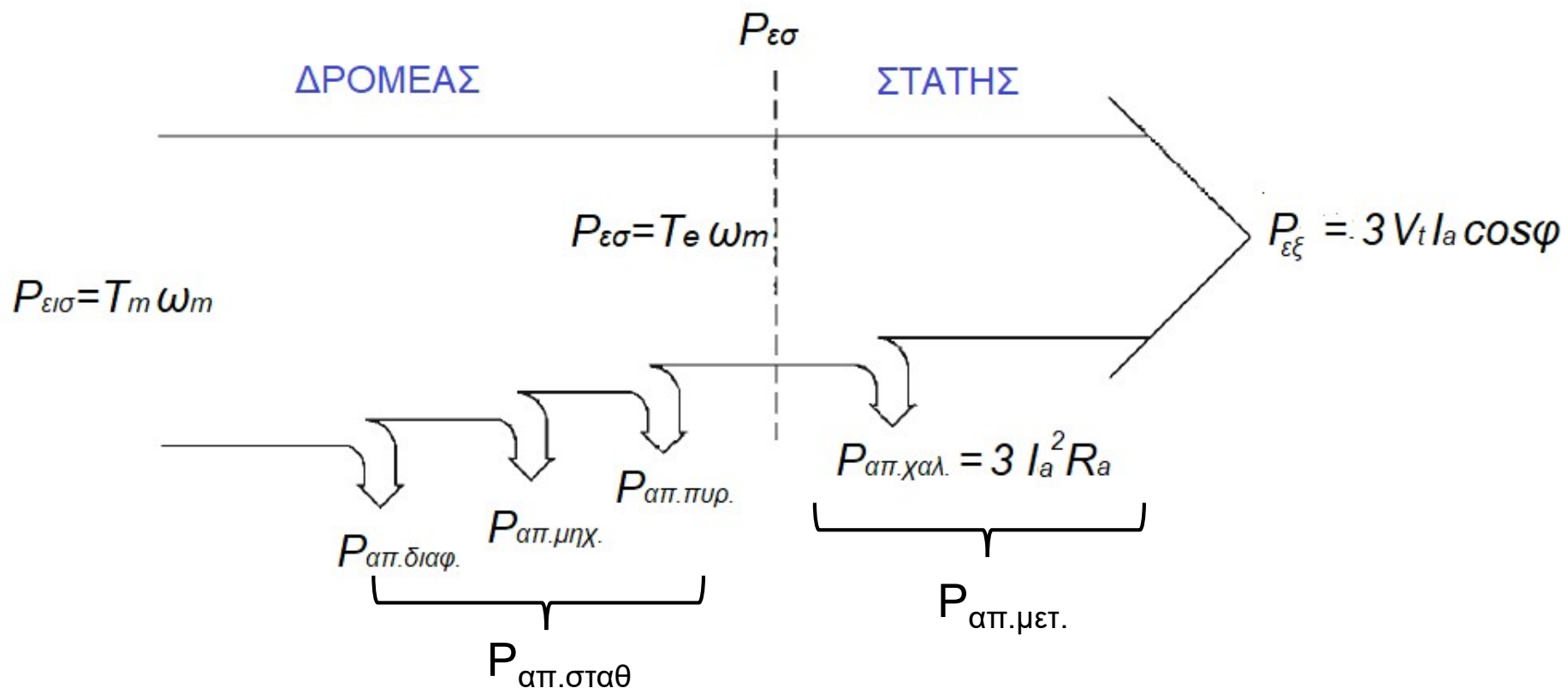
Μηχανικές απώλειες:

$$P_m = P_{em} \pm P_{\alpha\pi,m} \text{ και } T_m = T_{em} \pm T_{\alpha\pi,m}$$

[Κινητήρας: (-), Γεννήτρια: (+)]



## Απώλειες σύγχρονης γεννήτριας



$$\text{ΒΑ: } \eta = \frac{P_{\text{εξ}}}{P_{\text{εισ}}} = \frac{P_{\text{εξ}}}{P_{\text{εξ}} + P_{\text{απ.σταθ.}} + P_{\text{απ.μετ.}}}$$