



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά  
μαθήματα ΠΠ

# Ανάλυση Σ.Η.Ε

Ενότητα 2: Μοντέλα βασικών συνιστωσών των Σ.Η.Ε

Νικόλαος Βοβός, Γαβριήλ Γιαννακόπουλος  
Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και τεχνολογίας Υπολογιστών



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

- Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:
- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο
  
- Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

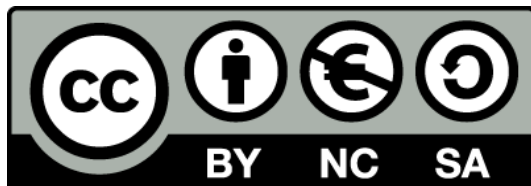
- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



# Άδειες χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης creative commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκεινται σε άλλου τύπου άδειες χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# **Βασικές συνιστώσες Σ.Η.Ε**

**- ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ**

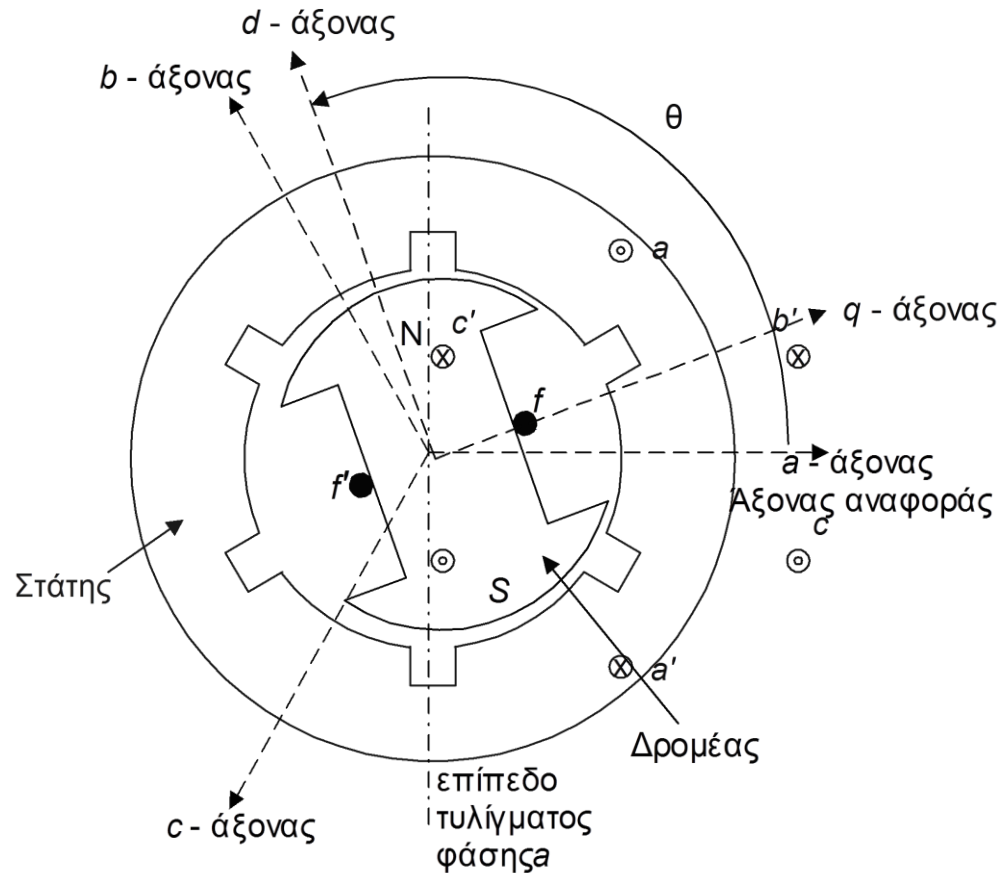
**- ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ**

**- ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**



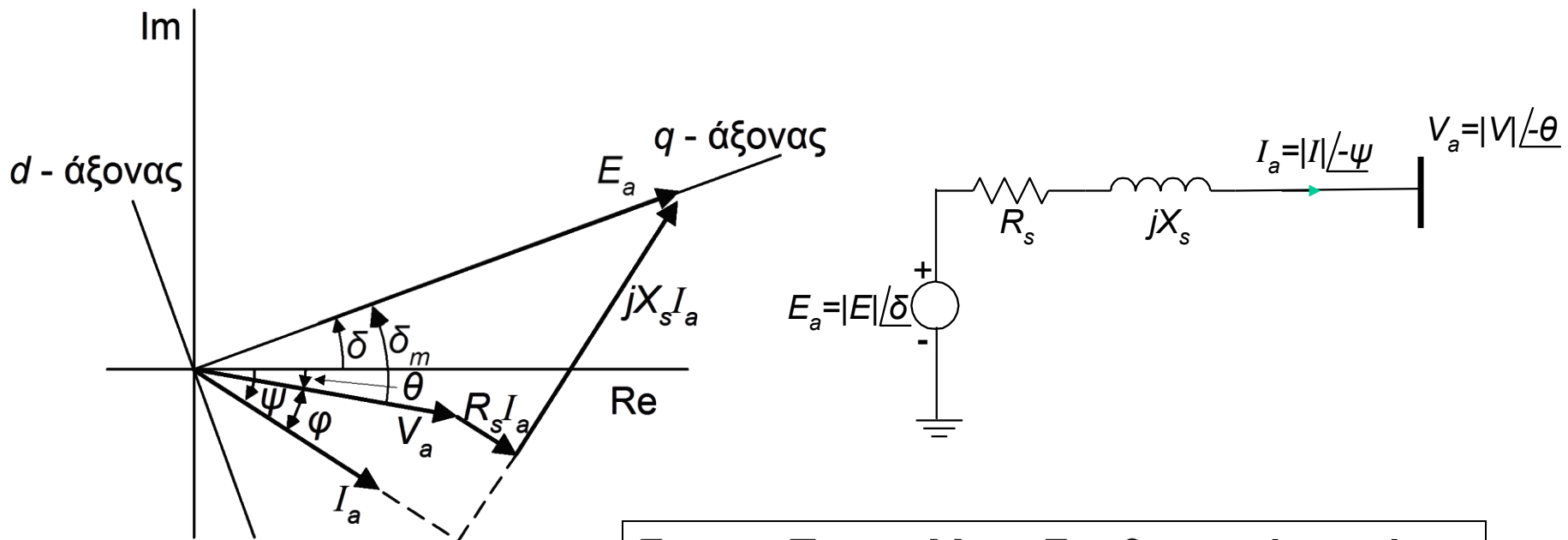
# Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά σύγχρονης γεννήτριας(1)

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



# Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

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

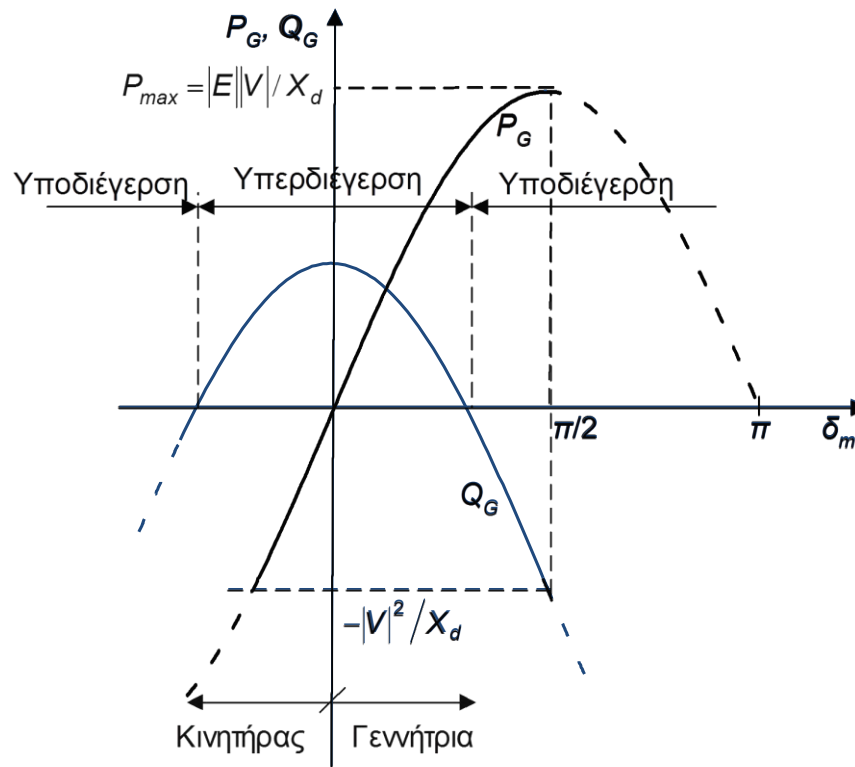


$$\delta_m = \angle \mathbf{E}_a - \angle \mathbf{V}_a = \delta + \theta \quad \text{Γωνία ισχύος}$$



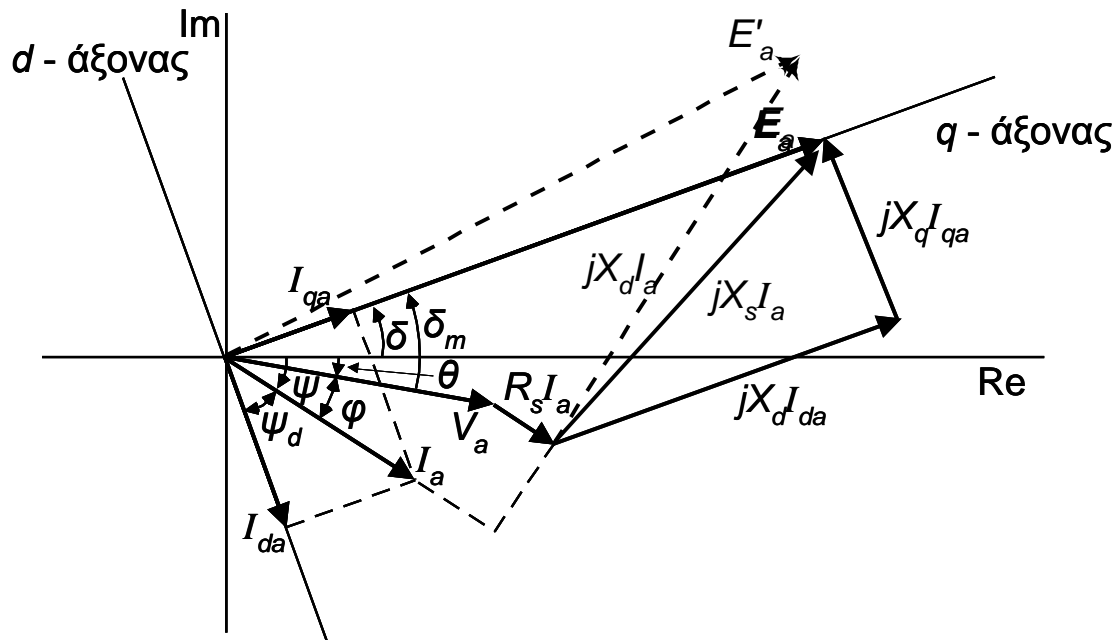
# Πραγματική και άεργος ισχύς γεννήτριας με κυλινδρικό δρομέα

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





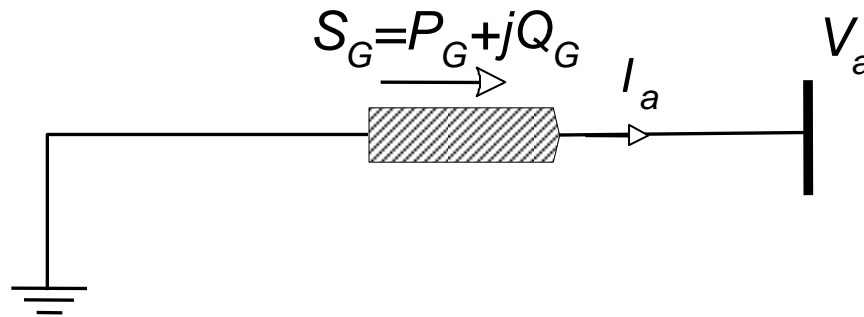
# Διανυσματικό διάγραμμα γεννήτριας με έκτυπους πόλους



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



# Μονοφασικό ισοδύναμο γεννήτριας για μελέτες ροής φορτίου

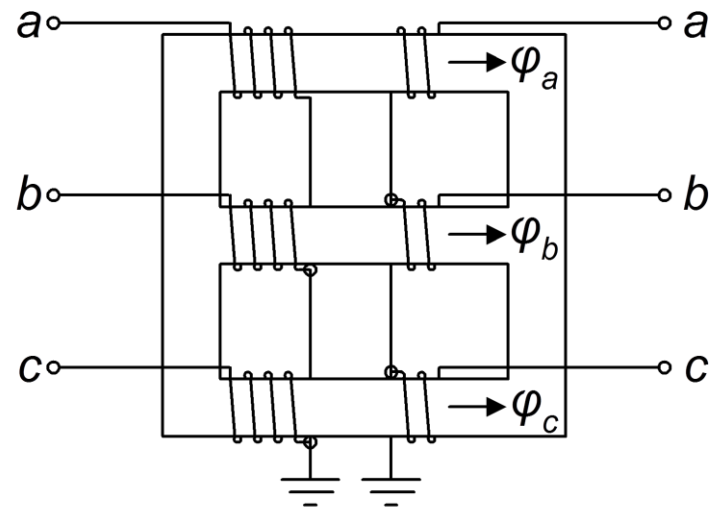
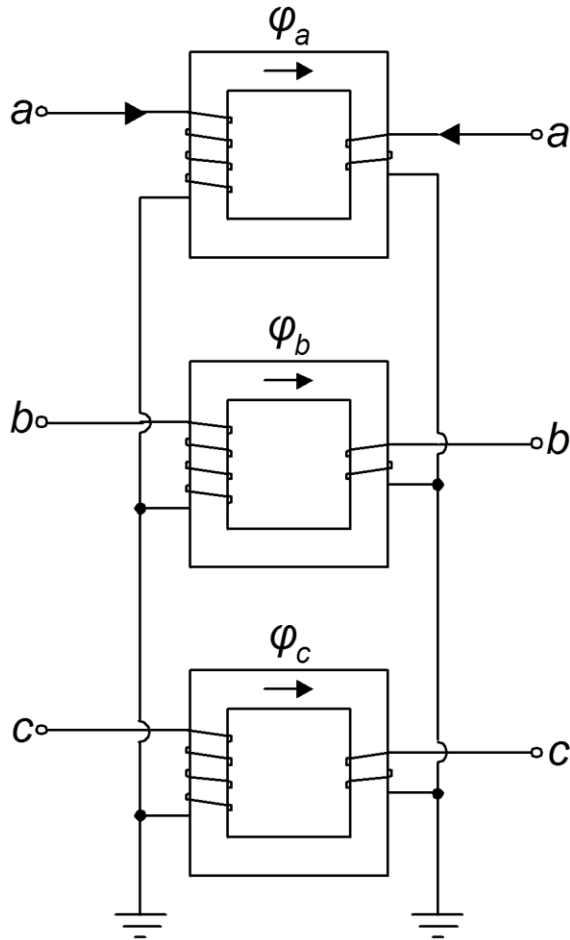


# Μετασχηματιστές

- *Μετασχηματιστές ισχύος*
  - *Μετασχηματιστές γεννήτριας*
  - *Μετασχηματιστές μεταφοράς*
  - *Μετασχηματιστές διανομής*
- *Μετασχηματιστές ρύθμισης τάσης*

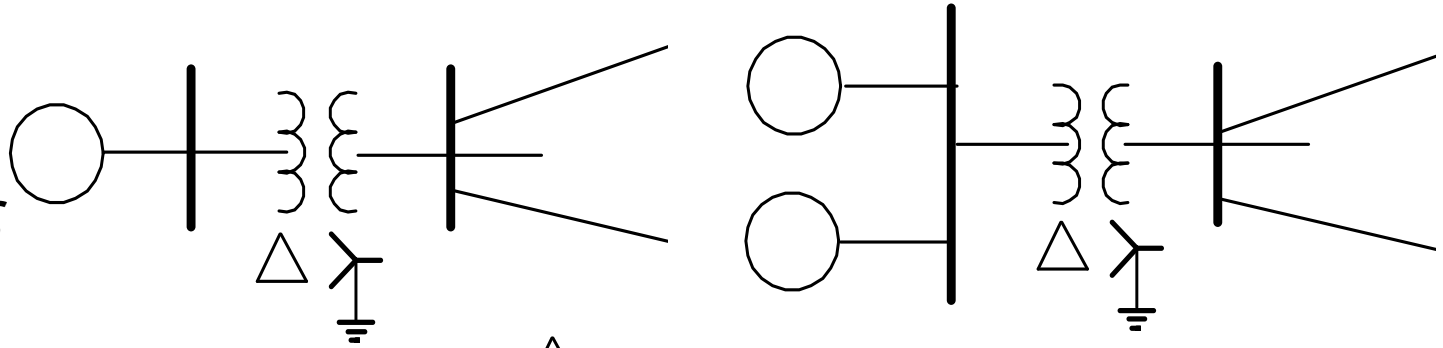


# Διατάξεις τριφασικών μετασχηματιστών

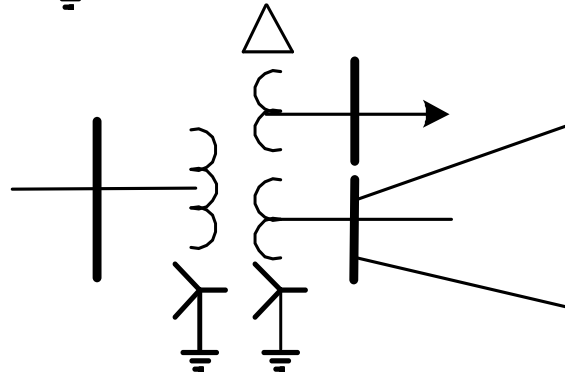


# Συνδεσμολογίες μετασχηματιστών(1)

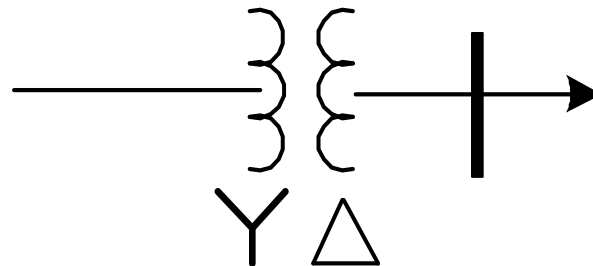
- *M/Σ γεννήτριας*



- *M/Σ μεταφοράς*



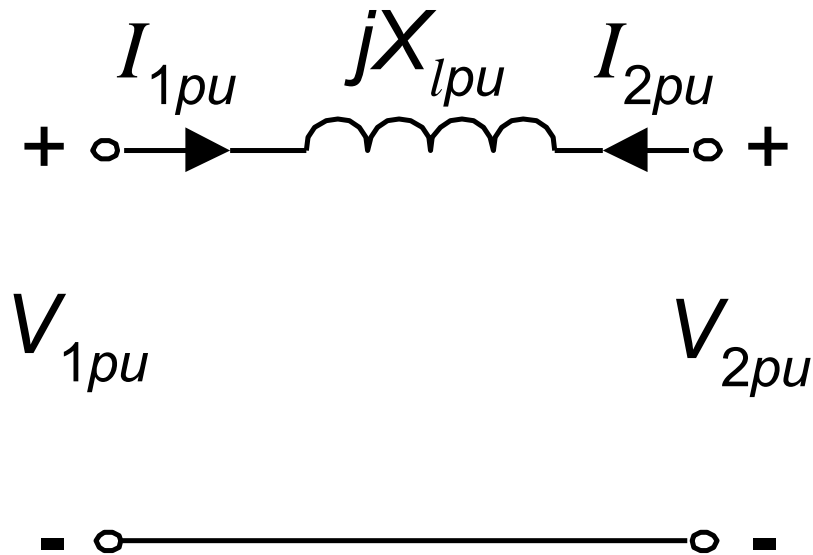
- *M/Σ διανομής*





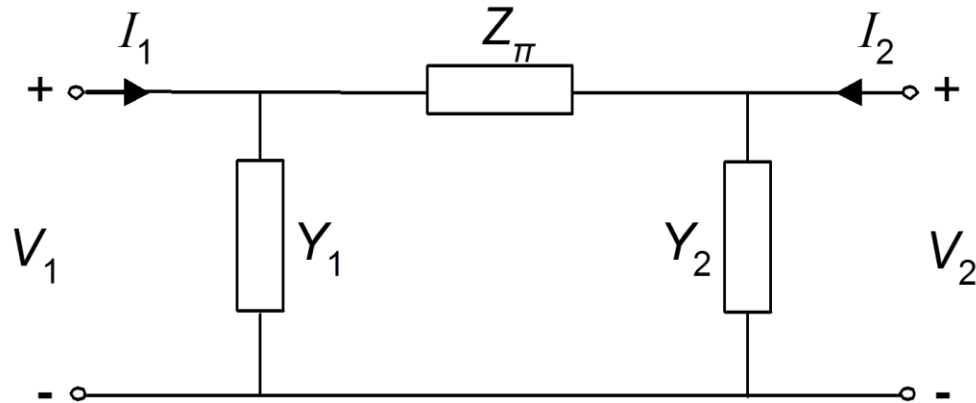


# Ανά μονάδα ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων





# π-Ισοδύναμο μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων



$$Z_{\pi} = \frac{jX_l}{\alpha} = jX_l \alpha$$

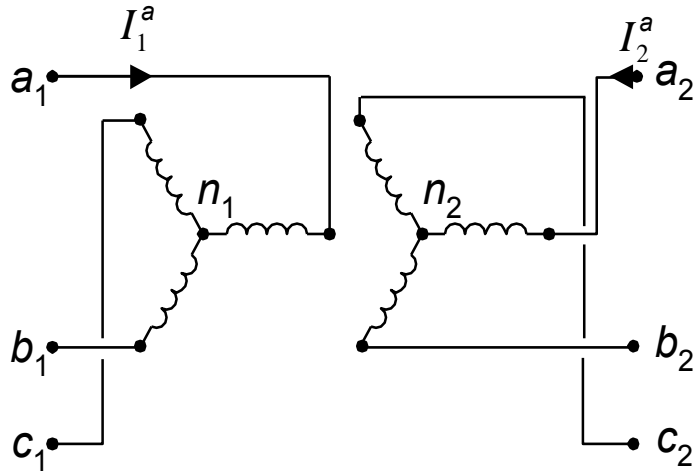
$$Y_1 = \frac{1}{jX_l} (1 - \alpha) = \frac{1}{X_l} \frac{1 - \alpha}{\alpha^2}$$

$$Y_2 = \frac{1}{jX_l} \alpha(\alpha - 1) = -\alpha Y_1 = \frac{1}{X_l} \frac{\alpha - 1}{\alpha}$$

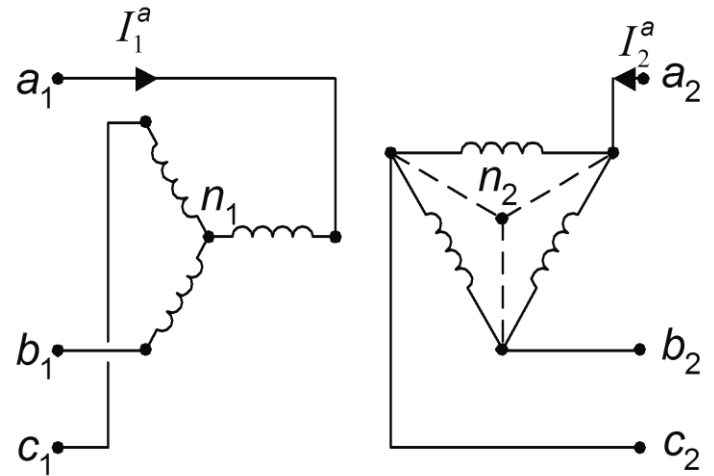




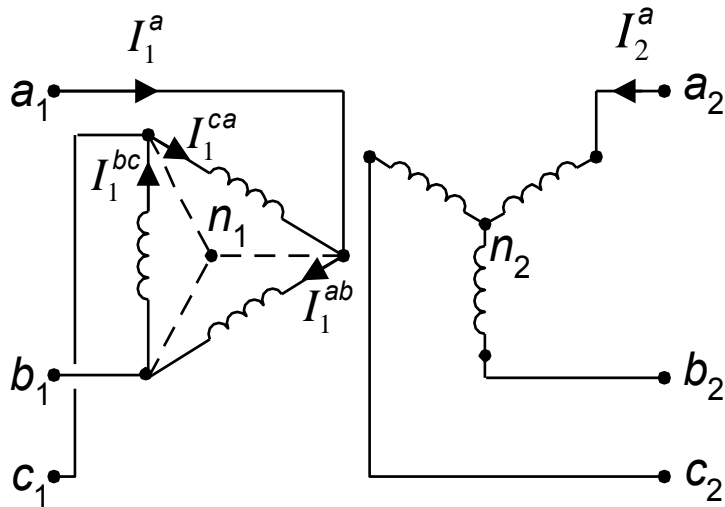
# Συνδεσμολογία τριφασικών μετασχηματιστών



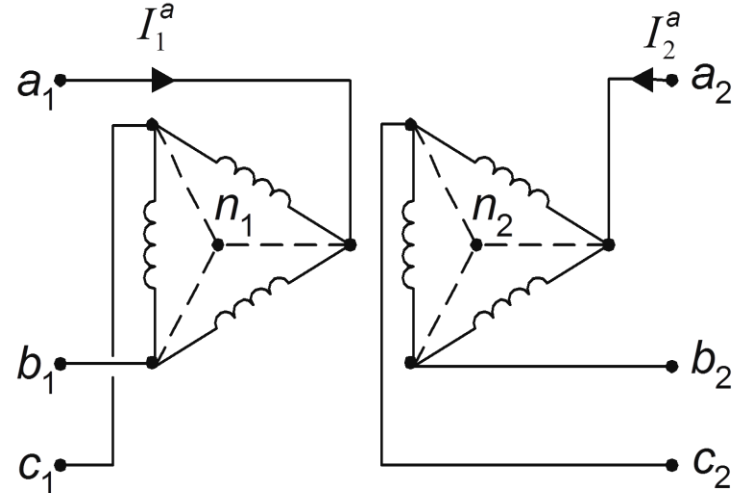
Υ-Υ συνδεσμολογία



Υ-Δ συνδεσμολογία



Δ-Υ συνδεσμολογία



Δ-Δ συνδεσμολογία

# Λόγος φασικών τάσεων, Τ ισοδύναμων Υ-Υ συνδεσμολογιών

---

Συνδεσμολογία  
μετασχηματιστή

---

$$t = V_1^a / V_2^a$$

Υ-Υ

$$N_1 : N_2 = a$$

Υ-Δ

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

Δ-Υ

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

Δ-Δ

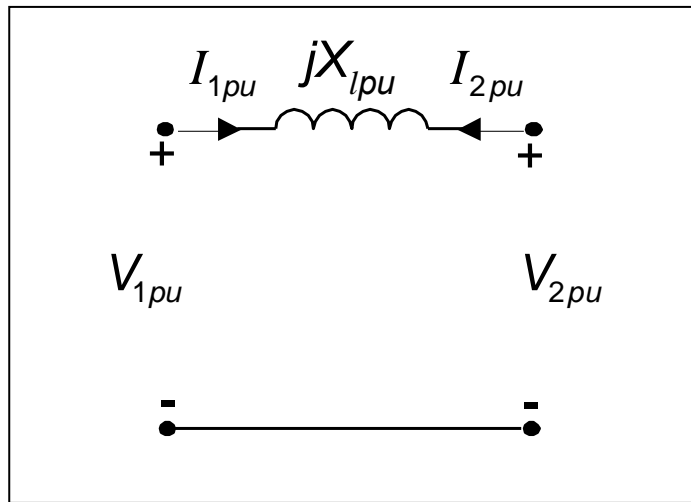
$$(N_1 / \sqrt{3} : N_2 / \sqrt{3}) = a$$

---

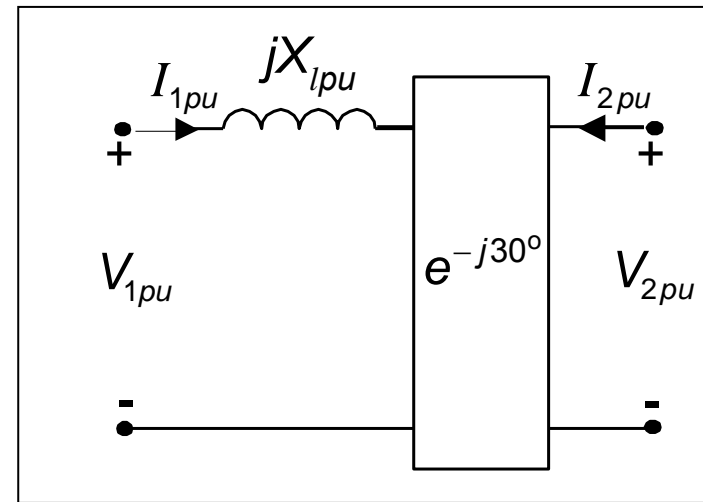


# Ανά μονάδα μονοφασικά ισοδύναμα τριφασικών μετασχηματιστών

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



Y-Y, Δ-Δ συνδεσμολογίες

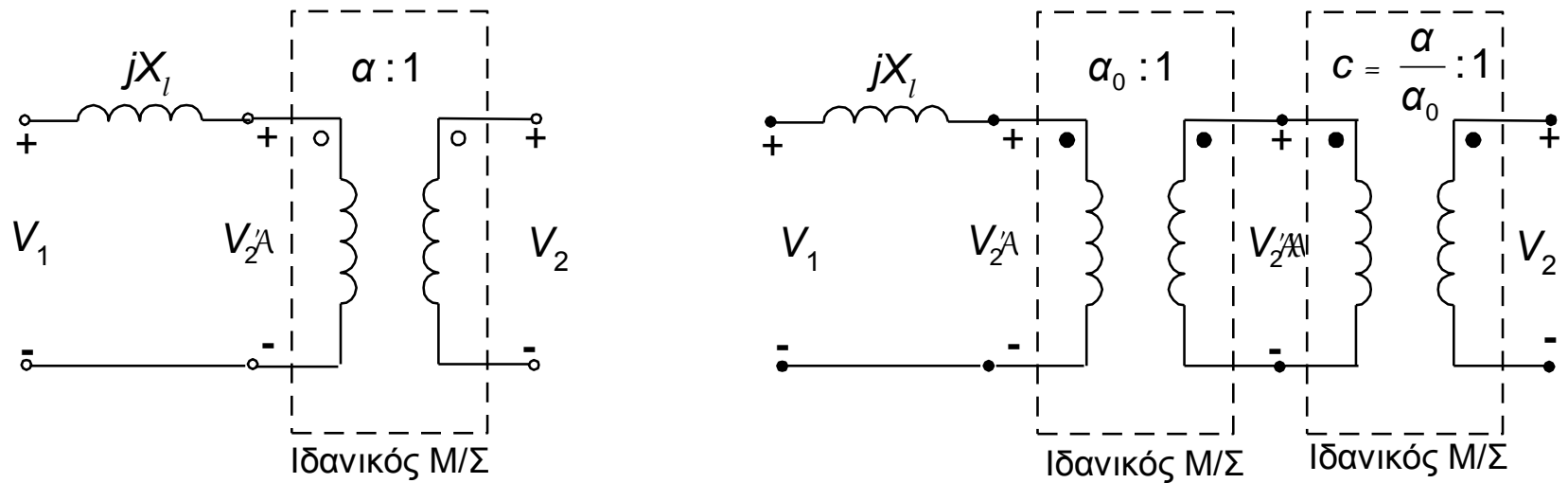


Y-Δ, Δ-Y συνδεσμολογίες



# Ισοδύναμη παράσταση μετασχηματιστή με δύο ιδανικούς μετασχηματιστές σε σειρά

Χρησιμοποιείται για τον σχηματισμό του ανά μονάδα ισοδυνάμου μετασχηματιστών με «μη ονομαστικό λόγο μετασχηματισμού»

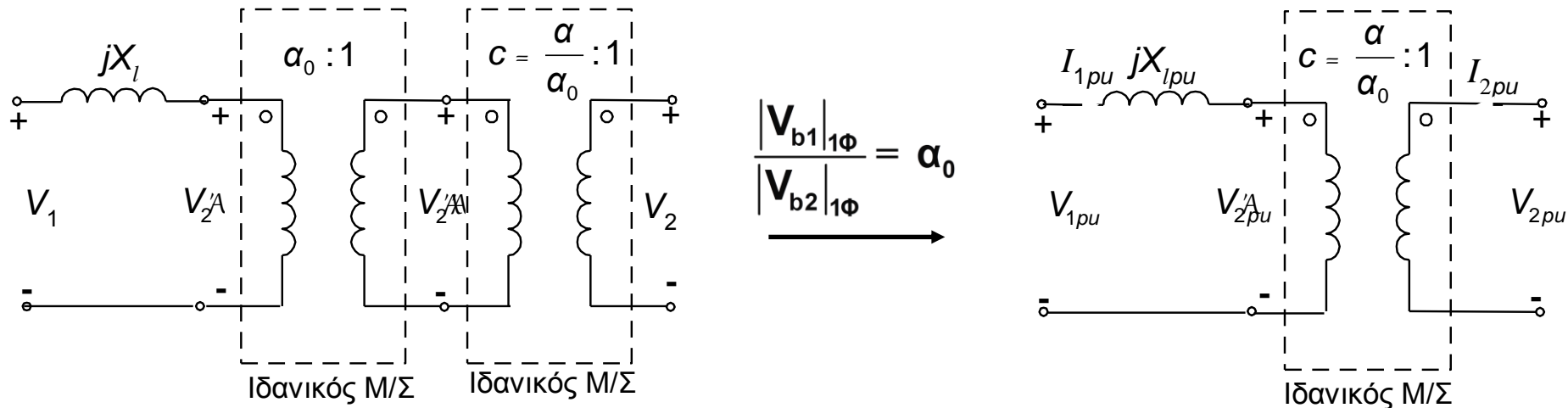


$$V_2^{\#} = \alpha V_2 = \alpha_0 \frac{\alpha}{\alpha_0} V_2 = \alpha_0 V_2^{\#}$$

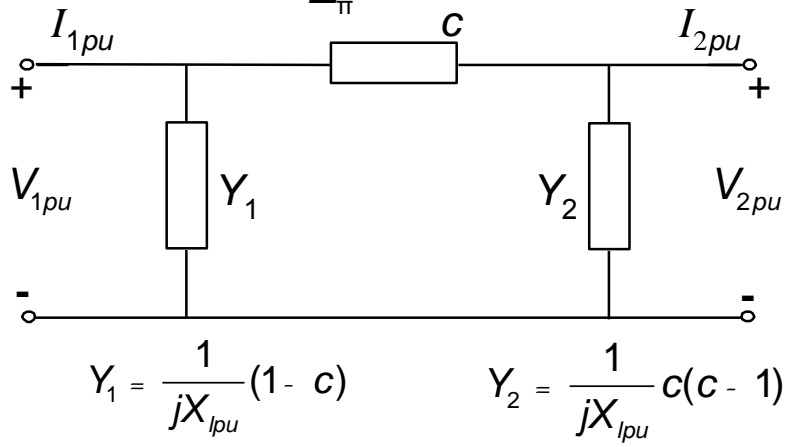
$$V_2^{\#} = \frac{\alpha}{\alpha_0} V_2 = c V_2$$



# Ανά μονάδα ισοδύναμο μετασχηματιστή με μη ονομαστικό λόγο μετασχηματισμού



$$Z_{\pi} = \frac{jX_{lpu}}{c}$$



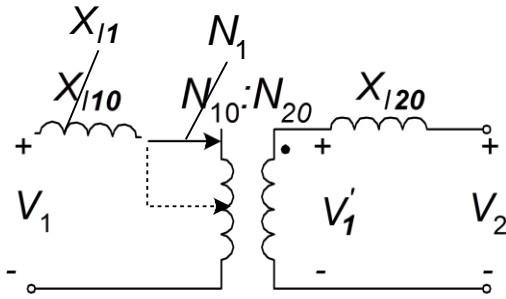
π-ισοδύναμο για πραγματικό c

$$Y_1 = \frac{1}{jX_{lpu}} (1 - c)$$

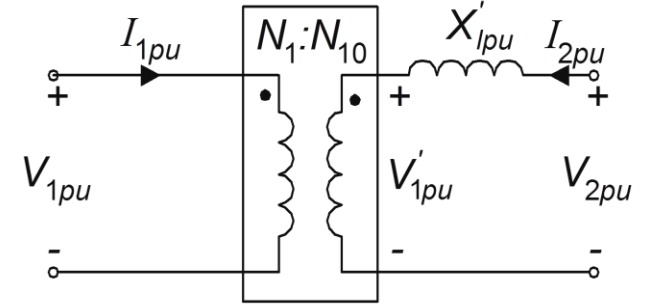
$$Y_2 = \frac{1}{jX_{lpu}} c(c - 1)$$



# Ανά μονάδα ισοδύναμο μετασχηματιστή με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού



$$\frac{X_{l1}}{X_{l10}} = \left( \frac{N_1}{N_{10}} \right)^2$$



Ιδανικός Μ/Σ

$$a_0 = \frac{N_{10}}{N_{20}} \longrightarrow X'_{10} = X_{l20} + \frac{X_{l10}}{a_0^2} = X_{l20} + \left( \frac{N_{20}}{N_{10}} \right)^2 X_{l10}$$

$$a = \frac{N_1}{N_{20}} \longrightarrow X'_1 = X_{l20} + \frac{X_{l1}}{a^2} = X_{l20} + \left( \frac{N_{20}}{N_1} \right)^2 \left( \frac{N_1}{N_{10}} \right)^2 X_{l10} = X'_{10}$$

*Η  $X_l$  αναφερόμενη στο δευτερεύον είναι σταθερή και ανεξάρτητη της λήψης πρωτεύοντος*

$$A_v \frac{|V_{b1}|_{1\Phi}}{|V_{b2}|_{1\Phi}} = \frac{N_{10}}{N_{20}} = a_0 \longrightarrow |Z_{b1}|_{1\Phi} = \frac{|V_{b1}|_{1\Phi}^2}{|S_b|_{1\Phi}} = \frac{a_0^2 |V_{b2}|_{1\Phi}^2}{|S_b|_{1\Phi}} = a_0^2 |Z_{b2}|_{1\Phi}$$

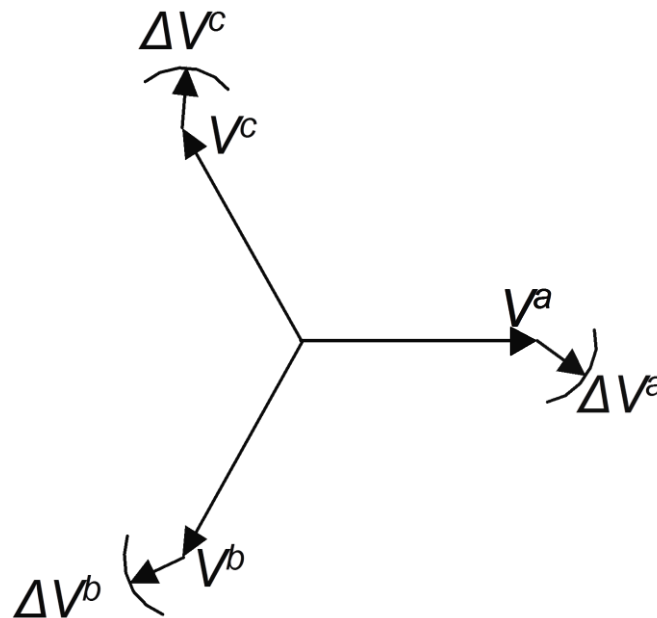
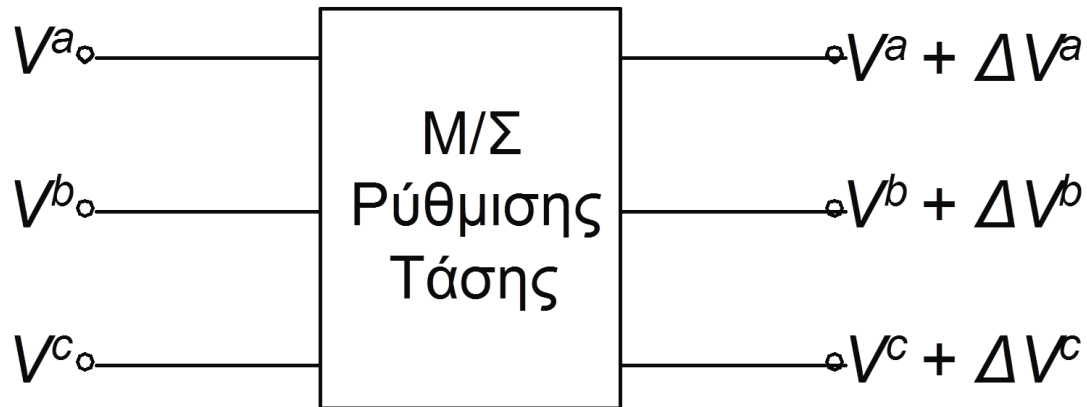
$$V_{1pu} = \frac{V_1}{|V_{b1}|_{1\Phi}} = \frac{V_1/a}{|V_{b1}|_{1\Phi}/a} = \frac{V'_1}{|V_{b2}|_{1\Phi} (a_0/a)} = \frac{N_1}{N_{10}} V'_{1pu}$$

∴

$$X'_{1pu} = \frac{X'_1}{|Z_{b2}|_{1\Phi}} = \frac{X'_{10}}{|Z_{b2}|_{1\Phi}} = \frac{X_{l20}}{|Z_{b2}|_{1\Phi}} + \frac{X_{l10}}{a_0^2 |Z_{b2}|_{1\Phi}} = X_{l20pu} + X_{l10pu}$$

*Η  $X'_{1pu}$  είναι σταθερή, ανεξάρτητη της λήψης και ίση με το άθροισμα των αντιδρ. σκέδασης πρωτ.-δευτ. ανηγμένων στις αντίστοιχες βάσεις*

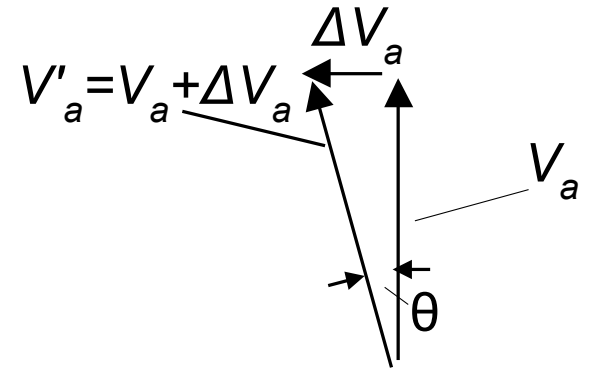
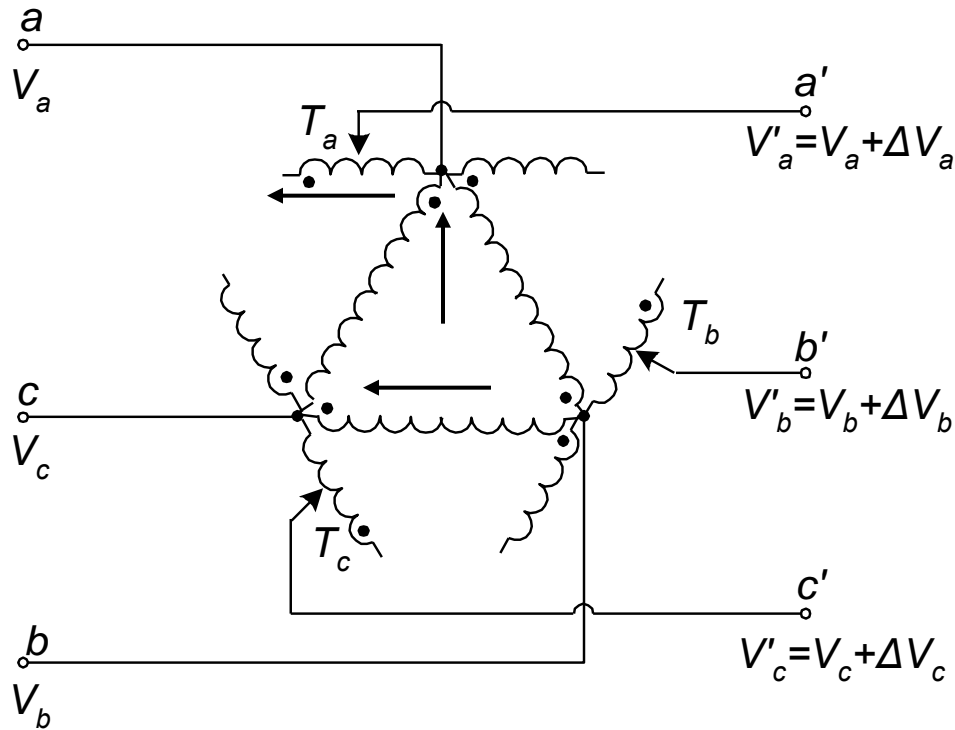
# Μετασχηματιστές ρύθμισης τάσης







# Μετασχηματιστής ρύθμισης φασικής γωνίας



$$\frac{V_a}{V'_a} = \frac{V_a}{V_a + \Delta V_a} = \frac{V_a}{V_a + j\rho V_a} = \frac{1}{1 + j\rho} \gg 1 - \tan^{-1} \rho = c$$



# Γραμμή μεταφοράς

## Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς

*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.*



# Παράσταση γραμμών 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 :*

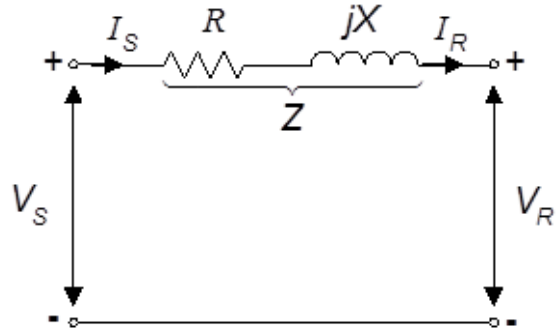
- Συγκεντρωμένες σε ένα σημείο*
- Κατανεμημένες σε όλο το μήκος της γραμμής*
- Μη σημαντικές που μπορούν να αγνοηθούν.*



# Ισοδύναμα κυκλώματα γραμμών μεταφοράς



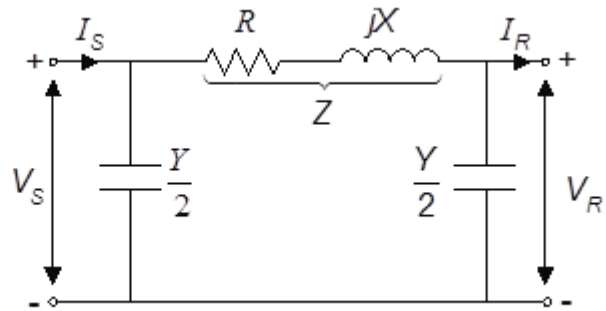
**Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μικρού μήκους ( $l < 80$  km)**



$$R = rl$$

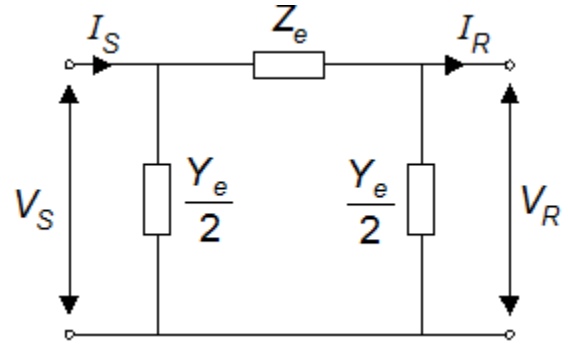
$$X = j\omega Ll$$

**Ονομαστικό  $\pi$  ισοδύναμο γραμμής μεσαίου μήκους ( $80$  km  $< l < 250$  km)**



$$Y = j\omega Cl$$

**$\pi$  ισοδύναμο γραμμής μεγάλου μήκους ( $l > 250$  km)**



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

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

# Φορτία

## ΕΙΔΗ ΑΠΛΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

- Κινητήρες
- Συσκευές θέρμανσης
- Ηλεκτρονικές συσκευές
- Φωτιστικά

## ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΛΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

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

- Είναι δυνατόν να προβλεφθούν
- Είναι συμμετρικά
- Μεταβάλλονται αργά με το χρόνο
- Καταναλώνουν άεργο ισχύ
- Εξαρτώνται από τάση και συχνότητα

## ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

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

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



# Εκθετικό στατικό μοντέλο φορτίου

$$P_L = P_{L0} \left( \frac{|V|}{|V_0|} \right)^a$$

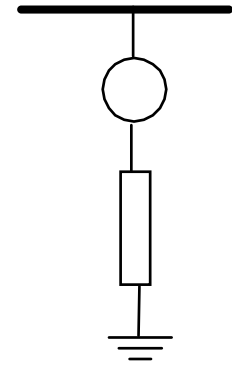
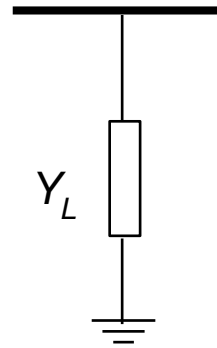
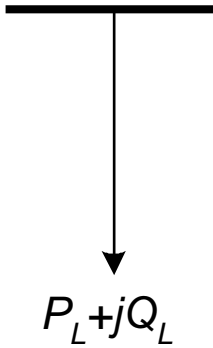
$$Q_L = Q_{L0} \left( \frac{|V|}{|V_0|} \right)^b$$

$$P_L = P_{L0} \left( \frac{|V|}{|V_0|} \right)^a (1 + k_{pf} \Delta f)$$

$$Q_L = Q_{L0} \left( \frac{|V|}{|V_0|} \right)^b (1 + k_{qf} \Delta f)$$



# Μοντέλα φορτίων



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





# Ανά μονάδα μονοφασικό ισοδύναμο συστήματος

- **Βάση ισχύος** : τριφασική ισχύς σε *MVA*
- **Βάσεις τάσης**: πολικές τάσεις σε *kV*

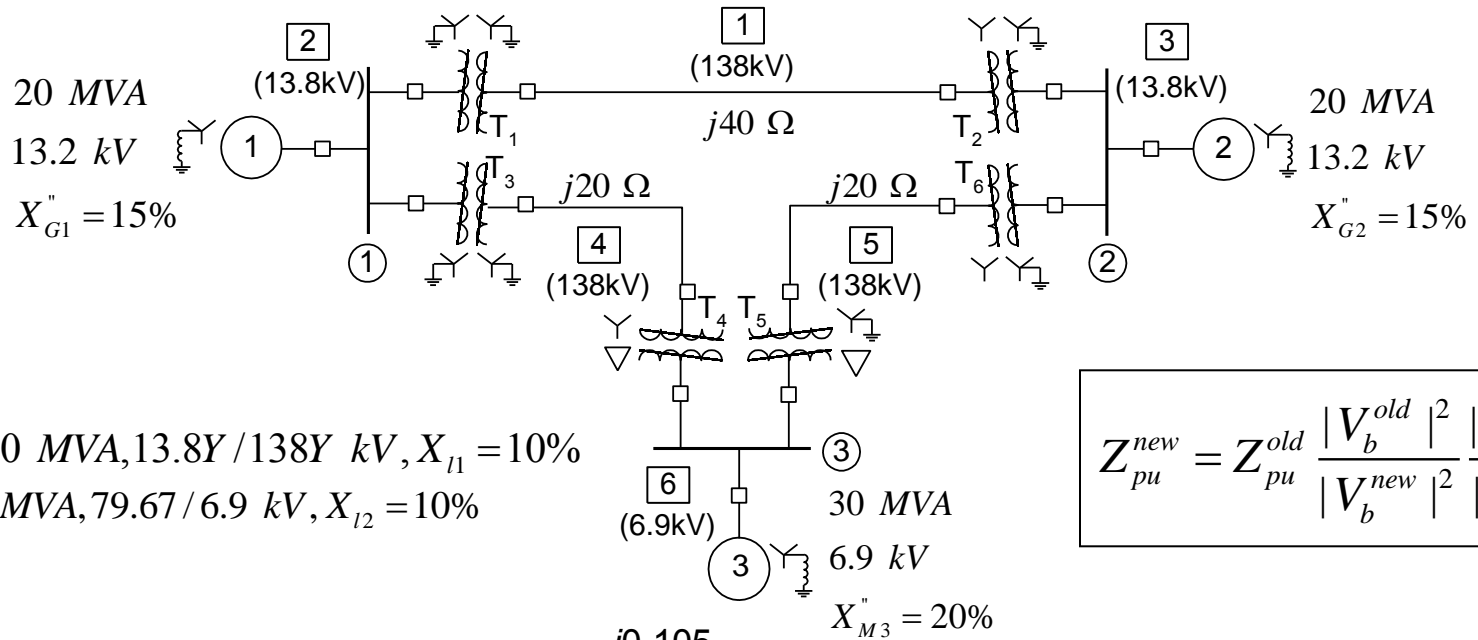
**Η βάση ισχύος είναι η ίδια για όλο το σύστημα.**

**Οι βάσεις τάσης για τμήματα του δικτύου που συνδέονται με *M/Σ* λαμβάνονται να έχουν λόγο ίδιο με το λόγο των πολικών τάσεων στις δύο πλευρές του *M/Σ*.**

- Η ανά μονάδα τιμή μιας αντίστασης είναι η ίδια, είτε εκφράζεται ως προς τη βάση αντίστασης της πλευράς στην οποία ανήκει, είτε αναφέρεται στην άλλη πλευρά του μετασχηματιστή και εκφράζεται ως προς τη βάση αντίστασης αυτής της πλευράς.
- Καταργείται η τμηματικοποίηση του δικτύου που προκαλείται από τους μετασχηματιστές και μπορούν να συνδυαστούν σε ένα διάγραμμα ανά μονάδα τιμές αντιστάσεων που προσδιορίστηκαν σε διαφορετικά τμήματα του δικτύου.



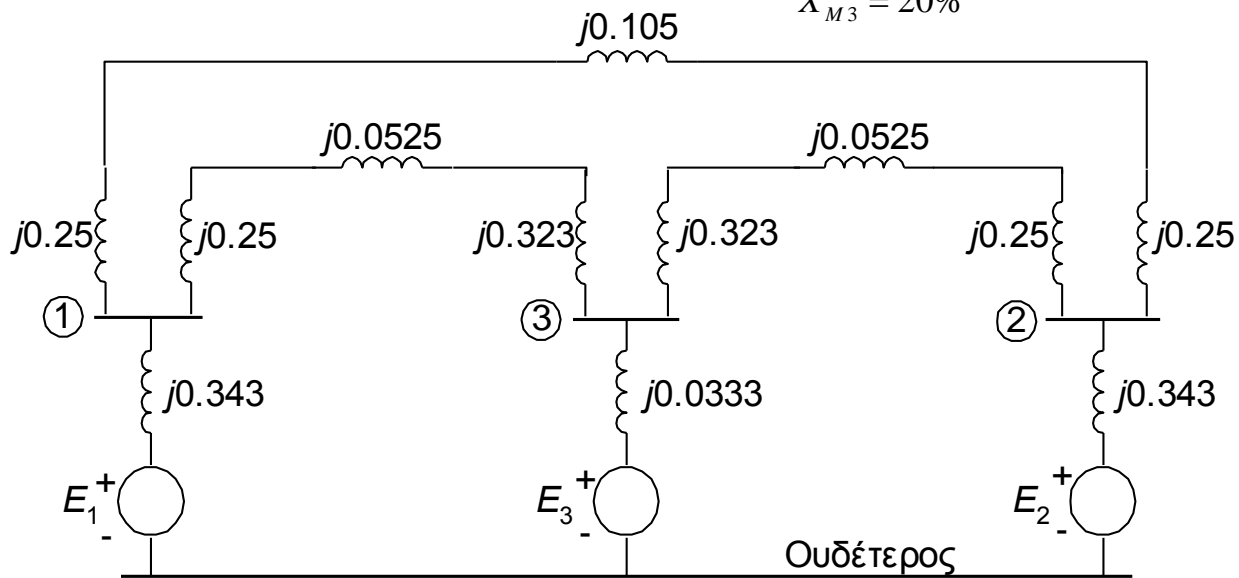
# Παράδειγμα



$Y-Y: 3\Phi, 20 \text{ MVA}, 13.8Y/138Y \text{ kV}, X_{l1} = 10\%$

$Y-\Delta: 1\Phi, 5 \text{ MVA}, 79.67/6.9 \text{ kV}, X_{l2} = 10\%$

$$Z_{pu}^{new} = Z_{pu}^{old} \frac{|V_b^{old}|^2 |S_b^{new}|}{|V_b^{new}|^2 |S_b^{old}|}$$



# Βιβλιογραφία

- Όλα τα σχήματα, οι εικόνες και τα γραφήματα που παρουσιάστηκαν σε αυτήν την ενότητα είναι από το βιβλίο «Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Ν. Α. Βοβός, Γ. Β. Γιαννακόπουλος, Εκδόσεις Ζήτη.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

