



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά  
μαθήματα ΠΠ

# Έλεγχος και Ευστάθεια Σ.Η.Ε

Ενότητα 4: Μεταβατική ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής  
Ενέργειας

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.



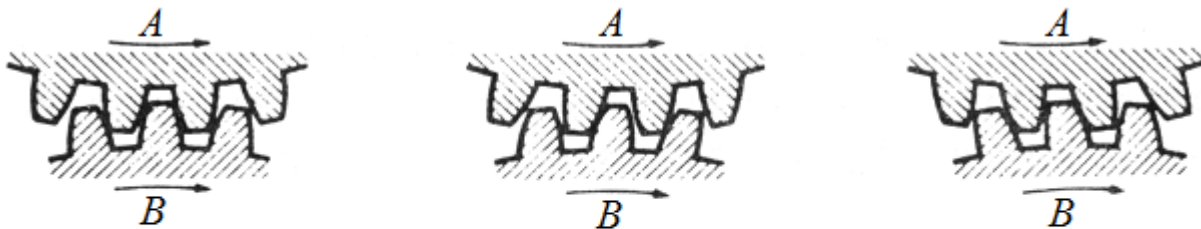
# Εισαγωγή

- Σε αυτό το κεφάλαιο θα προσδιορίσουμε τις απαραίτητες συνθήκες που εξασφαλίζουν την επιτυχή λειτουργία ενός ηλεκτρικού συστήματος, όταν μεταβαίνει από μια μόνιμη κατάσταση λειτουργίας σε μια άλλη, λόγω μεταβολών στις συνθήκες λειτουργίας του.
- Οι ξαφνικές αυτές μεταβολές προκαλούν ανισορροπία μεταξύ των ισχύων εισόδου και εξόδου των ηλεκτρικών μηχανών, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μηχανικών ταλαντώσεων στους δρομείς τους και πιθανό αποσυγχρονισμό των σύγχρονων μηχανών



# Συγχρονισμός γεννήτριας σε άπειρο ζυγό(1)

- Για την κατανόηση της έννοιας του **συγχρονισμού** μιας γεννήτριας, θα θεωρήσουμε ένα μηχανικό ανάλογο, όπου ένας κινητήρας **A** μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων πρόκειται να συνδεθεί σε ένα μηχανικό φορτίο.

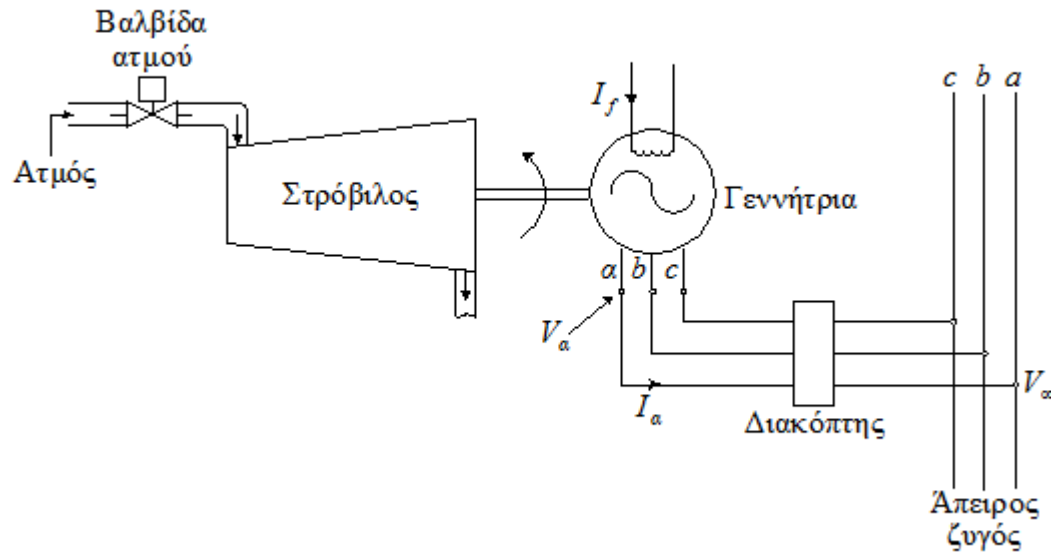


*Μηχανικό ανάλογο της γωνίας ισχύος:  
α) Χωρίς φορτίο. β) Γεννήτρια. γ) Κινητήρας.*

- Οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται πριν συμπλέξουμε το γρανάζι του είναι:
- **1.** Το γρανάζι **A** του κινητήρα πρέπει να έχει την ίδια ταχύτητα με το γρανάζι **B** του συστήματος και την κατάλληλη κατεύθυνση περιστροφής.
- **2.** Τα γρανάζια πρέπει να έχουν ταιριαστά δόντια.
- **3.** Τα γρανάζια πρέπει να έχουν μια κατάλληλη σχετική θέση (φάση). Είναι σαφές ότι η σύνδεση δεν μπορεί να γίνει όταν τα δόντια τους είναι το ένα απέναντι στο άλλο.

# Συγχρονισμός γεννήτριας σε άπειρο ζυγό(2)

- Θα θεωρήσουμε τώρα το αντίστοιχο πρόβλημα της σύνδεσης μιας γεννήτριας στον **άπειρο** ζυγό ενός συστήματος.



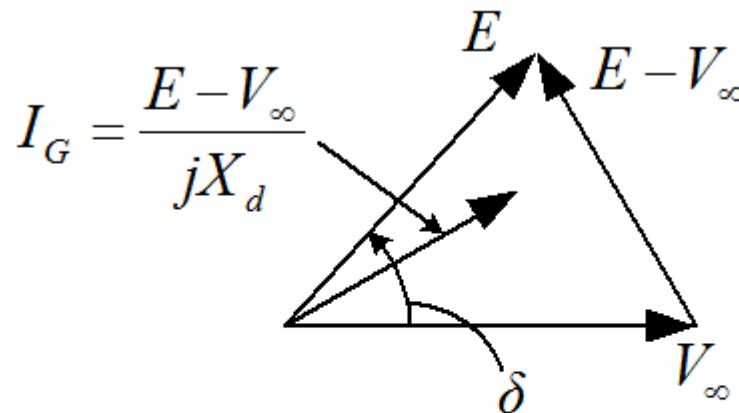
*Γεννήτρια που πρόκειται να συγχρονισθεί.*

- Πριν κλείσουμε το διακόπτη και αρχίσουμε να αποδίδουμε ισχύ στο ζυγό, πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες συνθήκες συγχρονισμού, όσον αφορά τις τάσεις  $V_a$  και  $V_\infty$ .
- 1. Η συχνότητα να είναι η ίδια.
- 2. Η φασική ακολουθία να είναι η ίδια.
- 3. Η γωνία τους να είναι η ίδια.
- 4.  $|V_a| = |E| = |V_\infty|$  όπου  $E$  η εσωτερική τάση της μηχανής.



# Συγχρονισμός γεννήτριας σε άπειρο ζυγό(3)

- Υποθέτουμε τώρα ότι αυξάνουμε τη μηχανική ισχύ που κινεί τη γεννήτρια, οπότε, αν το ρεύμα πεδίου  $I_f$  δεν μεταβληθεί ( $|E|$ =σταθερό), αυξάνει η γωνία ισχύος  $\delta = \angle E - \angle V_\infty$ .

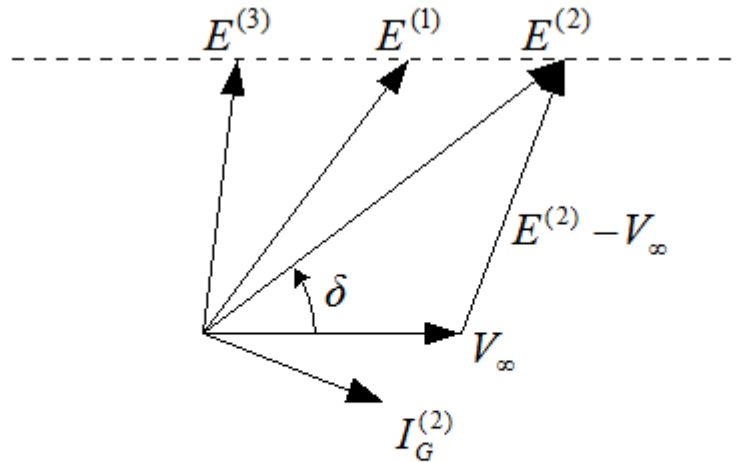


Διανυσματικό διάγραμμα για μεταβολή της μηχανικής ισχύος και  $I_f$  σταθερό.



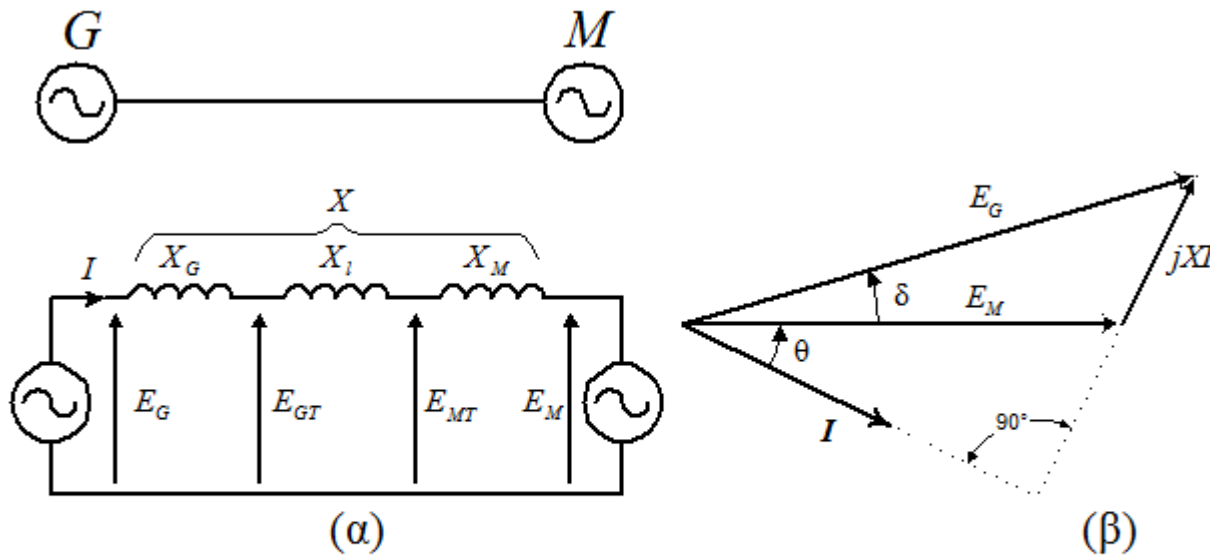
# Συγχρονισμός γεννήτριας σε άπειρο ζυγό(4)

- Υποθέτουμε τώρα ότι μεταβάλλουμε το ρεύμα πεδίου  $I_f$  και κρατούμε σταθερή τη μηχανική ισχύ εισόδου.
- Η μεταβολή του  $I_f$  μεταβάλλει το  $|E|$  αλλά επειδή  $P_G = \text{σταθερό}$ , συμπεραίνουμε ότι το  $|E| \sin \delta$  παραμένει σταθερό και για αυτό το  $E$  τερματίζει πάντοτε στη διακεκομμένη γραμμή, που είναι παράλληλη του  $V_\infty$ .



*Διανυσματικό διάγραμμα για μεταβολή του  $I_f$   
και μηχανική ισχύ εισόδου σταθερή.*

# Απλό σύστημα δύο μηχανών(1)

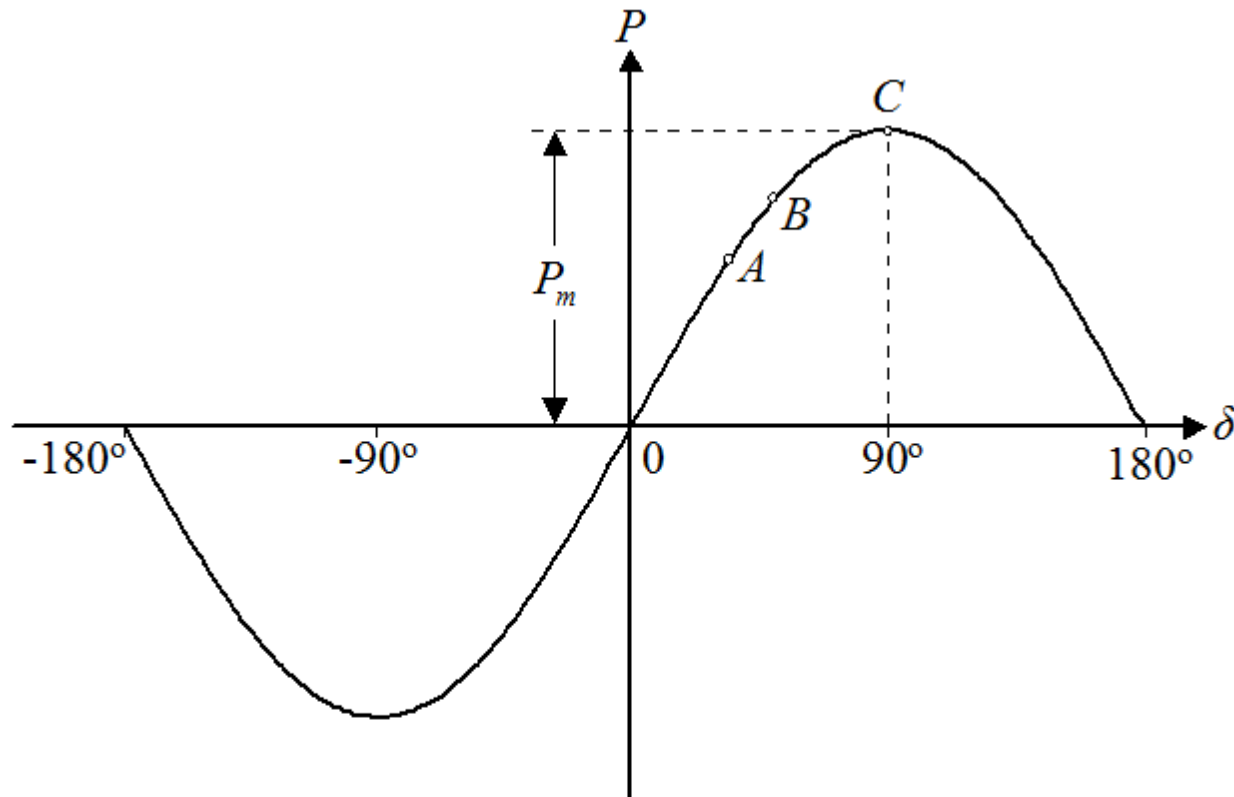


α) Απλό σύστημα δύο μηχανών.  
β) Διανυσματικό διάγραμμα.

- Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας δίνεται από τη σχέση:

$$P = \text{Pr}(E_G^* * I) = \text{Pr}\left(E_G^* \frac{E_G - E_M}{jX}\right) = \frac{E_G E_M}{X} \sin \delta$$

# Απλό σύστημα δύο μηχανών(2)



*Η καμπύλη ισχύος-γωνίας του συστήματος.*

# Παράδειγμα(1)

Μια γεννήτρια συγχρονίζεται σε ένα άπειρο ζυγό με  $I_f = 1000 \text{ A}$ ,  $V_\infty = 1 \angle 0^\circ \text{ pu}$  και  $X_d = 1.2 \text{ pu}$ . Με  $I_f$  σταθερό η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της γεννήτριας αυξάνει σε  $P_G = 0.3 \text{ pu}$ . **α)** Υπολογίστε το  $I_G$ . **β)** Με το  $P_G$  σταθερό, το  $I_f$  αυξάνει στα  $1500 \text{ A}$ . Υπολογίστε το  $I_G$ . Υποθέστε ότι το αυξάνει  $|E|$  αναλογικά με το  $I_f$ .

Λύση:

**α)** Στο συγχρονισμό  $E = V_\infty = 1 \angle 0^\circ \text{ pu}$  και άρα:

$$P_G = \frac{|E||V_\infty|}{X_d} \sin \delta \quad \text{ή} \quad 0.3 = \frac{1}{1.2} \sin \delta$$

Συνεπώς  $\delta = 21.1^\circ$  και,  $E = 1 \angle 21.1^\circ$  οπότε:

$$I_G = \frac{E - V}{jX_d} = \frac{1 \angle 21.1^\circ - 1}{j1.2} = 0.305 \angle 10.55^\circ \text{ pu}$$



# Παράδειγμα(2)

**β)** Επειδή το  $I_f$  αυξάνει κατά ένα συντελεστή **1.5** το ίδιο αυξάνει και το  $|E|$ . Έχουμε:

$$P_G = 0.3 = \frac{1.5}{1.2} \sin \delta \quad \text{ή} \quad \delta = 13.89^\circ \quad \text{και} \quad E = 1.5 \angle 13.89^\circ$$

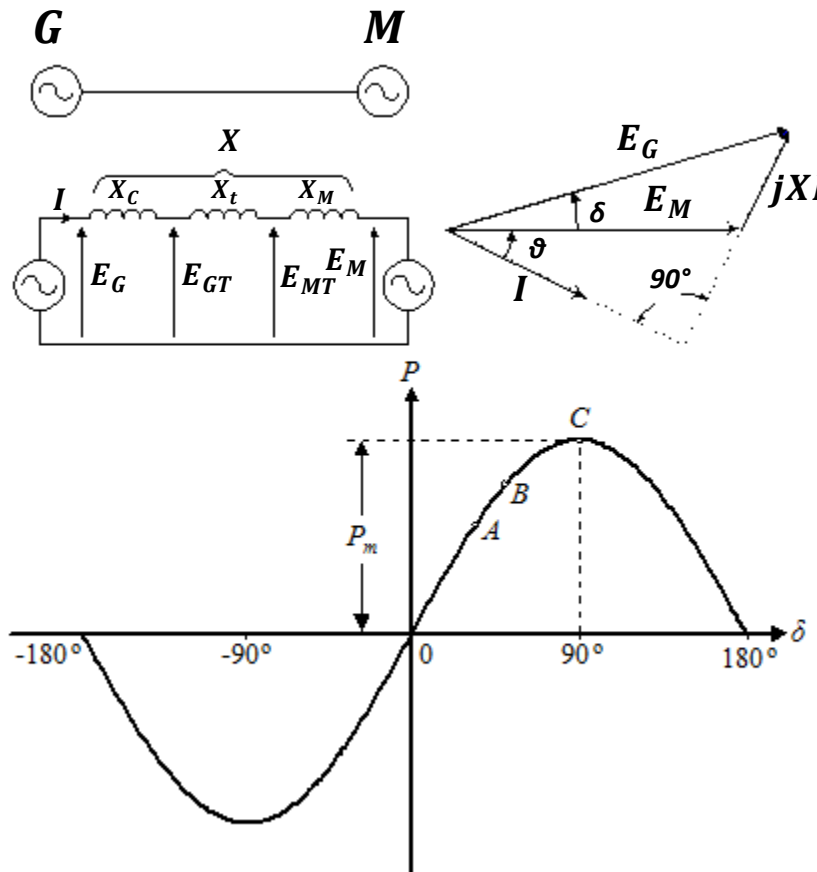
Άρα:

$$I_G = \frac{1.5 \angle 13.89^\circ - 1}{j1.2} = 0.581 \angle -51.72^\circ$$



# Ορισμοί και επεξήγηση των όρων(1)

**Ευστάθεια Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας** είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται στα εναλλασσόμενου ρεύματος συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας για να δηλώσει μια κατάσταση, όπου οι σύγχρονες μηχανές του συστήματος βρίσκονται σε συγχρονισμό, δηλαδή στρέφονται με την ίδια μέση ταχύτητα.



# Ορισμοί και επεξήγηση των όρων(2)

- Η  $P_m$  είναι το **όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης** του συστήματος.
- Το μέγιστο φορτίο στο οποίο ο κινητήρας μπορεί να εργάζεται πριν από κάποια συγκεκριμένη διαταραχή, ώστε να διατηρήσει το συγχρονισμό του και μετά τη διαταραχή ονομάζεται **όριο ευστάθειας μεταβατικής κατάστασης**.
- Για κάθε διαταραχή και συγκεκριμένο τρόπο αντιμετώπισής της, υπάρχει μία τιμή μεταφερόμενης ισχύος, που λέγεται **όριο ευστάθειας μεταβατικής κατάστασης** κάτω από την οποία, όταν εργάζεται προσφαλματικά το σύστημα, είναι ευσταθές και πάνω από την οποία είναι ασταθές.
- Όταν μία γεννήτρια στρέφεται ταχύτερα από μία άλλη, η γωνία που σχηματίζει ο άξονας του δρομέα της με τον άξονα του δρομέα της βραδύτερης γεννήτριας αυξάνει, με αποτέλεσμα μια μεταφορά φορτίου από τη βραδύτερη γεννήτρια στην ταχύτερη, γεγονός που τείνει να ελαττώσει τη διαφορά στην ταχύτητα και τελικά να τη μηδενίσει.



# Τύποι αστάθειας(1)

- Μπορούμε να ορίσουμε τρεις τύπους ασταθούς συμπεριφοράς στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας:
- **1.** Αστάθεια μόνιμης κατάστασης.
- **2.** Αστάθεια μεταβατικής κατάστασης.
- **3.** Αστάθεια δυναμική.
- Σύμφωνα με τους προηγούμενους τύπους αστάθειας, είναι χρήσιμο να διαιρέσουμε τη μετασφαλματική περίοδο στα πιο κάτω τρία διακεκριμένα χρονικά διαστήματα:





# Τύποι αστάθειας(2)

- **1)** Το **αρχικό** διάστημα, που αρχίζει με την εφαρμογή της διαταραχής και τελειώνει μετά από ένα δευτερόλεπτο. Οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις των δρομέων των μηχανών σε αυτό το διάστημα δεν επηρεάζονται από τα συστήματα ελέγχου συχνότητας και τάσης. Σε αυτό το διάστημα έχουμε μόνο την επίδραση των πηνίων απόσβεσης, τη λειτουργία των συστημάτων προστασίας και διακοπών, την εισαγωγή πυκνωτών ενίσχυσης, κ.λ.π.
- **2)** Το **ενδιάμεσο** διάστημα, που ακολουθεί το αρχικό διάστημα και διαρκεί περίπου 5 δευτερόλεπτα. Σε αυτό το διάστημα έχουμε την επίδραση των συστημάτων ελέγχου συχνότητας και τάσης.
- **3)** Το **τελικό** διάστημα, που διαρκεί μερικά λεπτά. Σε αυτό το διάστημα έχουμε την επίδραση παραγόντων με μεγάλη χρονική σταθερά, όπως είναι η χρονική σταθερά του λέβητα και των κυκλωμάτων αναθέρμανσης ατμού για ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, μόνιμη απώλεια γεννητριών, απόρριψη φορτίων κ.λ.π.



# Μεταβατική ευστάθεια-Βασικές έννοιες(1)

- Για την πραγματοποίηση της μελέτης μεταβατικής ευστάθειας των ΣΗΕ θα πρέπει να ακολουθήσουμε τα εξής στάδια
- **α)** Να υπολογίσουμε την κατάσταση του συστήματος πριν τη διαταραχή (αρχική κατάσταση).
- **β)** Να εισάγουμε τη διαταραχή με κατάλληλη τροποποίηση του μαθηματικού μοντέλου του συστήματος.
- **γ)** Να υπολογίσουμε τις μηχανικές ταλαντώσεις των δρομέων των μηχανών που προσδιορίζονται από τον υπολογισμό της γωνιακής θέσης τους.
- **δ)** Αν από την ανάλυση προκύψει ότι οι ταλαντώσεις της γωνιακής θέσης όλων των δρομέων των μηχανών αποσβένονται και το σύστημα τείνει να φτάσει σε μια νέα μόνιμη κατάσταση, τότε συμπεραίνουμε ότι το σύστημα είναι μεταβατικά ευσταθές για τη συγκεκριμένη διαταραχή.



# Μεταβατική ευστάθεια-Βασικές έννοιες(2)

- Το μαθηματικό μοντέλο που θα αναπτύξουμε θα βασισθεί στις πιο κάτω υποθέσεις:
- Κάθε γεννήτρια θα μελετηθεί ξεχωριστά και η μελέτη θα βασισθεί κυρίως στον υπολογισμό των γωνιακών θέσεων  $\delta_v$  των δρομέων των μηχανών.
- Επειδή οι μεταβολές των γωνιακών ταχυτήτων των δρομέων κάθε μηχανής είναι μικρές, μπορούμε να θεωρήσουμε τις γραμμές και τους μετασχηματιστές ότι βρίσκονται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας των 50 Hz. Άρα, όλες οι τάσεις, τα ρεύματα και οι ισχείς μπορούν να υπολογισθούν με τη χρήση των αλγεβρικών εξισώσεων, που ισχύουν στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Αυτή η σημαντική υπόθεση μας επιτρέπει να περιγράψουμε κάθε γεννήτρια με τη διαφορική της εξίσωση ταλάντωσης και να συνδέσουμε όλες τις διαφορικές εξισώσεις μεταξύ τους με αλγεβρικές εξισώσεις.



# Μεταβατική ευστάθεια-Βασικές έννοιες(3)

- Στην περίπτωση συμμετρικών διαταραχών, οι αλγεβρικές εξισώσεις σύζευξης που μόλις αναφέραμε είναι οι Στατικές Εξισώσεις Ροής Φορτίου. Η  $Y_{bus}$  αυτών των εξισώσεων περιλαμβάνει και τις ισοδύναμες αγωγιμότητες με τις οποίες εξομοιώνουμε τα φορτία και τις μηχανές και αυτή είναι η διαφορά της από την  $Y_{bus}$  που χρησιμοποιούμε στη μελέτη ροής φορτίου.
- Στην περίπτωση ασύμμετρων διαταραχών χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις που σχετίζουν τα ρεύματα και τις τάσεις θετικής ακολουθίας στους διάφορους ζυγούς. Αυτό γίνεται επειδή μόνο οι συνιστώσες θετικής ακολουθίας δημιουργούν δυνάμεις συγχρονισμού μέσα στη μηχανή.



# Εξίσωση ταλάντωσης(1)

- Αν θεωρήσουμε ότι υπάρχει μια διαφορά μεταξύ της μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος μιας γεννήτριας, αυτή η διαφορά θα χρησιμοποιηθεί:
- Για να αλλάξει την κινητική ενέργεια, άρα την ταχύτητα, της μονάδας.
- Για να υπερνικήσει κυρίως τη ροπή απόσβεσης των πηνίων απόσβεσης, αλλά και τις μεταβολές τριβής στα έδρανα του δρομέα, τις μαγνητικές απώλειες αλλά και κάθε ροπή που εμποδίζει την περιστροφή.
- Τα προηγούμενα συμπεράσματα τα εκφράζουμε μαθηματικά με τη σχέση:

$$P_{TN} - P_{Gv} = \frac{d}{dt} (W_{κιν,ν}) + P_{αποσ,ν} \quad MW$$



# Εξίσωση ταλάντωσης(2)

Αλλά: 
$$\frac{d}{dt} (W_{κιν,ν}) = \frac{W^0_{κιν,ν}}{\pi f^0} \frac{d^2 \delta_\nu}{dt^2} \quad MW$$

Η γωνία  $\delta_\nu$  μετρείται σε σχέση με ένα άξονα αναφοράς, που στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα.

Υποθέτουμε ότι η ροπή απόσβεσης  $P_{αποσ,ν}$  είναι ανάλογη με τη γωνιακή ταχύτητα, δηλαδή:

$$P_{αποσ,ν} = D_\nu \frac{d\delta_\nu}{dt} \quad MW$$

όπου  $D_\nu$  είναι μια θετική παράμετρος της μηχανής.

Τελικά:

$$P_{TN} - P_{Gv} = \frac{W^0_{κιν,ν}}{\pi f^0} \frac{d^2 \delta_\nu}{dt^2} + D_\nu \frac{d\delta_\nu}{dt} \quad MW$$

Αν διαιρέσουμε με την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας, παίρνουμε:

$$P_{TN} - P_{Gv} = \frac{H_\nu}{\pi f^0} \frac{d^2 \delta_\nu}{dt^2} + D_\nu \frac{d\delta_\nu}{dt} \quad pu \quad MW$$



# Εξίσωση ταλάντωσης(3)

- Η σταθερά  $H_v$ , είναι η σταθερά αδράνειας της μονάδας, μετράται σε δευτερόλεπτα και εκφράζει τα MJ της αποθηκευμένης κινητικής ενέργειας της μονάδας στη σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα ανά MVA ονομαστικό της μονάδας.
- Αν  $G$  είναι η ονομαστική ισχύ της μηχανής σε MVA και  $\omega^0_\mu$  η ονομαστική μηχανική γωνιακή ταχύτητα, έχουμε:

$$W^0_{κιν} = GH = \frac{1}{2} M \omega^0_\mu = \frac{1}{2} J \omega^2_\mu \quad MJ$$

όπου  $M = \frac{GH}{\pi f^0_\mu} = J \omega_\mu$  είναι η γωνιακή ροπή (στροφορμή) και  $J$  είναι η ροπή αδράνειας της μονάδας.

# Μεταβατική ισχύς στροβίλου

- Στο διάστημα του πρώτου δευτερολέπτου μετά τη διαταραχή, με μια πρώτη προσέγγιση, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η ισχύς του στροβίλου παραμένει σταθερή (λόγω των μεγάλων χρονικών σταθερών του συστήματος ελέγχου της συχνότητας και του στροβίλου) και ίση με την προσφαιματική τιμή της, δηλαδή:

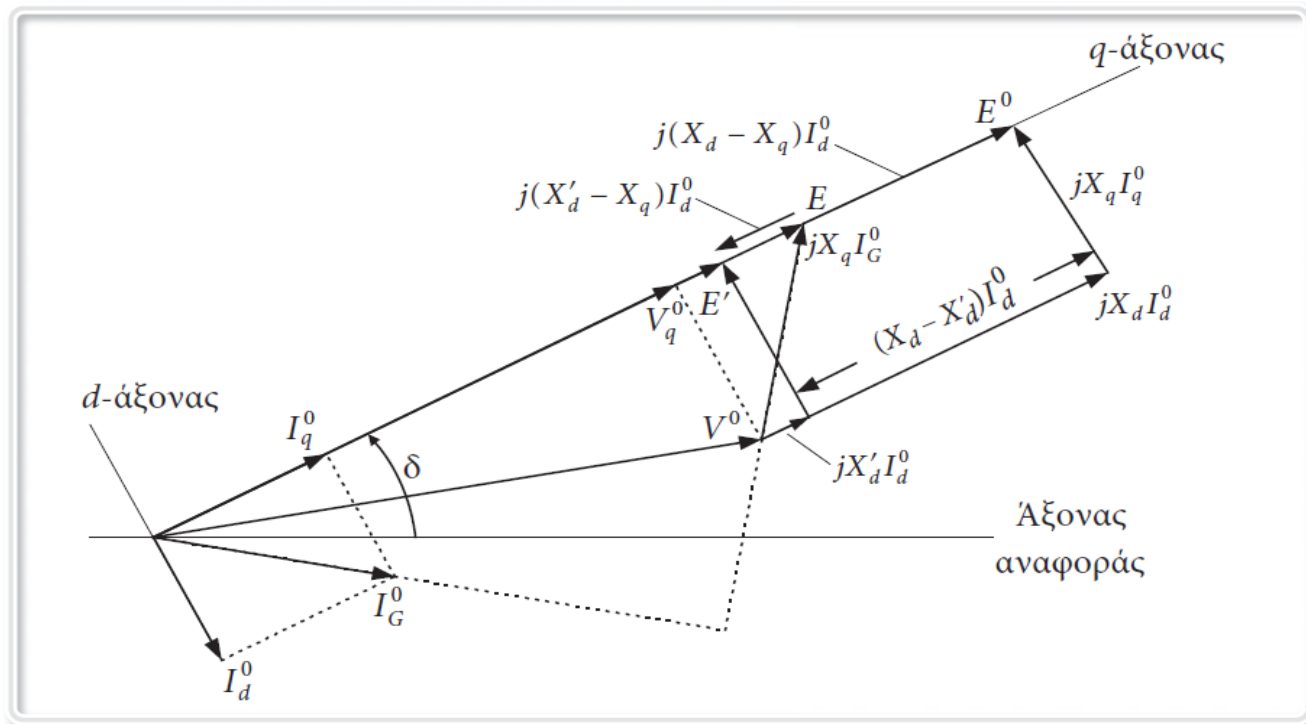
$$P_{TN} = P^0_{TN} = \text{σταθερή}$$







# Μεταβατική ηλεκτρική έξοδος της γεννήτριας(1)



Σχ. 4.8 Διαανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας στη μόνιμη κατάσταση.

Αρχικά θα υπολογίσουμε το  $E^0$  και επομένως το  $\delta$ , ενώ γνωρίζουμε τις ασφαλιστικές τιμές της τερματικής τάσης  $V^0$  και του ρεύματος  $I_G^0$ .

$$E^0 = E + j(X_d - X_q)I_d^0 \quad \text{όπου} \quad E = V^0 + jX_q I_G^0$$

Το  $E$  βρίσκεται στον άξονα  $q$  και προσδιορίζει τη γωνία  $\delta$ . Άρα υπολογίζεται το  $I_d^0$  και τελικά το  $E^0$ .

# Μεταβατική ηλεκτρική έξοδος της γεννήτριας(2)

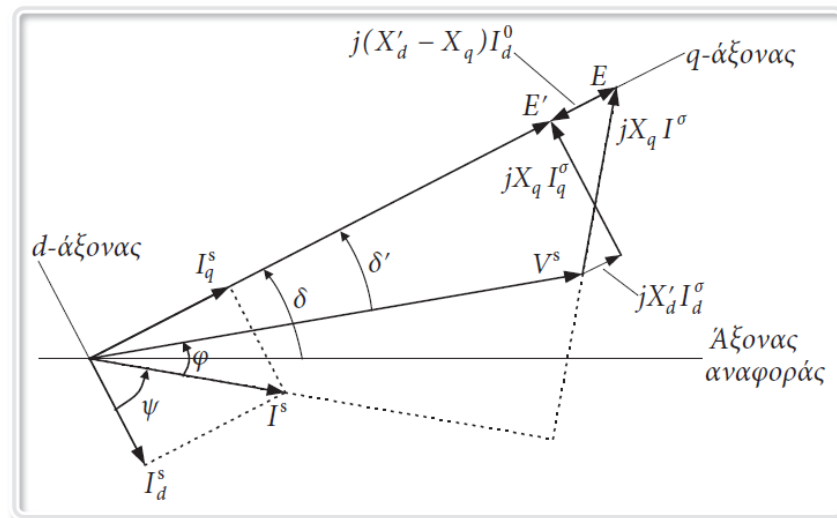
Μετά τη διαταραχή η εσωτερική τάση της γεννήτριας γίνεται  $E'$  από  $E^0$ , η αμοιβαία σύζευξη στον άξονα  $d$  ελαττώνεται από  $X_d$  σε  $X'_d$ , επειδή το πεδίο βρίσκεται στον άξονα  $d$ , ενώ το  $X_q$  παραμένει αμετάβλητο.

Για το  $E'$  ισχύει αντίστοιχη εξίσωση με το  $E^0$ , όπου το  $X'_d$  αντικαθιστά το  $X_d$  :

$$E' = E + j(X'_d - X_q)I^0_d, \text{ γνωρίζοντας ότι: } X_d > X_q > X'_d$$

Μια σχέση από την οποία είναι δυνατός ο υπολογισμός του  $|E'|$  με τη χρήση μόνο τάσεων, είναι:

$$|E'| = \frac{X'_d |E^0| + (X_d - X'_d) |V^0_q|}{X_d}$$



Σχ. 4.9 Διανυσματικό διάγραμμα γεννήτριας στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας.

# Μεταβατική ηλεκτρική έξοδος της γεννήτριας(3)

Η πραγματική και άεργος ισχύς, που τροφοδοτεί η γεννήτρια μετά τη διαταραχή, θεωρώντας ότι το  $|E'|$  παραμένει σταθερό, είναι:

$$P_G = \frac{|V^\sigma||E'|}{X'_d} \sin\delta' + \frac{|V^\sigma|^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X'_d} \right) \sin 2\delta' \quad Q_G = \frac{|V^\sigma||E'|}{X'_d} \cos\delta' - \frac{|V^\sigma|^2}{X'_d}$$

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η πραγματική και άεργος ισχύς εξόδου δίνονται από αντίστοιχες εξισώσεις, αν αντικαταστήσουμε το  $V^\sigma$  με το  $V^0$ , το  $E'$  με το  $E^0$  και το  $X'_d$  με το  $X_d$ .

Επειδή  $\frac{|E'|}{X'_d} > \frac{|E^0|}{X_d}$ , η μέγιστη ισχύς στη μεταβατική κατάσταση είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη ισχύ στη μόνιμη κατάσταση, για τερματική τάση σταθερή.

Επίσης ο δεύτερος όρος στην εξίσωση πραγματικής ισχύος στη μεταβατική κατάσταση αφαιρείται από τον πρώτο όρο για  $0^\circ < \delta' < 90^\circ$  και προστίθεται για  $90^\circ < \delta' < 180^\circ$ .

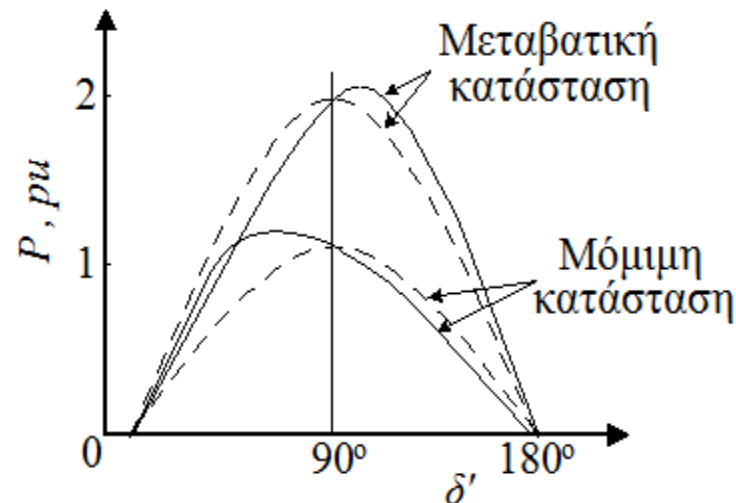


# Μεταβατική ηλεκτρική έξοδος της γεννήτριας(4)

$$P_G = \frac{|V^\sigma||E'|}{X'_d} \sin\delta' + \frac{|V^\sigma|^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X'_d} \right) \sin 2\delta'$$

$$\frac{|E'|}{X'_d} > \frac{|E^0|}{X_d}$$

$$X_d > X_q > X'_d$$



Καμπύλες ισχύος-γωνίας για μηχανή με κυλινδρικό δρομέα (διακεκομμένες γραμμές) και με έκτυπους πόλους (συμπαγείς γραμμές).

# Παράδειγμα(1)

Θεωρούμε μια σύγχρονη στροβιλογεννήτρια με ισχύ εξόδου στη μόνιμη κατάσταση  $0.6 pu MW$  και με παραμέτρους:  $X_d = X_q = 1.2 pu$ ,  $X'_d = 0.23 pu$ ,  $|E^0| = 1.2 pu$ . Αν υποθέσουμε ότι η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε ένα άπειρο ζυγό, δηλαδή ότι  $|V^0||V^s| = 1 pu$ , να υπολογίσετε τις καμπύλες ισχύος-γωνίας για τη μόνιμη και μεταβατική κατάσταση. Αν ο ζυγός της γεννήτριας δεν είναι άπειρος και η μετασφαλματική τάση του είναι  $0.3 pu$  ποια είναι η καμπύλη ισχύος-γωνίας;

## Λύση

Επειδή  $X_d = X_q$ , η ισχύς εξόδου της γεννήτριας στη μόνιμη κατάσταση δίνεται από τη σχέση:

$$P_G = \frac{|E^0||V^0|}{X_d} \sin\delta' = \frac{1.2*1}{1.2} \sin\delta' = 1.0 \sin\delta' pu MW$$



# Παράδειγμα(2)

$$|E'| = \frac{X'_d|E^0| + (X_d - X'_d)|V^0_q|}{X_d}$$

$$P_G = \frac{|V^\sigma||E'|}{X'_d} \sin\delta' + \frac{|V^\sigma|^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X'_d} \right) \sin 2\delta'$$

Για να υπολογίσουμε τη μεταβατική ισχύ εξόδου πρέπει να γνωρίζουμε το  $|E'|$ , που υπολογίζεται από το προσφαλματικό σημείο λειτουργίας. Έχουμε:

$$0.6 = 1.0 \sin\delta'^0 \quad \text{άρα} \quad \sin\delta'^0 = 36.87^\circ$$

$$|V^0_q| = |V^0| \cos\delta'^0 = 1.0 * \cos 36.87^\circ = 0.8 \text{ pu}$$

$$|E'| = \frac{0.23 * 1.2 + (1.2 - 0.23) * 0.8}{1.2} = 0.877 \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} P_G &= \frac{1 * 0.877}{0.23} \sin\delta' + \frac{1^2}{2} \left( \frac{1}{1.2} - \frac{1}{0.23} \right) \sin 2\delta' \\ &= 3.81 \sin\delta' - 1.76 \sin 2\delta' \text{ pu MW} \end{aligned}$$

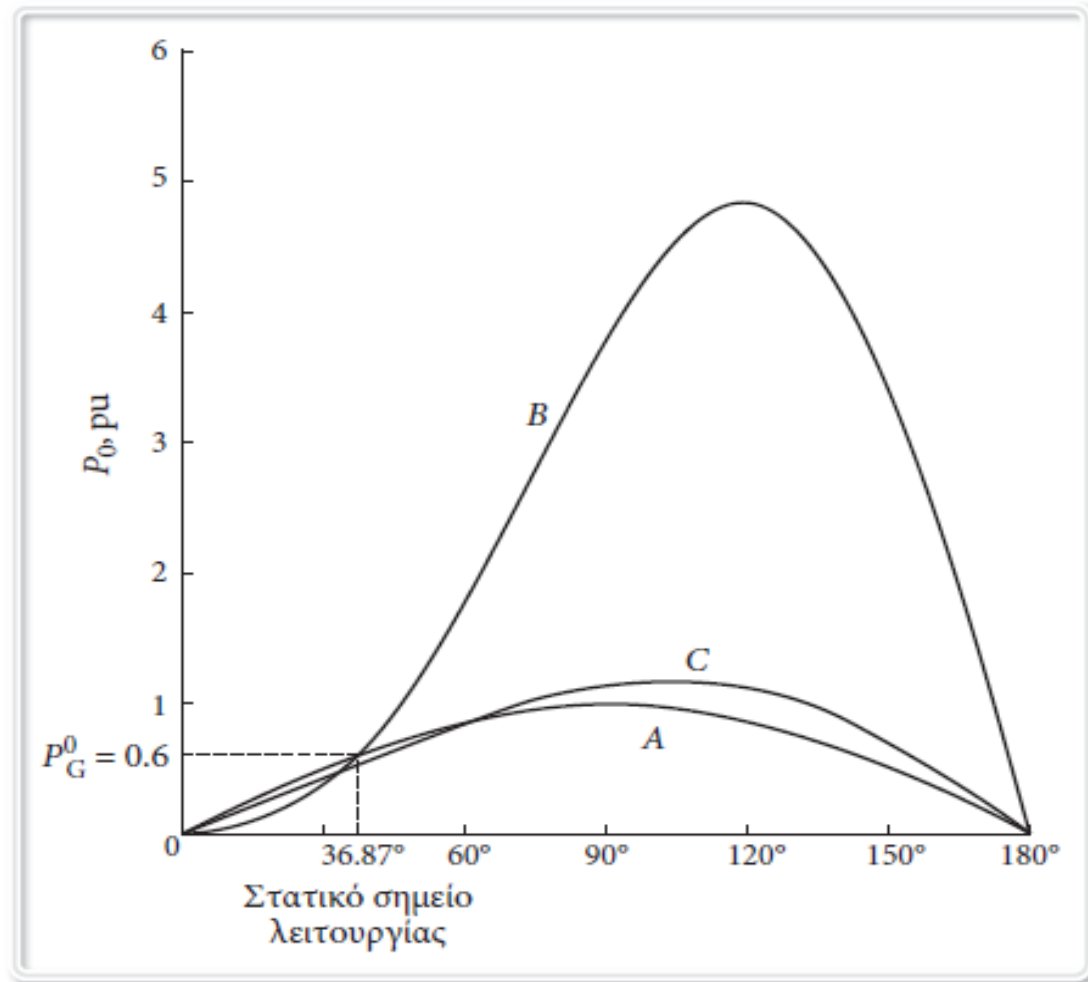
Αν η μετασφαλματική τάση γίνει  $|V^\sigma| = 0.3 \text{ pu}$  και πάλι έχουμε  $|E'| = 0.877$ .

Άρα:

$$\begin{aligned} P_G &= \frac{0.3 * 0.877}{0.23} \sin\delta' + \frac{0.3^2}{2} \left( \frac{1}{1.2} - \frac{1}{0.23} \right) \sin 2\delta' \\ &= 1.144 \sin\delta' - 0.158 \sin 2\delta' \text{ pu MW} \end{aligned}$$



# Παράδειγμα(3)

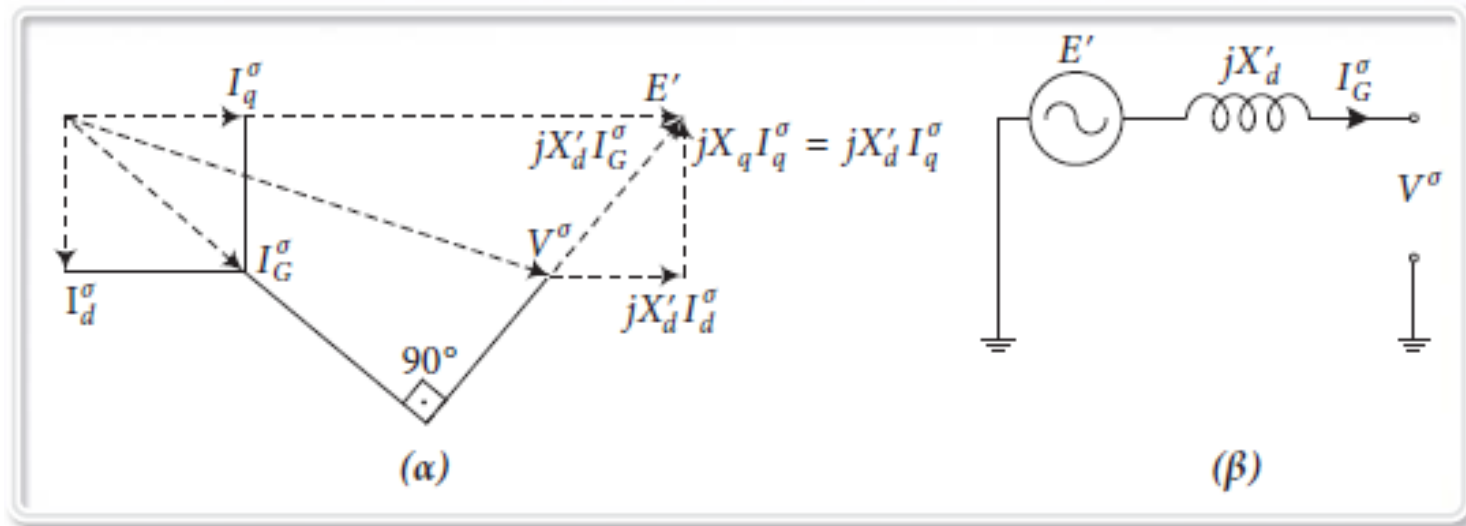


Σχ. 4.11 Στατική και μεταβατικές ισχύεις στροβιλογεννήτριας.



# Απλή παράσταση σύγχρονης γεννήτριας

Αν υποθέσουμε ότι  $X_q = X'_d$ , παίρνουμε  $E' = E$  και το διανυσματικό διάγραμμα γίνεται:



Σχ. 4.12 (α) Μετασφαλματικό διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων για  $X_q = X'_d$ .

(β) Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας για  $X_q = X'_d$ .

Άρα μπορούμε να γράψουμε:

$$V^\sigma = E' - jI_G^\sigma X'_d \text{ και } P_G = \frac{|V^\sigma||E'|}{X'_d} \sin\delta'$$



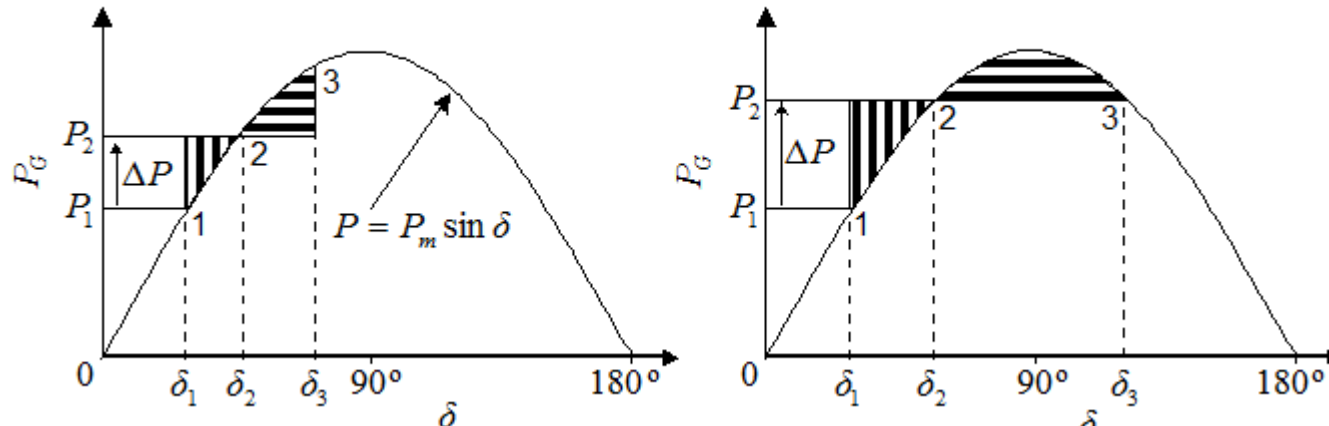
# Μέθοδοι μεταβατικής ευστάθειας

- Χρησιμοποιούμε δύο τρόπους μελέτης:
- **α)** Μέθοδοι **απευθείας ανάλυσης** με τις οποίες εξετάζεται η ευστάθεια χωρίς ουσιαστικά να λύνονται οι διαφορικές εξισώσεις. Μεταξύ αυτών είναι η μέθοδος Liapunov και η **μέθοδος των ίσων εμβαδών**.
- **β)** Η μέθοδος **έμμεσης λύσης**, όπου οι αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις του συστήματος επιλύονται σήμερα με αριθμητικές μεθόδους, που εφαρμόζονται σε ψηφιακούς υπολογιστές. Με αυτές τις μεθόδους η ευστάθεια ή όχι του συστήματος προσδιορίζεται από την προκύπτουσα μορφή των καμπυλών ταλάντωσης και είναι η μόνη πρακτική λύση για την επίλυση πραγματικών ΣΗΕ.



# Κριτήριο ίσων εμβαδών για μεταβατική ευστάθεια(1)

Θα αναπτύξουμε το κριτήριο των ίσων εμβαδών για την περίπτωση βηματικής αύξησης της μηχανικής ισχύος του στροβίλου  $P_T$  μιας σύγχρονης γεννήτριας συνδεδεμένης σε ένα άπειρο ζυγό, με σταθερό το μέτρο της ηλεκτρεγερτικής τάσης  $E'$ , με  $X_q = X'_d$  και για καθαρά επαγωγικό δίκτυο.



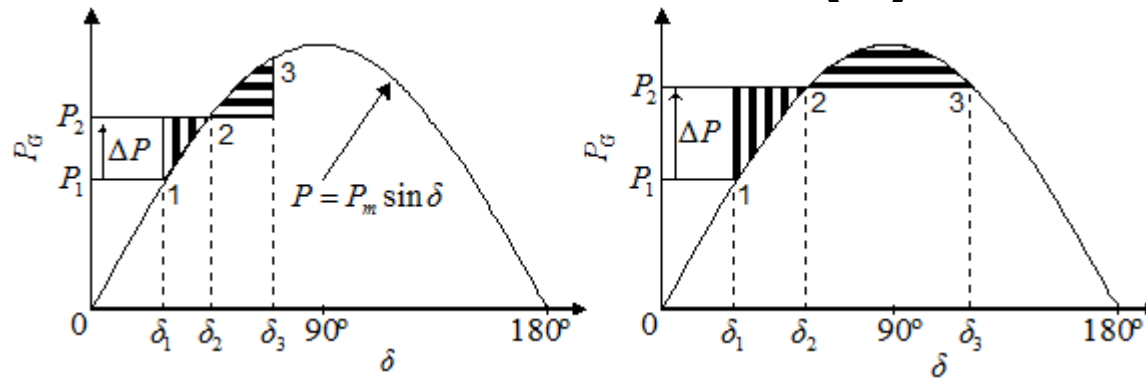
(α) Κριτήριο ίσων εμβαδών για βηματική αύξηση του  $P_T$

(β) Οριακή περίπτωση όταν  $\delta_3 = 180^\circ - \delta_2$





# Κριτήριο ίσων εμβαδών για μεταβατική ευστάθεια(2)



(α) Κριτήριο ίσων εμβαδών για βηματική αύξηση του  $P_T$   
 (β) Οριακή περίπτωση όταν  $\delta_3 = 180^\circ - \delta_2$

Αναλυτικότερα τα εμβαδά επιτάχυνσης και επιβράδυνσης είναι ίσα με:

$$A_{\varepsilon\pi\tau} = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_2 - P_m \sin \delta) d\delta = A_{\varepsilon\pi\beta} = \int_{\delta_2}^{\delta_3} (P_m \sin \delta - P_2) d\delta$$

Τελικά παίρνουμε:

$$P_2(\delta_3 - \delta_1) = P_m(\cos \delta_1 - \cos \delta_3) \text{ ή } (\delta_3 - \delta_1) \sin \delta_2 = \cos \delta_1 - \cos \delta_3$$

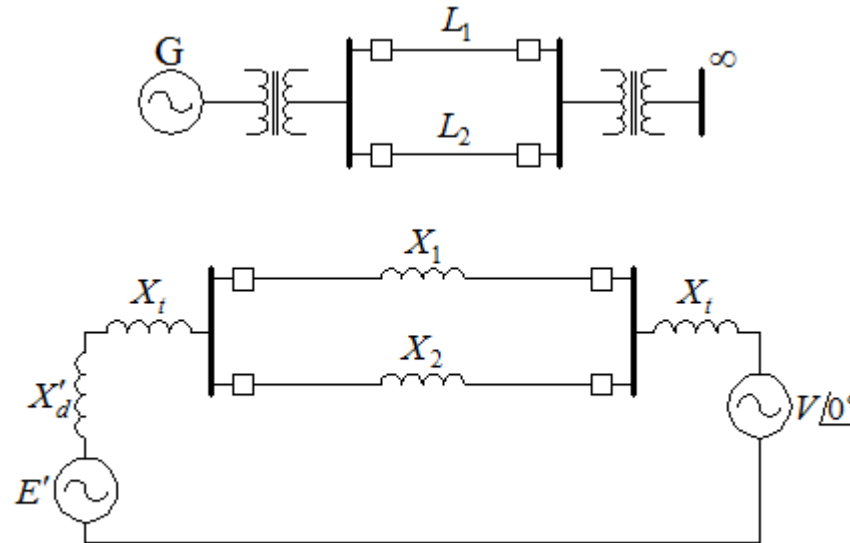
όπου οι γωνίες ισχύος πρέπει να μετρούνται σε ακτίνια.

Υπάρχει μια μέγιστη μεταβολή ισχύος στροβίλου  $\Delta P$ , που οδηγεί σε  $\delta_3 = \pi - \delta_2$ , για την οποία έχουμε ευστάθεια. Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε:

$$(\pi - \delta_1 - \delta_2) \sin \delta_2 = \cos \delta_1 + \cos \delta_2$$

# Άλλες εφαρμογές του κριτηρίου των ίσων εμβαδών

- Αποσύνδεση παράλληλης γραμμής



*Σύνδεση γεννήτριας με δύο παράλληλες γραμμές.*

Η τροφοδοτούμενη αρχικά ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας είναι:

$$P_{GI} = \frac{|E'| |V|}{X'_d + 2X_t + (X_1 || X_2)} \sin \delta$$

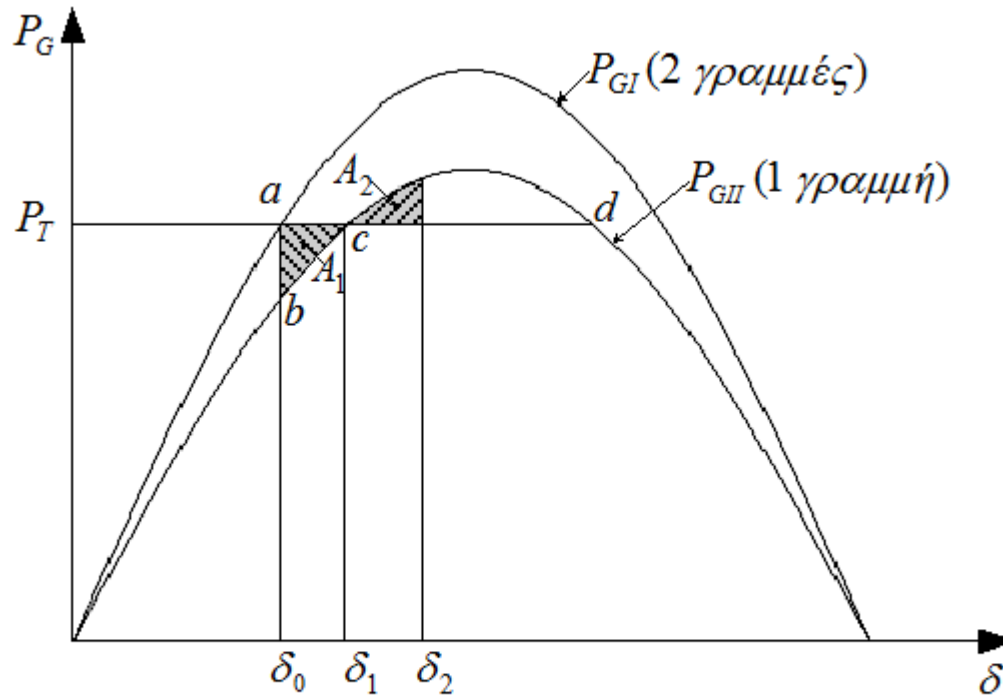
και με την αποσύνδεση της γραμμής  $L_2$  ελαττώνεται σε:

$$P_{GII} = \frac{|E'| |V|}{X'_d + 2X_t + X_1} \sin \delta$$





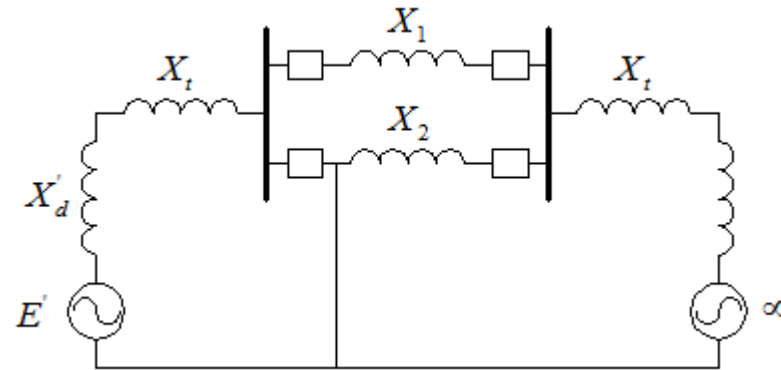
# Αποσύνδεση παράλληλης γραμμής(2)



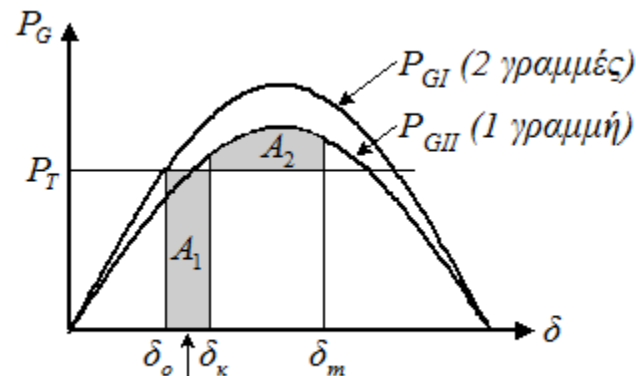
Κριτήριο των ίσων εμβαδών για αποσύνδεση μιας παράλληλης γραμμής.

Εκείνη η τιμή του  $P_T$ , που οδηγεί σε  $\delta_2 = \pi - \delta_1$ , είναι το όριο μεταβατικής ευστάθειας για την αποσύνδεση μιας παράλληλης γραμμής.

# Τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα σε παράλληλη γραμμή(1)



Τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ένα άκρο της γραμμής

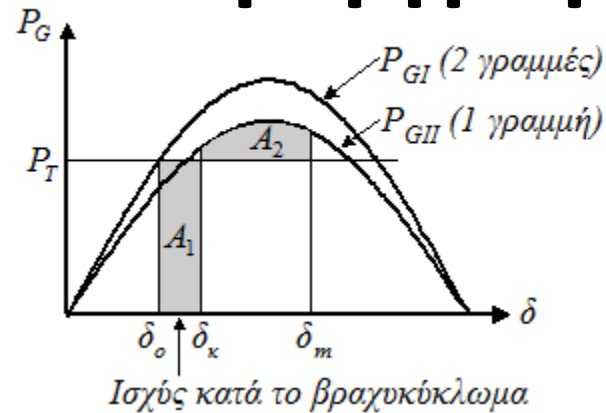


Ισχύς κατά το βραχυκύκλωμα

Κριτήριο των ίσων εμβαδών για τριφασικό βραχυκύκλωμα και απομόνωσή του με αποσύνδεση μιας γραμμής



# Τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα σε παράλληλη γραμμή(2)

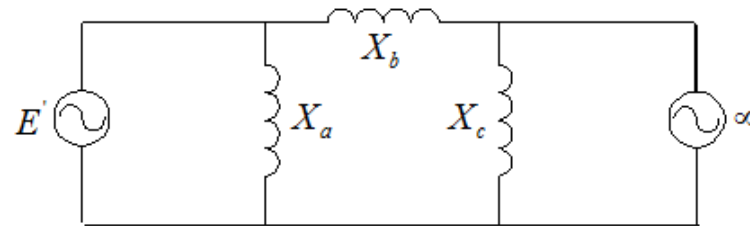
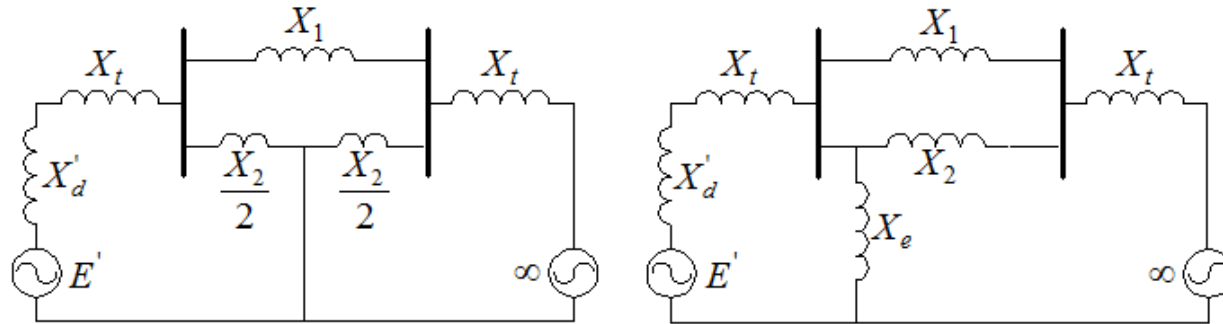


Κριτήριο των ίσων εμβαδών για τριφασικό βραχυκύκλωμα και απομόνωσή του με αποσύνδεση μιας γραμμής

- Υπάρχει, για κάθε  $P_T$ , μια **κρίσιμη γωνία εκκαθάρισης,  $\delta_{\kappa}$** , που όταν η εκκαθάριση γίνει νωρίτερα από αυτήν τη γωνία, έχουμε ευστάθεια, διαφορετικά οδηγούμαστε σε αστάθεια.
- Για να φτάσει η γωνία ισχύος την κρίσιμη γωνία εκκαθάρισης παρέρχεται ένας χρόνος  $t_{\kappa}$ , που ονομάζεται **κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης**.
- Όταν το τριφασικό βραχυκύκλωμα συμβεί σε μια ενδιάμεση θέση της γραμμής ή έχουμε κάποιο άλλο τύπο βραχυκυκλώματος, τότε κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος εξακολουθούμε να έχουμε κάποια μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.



# Τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα σε παράλληλη γραμμή(3)



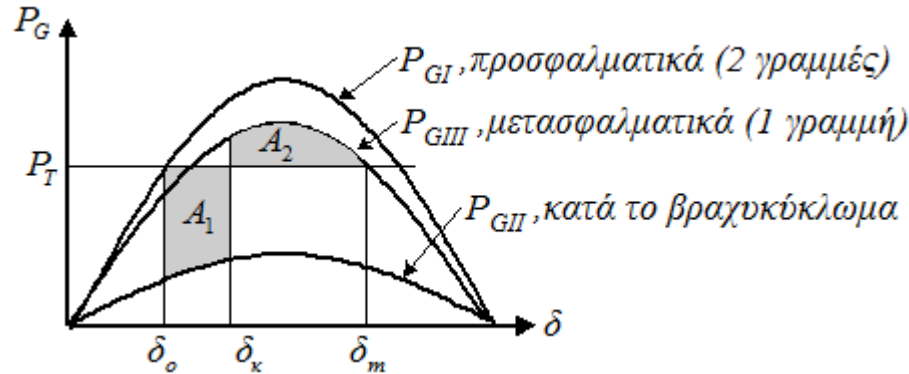
(γ)

- (α) Κύκλωμα για τριφασικό βραχυκύκλωμα στο μέσω της μιας από τις δύο παράλληλες γραμμές.  
 (β) Κύκλωμα για οποιοδήποτε βραχυκύκλωμα, εκτός του στερεού τριφασικού, στην αρχή της μιας γραμμής.  
 (γ) Ισοδύναμο κύκλωμα του (α) ή (β).





# Τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα σε παράλληλη γραμμή(4)



Σχ. 7.19 Κριτήριο ίσων εμβαδών για  $\delta_k$  όταν μεταφέρεται ισχύς κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_k} (P_T - P_{mII} \sin \delta) d\delta = P_T (\delta_k - \delta_0) + P_{mII} (\cos \delta_k - \cos \delta_0)$$

$$A_2 = \int_{\delta_k}^{\delta_m} (P_{mIII} \sin \delta - P_T) d\delta = P_{mIII} (\cos \delta_k - \cos \delta_m) - P_T (\delta_m - \delta_k)$$

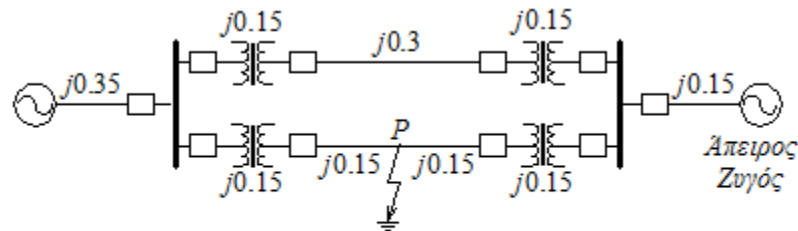
$$\delta_k = \cos^{-1} \frac{P_T (\delta_m - \delta_0) - P_{mII} (\cos \delta_k - \cos \delta_m) + P_{mIII} \cos \delta_m}{P_{mIII} - P_{mII}}$$

$$\text{όπου: } \delta_0 = \sin^{-1} \frac{P_T}{P_{mI}} \text{ και } \delta_0 < 90^\circ$$

$$\delta_m = \pi - \sin^{-1} \frac{P_T}{P_{mIII}} \text{ και } \delta_m > 90^\circ$$

# Παράδειγμα

Στο κύκλωμα οι αριθμοί εκφράζουν τις τιμές των επαγωγικών αντιστάσεων στο ανά μονάδα σύστημα και περιλαμβάνουν τη μεταβατική επαγωγική αντίσταση της γεννήτριας. Οι διακόπτες στα άκρα των γραμμών ανοίγουν ταυτόχρονα και δεν ξανακλείνουν μετά την εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος. Η γεννήτρια αποδίδει **1 pu** ισχύ, όταν συμβαίνει ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα στο σημείο **P**. Υπολογίστε σε ηλεκτρικές μοίρες την κρίσιμη γωνία εκκαθάρισης. Υποθέτουμε ότι η τάση πίσω από τη μεταβατική επαγωγική αντίσταση είναι **1.2 pu** για τη γεννήτρια και **1 pu** για τον άπειρο ζυγό.

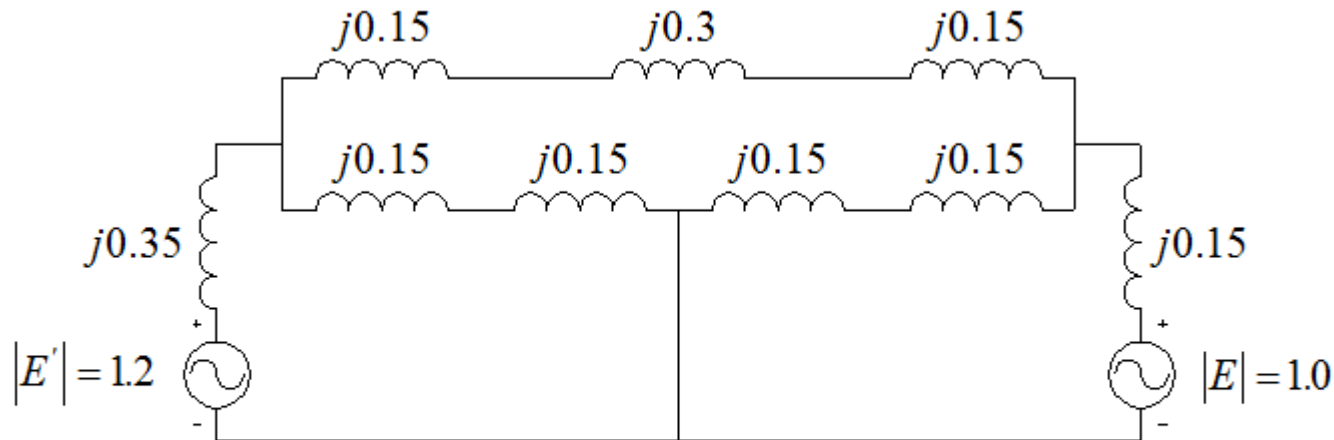


Σχ. 7.20 Μονοφασικό κύκλωμα του συστήματος.





# Λύση(1)



Σχ. 7.21 Κύκλωμα θετικής ακολουθίας του συστήματος.

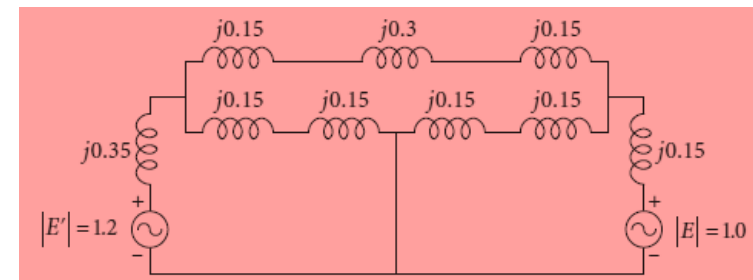
Πριν το βραχυκύκλωμα η επαγωγική αντίσταση μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, μεταξύ της γεννήτριας και του άπειρου ζυγού, είναι:

$$X = 0.35 + 0.15 + \frac{0.15 + 0.3 + 0.15}{2} = 0.8 \text{ pu}$$

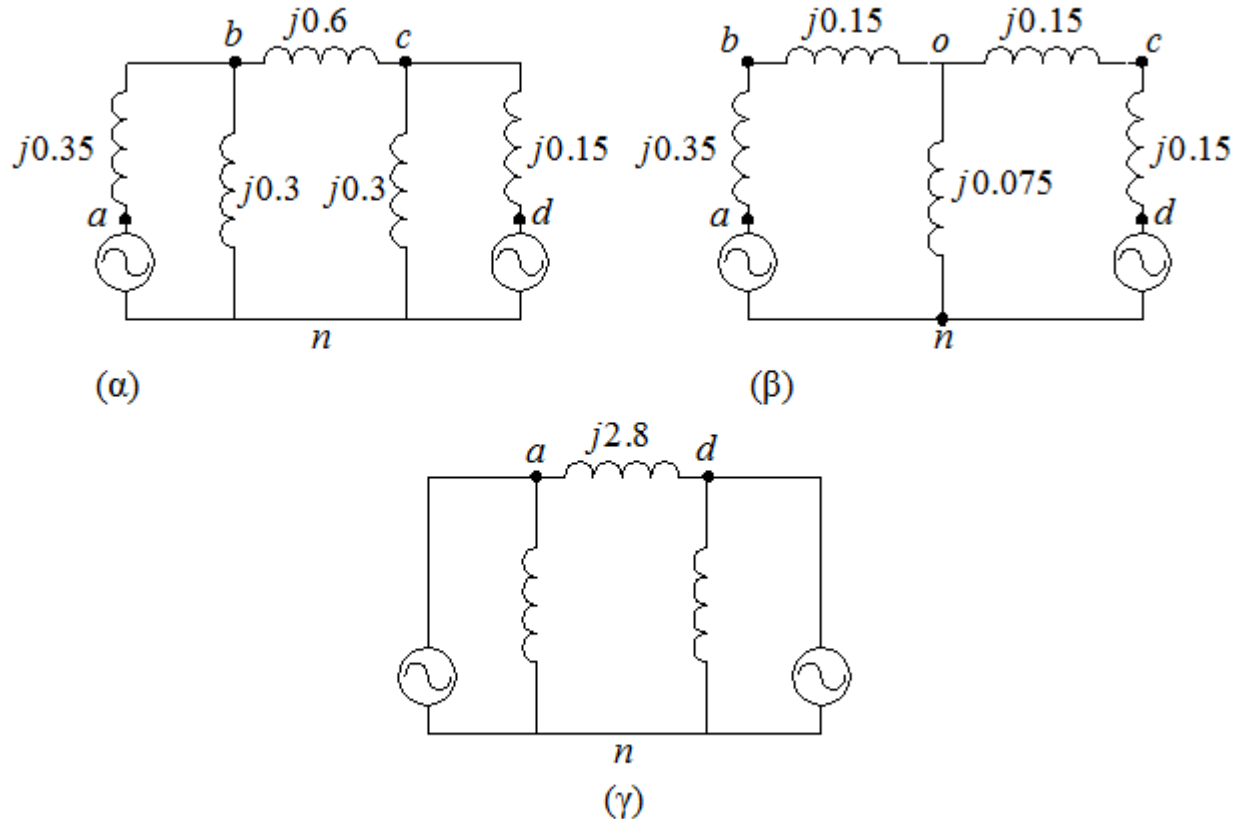
Μετά την εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος με την αποσύνδεση της μιας γραμμής η επαγωγική αντίσταση μεταφοράς είναι:

$$X = 0.35 + 0.15 + 0.15 + 0.3 + 0.15 = 1.1 \text{ pu}$$

# Λύση(2)



Κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος παίρνουμε:



Σχ. 7.22 (α) Αρχικό βραχυκυκλωμένο κύκλωμα.  
 (β) Μετασηματισμένο ισοδύναμο.  
 (γ) Ισοδύναμο  $\Delta$  κύκλωμα.



# Λύση(3)

Οι ισχείς εξόδου της γεννήτριας είναι:

$$\text{Πριν το βραχυκύκλωμα: } P_{mI} \sin \delta = \frac{1 \cdot 1.2}{0.8} \sin \delta = 1.5 \sin \delta$$

Κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος:

$$P_{mII} \sin \delta = \frac{1 \cdot 1.2}{2.8} \sin \delta = 0.429 \sin \delta$$

$$\text{Μετά το βραχυκύκλωμα: } P_{mIII} \sin \delta = \frac{1 \cdot 1.2}{1.1} \sin \delta = 1.091 \sin \delta$$

$$\text{Άρα: } \delta_0 = \sin^{-1} \frac{1}{1.5} = 41.81^\circ \text{ ή } 0.729 \text{ ακτίνια}$$

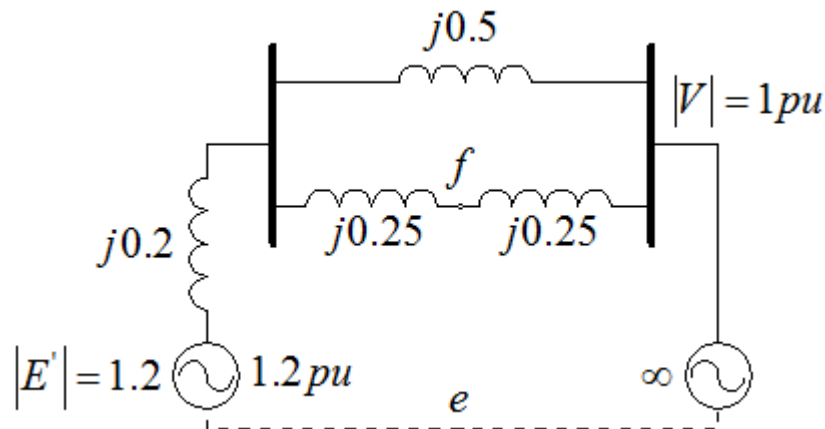
$$\delta_m = \pi - \sin^{-1} \frac{1}{1.091} = 113.56^\circ \text{ ή } 1.98 \text{ ακτίνια}$$

$$\begin{aligned} \text{και } \delta_k &= \cos^{-1} \frac{1 \cdot (1.98 - 0.729) - 0.429 \cdot \cos(41.81^\circ) + 1.091 \cdot \cos(113.56^\circ)}{1.091 - 0.429} = \\ &= \cos^{-1}(0.742) = 41.58^\circ \end{aligned}$$

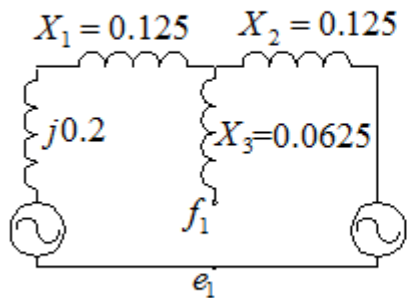


# Παράδειγμα

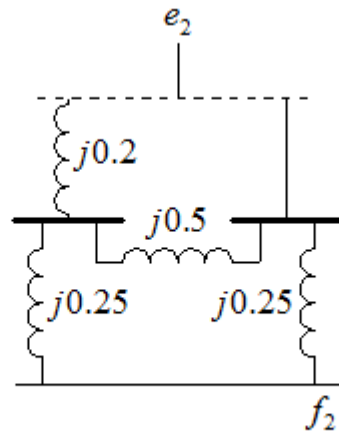
Το 132 KV σύστημα του Σχήματος, έχει δύο ίδιες παράλληλες γραμμές με  $X_+ = X_- = \frac{X_0}{2} = 0.5 pu$ . Η γεννήτρια έχει  $|E'| = 1.2 pu$ ,  $X'_d = 0.2 pu$  και  $X_- = 4X_0X'_d =$ . Η τάση του άπειρου ζυγού είναι  $1 pu$  και όλες οι  $pu$  τιμές εκφράζονται στην ίδια βάση. Υπολογίστε την επαγωγική αντίσταση μεταφοράς και τις μέγιστες τιμές μεταφερόμενης ισχύος για όλους τους τύπους βραχυκυκλωμάτων στο μέσον της μιας γραμμής.



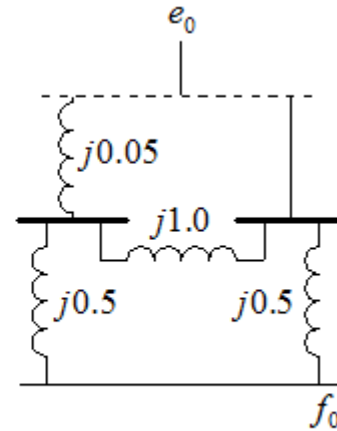
# Λύση(1)



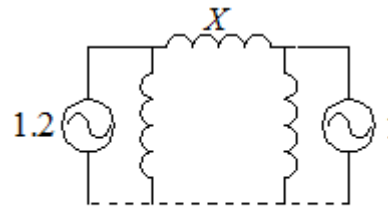
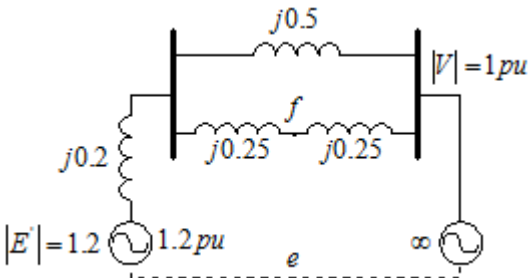
(α)



(β)



(γ)

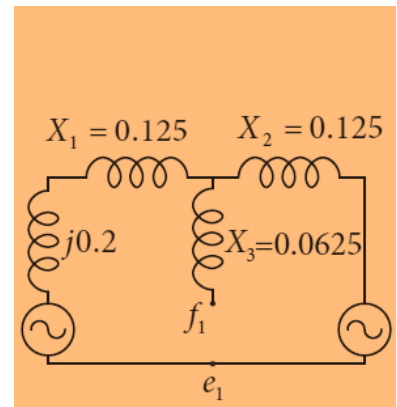


(δ)

- (α) Κύκλωμα θετικής ακολουθίας μετά το μετασχηματισμό  $\Delta$  σε  $Y$ .  
 (β) Κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας.  
 (γ) Κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας.  
 (δ) Τελικό  $\Delta$  μετασχηματισμένο κύκλωμα για τον υπολογισμό της επαγωγικής αντίστασης μεταφοράς.



# Λύση(2)



Η αντίσταση αρνητικής ακολουθίας του κυκλώματος είναι:

$$X_a = 0.2 // 0.5 = 0.1429 pu \quad X_- = (0.1429 + 0.25) // 0.25 = 0.1528 pu$$

Η αντίσταση μηδενικής ακολουθίας του κυκλώματος είναι:

$$X_a = 0.05 // 1 = 0.0476 pu \quad X_0 = (0.0476 + 0.5) // 0.5 = 0.2614 pu$$

(α) Τριφασικό βραχυκύκλωμα: Έχουμε:

$$X = \frac{0.325 * 0.125 + 0.125 * 0.0625 + 0.0625 * 0.325}{0.0625} = 1.1 pu$$

$$\text{και } P_m = \frac{1.2 * 1}{1.1} = 1.0901 pu$$

(β) Μονοφασικό βραχυκύκλωμα: Έχουμε:

$$X_3 + X_- + X_0 = 0.0625 + 0.1528 + 0.2614 = 0.4767 pu$$

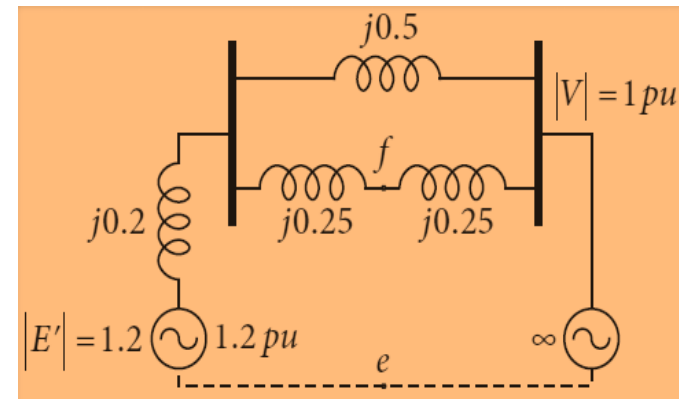
$$X = \frac{0.325 * 0.125 + 0.125 * 0.4767 + 0.4767 * 0.325}{0.4767} = 0.5352 pu$$

$$\text{και } P_m = \frac{1.2 * 1}{0.5352} = 2.2422 pu$$





# Λύση(3)



(γ) Διφασικό βραχυκύκλωμα: Έχουμε:

$$X_3 + X_- = 0.0625 + 0.1528 = 0.2153 \text{ pu}$$

$$X = \frac{0.325 * 0.125 + 0.125 * 0.2153 + 0.2153 * 0.325}{0.2153} = 0.6387 \text{ pu}$$

$$\text{και } P_m = \frac{1.2 * 1}{0.6387} = 1.8788 \text{ pu}$$

(δ) Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη: Έχουμε:

$$X_3 + X_- // X_0 = 0.0625 + 0.1528 // 0.2614$$

$$= 0.1589 \text{ pu}$$

$$X = \frac{0.325 * 0.125 + 0.125 * 0.1589 + 0.1589 * 0.325}{0.1589} = 0.7057 \text{ pu}$$

$$\text{και } P_m = \frac{1.2 * 1}{0.7057} = 1.7004 \text{ pu}$$

(ε) Πριν συμβεί το βραχυκύκλωμα είχαμε:

$$X = 0.2 + \frac{0.5}{2} = 0.45 \text{ pu}$$

$$\text{και } P_m = \frac{1.2 * 1}{0.45} = 2.6667 \text{ pu}$$



# Λύση(4)

(στ) Μετά την απομόνωση του βραχυκυκλώματος έχουμε:

$$X = 0.2 + 0.5 = 0.7 \text{ pu}$$

$$\text{και } P_m = \frac{1.2 \cdot 1}{0.7} = 1.7143 \text{ pu}$$

- Επειδή ο κίνδυνος για την πρόκληση αστάθειας από ένα βραχυκύκλωμα αυξάνεται με τη μείωση της μεταφερόμενης ισχύος κατά τη διάρκειά του, οι διάφοροι τύποι βραχυκυκλωμάτων μπορούν να καταταγούν κατά σειρά αυξανόμενης σοβαρότητας, ως ακολούθως:
- **1.** Μονοφασικό βραχυκύκλωμα.
- **2.** Διφασικό βραχυκύκλωμα.
- **3.** Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη.
- **4.** Τριφασικό βραχυκύκλωμα.



# Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ταλάντωσης (Εμμεση λύση)(1)



Για την εφαρμογή των αριθμητικών μεθόδων στην επίλυση των διαφορικών εξισώσεων, η διαφορική εξίσωση ταλάντωσης δεύτερης τάξης, μετατρέπεται σε δύο διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης με την εισαγωγή των μεταβλητών κατάστασης  $x_1$  και  $x_2$ , που ορίζονται από τη σχέση:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix}$$

όπου:  $\delta$  η γωνιακή θέση του δρομέα σε ηλεκτρικά ακτίνια

$\dot{\delta}$  η διακύμανση της ηλεκτρικής γωνίας του δρομέα  $\Delta\omega = \frac{d\delta}{dt} = \dot{\delta}$  σε ηλεκτρικά ακτίνια το δευτερόλεπτο

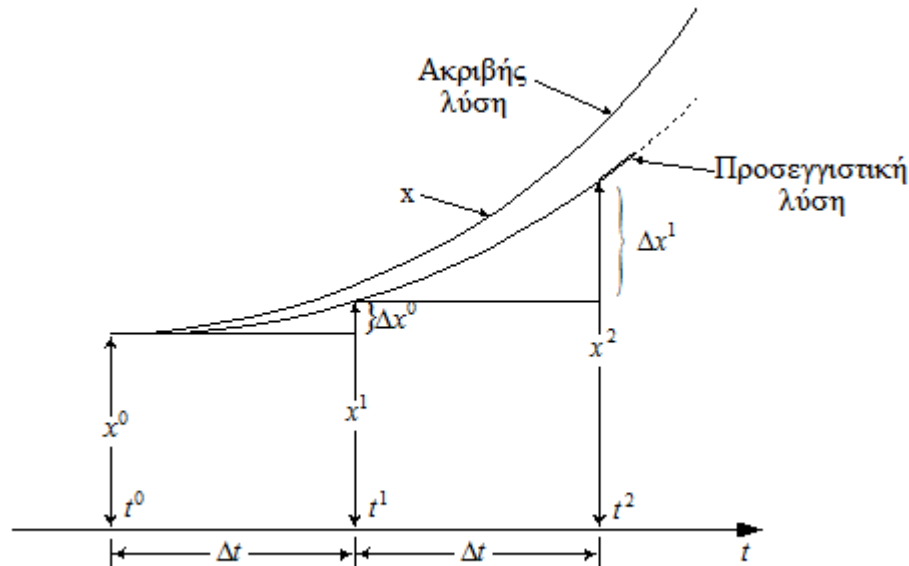
Με τη χρήση αυτών των μεταβλητών η εξίσωση ταλάντωσης γράφεται:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{\pi f^0}{H} (P_T - P_G - D x_2) \end{aligned}$$

Η απλούστερη μέθοδος αριθμητικής ολοκλήρωσης του Euler παρουσιάζεται γραφικά.



# Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ταλάντωσης (Εμμεση λύση)(2)



Σχ. 7.24 Γραφική εξήγηση της μεθόδου ολοκλήρωσης του Euler.

$$\dot{x}^0 = f(x^0) = \frac{\Delta x^0}{\Delta t} \text{ ή } \Delta x^0 = f(x^0) \Delta t \text{ και } x^1 = x^0 + f(x^0) \Delta t$$

και συνεπώς προκύπτει εύκολα η επαγωγική σχέση:

$$x^{v+1} = x^v + f(x^v) \Delta t \quad \text{για } v = 0, 1, 2, \dots$$

Για ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων  $n$ -τάξης παίρνουμε:

$$x^{v+1}_i = x^v_i + f_i(x^v_1, x^v_2, \dots, x^v_n) \Delta t \quad \text{για } i = 1, 2, \dots, n$$

# Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας με τη βοήθεια υπολογιστών

- Θα διευκρινίσουμε τη μέθοδο της έμμεσης λύσης με την εφαρμογή της σε ένα σύστημα τριών ζυγών.
- Θα δεχτούμε τις ακόλουθες υποθέσεις:
  - 1. Η επίδραση των εκτύπων πόλων θα αμεληθεί.
  - 2. Οι ισχείς των στροβίλων θα παραμένουν σταθερές όλη τη μετασφαλματική περίοδο.
  - 3. Οι αντιηλεκτρεγερτικές τάσεις των γεννητριών θα έχουν σταθερό μέτρο όλη τη μετασφαλματική περίοδο.
  - 4. Όλες οι ισχείς απόσβεσης στις εξισώσεις ταλάντωσης θα αμεληθούν.
  - 5. Τα φορτία μας θα υποθέσουμε ότι είναι **τύπου σύνθετης αντίστασης**.

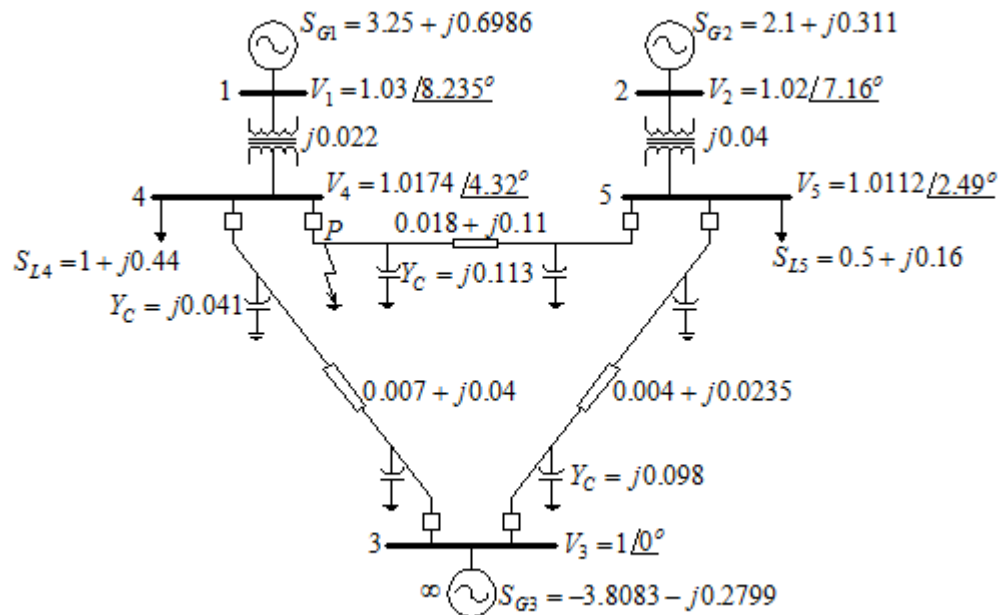


# Περιγραφή του συστήματος

Στο σύστημα του Σχήματος συμβαίνει ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα στη θέση  $P$  και εκκαθαρίζεται μετά από κάποιο χρόνο με ταυτόχρονο άνοιγμα των διακοπών της γραμμής μεταξύ των ζυγών 4 και 5. Να μελετήσετε τη μεταβατική ευστάθεια κάθε γεννήτριας. Με βάση τα **100 MVA** για τις γεννήτριες δίνονται:

Γεννήτρια 1: **500 MVA, 25 KV,  $X'_d = 0.067 pu$ ,  $H = 12 s$**

Γεννήτρια 2: **300 MVA, 20 KV,  $X'_d = 0.1 pu$ ,  $H = 9 s$**



Μonoφασικό διάγραμμα του συστήματος και ασφαλιστική κατάσταση.

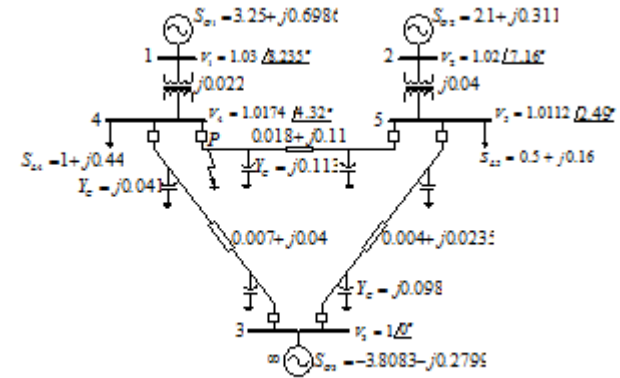


# Λύση του προβλήματος

Προσφαλματική κατάσταση:

$$I^0_{G1} = \left( \frac{S^0_{G1}}{V^0_1} \right)^* = \frac{3.25 - j0.6986}{1.03 \angle -8.235^\circ} = 3.227 \angle -3.896^\circ pu$$

$$I^0_{G2} = \left( \frac{S^0_{G2}}{V^0_2} \right)^* = \frac{2.1 - j0.311}{1.0 \angle -7.16^\circ} = 2.081 \angle -1.264^\circ pu$$



Μονοφασικό διάγραμμα του συστήματος και προσφαλματική κατάσταση.

$$E'_1 = V^0_1 + X'_{d1} I^0_{G1} = 1.03 \angle 8.235^\circ + j0.067 * 3.227 \angle -3.896^\circ pu = 1.096 \angle 19.354^\circ pu$$

$$E'_2 = V^0_2 + X'_{d2} I^0_{G2} = 1.02 \angle 7.16^\circ + j0.1 * 2.081 \angle -1.264^\circ pu = 1.071 \angle 18.246^\circ pu$$

$$E'_3 = V_3 = 1.0 \angle 0^\circ pu$$

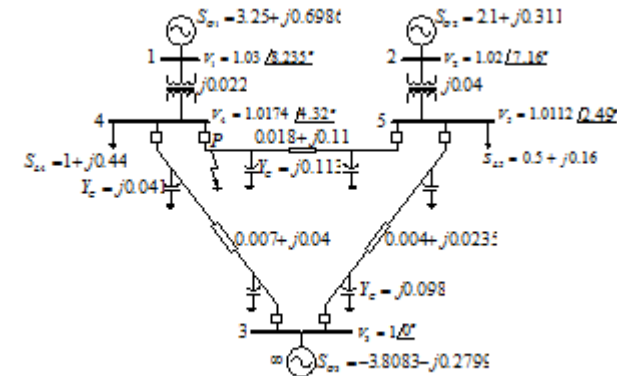
Το μέτρο αυτών των τάσεων θα θεωρηθεί σταθερό, ενώ οι γωνίες τους καθορίζουν τις αρχικές γωνιακές θέσεις των δρομέων και επομένως έχουμε:

$$\delta^0_1 = 19.354^\circ \quad \text{και} \quad \delta^0_2 = 18.246^\circ$$

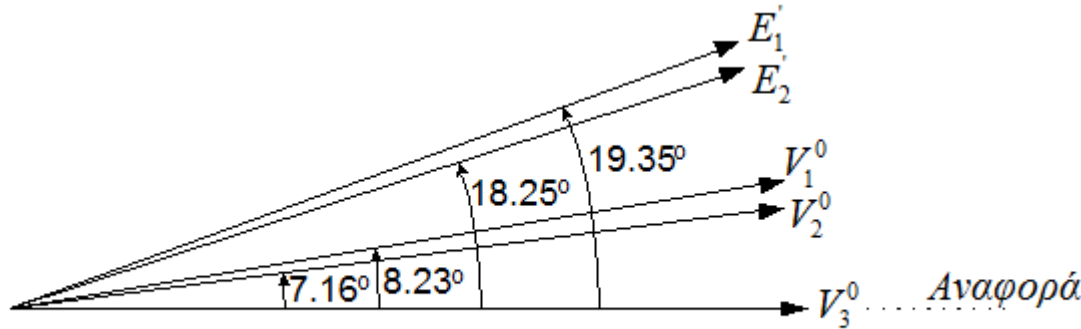


$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{\pi f^0}{H} (P_T - P_G - D x_2)$$



Μονοφασικό διάγραμμα του συστήματος και προσφαιρική κατάσταση.



Σχ. 7.26 Αρχικές τάσεις και γωνιακές θέσεις των δρομέων των μηχανών.

Οι ισοδύναμες σύνθετες αγωγιμότητες των φορτίων είναι:

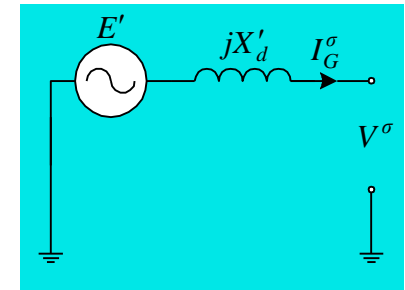
$$Y_{L4} = \frac{S_{L4}^*}{|V_4|^2} = \frac{1-j0.44}{1.0174^2} = \mathbf{0.9661 - j0.4251 pu}$$

$$Y_{L5} = \frac{S_{L5}^*}{|V_5|^2} = \frac{0.5-j0.16}{1.0112^2} = \mathbf{0.4889 - j0.1565 pu}$$

$$\begin{bmatrix} I_{G1} \\ I_{G2} \\ I_{G3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_1 \\ E'_2 \\ E'_3 \end{bmatrix}$$

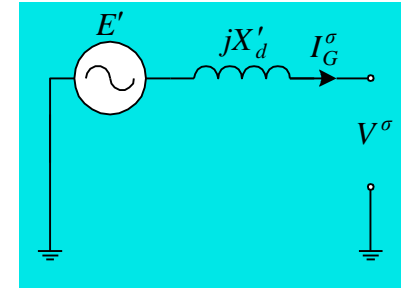
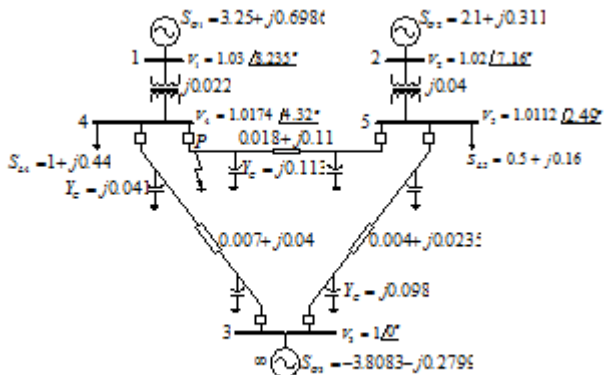
Οι ισχείς των στροβίλων παραμένουν σταθερές στις τιμές:

$$P_{T1} = 3.25 pu \quad P_{T2} = 2.1 pu$$





# Υπολογισμός της προσφαματικής μήτρας $Y_{bus}$



$$Y_{11} = \frac{1}{j0.067 + j0.022} = -j11.236$$

Μονοφασικό διάγραμμα του συστήματος και προσφαματική κατάσταση.

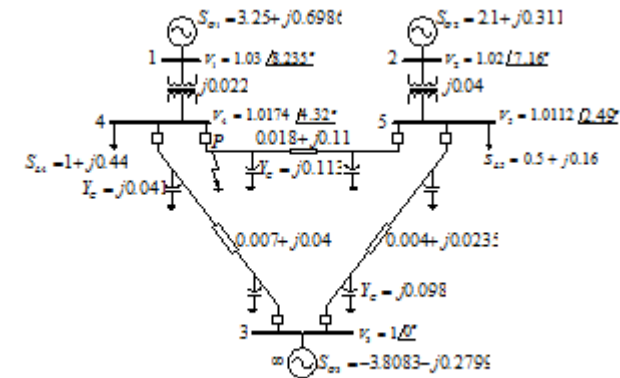
Στη  $Y_{bus}$  περιλαμβάνουμε και τις αντιστάσεις  $X'_d$  των μηχανών καθώς και τις ισοδύναμες αντιστάσεις των φορτίων:

Πίνακας Η προσφαματική μήτρα  $Y_{bus}$  σε pu.

Ζυγός	1	2	3	4	5
1	-j11.236	0	0	j11.236	0
2	0	-j7.1428	0	0	j7.1428
3	0	0	11.284-j65.473	-4.245+j24.257	-7.039+j41.355
4	j11.236	0	-4.245+j24.257	6.6598-j44.617	-1.4488+j8.8538
5	0	j7.1428	-7.039+j41.355	-1.4488+j8.8538	8.9769+j57.2972



# Υπολογισμοί κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος(1)



Μονοφασικό διάγραμμα του συστήματος και προσωλήμιατη κατάσταση.

Η εισαγωγή του βραχυκυκλώματος συγχωνεύει το ζυγό 4 με το ζυγό αναφοράς και γι' αυτό η σειρά 4 και η στήλη 4 του προηγούμενου Πίνακα απαλείφονται.

Κατόπιν για να δημιουργήσουμε τη  $Y_{bus}$ , που περιέχει μόνο τους κόμβους των γεννητριών, απαλείφουμε τη σειρά και τη στήλη, που αντιπροσωπεύουν το ζυγό 5, με τη μέθοδο απαλοιφής του Kron.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, αν  $p$  είναι ο κόμβος που δεν περιέχει πηγή ρεύματος και θέλουμε να τον απαλείψουμε, κάθε νέο  $jk$  στοιχείο της ελαττωμένης μήτρας προκύπτει από τα στοιχεία της παλαιάς μήτρας σύμφωνα με τη σχέση:

$$Y_{jk(v\epsilon o)} = Y_{jk} - \frac{Y_{jp}Y_{pk}}{Y_{pp}}$$



Η ελαττωμένη  $Y_{bus}$  που ισχύει κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος είναι.

# Υπολογισμοί κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος(2)

Πίνακας 7.2 Η ελαττωμένη μήτρα  $Y_{bus}$ , που ισχύει κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος.

Ζυγός	1	2	3
1	$-j11.236$	0	0
2	0	$0.1362-j6.2737$	$-0.0681+j5.1661$
3	0	$-0.0681+j5.1661$	$5.7986-j35.6301$

Αμέσως μετά το βραχυκύκλωμα τα ρεύματα γεννητριών υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} I_{G1} \\ I_{G2} \\ I_{G3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_1 \\ E'_2 \\ E'_3 \end{bmatrix}$$

Η ηλεκτρική ισχύς εξόδου κάθε γεννήτριας  $i$  δίνεται από την εξίσωση:

$$P_{Gi} = \text{Πρ}(E'_i I_{Gi}^*) = \text{Πρ} \left[ E'_i \sum_{j=1}^n (Y_{ij} E'_j)^* \right]$$



# Υπολογισμοί κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος(3)

Οι εξισώσεις ταλάντωσης παίρνουν τη μορφή:

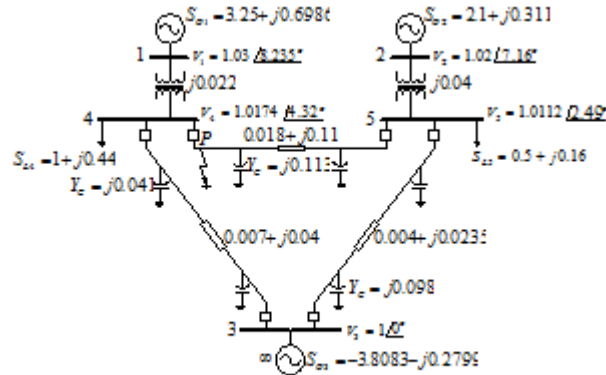
$$\dot{x}_{1i} = x_{2i}$$

για  $i = 1, 2$

$$x_{2i} = \frac{\pi f^0}{H_i} \left[ P_{Ti} - \Pi \rho \left[ E'_i \sum_{j=1}^n (Y_{ij} E'_i)^* \right] \right]$$



# Υπολογισμοί μετά την εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος



Μονοφασικό διάγραμμα του συστήματος και προσαρμοστική κατάσταση.

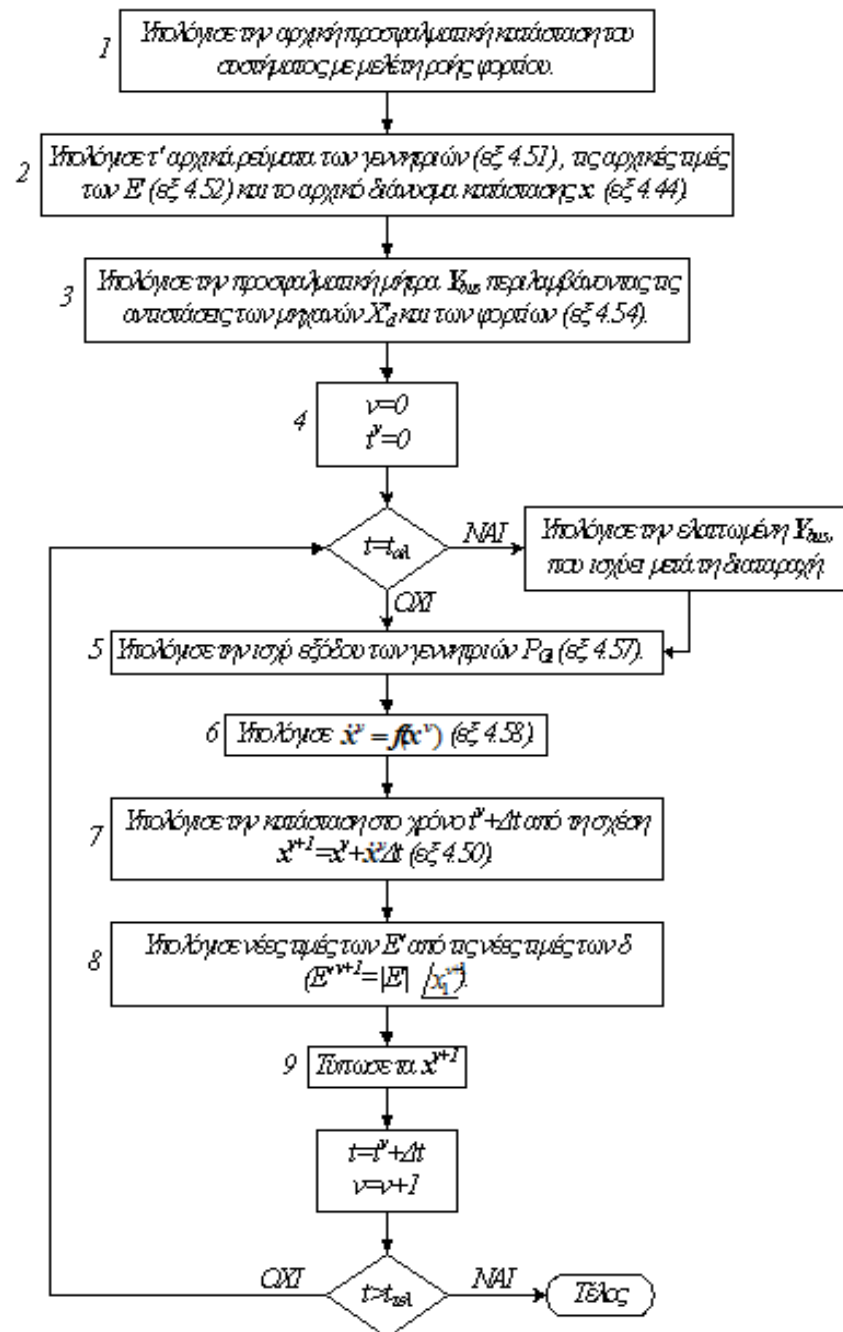
Επειδή το βραχυκύκλωμα εκκαθαρίζεται με την αποσύνδεση της γραμμής μεταξύ των κόμβων 4 και 5, για τον υπολογισμό της νέας μήτρας  $Y_{bus}$  μηδενίζουμε τα στοιχεία  $Y_{45}$  και  $Y_{54}$  και αφαιρούμε την εν σειρά και εγκάρσια αγωγιμότητα της γραμμής 4-5 από τα στοιχεία  $Y_{44}$  και  $Y_{55}$  στην αρχική  $Y_{bus}$ .

Τη νέα μήτρα που προκύπτει την ελαττώνουμε με τη μέθοδο Kron.

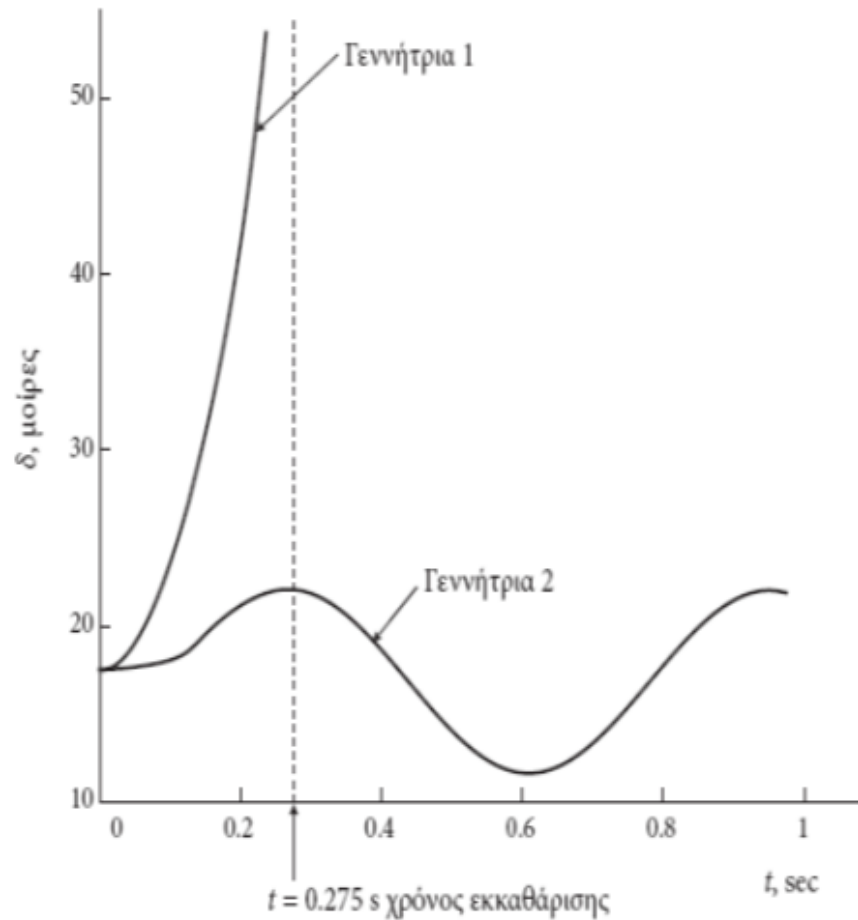
Πίνακας Η μετασφαλματική ελαττωμένη μήτρα  $Y_{bus}$ .

Ζυγός	1	2	3
1	$0.5 - j7.7898$	0	$-0.2214 + j7.6289$
2	0	$0.1591 - j6.1168$	$-0.0901 + j6.0975$
3	$-0.2214 + j7.6289$	$-0.0901 + j6.0975$	$1.3932 - j13.8731$





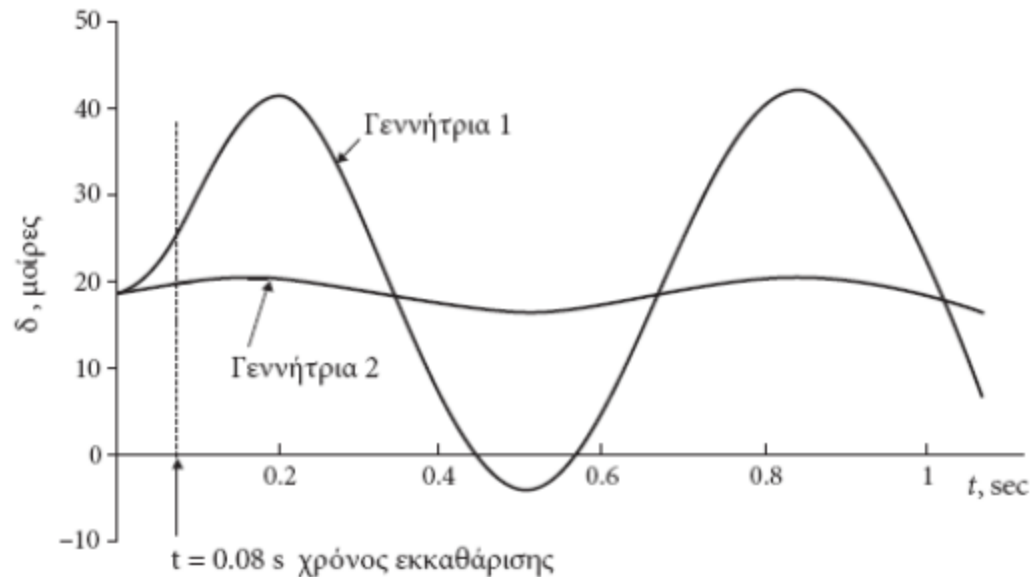
# Αποτελέσματα με χρήση υπολογιστή(1)



Καμπύλες των γωνιών ταλάντωσης για χρόνο εκκαθάρισης 0.275 s



# Αποτελέσματα με χρήση υπολογιστή(2)



Καμπύλες των γωνιών ταλάντωσης για χρόνο εκκαθάρισης 0.08 s





# Παράγοντες που επηρεάζουν την μεταβατική ευστάθεια(1)

- Η διατήρηση της ευστάθειας επιτυγχάνεται ευκολότερα, όταν το  $P_m$  είναι μεγαλύτερο.
- Από την άποψη αυτή η γεννήτρια με εκτύπους πόλους είναι πιο ευσταθής από τη γεννήτρια με κυλινδρικό δρομέα
- Το  $P_m$  μπορεί να αυξηθεί με αύξηση της τάσης του συστήματος πάνω από την ονομαστική της τιμή και με ελάττωση της επαγωγικής αντίστασης μεταφοράς.
- Η ευστάθεια μπορεί να βελτιωθεί με ελάττωση του συνολικού χρόνου εκκαθάρισης των βραχυκυκλωμάτων και αύξηση της σταθεράς αδράνειας της μονάδας (αν και αυτό δεν μπορεί να αξιοποιηθεί πρακτικά).
- Τα σύγχρονα συστήματα ελέγχου της διέγερσης, που χρησιμοποιούν θυρίστορ, αντιδρούν πολύ γρήγορα στην ελάττωση της τάσης του ζυγού της γεννήτριας αυξάνοντας τη ροή διακένου, που ασκεί μια ροπή αναχαίτισης στο δρομέα και επιβραδύνει την κίνησή του, βελτιώνοντας τη μεταβατική ευστάθεια.



# Παράγοντες που επηρεάζουν την μεταβατική ευστάθεια(2)

- Επίσης, τα σύγχρονα ηλεκτροϋδραυλικά συστήματα ελέγχου της ισχύος εισόδου του στροβίλου, δρουν γρήγορα για την ελάττωση της ισχύος εισόδου και βελτιώνουν τη μεταβατική ευστάθεια.
- Η σύγχρονη τάση στη σχεδίαση μεγάλων εναλλακτών είναι η ελάττωση του λόγου βραχυκύκλωσης ( $= \frac{1}{X_d}$ ), που επιτυγχάνεται με ελάττωση του διάκενου αέρα της μηχανής και συνέπεια την εξοικονόμηση μεγέθους, βάρους και κόστους καθώς και την ελάττωση των μαγνητικών δυνάμεων της μηχανής. Η ελάττωση όμως του μεγέθους του δρομέα ελαττώνει το όριο μεταβατικής ευστάθειας, επειδή ελαττώνεται η σταθερά αδράνειας.

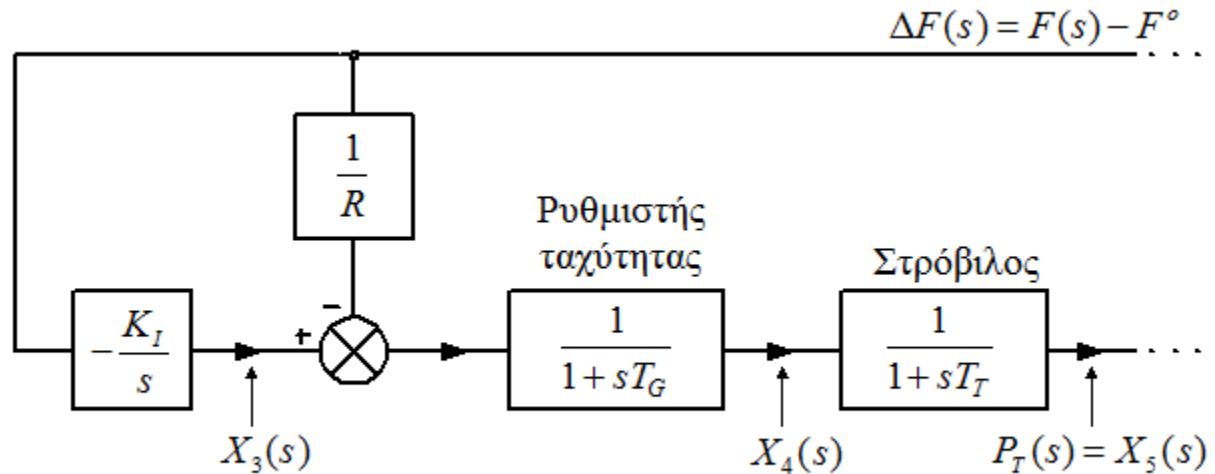


# Επίδραση των συστημάτων ελέγχου συχνότητας και τάσης στη μεταβατική ευστάθεια

- Στην προηγούμενη ανάλυση αμελήσαμε την επίδραση των συστημάτων ελέγχου συχνότητας και τάσης στη μεταβατική απόκριση των συστημάτων.
- Για να λάβουμε υπόψη μας την επίδραση των συστημάτων ελέγχου, θα επεκτείνουμε το μαθηματικό μοντέλο με αύξηση των διαστάσεων του διανύσματος κατάστασης, χωρίς να αλλάξουμε καθόλου τη βασική λογική της διαδικασίας.



# Επίδραση του βρόγχου ελέγχου συχνότητας(1)



*Το σύστημα ελέγχου P-f μιας μονάδος.*

Από τον ορισμό των συναρτήσεων μεταφοράς, προκύπτουν οι σχέσεις:

$$X_3(s) = -\frac{K_1}{s} \Delta F(s)$$

$$X_4(s) = \frac{1}{1 + sT_G} \left[ X_3(s) - \frac{1}{R} \Delta F(s) \right]$$

$$X_5(s) = \frac{1}{1 + sT_T} X_4(s)$$



# Επίδραση του βρόγχου ελέγχου συχνότητας(2)

Παίρνοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace έχουμε:

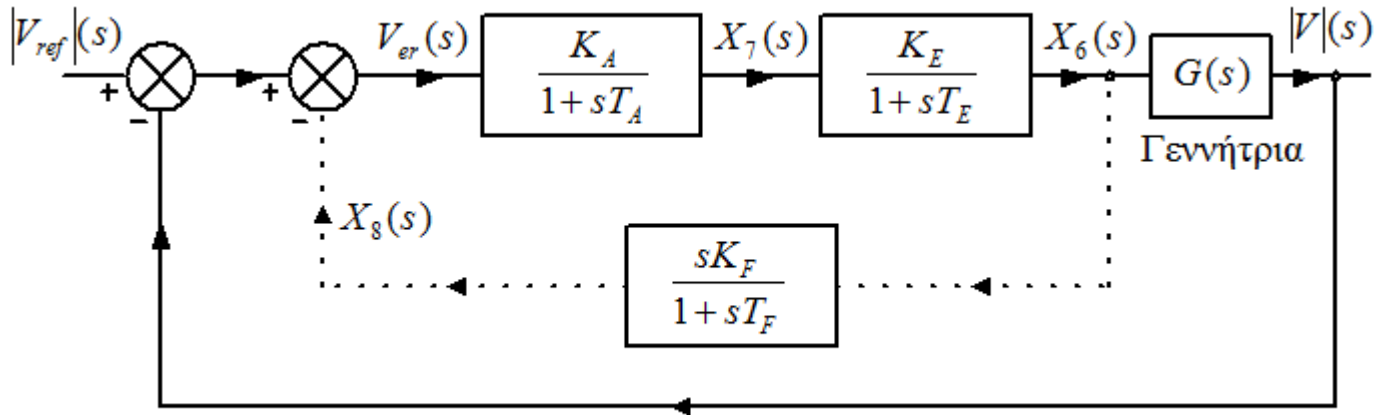
$$\begin{aligned}\dot{x}_3 &= -K_I \Delta f \\ \dot{x}_4 &= \frac{1}{T_G} \left( x_3 - \frac{1}{R} \Delta f - x_4 \right) \\ \dot{x}_5 &= \frac{1}{T_T} (x_4 - x_5)\end{aligned}$$

$$\text{Αλλά: } \Delta f = \frac{1}{2\pi} \dot{\delta} = \frac{1}{2\pi} x_2$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_3 &= -\frac{K_I}{2\pi} x_2 \\ \dot{x}_4 &= \frac{1}{T_G} \left( x_3 - \frac{1}{2\pi R} x_2 - x_4 \right) \\ \dot{x}_5 &= \frac{1}{T_T} (x_4 - x_5) \\ x^0_3 &= x^0_4 = x^0_5 = P^0_T\end{aligned}$$



# Επίδραση του βρόγχου ελέγχου τάσης(1)



Σχ. 7.31 Το σύστημα ελέγχου τάσης.

$$\frac{x_6(s)}{x_7(s)} = \frac{K_E}{1+sT_E} \quad \frac{x_7(s)}{V_{er}(s)} = \frac{K_A}{1+sT_A} \quad \frac{x_8(s)}{x_6(s)} = \frac{sK_F}{1+sT_F}$$

όπου:  $V_{er}(s) = |V_{ref}|(s) - |V|(s) - X_8(s)$  και δεν είναι καινούργια μεταβλητή κατάστασης.



# Επίδραση του βρόγχου ελέγχου τάσης(2)

Με αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace:

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{T_E} (K_E x_7 - x_6)$$

$$\dot{x}_7 = \frac{1}{T_A} [K_A (|V_{ref}| - |V|) - x_7]$$

$$\dot{x}_8 = \frac{1}{T_E T_F} (K_F K_E x_7 - K_F x_6 - T_E x_8)$$

Η τάση  $x^0_8 = 0$ , ενώ οι τάσεις  $x^0_6$  και  $x^0_7$  πρέπει να υπολογιστούν.



# Σχέση μεταξύ τάσης διέγερσης και τερματικής τάσης

$$\dot{x}_9 = \frac{1}{T_r} (K_V x_6 - |E^0|)$$

όπου:  $x_9 = E'$  είναι η νέα μεταβλητή κατάστασης

$T_r$  είναι η χρονική σταθερά πεδίου

$K_V = \frac{\omega L_5}{\sqrt{2} r_r}$  όπου  $r_r$  είναι η ωμική αντίσταση πεδίου και  $L_5$  το μέτρο της αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ δρομέα και τυμπάνου.

$$|E^0| = |V_q^0| + X_d |I_d^0| \quad \text{ή} \quad |E^0| = |V_q^0 + jX_q I_G^0| \quad \text{για} \quad X_q = X'_d \quad \text{και} \\ x_9^0 = |E'^0|$$





# Συγκέντρωση των εξισώσεων

Ο υπολογισμός των μεταβλητών κατάστασης γίνεται από τις εξισώσεις:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad \dot{x}_2 = \frac{\pi f^0}{H} (x_5 - P_G - D x_2) \quad \dot{x}_3 = -\frac{K_I}{2\pi} x_2 \quad \dot{x}_4 = \frac{1}{T_G} \left( x_3 - \frac{1}{2\pi R} x_2 - x_4 \right)$$

$$\dot{x}_5 = \frac{1}{T_T} (x_4 - x_5) \quad \dot{x}_6 = \frac{1}{T_E} (K_E x_7 - x_6) \quad \dot{x}_7 = \frac{1}{T_A} [K_A (|V_{ref}| - |V| - x_8) - x_7]$$

$$\dot{x}_8 = \frac{1}{T_E T_F} (K_F K_E x_7 - K_F x_6 - T_E x_8) \quad \dot{x}_9 = \frac{1}{T_r} (K_V x_6 - |E^0|)$$



# Περίληψη(1)

- Σε κατάσταση ανισορροπίας των ροπών (ή ισχύων) εισόδου και εξόδου σε κάθε γεννήτρια δημιουργούνται ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις της γωνίας του δρομέα, που μερικές φορές είναι τόσο μεγάλες, που οδηγούν κάποιες γεννήτριες σε αποσυγχρονισμό.
- Στην ειδική περίπτωση δύο μηχανών (ή μιας μηχανής και ενός άπειρου ζυγού) χρησιμοποιήσαμε το κριτήριο των ίσων εμβαδών για τον υπολογισμό της κρίσιμης γωνίας εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος.
- Οι διαφορικές εξισώσεις, που περιγράφουν τις δυναμικές ταλαντώσεις των μηχανών, δεν είναι γραμμικές και μπορούν να λυθούν μόνο με αριθμητικές μεθόδους.



# Περίληψη(2)

- Αυτές τις διαφορικές εξισώσεις τις εκφράσαμε στην κανονική μορφή των εξισώσεων **κατάστασης**, που διευκολύνουν τη συστηματοποίηση της λύσης με τη χρήση μητρών.
- Όταν στη μελέτη μας λαμβάνουμε υπόψη μας και την επίδραση των συστημάτων ελέγχου συχνότητας και τάσης, χρειαζόμαστε εννέα μεταβλητές κατάστασης ανά μηχανή, για να περιγράψουμε τη δυναμική συμπεριφορά της.
- Η μεταβατική ευστάθεια των ΣΗΕ εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, που σχετίζονται με τη σχεδίαση του συστήματος, το σύστημα προστασίας του και τα συστήματα ελέγχου πραγματικής και αέργου ισχύος των μηχανών.



# Βιβλιογραφία

- Όλα τα σχήματα, οι εικόνες και τα γραφήματα που παρουσιάστηκαν σε αυτήν την ενότητα είναι από το βιβλίο «Έλεγχος και Ευστάθεια 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.

