

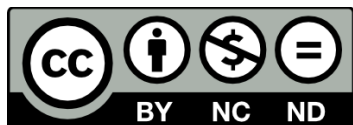


# ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ III

## ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΑ ΣΗΕ

Λαμπρίδης Δημήτρης

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# 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 Ι



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# Περιεχόμενα ενότητας

1. Εισαγωγή πάνω στην ευστάθεια των ΣΗΕ
2. Ισοδύναμα κυκλώματα σύγχρονης γεννήτριας
3. Συνθήκη ευστάθειας στάσιμης κατάστασης γεννήτριας - ΑΖ



# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΑΝΩ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΩΝ ΣΗΕ

*Ευστάθεια* ενός συστήματος



Η ικανότητα του συστήματος να επιστρέφει σε κανονική κατάσταση λειτουργίας μετά από μια διαταραχή στην οποία υποβλήθηκε

*Ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας*



Η ευστάθεια των μηχανών του συστήματος



**Σε ένα ΣΗΕ που λειτουργεί σε στάσιμη κατάσταση**

- **οι μηχανές του συστήματος λειτουργούν σε συγχρονισμό μεταξύ τους**
- **η μεταφερόμενη ενεργή ισχύς προσδιορίζει τις σχετικές γωνίες των δρομέων τους**

**Μια διαταραχή σε ένα ΣΗΕ επιφέρει**

- **μεταβολή της ροής ενεργής ισχύος μεταξύ των μηχανών**
- **ταλάντωση του δρομέα κάθε μηχανής ως προς τους άλλους δρομείς**
- **διακύμανση των τάσεων του ΣΗΕ**



**Ευσταθές ΣΗΕ:** μετά από μια διαταραχή, όλες οι μηχανές επιστρέφουν σε κατάσταση συγχρονισμού (μετά από ένα διάστημα που χαρακτηρίζεται από μηχανικές και ηλεκτρικές ταλαντώσεις)

**Ασταθές ΣΗΕ:** μετά από μια διαταραχή, μια ή περισσότερες μηχανές οδηγούνται σε **απώλεια συγχρονισμού**





Η ευστάθεια των ΣΗΕ διακρίνεται σε

- Ευστάθεια στάσιμης κατάστασης
- Ευστάθεια μεταβατικής κατάστασης

Ένα συγχρονισμένο ΣΗΕ έχει *ευστάθεια στάσιμης κατάστασης* εάν, μετά από μια **μικρή** και **αργή** διαταραχή, μπορεί να επανακτήσει το συγχρονισμό και να τον διατηρήσει

**Αργή διαταραχή:** μια διαταραχή που ολοκληρώνεται σε χρόνο μεγαλύτερο από τις χρονικές σταθερές των μηχανών, των ρυθμιστών των στροβίλων και των αυτομάτων ρυθμιστών τάσης



Μεταβατική χρονική σταθερή

$T'_d$

Στροβιλογεννήτριας

1 s

Γεννήτριας έκτυπων πόλων

1,4 - 1,8 s

**Αργές διαταραχές είναι**

- **φυσιολογικές (μικρές) διακυμάνσεις του φορτίου**
- **η δράση των ρυθμιστών των στροβίλων (έλεγχος  $P-f$ )**
- **η δράση των αυτόματων ρυθμιστών τάσης (έλεγχος  $Q-V$ )**

Μεταβολή γωνίας φόρτισης:

1° - 5°

Ανάλυση προβλήματος:

γραμμική



Ένα συγχρονισμένο ΣΗΕ έχει **ευστάθεια μεταβατικής κατάστασης** εάν, μετά από μια **μεγάλη** και **απότομη** διαταραχή, μπορεί να επανακτήσει το συγχρονισμό και να τον διατηρήσει

Μεγάλες και απότομες διαταραχές είναι

- σφάλματα και αποζεύξεις τους
- μεγάλες αυξήσεις/μειώσεις ισχύος
- χειρισμοί διακοπών του ΣΗΕ

Μεταβολή γωνίας φόρτισης:

> 5°

Ανάλυση προβλήματος:

μη-

γραμμική



## Όριο ευστάθειας ενός ΣΗΕ



Η μέγιστη ενεργή ισχύς στάσιμης κατάστασης που μπορεί να μεταφερθεί από το σύστημα χωρίς απώλεια της ευστάθειας

Το όριο ευστάθειας εξαρτάται από

- το μέγεθος
- τη μορφή, και
- τη θέση της διαταραχής



**Ανάλογα με τη φύση και τη διάρκεια της διαταραχής, τα μηχανικά μεταβατικά φαινόμενα που δημιουργούνται στους δρομείς των σύγχρονων γεννητριών του συστήματος μπορεί**

- **Να αποσβεστούν σε ένα δευτερόλεπτο, ή**
- **Να συνεχιστούν στα επόμενα δευτερόλεπτα ή και λεπτά**

**Στη δεύτερη περίπτωση είναι πάλι δυνατό**

- **Να έχουμε ευτυχή κατάληξη (επανάκτηση του συγχρονισμού), ή**
- **Να οδηγηθούμε σε κατάρρευση του συστήματος**



Η μεταβατική περίοδος μετά τη διαταραχή διαιρείται σε τρία χρονικά διαστήματα:

- Το *αρχικό διάστημα* (το **πρώτο δευτερόλεπτο** μετά τη διαταραχή)
- Το *ενδιάμεσο διάστημα* (~ **πέντε δευτερόλεπτα** μετά το αρχικό διάστημα), και
- Το *τελικό διάστημα* (**αρκετά λεπτά** μετά τη διαταραχή)



## ➤ Αρχικό διάστημα

- ✓ Μη ελεγχόμενες ταλαντώσεις δρομέων (έλεγχοι  $P-f$  και  $Q-V$  δεν προλαβαίνουν να γίνουν)
- ✓ Έλεγχος μόνο με λειτουργίες χειρισμών:
  - Διακοπή και επανάζευξη της βραχυκυκλωμένης γραμμής (αυτόματοι διακόπτες ισχύος)
  - Αποσύνδεση προβληματικών γεννητριών
  - Σύνδεση πυκνωτών υποστήριξης



## ➤ Ενδιάμεσο διάστημα

✓ Οι έλεγχοι  $P-f$  και  $Q-V$  αρχίζουν να επιδρούν

## ➤ Τελικό διάστημα

✓ Μακροχρόνια αποτελέσματα:

➤ Τα συστήματα ατμού λέβητα αρχίζουν να επιδρούν

✓ Μόνιμη απώλεια μονάδων παραγωγής ΗΕ

✓ **Απόρριψη φορτίων**  $\Leftrightarrow$  απόζευξη προεπιλεγμένων καταναλωτών





## 2. ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

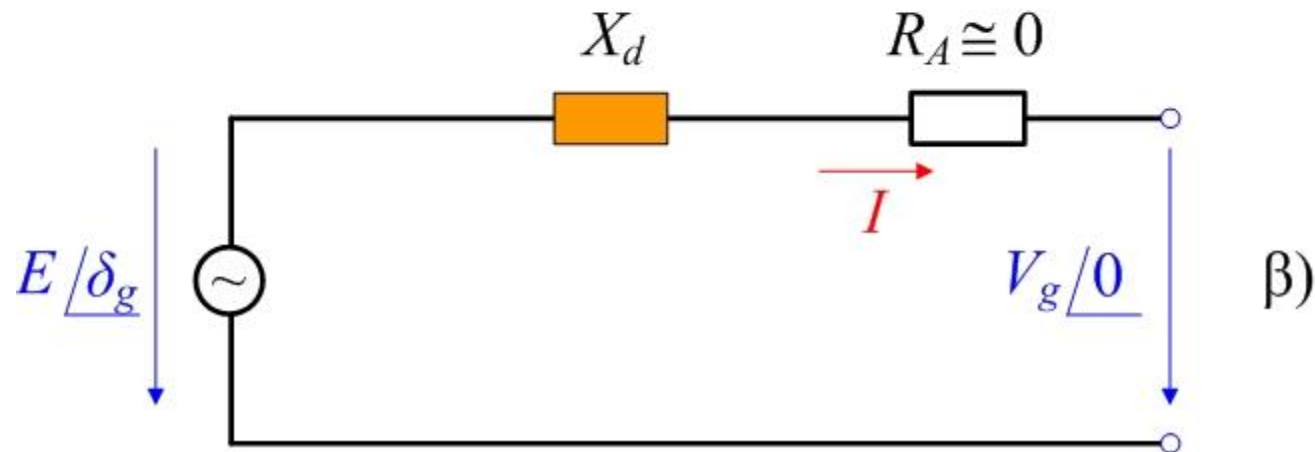
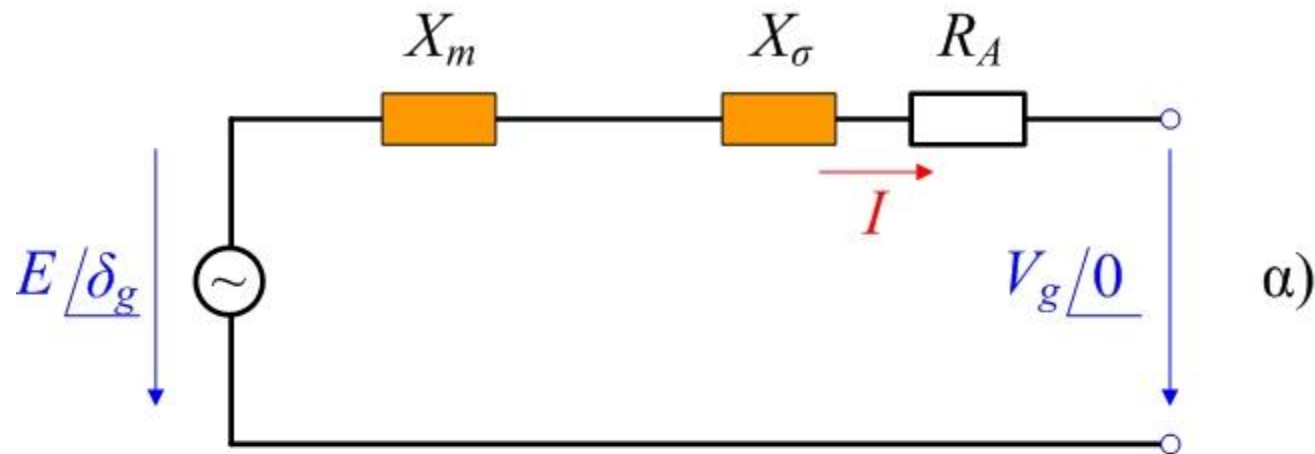
### Η ΣΓ ΣΑΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΣΤΑΣΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

- $X_m$ : αντίδραση μαγνήτισης  
 $X_\sigma$ : αντίδραση σκέδασης  
 $X_d$ : σύγχρονη αντίδραση =  $X_m + X_\sigma$   
 $R_A$ : αντίσταση τυλίγματος στάτη (συχνά αμελείται)

Ηλεκτρική ισχύς ΣΓ ανά φάση

$$P_e = \frac{EV_g}{X_d} \sin \delta_g$$





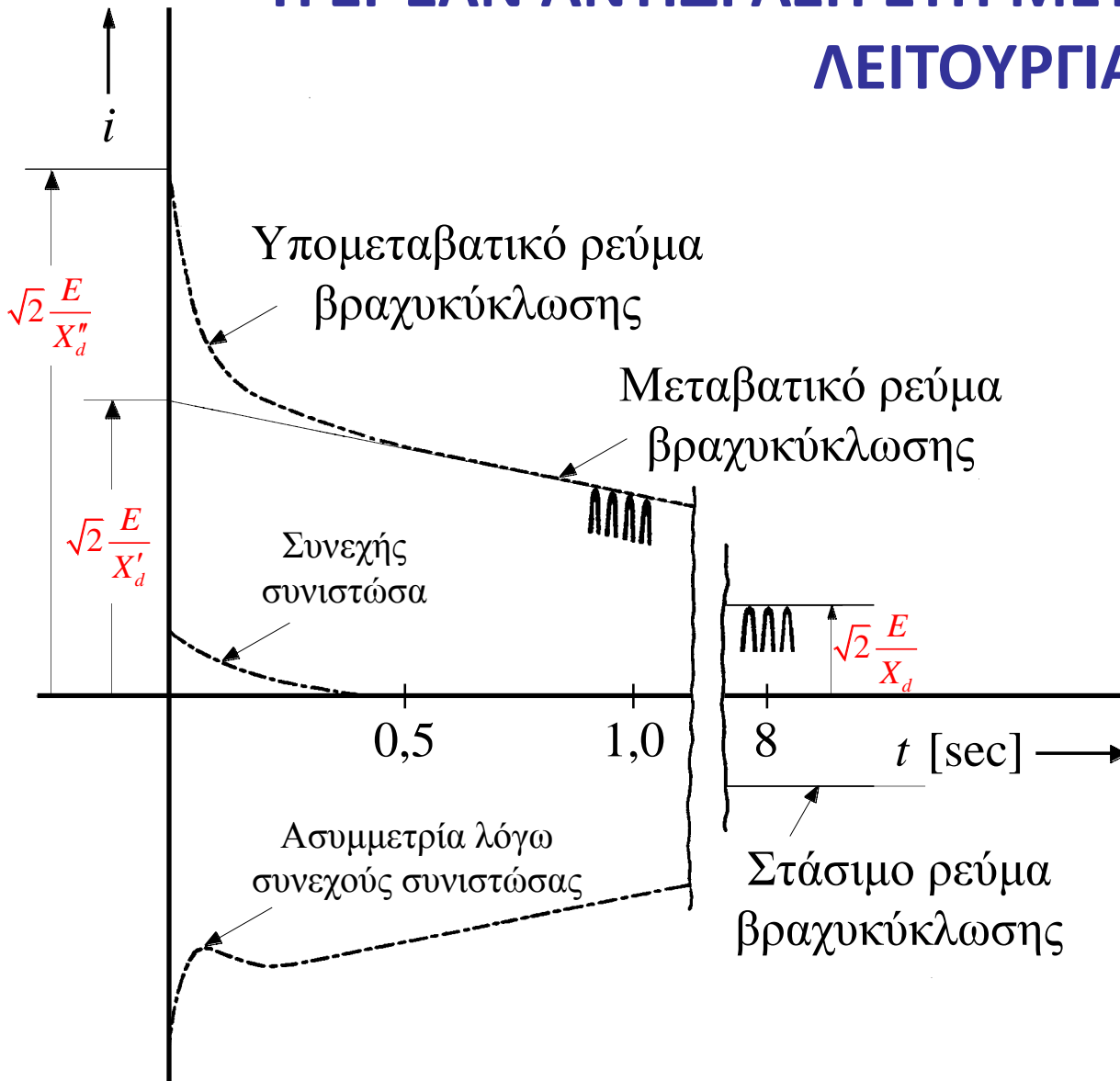
**Σχ.4.2: Ισοδύναμα μονοφασικά κυκλώματα μη κορεσμένης ΣΓ κυλινδρικού δρομέα**

**α) πλήρες ισοδύναμο**

**β) απλοποιημένο ισοδύναμο (ανάλυση ΣΗΕ στη στάσιμη κατάσταση)**



# Η ΣΓ ΣΑΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ



Σχ.4.3:  
Περιβάλλουσα  
του ρεύματος  
βραχυκύκλωσης  
ΣΓ σαν  
συνάρτηση του  
χρόνου

$X_d$  Σύγχρονη αντίδραση

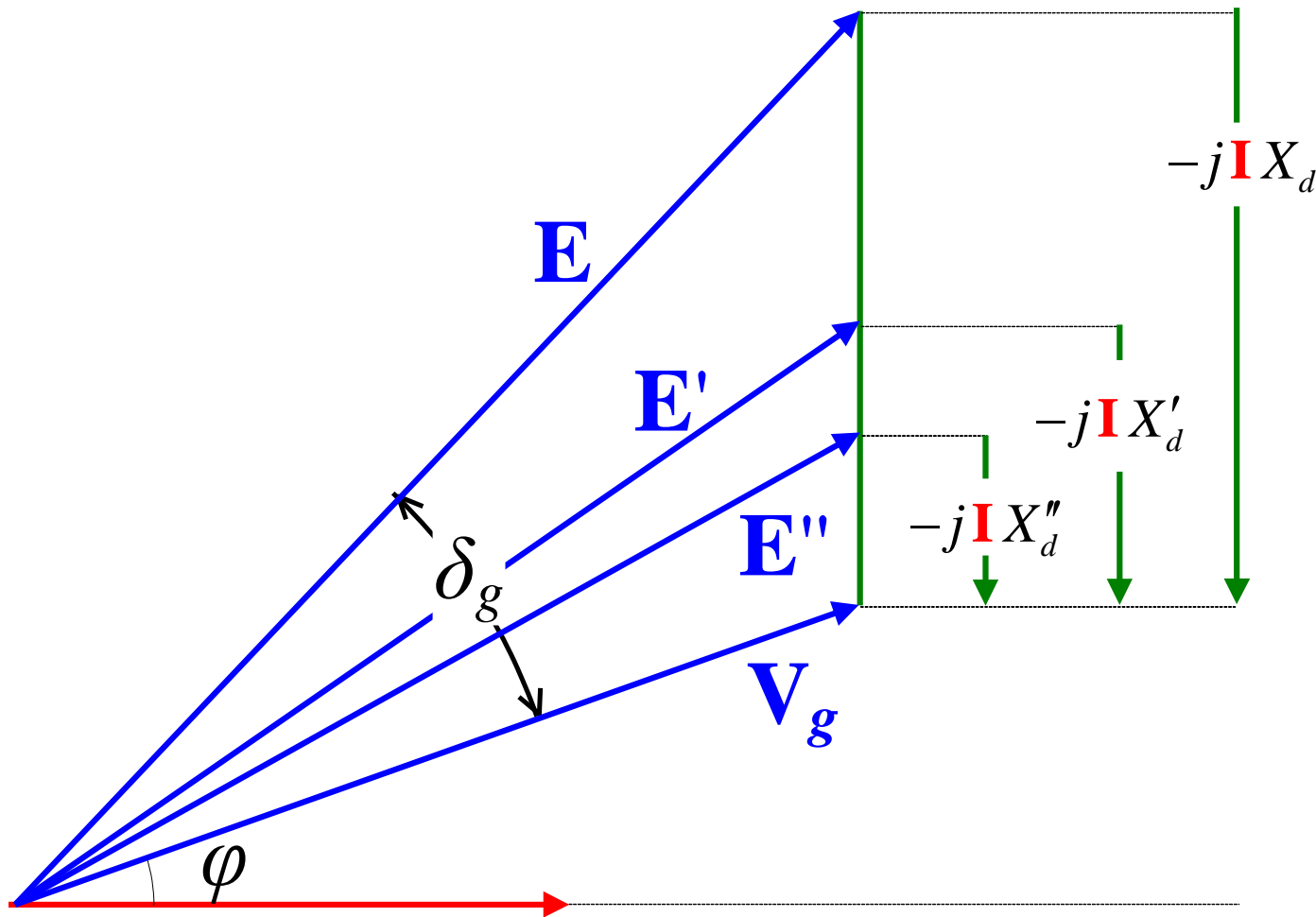
$X'_d$  Μεταβατική αντίδραση ορθού άξονα (0,20 - 0,35 pu)

$T'_d$  Μεταβατική χρονική σταθερή ορθού άξονα (1 - 2 s)  
 $\Rightarrow$  5 – 10 s για στάσιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης

$X''_d$  Υπομεταβατική αντίδραση  
ορθού άξονα (0,07 - 0,30 pu)

$T''_d$  Υπομεταβατική χρονική σταθερή  
ορθού άξονα (20 - 40 ms)





**I**

Σχ.4.4: Διάγραμμα λειτουργίας στροβιλογεννήτριας η οποία λειτουργεί με προ του σφάλματος ρεύμα **I** τροφοδοτώντας ένα σταθερό σύνθετο ωμικό – επαγωγικό φορτίο. Φαίνονται οι υπομεταβατικές και μεταβατικές ΗΕΔ και αντιδράσεις των τριών ισοδυνάμων κυκλωμάτων



# Ανάλογα με το είδος του σφάλματος και τη χρονική περίοδο που ενδιαφέρει, η ΣΓ μπορεί να αναπαρασταθεί κυκλωματικά αντίστοιχα

α) Σε περιπτώσεις σφαλμάτων με έντονα επαγωγικό χαρακτήρα και για την ανάλυση που αφορά στο στάσιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης



μία πηγή τάσης  $E$  πίσω από τη σύγχρονη αντίδραση  $X_d$

β) Αν η ΣΓ έχει κλωβό απόσβεσης και οι συνθήκες των πρώτων δύο κύκλων λειτουργίας μετά το σφάλμα θεωρούνται κρίσιμες



μία πηγή τάσης  $E''$  πίσω από μία σταθερή αντίδραση ίση με την υπομεταβατική αντίδραση του ορθού άξονα  $X_d''$



γ) Αν εξετάζονται προβλήματα ευστάθειας, τότε η αρχική περίοδος δεν είναι κρίσιμη



μία πηγή τάσης  $E'$  πίσω από μία σταθερή αντίδραση ίση με την μεταβατική αντίδραση του ορθού άξονα  $X'_d$



ισοδύναμο κύκλωμα που οδηγεί σε υπολογισμούς με **επαρκή ακρίβεια**, όσον αφορά στην **αρχική ταλάντωση της γωνίας του δρομέα**

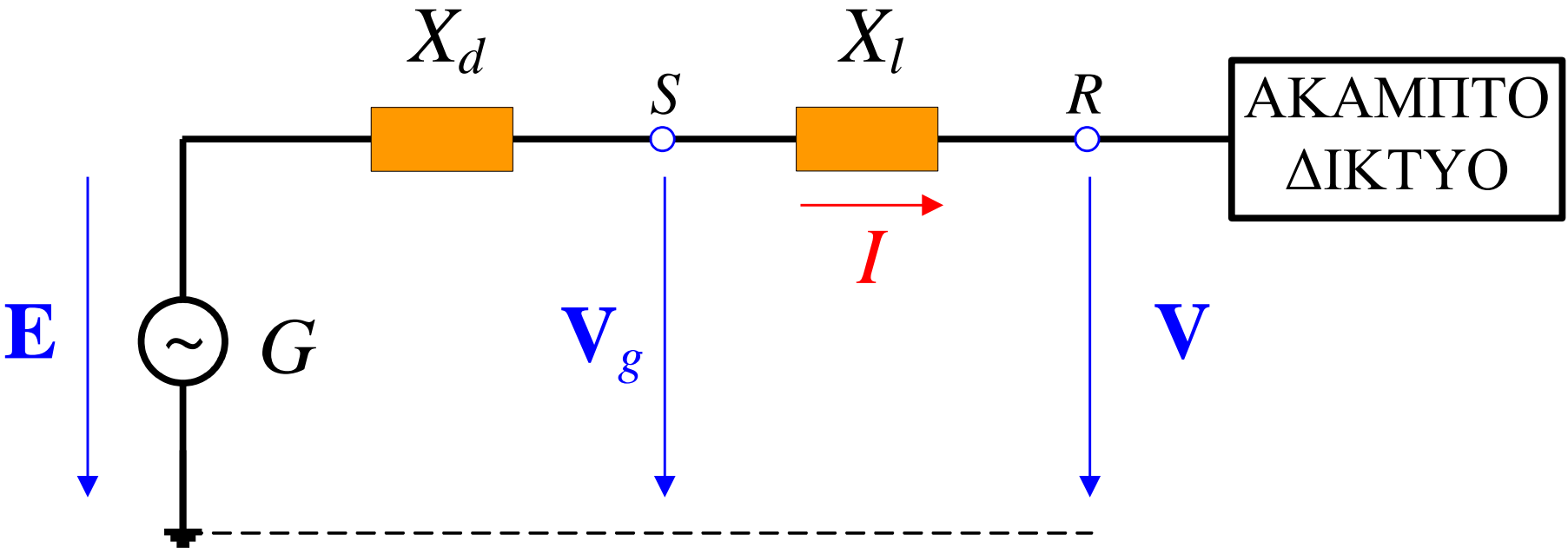


**Γωνία φόρτισης της γεννήτριας  $\delta_g$**  : η αντίστοιχη **ηλεκτρική γωνία** κατά την οποία έχει μετατοπιστεί ο δρομέας της ΣΓ από τη θέση που είχε στη λειτουργία **χωρίς φορτίο** στη θέση που είχε στη λειτουργία **με φορτίο πριν από το σφάλμα**





# ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗ ΣΕ ΑΠΕΙΡΟ ΖΥΓΟ



Σχ.4.5: Ισοδύναμο κύκλωμα ΣΓ  $G$  συνδεδεμένης σε άπειρο ζυγό. Η ΗΕΔ της γεννήτριας είναι  $E$ , η τάση του άπειρου ζυγού είναι  $V$  και η αντίδραση της διασυνδετικής κοντής γραμμής μεταφοράς είναι  $X_l$

Αν  $X = X_d + X_\ell$        $\mathbf{E} = Ee^{j\delta}$        $\mathbf{V} = Ve^{j0}$

τότε  $P_e = \frac{EV}{X} \sin \delta = \hat{P}_e \sin \delta$

όπου  $\hat{P}_e = \frac{EV}{X}$



# ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

➤ Στάσιμη κατάσταση

$$P_{sh} = P_T - P_R = P_e = P_N + P_{Cu} + P_{Fe}$$

$$T_{sh} = T_T - T_R = T_e$$

$$P_{sh} = P_e = \frac{E V}{X} \sin \delta = \hat{P}_e \sin \delta$$

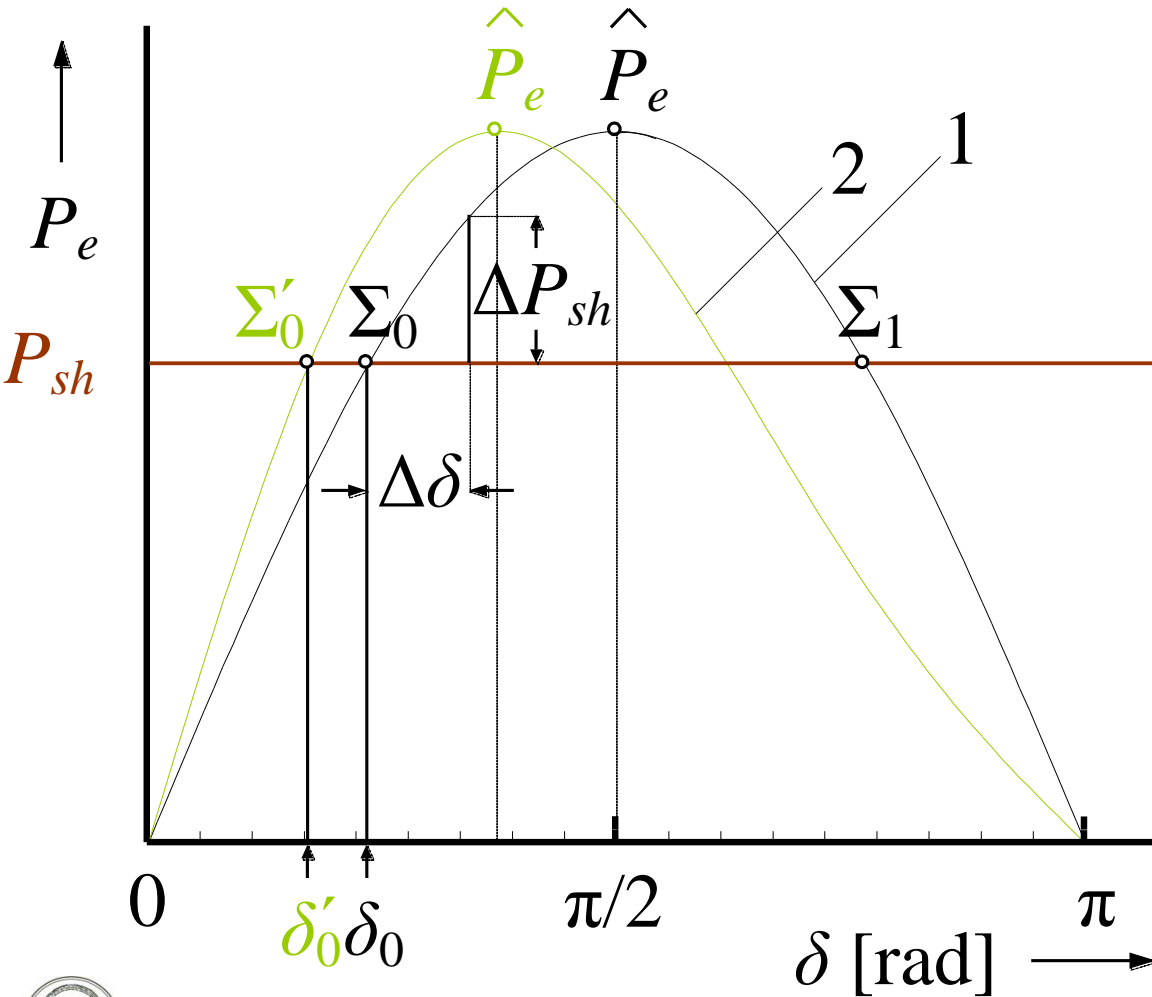
$$(P_e \cong P_N \quad \text{αν} \quad P_{Cu}, P_{Fe} \cong 0)$$

Όριο ευστάθειας στάσιμης κατάστασης

$$\hat{P}_e = \frac{E V}{X}$$



### 3. ΣΥΝΘΗΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΤΑΣΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ - ΑΖ



Σχ.4.7: Καμπύλες ηλεκτρομαγνητικής ισχύος  $P_e$  συναρτήσει της γωνίας φόρτισης  $\delta$  του συστήματος γεννήτριας-άπειρου ζυγού του Σχ.4.5

1: καμπύλη για στροβιλογεννήτρια

2: καμπύλη για γεννήτρια έκτυπων πόλων



➤ Μεταβατική κατάσταση

$$T_{sh} > T_e \Rightarrow P_{sh} > P_e \Rightarrow \text{Ο δρομέας **επιταχύνεται**}$$

$$T_{sh} < T_e \Rightarrow P_{sh} < P_e \Rightarrow \text{Ο δρομέας **επιβραδύνεται**}$$

$$t = 0^-: \quad \omega_m(0^-) = \omega_{ms}$$

$$t = 0: \quad \Delta P_{sh} > 0 \quad \omega_m(0^+) = \omega_{ms} \text{ (λόγω αδράνειας)}$$

$$\text{Επιτάχυνση δρομέα} \quad \Delta\delta > 0 \Rightarrow \frac{\Delta P_{sh}}{\Delta\delta} > 0 \Rightarrow$$

$$\text{Πρέπει, για να έχουμε ευστάθεια,} \quad \Delta P_e > 0 \Rightarrow$$



## Συνθήκη ευστάθειας στάσιμης κατάστασης

$$\frac{\partial P_e}{\partial \delta} > 0 \iff \delta < \frac{\pi}{2}$$

Σημείο  $\Sigma_1 \Rightarrow$  **Αστάθεια**

$$P_{sh} \rightarrow P_{sh} + \Delta P_{sh} \Rightarrow \delta \rightarrow \delta + \Delta \delta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_e \rightarrow P_e - \Delta P_e \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{array}{l} \text{ολίσθηση} \\ \text{πόλων} \end{array} \quad \mathbf{I} = \frac{\mathbf{E} - \mathbf{V}}{jX}$$



Σημείο  $\Sigma_0 \Rightarrow$  **Ευστάθεια**

$$P_{sh} \rightarrow P_{sh} + \Delta P_{sh} \Rightarrow \delta \rightarrow \delta + \Delta\delta \Rightarrow P_e \rightarrow P_e + \Delta P_e$$

$$\Delta P_e = \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \Delta\delta = P_s \Delta\delta$$

**Ισχύς συγχρονισμού**

$$P_s = \left. \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \right|_{\delta=\delta_0} = \frac{E V}{X} \cos \delta_0$$

**Βελτίωση ευστάθειας:**

$$E \uparrow \Rightarrow \hat{P}_e \uparrow, \quad X \downarrow \Rightarrow \hat{P}_e \uparrow$$



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Λαμπρίδης Δημήτρης.  
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΙΙΙ, ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΗΕ Ι». 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



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



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



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.

