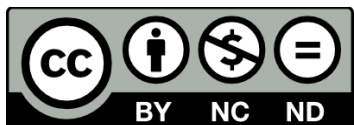




# ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ III

## ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΑ ΣΗΕ

Λαμπρίδης Δημήτρης, Καθηγητής  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ



# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη 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.





# ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΗΕ III



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

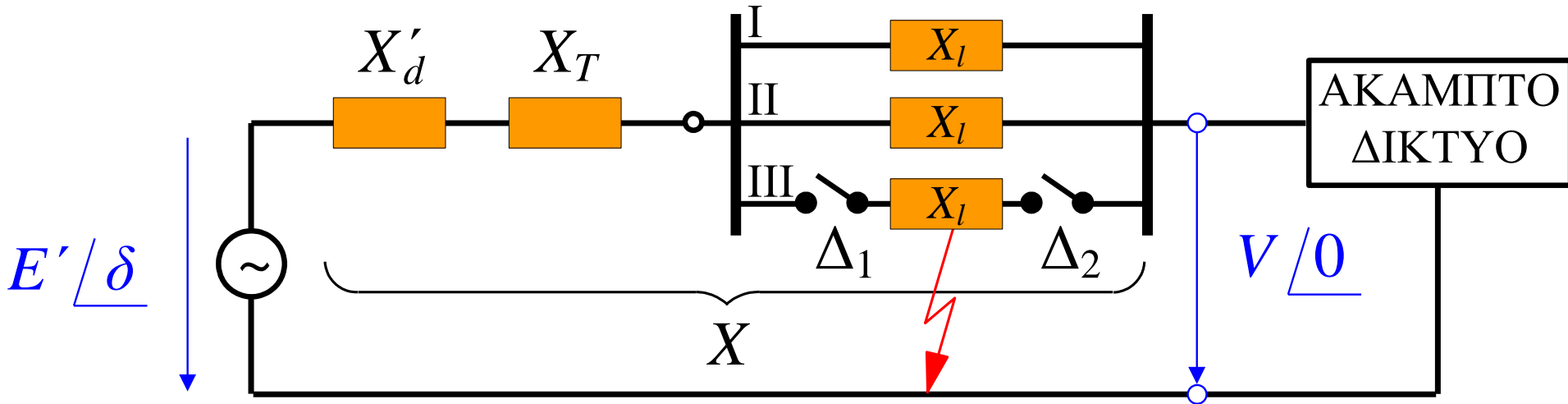
# Περιεχόμενα ενότητας

5. Ευστάθεια μεταβατικής κατάστασης
  - i. Κριτήριο ίσων εμβαδών
    - b. Αλλαγή αντίδρασης μεταφοράς
6. Προσαρμογή ομοιογενούς μακριάς ΓΜ στις συνθήκες ευστάθειας
7. Αναγωγή συστήματος σε διάταξη γεννήτριας – ΑΖ
8. Αναγωγή δύο συστημάτων σε διάταξη γεννήτριας– ΑΖ
9. Ευστάθεια – Συμπεράσματα



# i. Κριτήριο ίσων εμβαδών

a. Εφαρμογές του κριτηρίου των ίσων εμβαδών: Αλλαγή αντίδρασης μεταφοράς



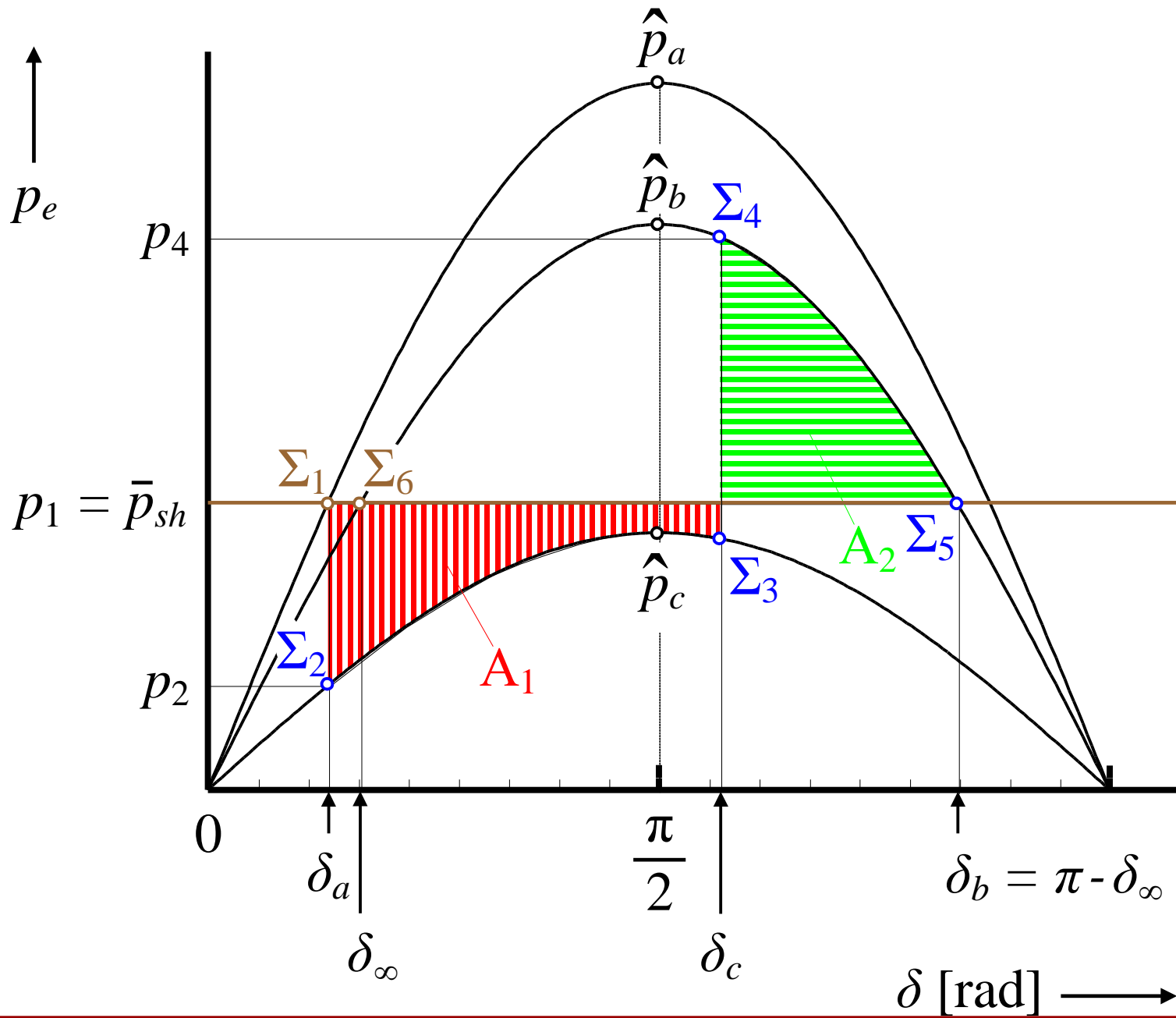
Σχ.4.16: Ισοδύναμο κύκλωμα συστήματος γεννήτριας-άπειρου ζυγού, για τη μελέτη της ευστάθειας μεταβατικής κατάστασης. Η διασυνδεδετική γραμμή αποτελείται από τρία κυκλώματα μεταφοράς, με σφάλμα στο ένα από αυτά. Οι συνολικές αντιδράσεις μεταφοράς  $X$  του συστήματος είναι ίσες με:

$X_a$  ΠΡΙΝ από το σφάλμα

$X_b$  ΜΕΤΑ την απόζευξη του σφάλματος, και

$X_c$  ΚΑΤΑ τη διάρκεια του σφάλματος.





ΠΡΙΝ      ΜΕΤΑ      ΚΑΤΑ

Συνολικές αντιδράσεις μεταφοράς:  $x_a \leq x_b < x_c$

$$\hat{p}_a = \frac{e'v}{x_a}, \quad \hat{p}_c = \frac{e'v}{x_c}, \quad \hat{p}_b = \frac{e'v}{x_b}$$

$$\hat{p}_c < \hat{p}_b \leq \hat{p}_a$$

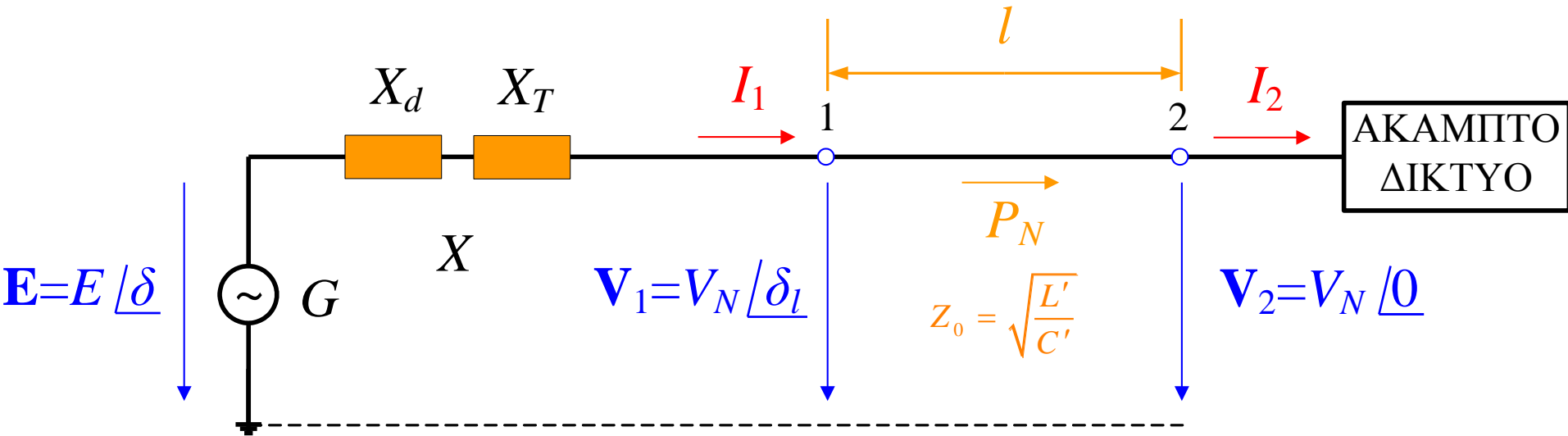
$A_1 = A_2 \Rightarrow$       Υπολογισμός κρίσιμης γωνίας φόρτισης  $\delta_c$

$$\cos \delta_c = \frac{P_{sh} (\delta_b - \delta_a) + \hat{p}_b \cos \delta_b - \hat{p}_c \cos \delta_a}{\hat{p}_b - \hat{p}_c}$$



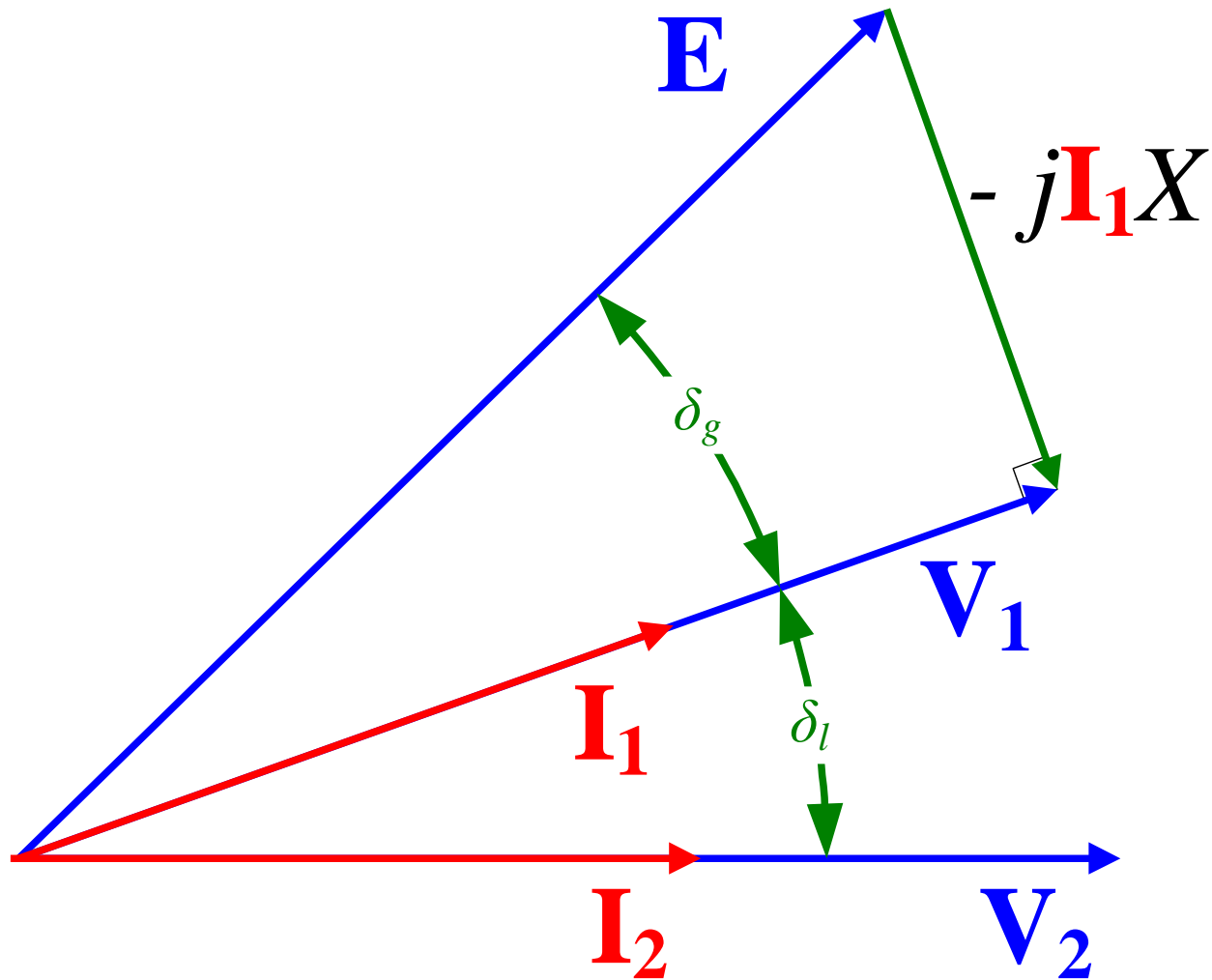


# 6. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΟΜΟΙΟΓΕΝΟΥΣ ΜΑΚΡΙΑΣ ΓΜ ΣΤΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ



Σχ.4.18: Μεταβολή της γωνίας φόρτισης μίας ομοιογενούς μακριάς γραμμής μεταφοράς μήκους  $l$  χωρίς απώλειες, που μεταφέρει φυσική ισχύ  
α) Ισοδύναμο κύκλωμα





Σχ.4.18: Μεταβολή της γωνίας φόρτισης μίας ομοιογενούς μακριάς γραμμής μεταφοράς μήκους  $l$  χωρίς απώλειες, που μεταφέρει φυσική ισχύ  
 β) Διάγραμμα φασικών διανυσμάτων



Έστω ότι η ΓΜ χωρίς απώλειες, με χαρακτηριστική αντίσταση  $Z_0$ , φορτίζεται με τη φυσική της ισχύ  $P_N$

$$P_N = \frac{U_N^2}{Z_0}$$

Η ΓΜ θα παρουσιάζει τότε μηδενική πτώση τάσης, δηλαδή τα διανύσματα  $\mathbf{I}, \mathbf{V}$  θα έχουν σταθερό μέτρο, αλλά θα στρέφονται με τη σταθερή αλλαγής φάσης  $\beta$

Συνολική αλλαγή φάσης:  $\delta_l = \beta l = \omega \sqrt{L'C'} l = \omega \sqrt{LC}$

όπου  $\beta \cong 6^\circ / 100 \text{ km}$

οπότε  $\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_2 e^{j\delta_l}$  και  $\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2 e^{j\delta_l}$



Εξαιτίας της πτώσης τάσης στη γεννήτρια και στο μετασχηματιστή, θα έχουμε πρόσθετη αλλαγή στη συνολική γωνία φόρτισης κατά  $\delta_g$

$$\tan \delta_g = \frac{X I_1}{V_1} = \frac{X}{Z_0}$$

Η συνολική γωνία φόρτισης  $\delta$  του συστήματος γεννήτριας-άπειρου ζυγού θα είναι

$$\delta = \delta_g + \delta_l$$



Για να έχουμε ευστάθεια στάσιμης κατάστασης πρέπει

$$\delta < \frac{\pi}{2} = 90^\circ$$

Για να έχουμε ευστάθεια μεταβατικής κατάστασης πρέπει

$$\delta < 70^\circ$$

Συνήθως σε στάσιμη κατάσταση λειτουργίας ισχύει

$$\delta_g = 30^\circ - 50^\circ$$

$$\text{Έστω } \delta_g = 45^\circ \Rightarrow \delta_l < 70^\circ - 45^\circ = 25^\circ$$

$$\text{Τότε πρέπει } \delta_l = \beta l < 25^\circ \Rightarrow l < 400 \text{ km}$$



- Για να προσαρμόσουμε ένα δεδομένο φορτίο  $Z_R$  στη φυσική ισχύ της γραμμής, θα πρέπει ν' αλλάξουμε την κυματική της αντίσταση  $Z_0$
- Η αλλαγή της  $Z_0$  επιδρά στην ευστάθεια του συστήματος
- Η επίδραση μπορεί να είναι **θετική** ή **αρνητική**, ανάλογα με τη μεταβολή που επιφέρουν τα άεργα στοιχεία (πηνία ή πυκνωτές) στη στροφή της γραμμής  $\delta_l$



α) Αύξηση της κυματικής αντίστασης

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \left( \delta_l = \omega \sqrt{LC} \right)$$

Αυτεπαγωγές σε σειρά  $L_s$

$\Rightarrow$  αύξηση  $L \Rightarrow$  αύξηση  $\delta_l$   
 $\Rightarrow$  **μείωση** ευστάθειας

Αυτεπαγωγές παράλληλα  $L_p$

$\Rightarrow$  μείωση  $C \Rightarrow$  μείωση  $\delta_l$   
 $\Rightarrow$  **αύξηση** ευστάθειας



β) *Ελάττωση της κυματικής αντίστασης*

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\delta_l = \omega\sqrt{LC})$$

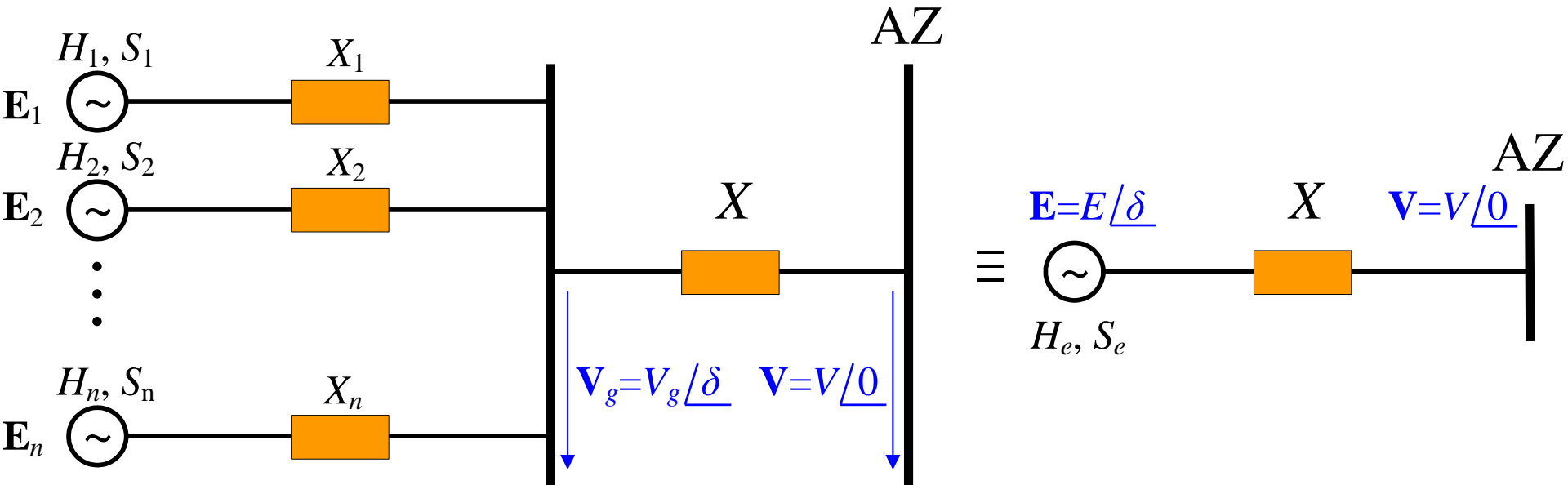
Πυκνωτές παράλληλα  $C_p \Rightarrow$  αύξηση  $C \Rightarrow$  αύξηση  $\delta_l$   
 $\Rightarrow$  **μείωση** ευστάθειας

Πυκνωτές σε σειρά  $C_s \Rightarrow$  μείωση  $L \Rightarrow$  μείωση  $\delta_l$   
 $\Rightarrow$  **αύξηση** ευστάθειας





# 7. ΑΝΑΓΩΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ – ΑΖ



Σχ.4.19: Αναγωγή ενός συστήματος παραγωγής που αποτελείται από  $n$  ΣΓ, σε διάταξη γεννήτριας-άπειρου ζυγού



## ΠΑΡΑΔΟΧΗ:

$$X_1, X_2, \dots, X_n \ll X \quad \Rightarrow \quad \mathbf{E}_1 \cong \mathbf{E}_2 \cong \dots \cong \mathbf{E}_n \cong \mathbf{V}_g = E e^{j\delta}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{2H_1}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} &= p_{sh1} - p_{e1} && (\text{βάση } S_1) \\ \frac{2H_2}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} &= p_{sh2} - p_{e2} && (\text{βάση } S_2) \\ \vdots & && \vdots \\ \frac{2H_n}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} &= p_{shn} - p_{en} && (\text{βάση } S_n) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} &\text{αλλαγή βάσης σε μία} \\ &\text{αυθαίρετη κοινή βάση } S_e \\ &\text{έτσι ώστε } H_e S_e = \sum_{i=1}^n H_i S_i \end{aligned}$$



Για την  $S_e$  ισχύουν:

$$H'_i = \frac{H_i S_i}{S_e}$$

$$P'_{shi} = \frac{P_{shi} S_i}{S_e} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$P'_{ei} = \frac{P_{ei} S_i}{S_e}$$





όπου

$$H_e = \sum_{i=1}^n H'_i = \sum_{i=1}^n \frac{H_i S_i}{S_e}$$

$$P_{she} = \sum_{i=1}^n P'_{shi} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{shi} S_i}{S_e} \quad \text{και}$$

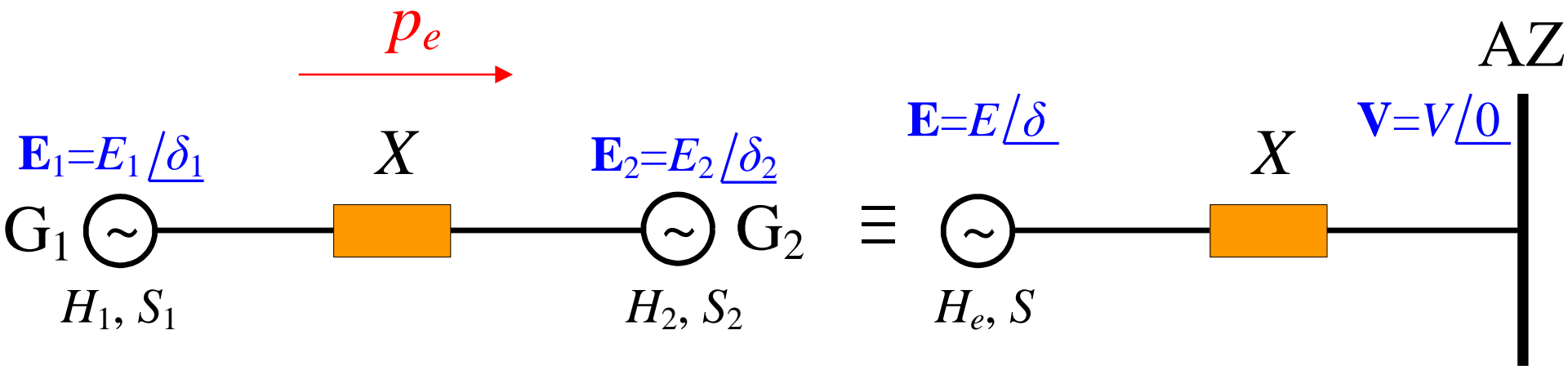
$$P_{ee} = \sum_{i=1}^n P'_{ei} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{ei} S_i}{S_e}$$

Η ισοδύναμη γεννήτρια  $G_e$  θα έχει την τάση  $\mathbf{V}_g$

Σαν γωνία  $\delta$  θα ληφθεί η γωνία μεταξύ των  $\mathbf{V}_g$  και  $\mathbf{V}$



# 8. ΑΝΑΓΩΓΗ ΔΥΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ – ΑΖ



Σχ.4.20: Αναγωγή δύο συστημάτων παραγωγής συνδεδεμένων για ανταλλαγή ενέργειας, σε διάταξη γεννήτριας-άπειρου ζυγού



Σε μια αυθαίρετη κοινή βάση

$$S_1 = S_2 = S$$

για τις δυο γεννήτριες θα ισχύουν οι εξισώσεις κίνησης:

$$\frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H_1} (p_{sh1} - p_{e1})$$

$$\frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H_2} (p_{sh2} - p_{e2})$$



- Γραμμές Μεταφοράς Χωρίς Απώλειες
- Θετική φορά της ισχύος  $p_e$  από  $G_1$  σε  $G_2$

$$P_{e1} + P_{e2} = 0 \Rightarrow P_{e1} = -P_{e2} = P_e$$

Στάσιμη κατάσταση λειτουργίας:

$$P_{sh2} = P_{e2} = -P_{e1} = -P_{sh1} \Rightarrow P_{sh1} = -P_{sh2} = P_{sh}$$

Μεταβατική κατάσταση λειτουργίας:

$$P_{sh1} \neq -P_{sh2}$$





$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} &= \frac{\omega_s}{2H_1} (p_{sh1} - p_e) \\ \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} &= \frac{\omega_s}{2H_2} (p_{sh2} + p_e) \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\frac{d^2 \delta_1}{dt^2} - \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H_1} (p_{sh1} - p_e) - \frac{\omega_s}{2H_2} (p_{sh2} + p_e)$$



$$\left. \begin{aligned}
 \delta &= \delta_1 - \delta_2 \\
 \frac{1}{H_e} &= \frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} \\
 P_{sh} &= \left( \frac{P_{sh1}}{H_1} - \frac{P_{sh2}}{H_2} \right) H_e
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{2H_e}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{sh} - P_e \quad (1)$$



Στην περίπτωση που έχουμε δύο συστήματα με πολύ άνισες σταθερές  $H_1$  και  $H_2$ , τότε η σταθερή  $H_e$  του συνολικού συστήματος θα είναι περίπου ίση με τη μικρότερη σταθερή

$$H_1 \ll H_2 \Rightarrow H_e \cong H_1$$

**$\Rightarrow$  το ασθενέστερο σύστημα θα προσδιορίζει τη συχνότητα ταλαντώσεων**



Η εξίσωση (1) με  $p_{sh} = 0$ , περιγράφει τις ταλαντώσεις που θα δημιουργηθούν αν συνδεθούν δύο συστήματα για ανταλλαγή ενέργειας **χωρίς** αλλαγή της μηχανικής ροπής

Σε κάθε περίπτωση, ένα σύνθετο ΣΗΕ μπορεί να αναχθεί σε μία ισοδύναμη ΣΓ συνδεδεμένη σε έναν άπειρο ζυγό



## 9. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Κίνδυνοι από διαταραχές, μεγάλες και απότομες αλλαγές φορτίου, βραχυκυκλώματα, σφάλματα γης
  - ⇒ Μεγάλα ρεύματα, επικίνδυνες ταλαντώσεις
  - ⇒ Πιθανή απόρριψη φορτίων
- Όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο στάσιμης κατάστασης λειτουργίας της ΣΓ, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος αστάθειας
- ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ-ΦΟΡΤΙΟ: Όριο ευστάθειας
- Περίοδος φαινομένων  $\cong 1 \text{ sec}$  - απόσβεση



- Ισχύς συγχρονισμού: 
$$\frac{\partial P_e}{\partial \delta} \Big|_{\delta=\delta_0} = \frac{E_1 E_2}{X} \cos \delta_0$$
- Μεταφορά > 400 km χρειάζεται προσοχή



## ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

- Μεγάλο ρεύμα διέγερσης:  $E \uparrow$
- Πυκνωτές σε σειρά σε μακριά ΓΜ ΧΑ που μεταφέρει τη  $P_N$  :  $X \downarrow$
- Αυτεπαγωγές παράλληλα σε μακριά ΓΜ ΧΑ που μεταφέρει τη  $P_N$  :  $\delta_l \downarrow$
- Μεταφορά με πολλά κυκλώματα  $X \downarrow$
- Διπλοί ή τετραπλοί αγωγοί ανά φάση  $X \downarrow$
- Μ/Σ μικρής αντίδρασης  $X \downarrow$
- Γρήγοροι διακόπτες ισχύος  $t_1 \downarrow$



## ΕΠΙΔΕΙΝΩΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

- Πυκνωτές παράλληλα σε μακριά ΓΜ ΧΑ που μεταφέρει τη  $P_N$  :  $\delta_l \uparrow$
- Αυτεπαγωγές σε σειρά σε μακριά ΓΜ ΧΑ που μεταφέρει τη  $P_N$  :  $X \uparrow$





# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Λαμπρίδης Δημήτρης.  
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΙΙΙ, ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΗΕ ΙΙΙ». Έκδοση: 1.0.  
Θεσσαλονίκη 2015 Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:  
[http://opencourses.auth.gr/eclass\\_courses](http://opencourses.auth.gr/eclass_courses).



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 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».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

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

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





# Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα  
Θεσσαλονίκη, Εαρινό εξάμηνο 2013-2014





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

---

# Σημειώματα

# 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.

