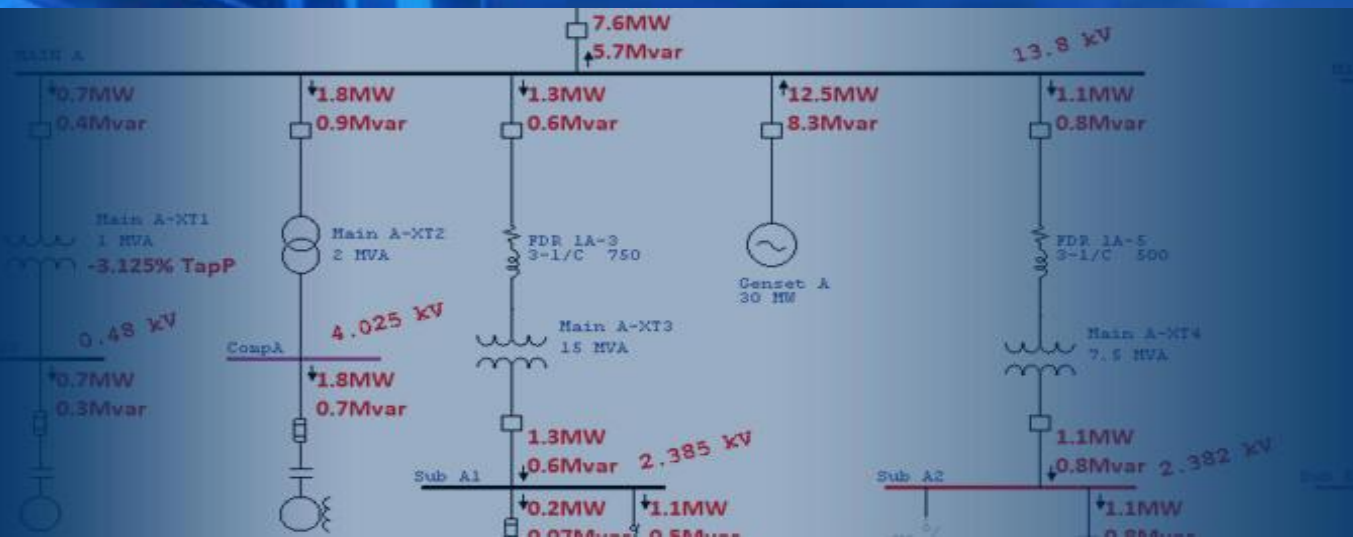


# Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (2<sup>η</sup> ενότητα)

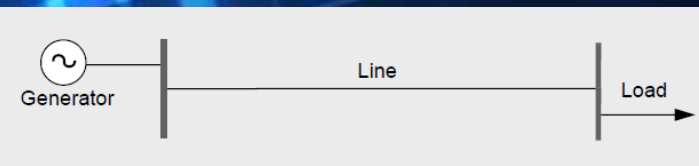
Παναγής Βοβός  
Επικ. Καθηγητής

**Μοντέλα βασικών συνιστωσών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας**

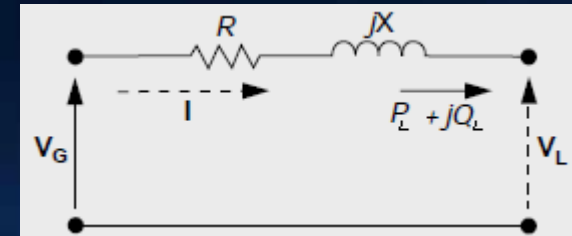
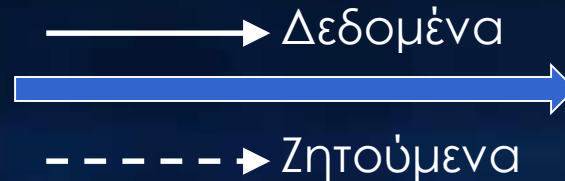


# Γιατί χρειάζονται τα μοντέλα των συνιστωσών ;

- Στο παρακάτω απλό πρόβλημα ανάλυσης ροής φορτίου ήδη χρησιμοποιούμε ένα μοντέλο:



Τυπική αναπαράσταση ΣΗΕ



Μονογραμμικό ισοδύναμο

- Εδώ, η γραμμή μεταφοράς αντικαθίσταται με μία αντίσταση ( $R$ ) και μία αντίδραση ( $jX$ )
- Μοντέλα υπάρχουν και για τις υπόλοιπες βασικές συνιστώσες του ΣΗΕ: γεννήτριες, φορτία, μετασχηματιστές
- Αλλά και για πιο σπάνιες συνιστώσες (π.χ. FACTS)
- Η πολυπλοκότητα/αναλυτικότητα των μοντέλων εξαρτάται από την επιθυμητή ακρίβεια ή ταχύτητα επίλυσης του προβλήματος

# Μετασχηματιστής ισχύος

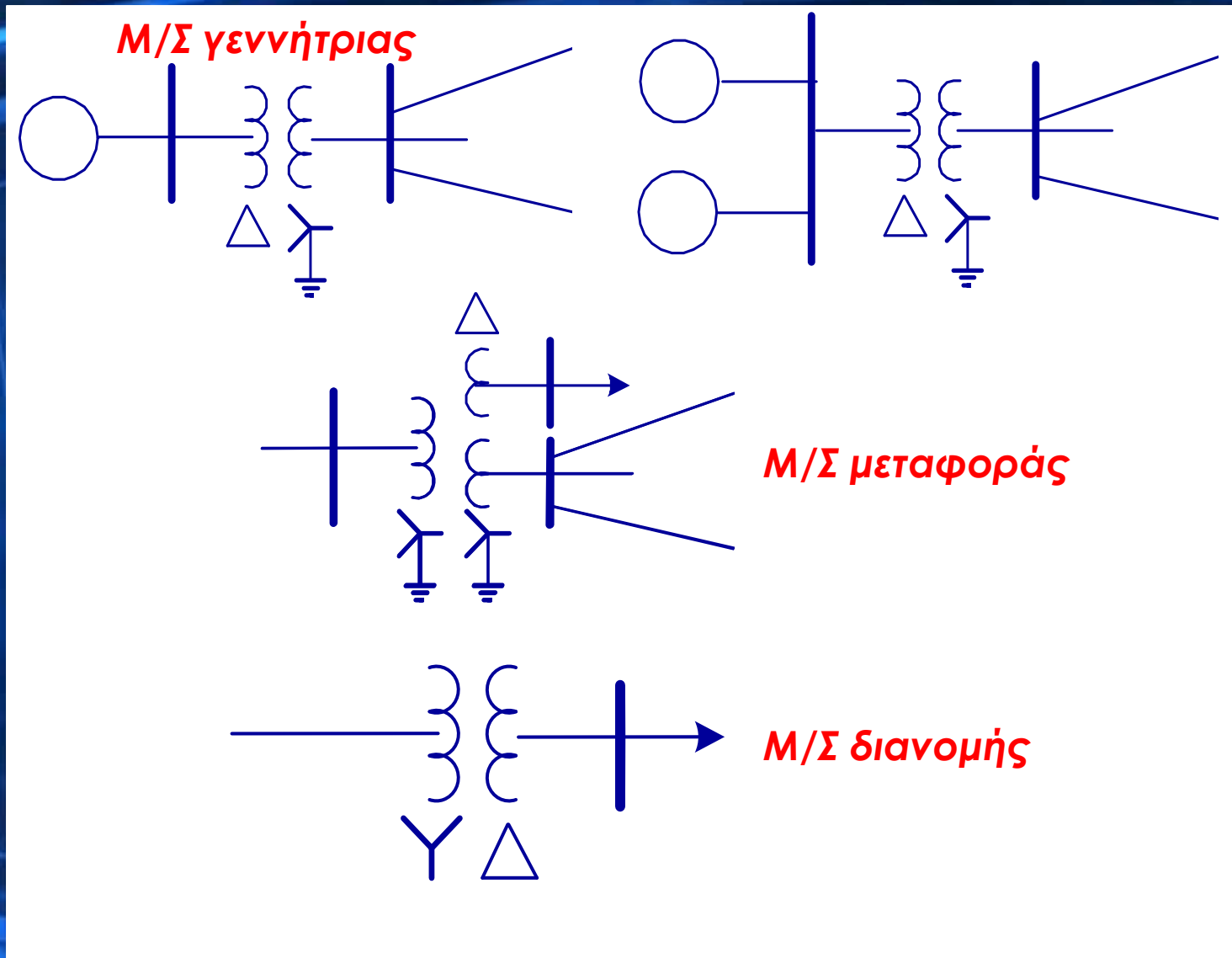


- Οι σύγχρονες γεννήτριες παράγουν ισχύ σε σχετικά χαμηλή τάση.
- Η μεταφορά της απαιτεί όσο το δυνατόν πιο υψηλή τάση, ώστε να:
  - ελαχιστοποιούνται οι απώλειες
  - να αυξάνεται η ικανότητα φόρτισης των γραμμών
- Η ισχύς όμως μπορεί να καταναλωθεί μόνο σε χαμηλά επίπεδα τάσης.
- Η ανύψωση (παραγωγή>μεταφορά) και ο υποβιβασμός (μεταφορά>κατανάλωση) της τάσης γίνεται με μετασχηματιστές ισχύος.

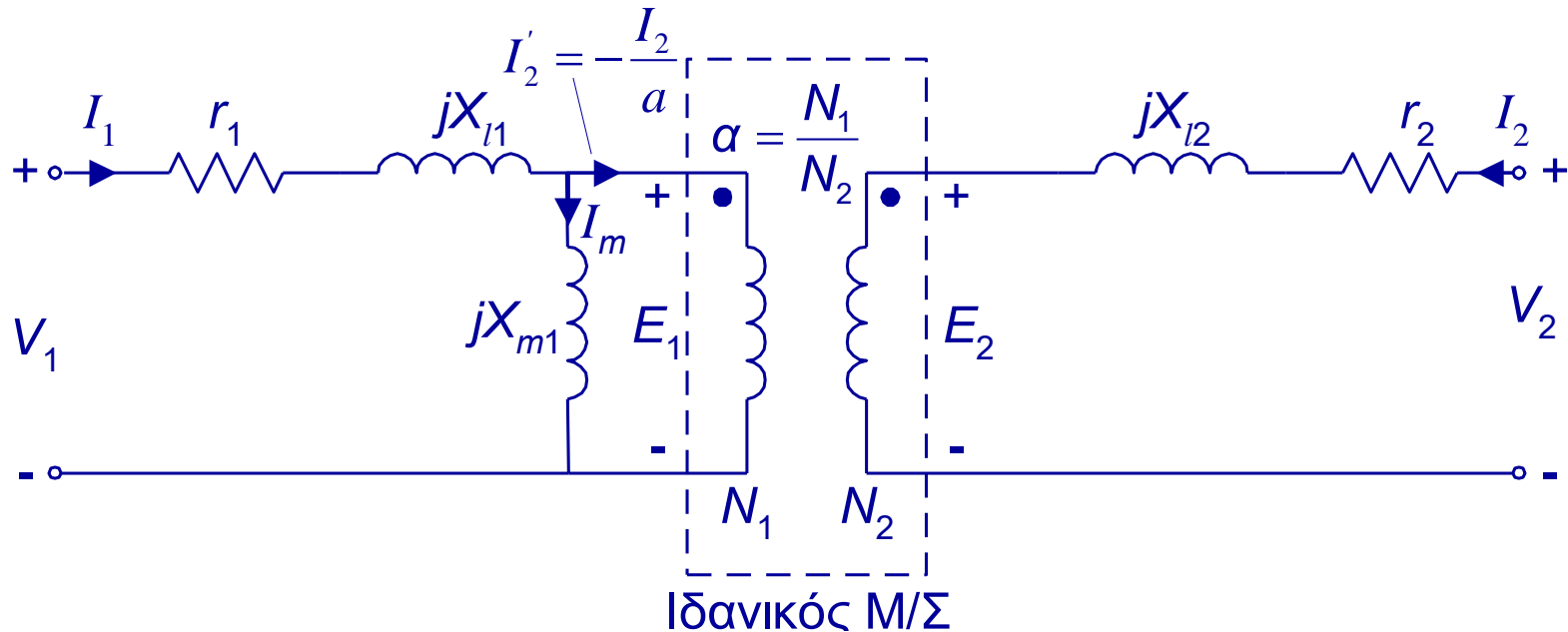


- Οι μεγάλης ισχύος μετασχηματιστές κατασκευάζονται συνήθως από 3 ξεχωριστούς μονοφασικούς (γιατί;).
- Αποτελούνται από ένα ή περισσότερα τυλίγματα συζευγμένα μαγνητικά μεταξύ τους.
- Η σύζευξη γίνεται με πυρήνα από μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό υπό μορφή ελασμάτων.
- Στον ίδιο πυρήνα μπορεί να υπάρχουν ένα ή περισσότερα τυλίγματα.
- Με ένα τύλιγμα και δυνατότητα λήψεων ονομάζονται αυτομετασχηματιστές.

# Συνδεσμολογίες μετασχηματιστής ισχύος



# Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή



$r_1, r_2$  = οι αντιστάσεις τυλιγμάτων πρωτεύοντος-δευτερεύοντος

$X_{l1}, X_{l2}$  = οι αντιδράσεις σκέδασης τυλιγμάτων πρωτεύοντος-δευτερεύοντος

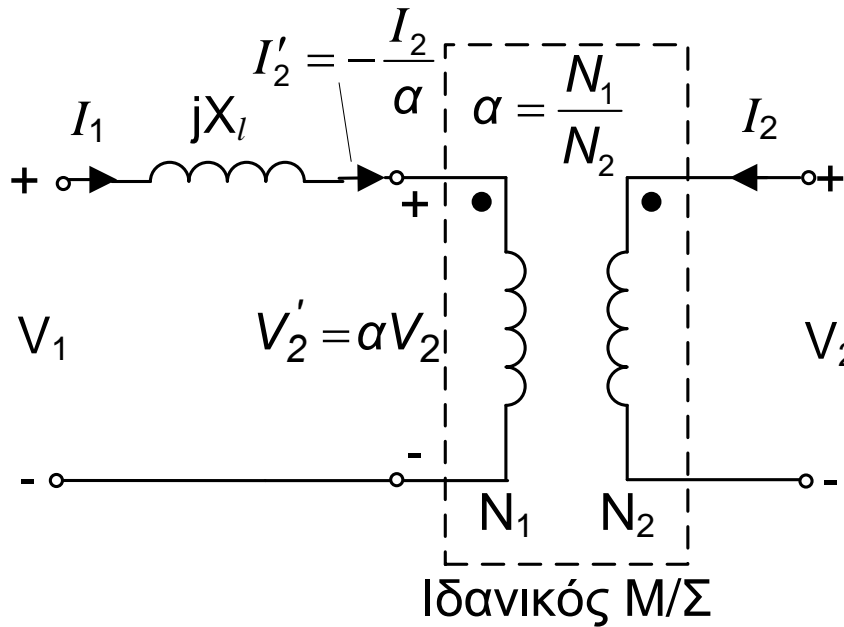
$X_{m1}$  = η αντίδραση μαγνήτισης αναφερόμενη στο πρωτεόν

Διαπιστώσεις για μεγάλους μετασχηματιστές ισχύος:

1. Το ρεύμα μαγνήτισης είναι μικρό σε σχέση με το ρεύμα φορτίου.
2. Οι αντιστάσεις τυλιγμάτων είναι μικρές σε σχέση με τις αντιδράσεις σκέδασης.

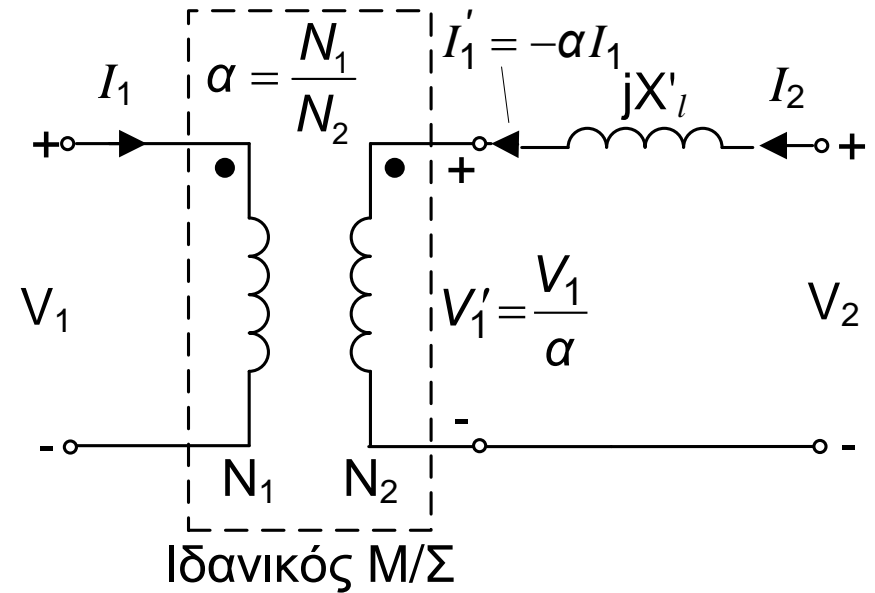
Άρα:  $r_1, r_2, X_{m1}$  μπορούν να απαλειφθούν.

# Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή (συνολική σκέδαση)



**Αναφερόμενο στο πρωτεύον**

$$X_l = X_{l1} + \alpha^2 X_{l2}$$

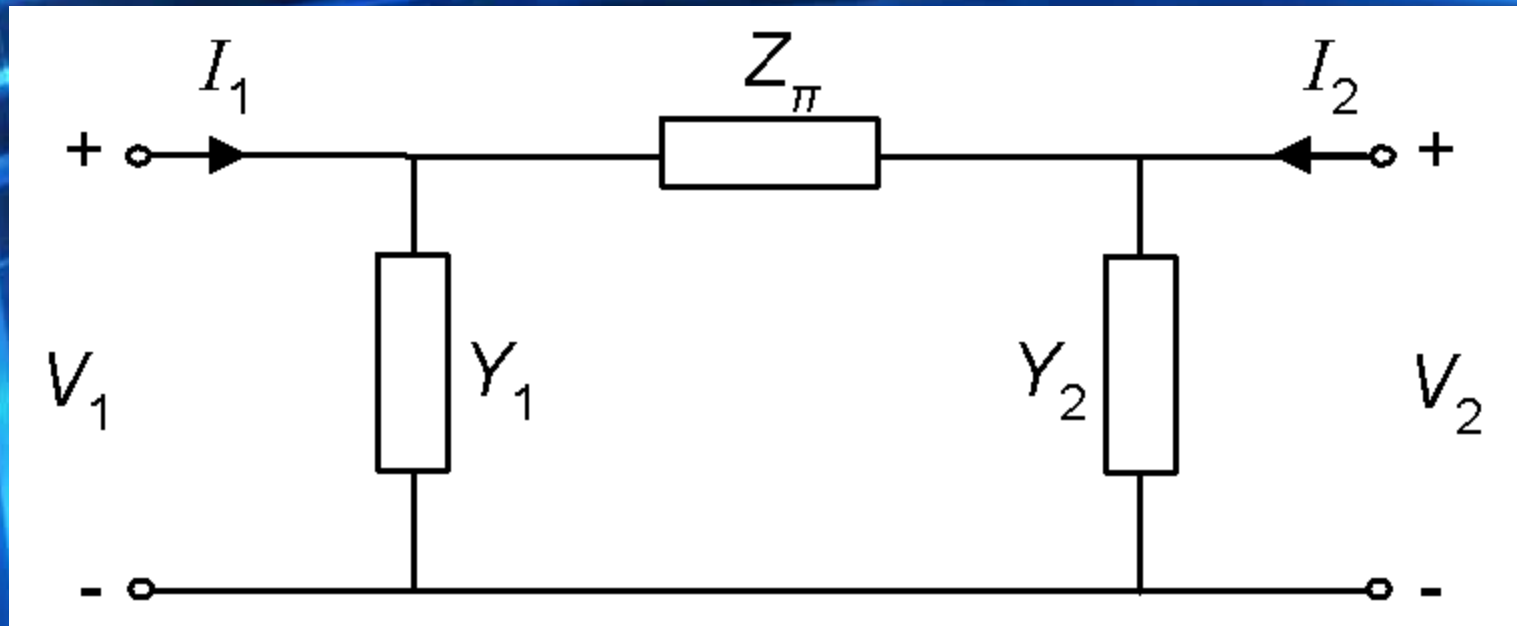


**Αναφερόμενο στο δευτερεύον**

$$X'_l = X_l / \alpha^2 = X_{l1} / \alpha^2 + X_{l2}$$

$$X_l = \alpha^2 X'_l$$

# π-ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή



- Οι τιμές των στοιχείων του π-ισοδυνάμου υπολογίζονται ώστε να έχει την ίδια τερματική συμπεριφορά με το προηγούμενο ισοδύναμο.
- Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται συχνά σε μελέτες ροής φορτίου.

$$Z_{\pi} = \frac{jX_l}{a} = jX'_l a \quad \boxed{X_l = a^2 X'_l}$$

$$Y_1 = \frac{1}{jX_l}(1 - a) = \frac{1}{jX'_l} \frac{1 - a}{a^2}$$

$$Y_2 = \frac{1}{jX_l} a(a - 1) = \frac{1}{jX'_l} \frac{a - 1}{a} = -aY_1$$

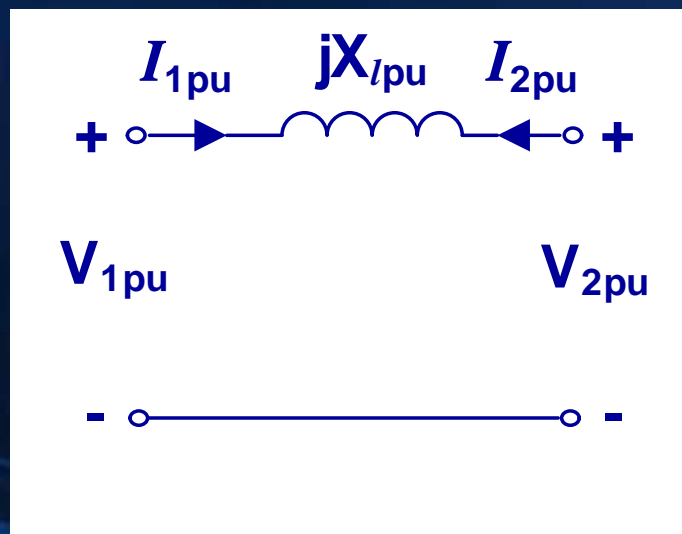
# Ανά μονάδα ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων

**Αν:**

1. η βάση ισχύος είναι ίδια και στις δύο πλευρές του μετασχηματιστή **και**
2. οι βάσεις τάσης έχουν λόγο ίσο με το λόγο μετασχηματισμού,

**Τότε:**

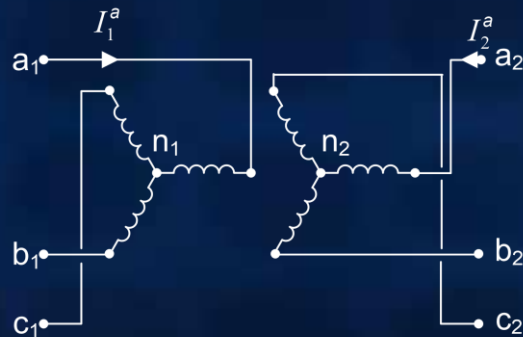
1. καταργείται ο ιδανικός μετασχηματιστής και
2. η ανά μονάδα τιμή της αντίδρασης σκέδασης έχει την ίδια τιμή σε όποια πλευρά και αν θεωρηθεί ανηγμένη (δηλαδή  $X_{lpu} = X'_{lpu}$ ).



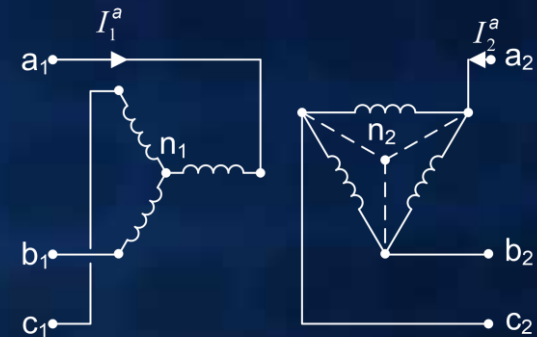


# Ανά μονάδα μονοφασικό ισοδύναμο τριφασικού μετασχηματιστή

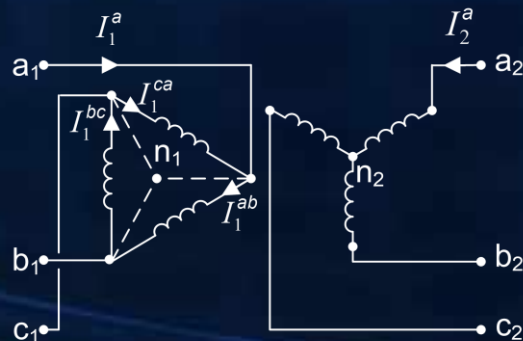
- Τα μονοφασικά ισοδύναμα αναφέρονται σε φασικές ποσότητες (τάσεις ως προς τον ουδέτερο και φασικά ρεύματα).
- Άρα όλες οι πιθανές συνδεσμολογίες των τριφασικών μετασχηματιστών πρέπει να μετατραπούν σε ισοδύναμες Υ-Υ με κατάλληλους ενεργούς λόγους σπειρών.



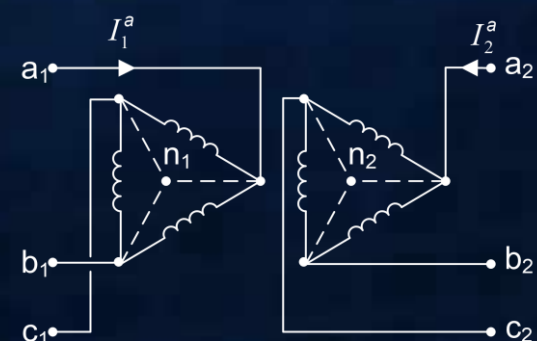
Υ-Υ συνδεσμολογία



Υ-Δ συνδεσμολογία



Δ-Υ συνδεσμολογία



Δ-Δ συνδεσμολογία

# Λόγος φασικών τάσεων ( $t$ ) ισοδύναμων Υ-Υ συνδεσμολογιών

- $V_1, V_2$  : φασικές τάσεις πρωτεύοντος-δευτερεύοντος ισοδύναμου Υ-Υ
- $a$  : λόγος σπειρών πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πραγματικού μετασχηματιστή

Συνδεσμολογία  
μετασχηματιστή

$t=V_1/V_2$  ισοδυνάμου

Υ-Υ

$$N_1 : N_2 = a$$

Υ-Δ

$$(N_1 : N_2 / \sqrt{3})e^{-j30^\circ} = \sqrt{3}ae^{-j30^\circ}$$

Δ-Υ

$$(N_1 / \sqrt{3} : N_2)e^{-j30^\circ} = \frac{a}{\sqrt{3}}e^{-j30^\circ}$$

Δ-Δ

$$(N_1 / \sqrt{3} : N_2 / \sqrt{3}) = a$$

Αναλυτικά  
§6.10

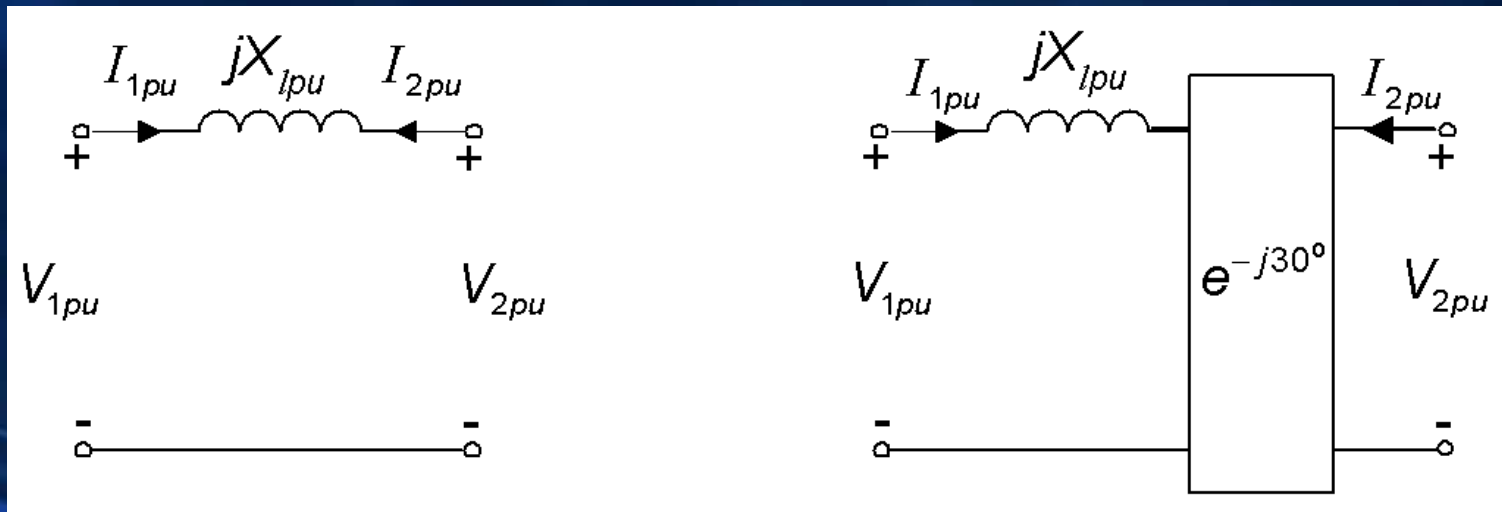
**30°** : στους Υ-Δ και Δ-Υ μετασχηματιστές οι φάσεις μαρκάρονται έτσι, ώστε οι τάσεις ως προς τον ουδέτερο από τους ακροδέκτες του δευτερεύοντος να προηγούνται κατά 30° των τάσεων ως προς ουδέτερο από τους αντίστοιχους ακροδέκτες πρωτεύοντος (ANSI).

# Ανά μονάδα μονοφασικό ισοδύναμο τριφασικού μετασχηματιστή

Θέτοντας :

1) βάση ισχύος  $|S_b|_{1\Phi}$  κοινή σε αμφότερες πλευρές του μετασχηματιστή και

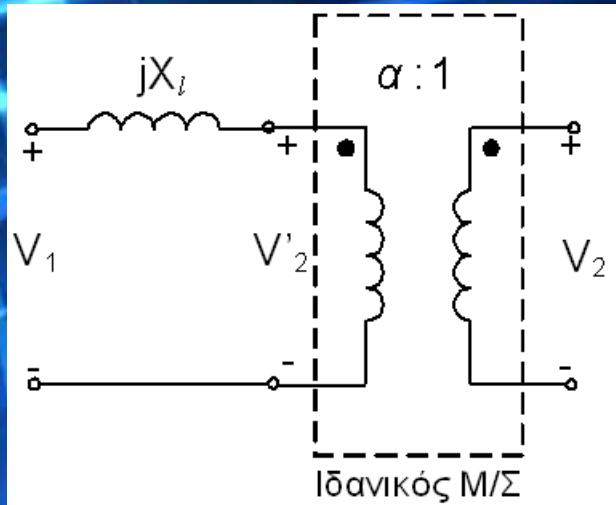
$$2) \frac{|V_{b1}|_{1\Phi}}{|V_{b2}|_{1\Phi}} = \begin{cases} \alpha & \text{για } Y-Y, \Delta-\Delta \text{ συνδεσμολογίες} \\ \sqrt{3}\alpha & \text{για } Y-\Delta \text{ συνδεσμολογίες} \\ \alpha/\sqrt{3} & \text{για } \Delta-Y \text{ συνδεσμολογίες} \end{cases}$$



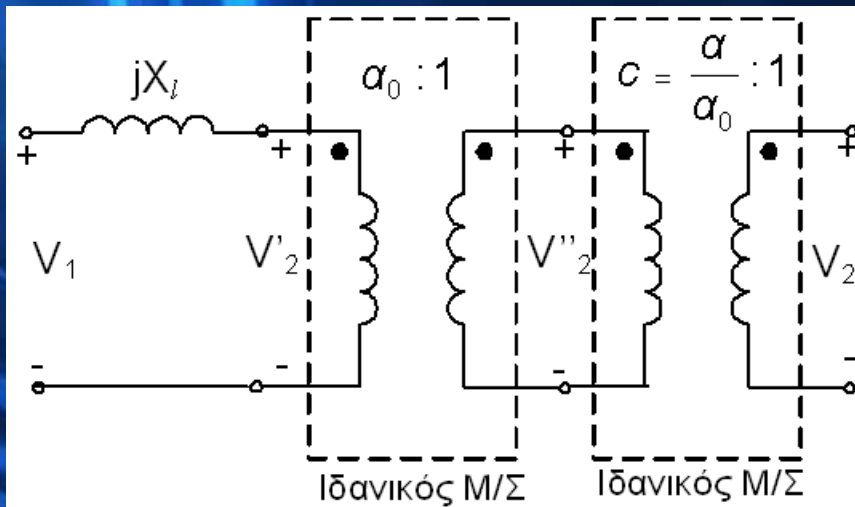
Y-Y, Δ-Δ συνδεσμολογίες

Y-Δ, Δ-Y συνδεσμολογίες

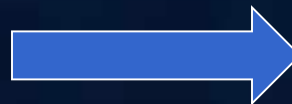
# Ανά μονάδα ισοδύναμο μετασχηματιστή με μη ονομαστικό λόγο μετασχηματισμού ( $\alpha$ )



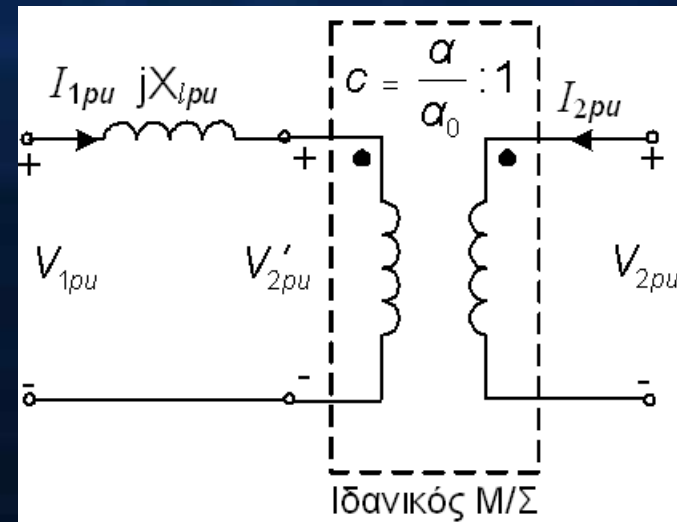
Αν  $\frac{|V_{b1}|_{1\Phi}}{|V_{b2}|_{1\Phi}} = \alpha_0$  είναι ο λόγος των βάσεων των τάσεων στις δύο πλευρές του μετασχηματιστή, τότε :  
αυτός μπορεί να παρασταθεί ισοδύναμα με δύο ιδανικούς μετασχηματιστές σε σειρά.



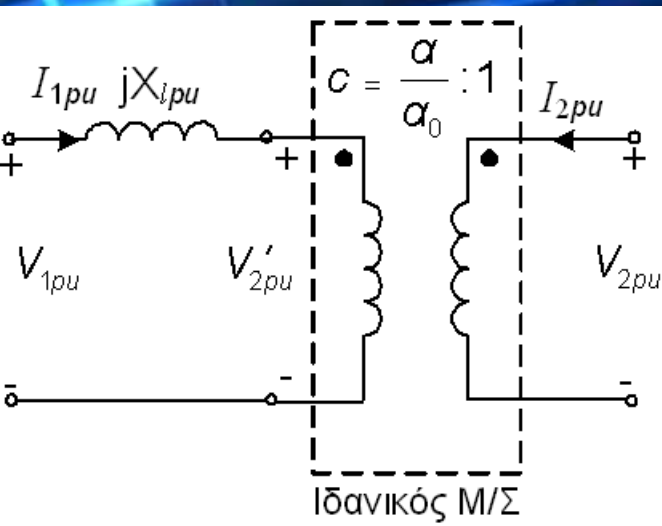
Ανά μονάδα  
ισοδύναμο



ο Μ/Σ με  
λόγο  $\alpha_0$   
«φεύγει»

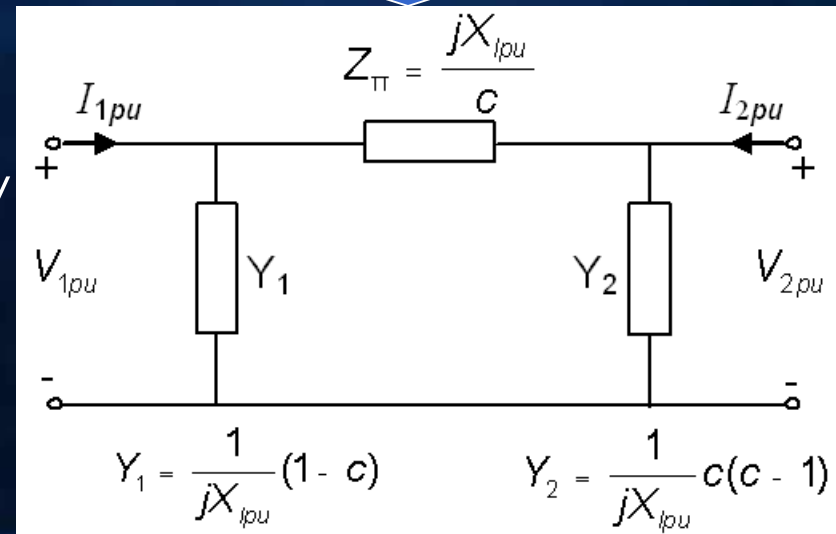


# Ανά μονάδα ισοδύναμο μετασχηματιστή με μη ονομαστικό λόγο μετασχηματισμού ( $\alpha$ )



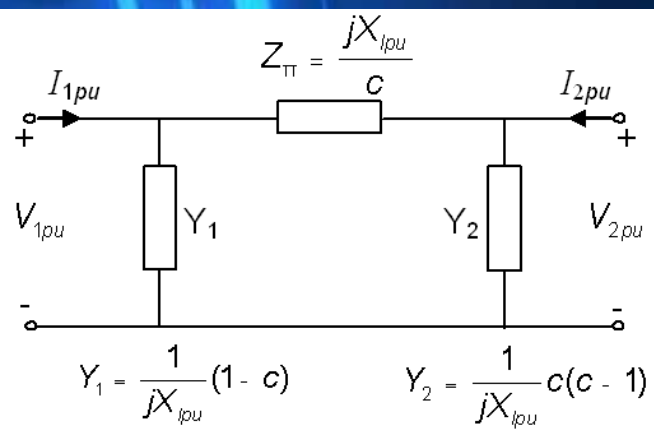
- Σε μελέτες ροής φορτίου οι ιδανικοί μετασχηματιστές είναι πρόβλημα.
- Το π-ισοδύναμο βολεύει.
- Όπως και στον μετασχηματιστή με ονομαστικό λόγο μετασχηματισμού, θα πρέπει η τερματική συμπεριφορά του ισοδυνάμου να διατηρείται. Έτσι:

- Το  $c$  μπορεί να είναι μιγαδικός ή πραγματικός.
- Αν είναι μιγαδικός τότε δεν μπορούμε να κάνουμε το π-ισοδύναμο (βλ. §4.4).

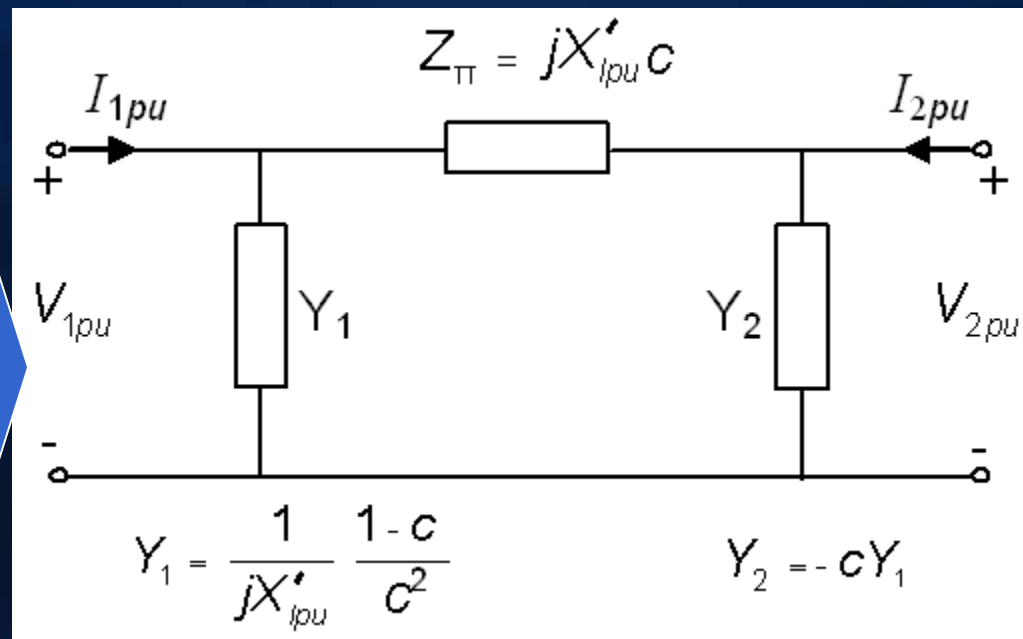


# Ανά μονάδα ισοδύναμο μετασχηματιστή με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού ( $c \rightarrow IR$ )

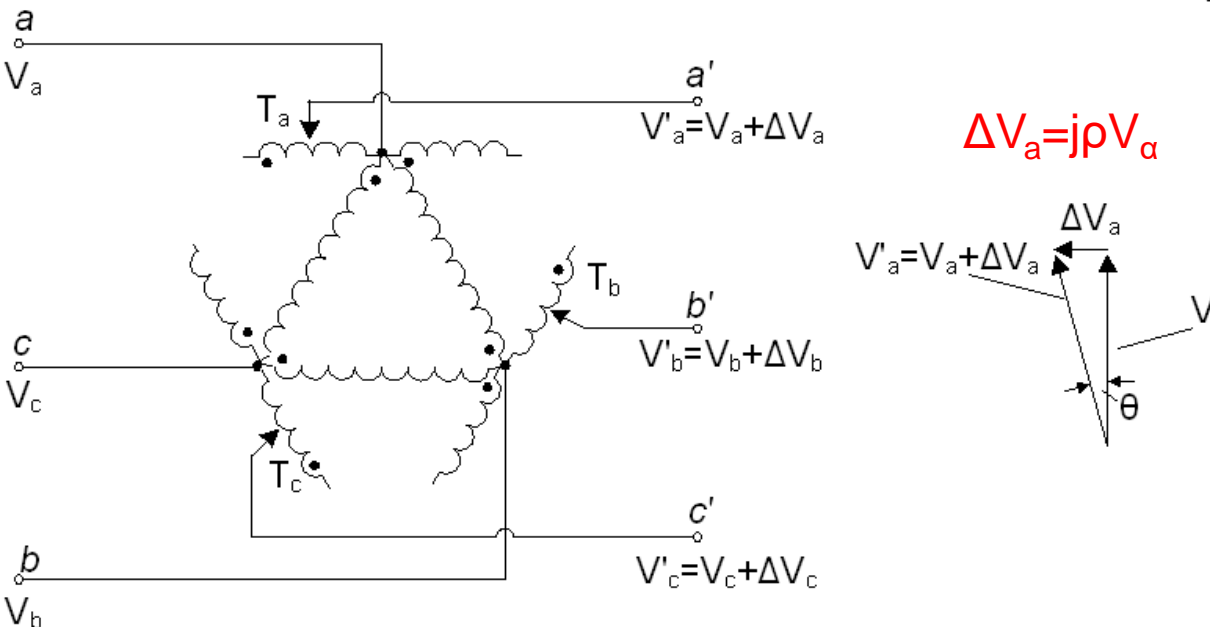
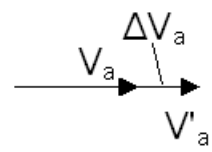
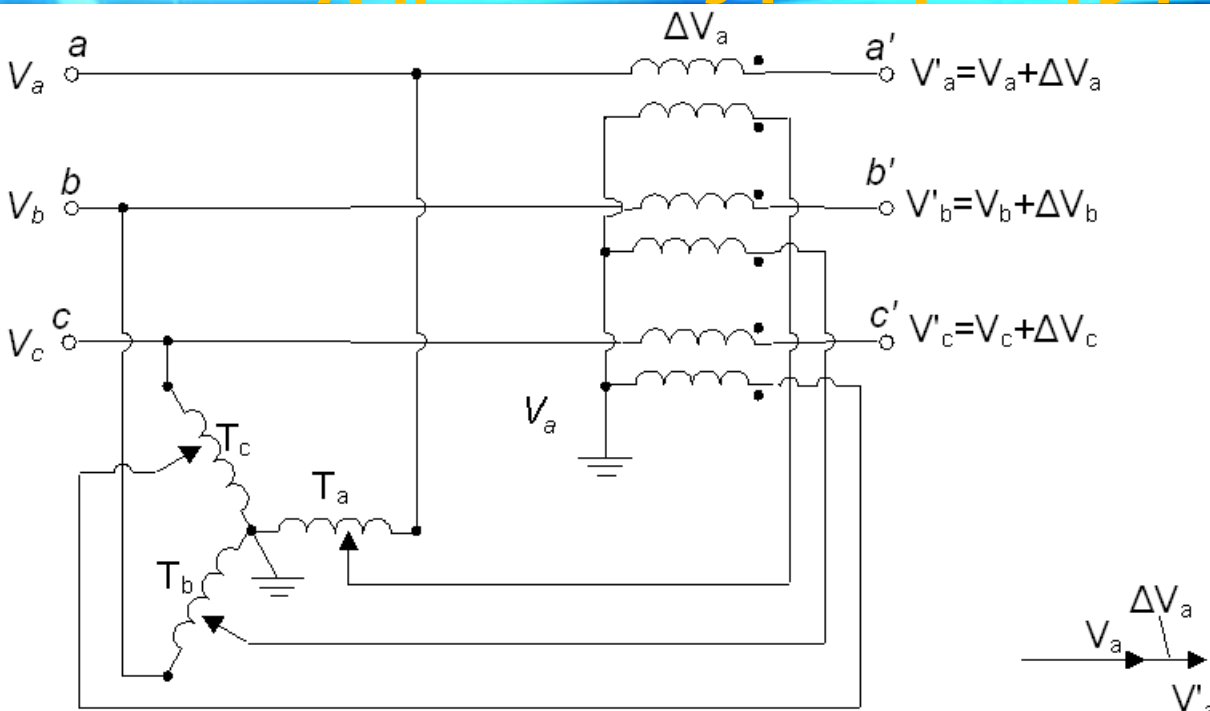
- Χρησιμοποιείται στη ρύθμιση της τάσης φορτίου.
- Συνήθως, μεταβλητές λήψεις υπάρχουν στο πρωτεύον.
- Στο π-ισοδύναμο προτιμάται η αναφορά της ανά μονάδας συνολικής αντίδρασης σκέδασης στο δευτερεύον.
- Τότε αυτή ( $X'_{lpu}$ ) είναι σταθερή και ανεξάρτητη του  $c$ .



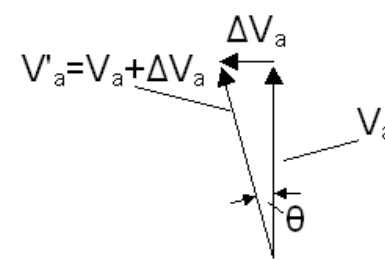
$$X_l = a^2 X'_l \rightarrow X_l = c^2 X'_{lpu}$$



# Μετασχηματιστές ρύθμισης μέτρου και φάσης



$$\Delta V_a = j\rho V_a$$



- Ρύθμιση μέτρου = ρύθμιση ροής άεργης ισχύος
- Το μοντέλο μετασχηματιστή μεταβλητού λόγου ισχύει για  $c = 1/(1+\rho)$
- όπου  $\rho \rightarrow IR$  μικρός αριθμός:  $\Delta V_a = \rho V'_a$
- Ρύθμιση φάσης = ρύθμιση ροής πραγματικής ισχύος
- Για  $\rho \ll 1$ :  $\theta = \tan^{-1} \rho$
- Ισχύει το μοντέλο μετασχηματιστή μεταβλητού λόγου, αλλά όχι το πι-ισοδύναμο γιατί  $c = 1/\angle -\theta$  μιγαδικός.

# Γραμμή μεταφοράς Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

1. *Εν σειρά επαγωγή  $L$ , σε  $H/m$*

Παριστάνει τις τάσεις σειράς που επάγονται στους αγωγούς και προκαλούνται από τα μαγνητικά πεδία που τους περιβάλλουν.

2. *Εγκάρσια χωρητικότητα  $C$ , σε  $F/m$*

Παριστάνει τα εγκάρσια ρεύματα διαρροής μεταξύ των αγωγών που προκαλούνται από τα ηλεκτρικά πεδία που υπάρχουν στο μεταξύ των αγωγών χώρο.

3. *Εν σειρά αντίσταση  $r$ , σε  $\Omega/m$*

Παριστάνει την ωμική αντίσταση του υλικού των αγωγών.



# Τι καθορίζει την επιλογή του μοντέλου της γραμμής μεταφοράς

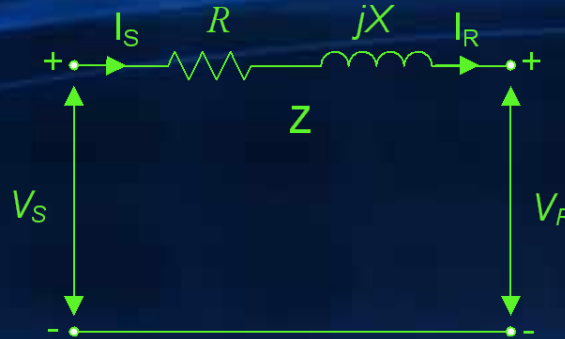
Ο βασικός παράγοντας που καθορίζει τον τρόπο με τον οποίον θα παραστήσουμε μια εναέρια γραμμή μεταφοράς είναι το μήκος της.

Αυτό καθορίζει αν οι παράμετροι θα θεωρηθούν :

- Συγκεντρωμένες σε ένα σημείο.
- Κατανεμημένες σε όλο το μήκος της γραμμής.
- Μη σημαντικές που μπορούν να αγνοηθούν.

# Μοντέλο γραμμής μεταφοράς

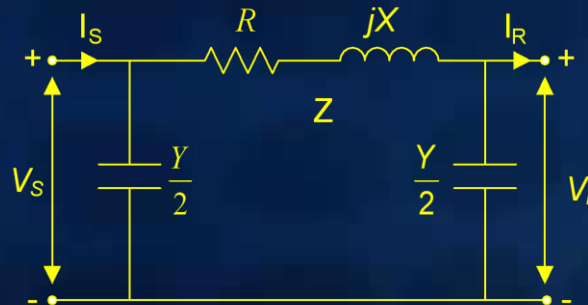
Ισοδύναμο κύκλωμα  
γραμμής μικρού μήκους  
( $l < 80 \text{ km}$ )



$$R = rl$$

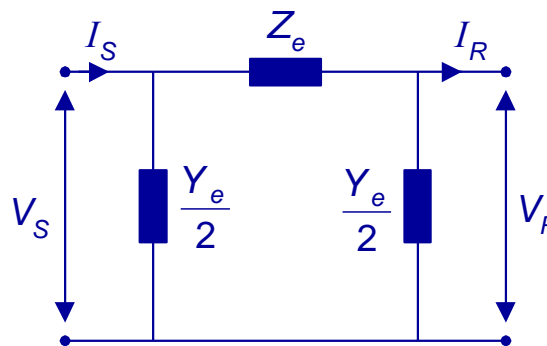
$$X = j\omega Ll$$

Ονομαστικό  $\pi$  ισοδύναμο  
γραμμής μεσαίου μήκους  
( $80 \text{ km} < l < 250 \text{ km}$ )



$$Y = j\omega Cl$$

$\pi$  ισοδύναμο  
γραμμής μεγάλου μήκους  
( $l > 250 \text{ km}$ )



$$Z_e = Z \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l}$$

$$Y_e = Y \frac{\tanh(\gamma l / 2)}{\gamma l / 2}$$

$$Z = zl, Y = yl, \gamma = \sqrt{zy}$$

# Είδη και χαρακτηριστικά φορτίων

## ΕΙΔΗ ΑΠΛΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

- Κινητήρες
- Συσκευές θέρμανσης
- Ηλεκτρονικές συσκευές
- Φωτιστικά

## ΧΑΡΑΚΗΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΛΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

- Μέγεθος
- Συμμετρία (μονοφασικά, τριφασικά)
- Περίοδος χρήσης (κανονική, τυχαία)

## ΧΑΡΑΚΗΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

- Το μέγεθός τους και ο τρόπος μεταβολής τους με το χρόνο μπορούν να προβλεφθούν
- Είναι συμμετρικά
- Μεταβάλλονται αργά με το χρόνο
- Καταναλώνουν άεργο ισχύ
- Εξαρτώνται από τάση και συχνότητα

$$P_L = P_L(f, |V|) \rightarrow \Delta P_L \approx \frac{\partial P_L}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial P_L}{\partial |V|} \Delta |V|$$

$$Q_L = Q_L(f, |V|) \rightarrow \Delta Q_L \approx \frac{\partial Q_L}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial Q_L}{\partial |V|} \Delta |V|$$

Χαρακτηριστικές παράμετροι περιγραφής της συμπεριφοράς κάθε φορτίου γύρω από την ονομαστική τάση και συχνότητα.

# Εκθετικό στατικό μοντέλο φορτίων

- Εξάρτηση φορτίου από την τάση: εκθετικό μοντέλο
- Ο δείκτης «0» σημαίνει αρχική συνθήκη λειτουργίας
- Σταθερές  $a, b \rightarrow \mathbb{N}$
- $a=b=0$  σταθερής ισχύος
- $a=b=1$  σταθερού ρεύματος
- $a=b=2$  σταθερής σύνθετης αντίστασης

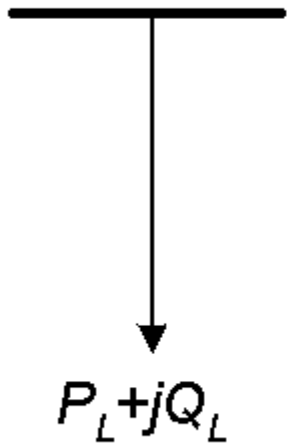
$$\left\{ \begin{array}{l} P_L = P_{L0} \left( \frac{|V|}{|V_0|} \right)^a \\ Q_L = Q_{L0} \left( \frac{|V|}{|V_0|} \right)^b \end{array} \right.$$

Εξάρτηση φορτίου από την τάση **και** την συχνότητα  
( $K_{pf}$  και  $K_{qf}$  σταθερές)

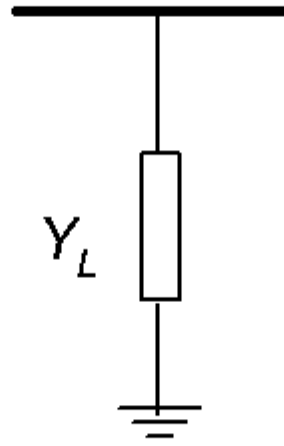
$$\left\{ \begin{array}{l} P_L = P_{L0} \left( \frac{|V|}{|V_0|} \right)^a (1 + k_{pf} \Delta f) \\ Q_L = Q_{L0} \left( \frac{|V|}{|V_0|} \right)^b (1 + k_{qf} \Delta f) \end{array} \right.$$

# Μοντέλα φορτίων

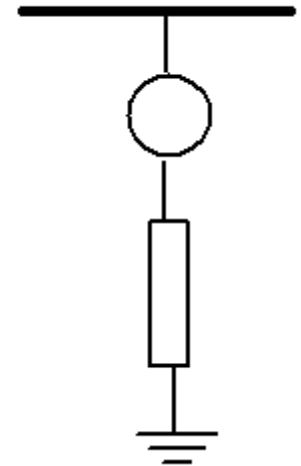
Κατάλληλο για μελέτη  
ροής φορτίου



Κατάλληλο για μελέτη  
βραχυκυκλωμάτων ή  
ευστάθειας



Κατάλληλο για μελέτη  
βραχυκυκλωμάτων ή  
ευστάθειας όταν είναι  
μεγάλη μηχανή



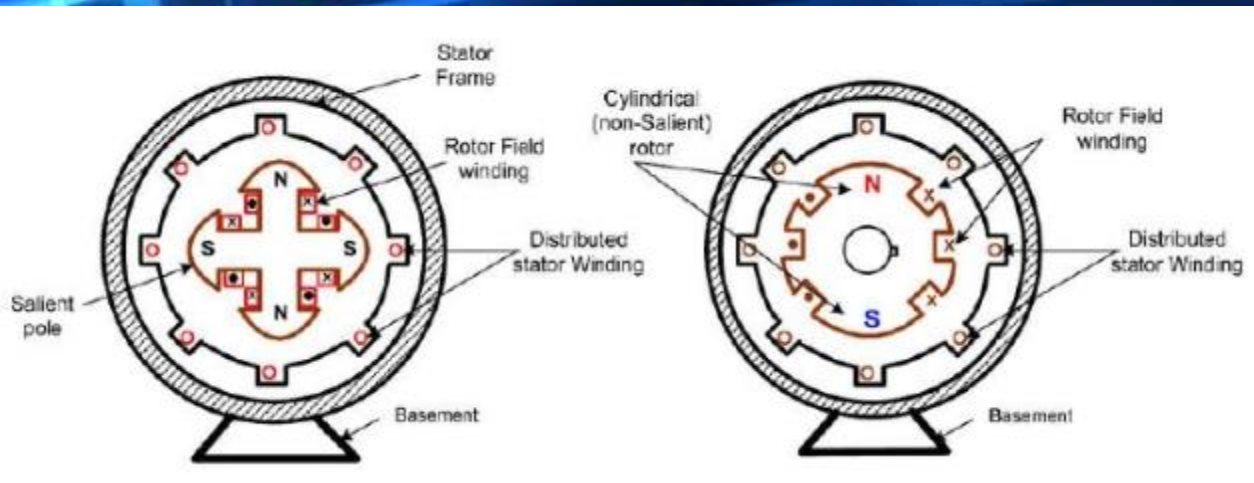
$$Y_L = \frac{S_L^*}{|V|^2} = \frac{P_L - jQ_L}{|V|^2}$$

# Η σύγχρονη γεννήτρια

Το μεγαλύτερο ποσοστό εγκατεστημένης παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος στον κόσμο αποτελείται από σύγχρονες τριφασικές γεννήτριες.



# Η σύγχρονη γεννήτρια



δρομέα έκτυπων πόλων

κυλινδρικού δρομέα



$$f = \frac{P N}{2 \cdot 60} = \frac{P}{2} f_m$$

f: συχνότητα παραγόμενης τάσης

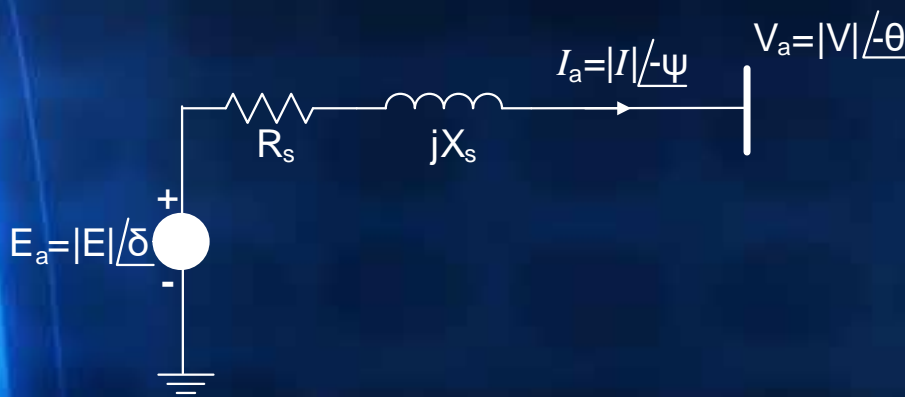
P: αριθμός πόλων δρομέα (N,S)

N: ταχύτητα δρομέα (στροφές/λεπτό)

$f_m$  : μηχανική συχνότητα (στροφές/δευτερόλεπτο)

# Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας (μόνιμη κατάσταση)

- Στη μόνιμη κατάσταση και υπό συμμετρική φόρτιση η σύγχρονη γεννήτρια παρουσιάζει τριφασική συμμετρία.
- Μπορεί να μελετηθεί επομένως με το μονοφασικό ισοδύναμό της.



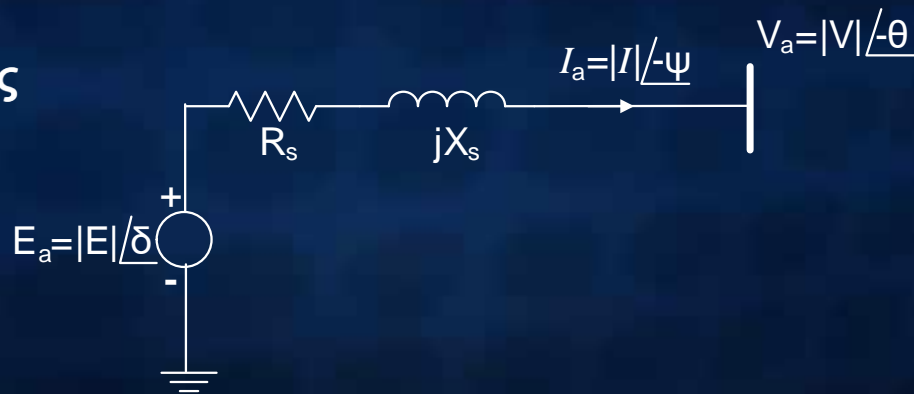
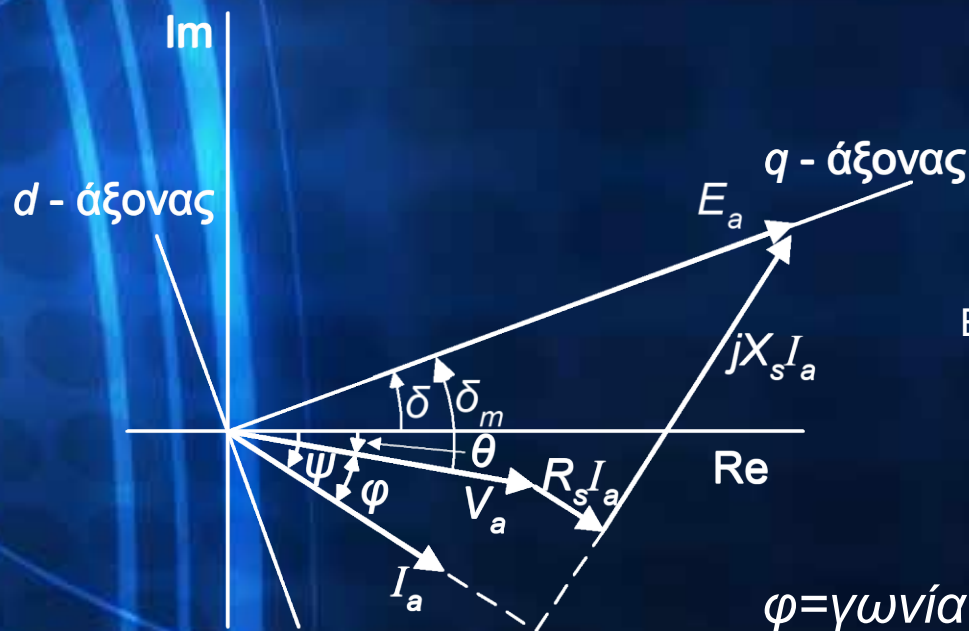
$R_s$  : ανά φάση αντίσταση στάτη  
 $X_s$  : σύγχρονη αντίδραση (λαμβάνει υπόψη τη ροή που παράγεται από τα ρεύματα του στάτη)  
 $E_a$  : φασική τάση ανοικτού κυκλώματος ( $\sim$ ρεύματος διέγερσης)

- Κυλινδρικός δρομέας: η  $X_s$  είναι σταθερή .
- Δρομέας έκτυπων πόλων: η  $X_s$  μεταβάλλεται συναρτήσει της θέσης του δρομέα ! Θα δούμε αργότερα τι θα κάνουμε με αυτό ...



# Διανυσματικό διάγραμμα γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα

$$\mathbf{E}_a = \mathbf{V}_a + \mathbf{R}_s \mathbf{I}_a + \mathbf{jX}_s \mathbf{I}_a$$



$\varphi = \text{γωνία συντελεστή ισχύος}$

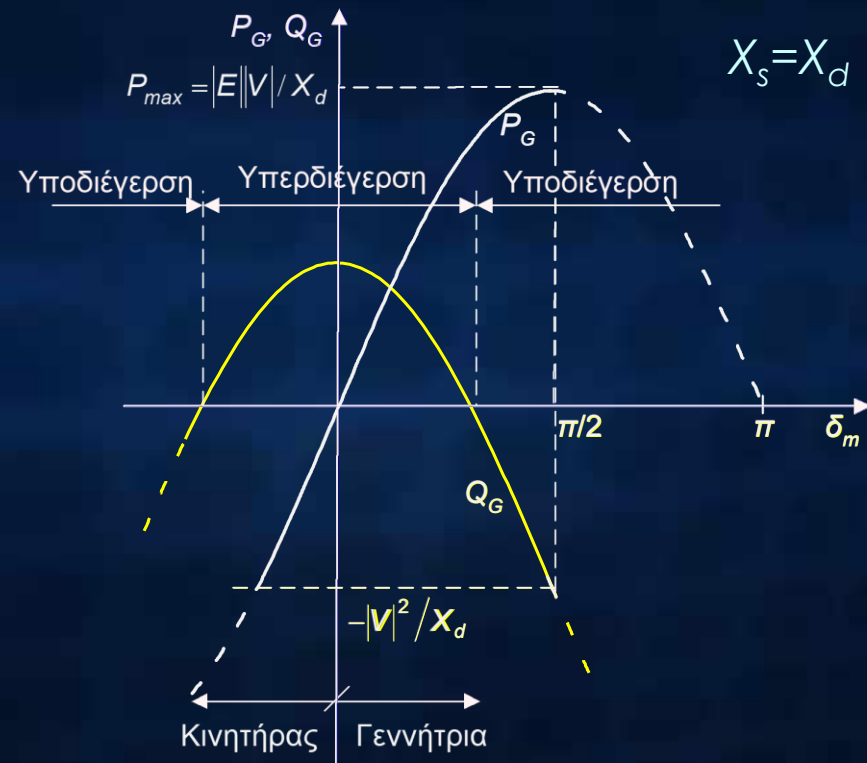
$$\delta_m = \angle \mathbf{E}_a - \angle \mathbf{V}_a = \delta + \theta \quad \text{Γωνία ισχύος}$$

# Πραγματική και άεργος ισχύς γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα

- Γενικά  $R_s \ll X_s$  (εκτός από τις πολύ μικρές γεννήτριες).
- Μπορούμε να αμελήσουμε την αντίσταση του στάτη ( $R_s=0$ ).

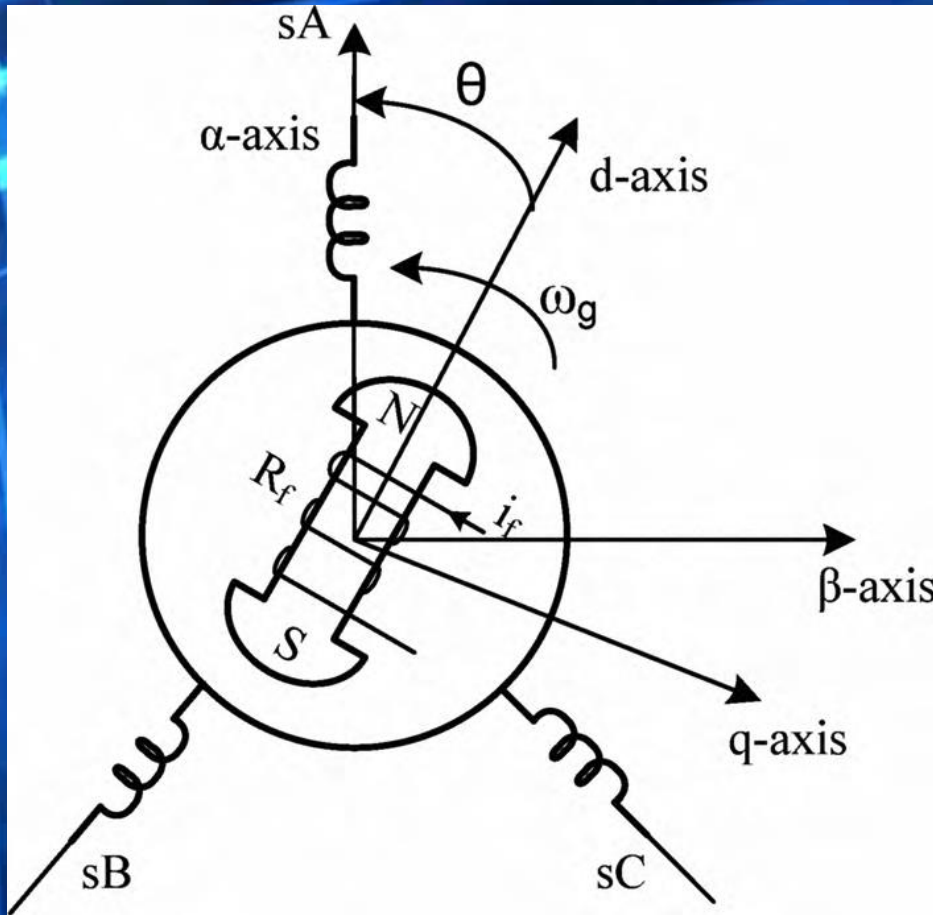
$$P_G = \frac{|E||V|}{X_s} \sin \delta_m$$

$$Q_G = \frac{|V|(|E| \cos \delta_m - |V|)}{X_s}$$



- Αν  $|E|$  και  $|V|$  είναι φασικές τάσεις, τότε  $P_G, Q_G$  είναι ανά φάση.
- Αν  $|E|$  και  $|V|$  είναι πολικές τάσεις, τότε  $P_G, Q_G$  είναι συνολικές.
- Αν  $|E|$  και  $|V|$  είναι ανά μονάδα, τότε  $P_G, Q_G$  είναι ανά μονάδα.

# Διανυσματικό διάγραμμα γεννήτριας με δρομέα έκτυπων πόλων



- Εδώ η  $X_s$  μεταβάλλεται συναρτήσει της θέσης του δρομέα !
- Λύση: μετασχηματισμός Park.
- Ρεύματα, τάσεις, ροές στάτη αναλύονται σε δύο κάθετες συνιστώσες.
- d: κατά μήκος άξονα πόλων.
- q: υστερεί  $90^\circ$  έναντι του d.
- Το ρεύμα του στάτη  $I_a$  αναλύεται σε d-q.
- Το ίδιο γίνεται με τη πώση τάσης  $X_s \cdot I_a$  πάνω στην αντίδραση του στάτη:

$$\mathbf{E}_a = \mathbf{V}_a + \mathbf{R}_s \mathbf{I}_a + \mathbf{j}X_d \mathbf{I}_{da} + \mathbf{j}X_q \mathbf{I}_{qa}$$

# Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων σύγχρονης γεννήτριας με δρομέα έκτυπων πόλων

Μόνο για μικρά ρεύματα διέγερσης είναι συγκρίσιμα  $X_d$  και  $X_q$ .  
Γενικά:  $X_d > X_q$ , επομένως θα μπορούσαμε να αγνοήσουμε την  $X_q$ .



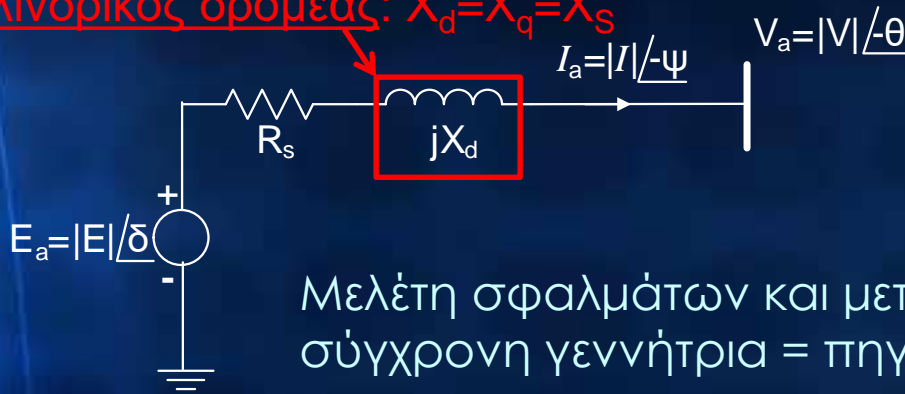
Η τάση στη σύγχρονη αντίδραση  $X_s$  δεν είναι κάθετη στο  $I_a$ .  
Άρα, δεν μπορούμε απευθείας να αναπαραστήσουμε την εμπέδηση αυτού του τύπου γεννήτριας με μια εμπέδηση  $R+jX_s$

$$\mathbf{E}_a = \mathbf{V}_a + \mathbf{R}_s \mathbf{I}_a + \mathbf{jX}_d \mathbf{I}_{da} + \mathbf{jX}_q \mathbf{I}_{qa}$$

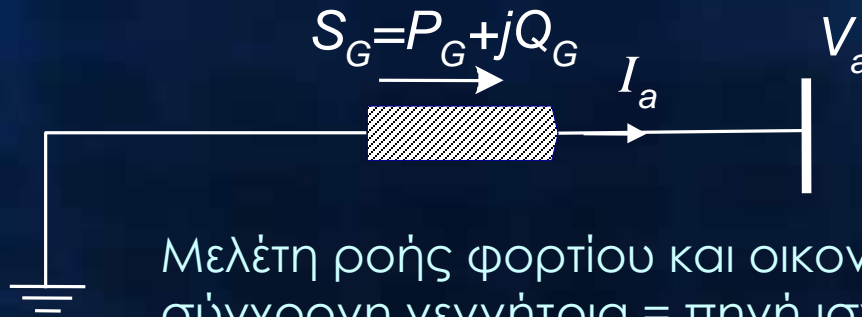
# Ισοδύναμα μοντέλα σύγχρονης γεννήτριας

- Στη συνηθισμένη λειτουργία των γεννητριών στο ΣΗΕ δεν είναι μικρή η διέγερση της μηχανής. Άρα όταν έχουμε έκτυπους πόλους :
- μπορούμε να προσεγγίσουμε τη συνολική σύγχρονη αντίδραση με τη σύγχρονη αντίδραση κατά τον d άξονα.

Κυλινδρικός δρομέας:  $X_d=X_q=X_s$

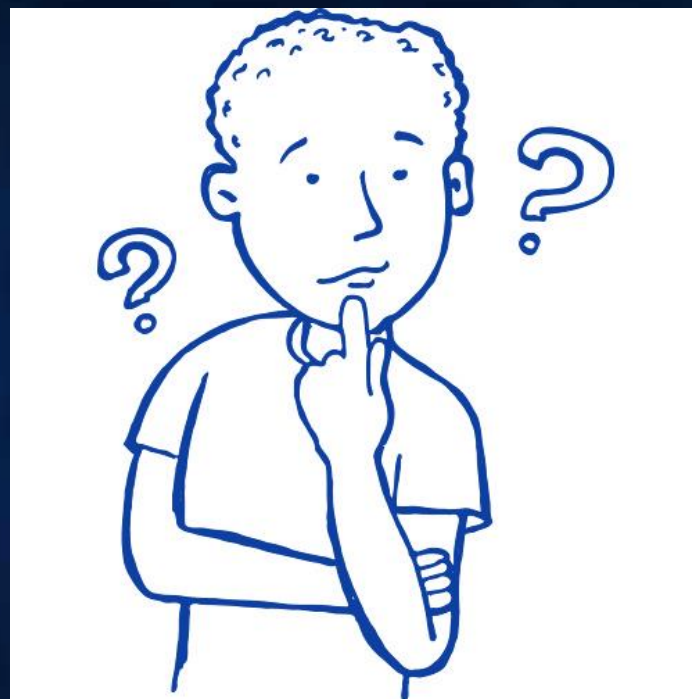


Μελέτη σφαλμάτων και μεταβατικής ευστάθειας:  
σύγχρονη γεννήτρια = πηγή τάσης +  $(R+jX)$



Μελέτη ροής φορτίου και οικονομικής λειτουργίας:  
σύγχρονη γεννήτρια = πηγή ισχύος

Ευχαριστώ για την προσοχή σας !



Ερωτήσεις ;