



Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχ. Η/Υ

# Ηλεκτρικές Μηχανές II

Μάθημα 4<sup>ο</sup>

Σύγχρονες Γεννήτριες – Μέρος Β΄

Γιώργος Ορφανουδάκης

# Περιεχόμενα μαθήματος

1. Ισχύς και Ροπή
2. Μέτρηση Παραμέτρων

# Ισχύς των Σύγχρονων Γεννητριών

- Η σύγχρονη γεννήτρια είναι μια σύγχρονη μηχανή που λειτουργεί ως γεννήτρια μετατρέποντας μηχανική ισχύ σε τριφασική ηλεκτρική ισχύ στην έξοδο της
- Η κινητήρια μηχανή μιας τέτοιας γεννήτριας μπορεί να είναι ένας
  - κινητήρας ντίζελ,
  - ατμοστρόβιλος,
  - υδροστρόβιλος
  - ή κάθε άλλη παρόμοια μηχανή
- Η κινητήρια μηχανή θα πρέπει οπωσδήποτε να λειτουργεί σε **σταθερή συχνότητα**, χωρίς να εξαρτάται από την ισχύ που απαιτεί κάθε φορά το φορτίο της γεννήτριας
- Μια σύγχρονη γεννήτρια παρουσιάζει **απώλειες** κατά τη μετατροπή της μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική, γι' αυτό και η ισχύς εισόδου της δεν είναι ίση με την ισχύ εξόδου

# Ισχύς των Σύγχρονων Γεννητριών (2)

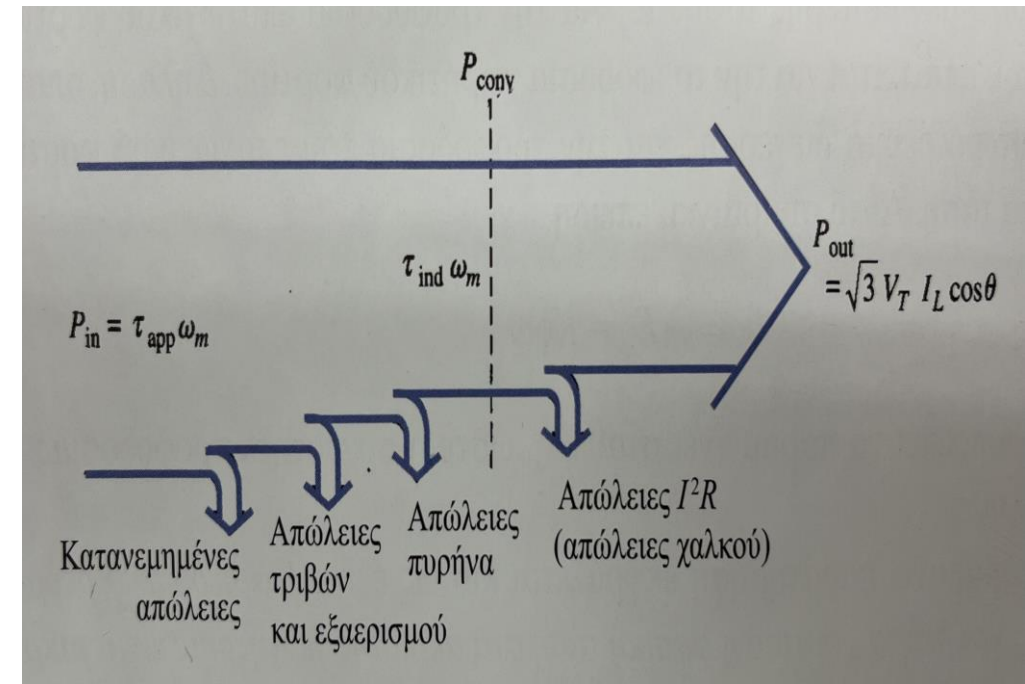
- Διάγραμμα ροής ισχύος
- Η ισχύς **εισόδου** στη γεννήτρια είναι η μηχανική ισχύς που εφαρμόζεται στον άξονα της:

$$P_{in} = \tau_{app} \omega_m$$

- Η ισχύς που μετατρέπεται σε ηλεκτρική στο εσωτερικό της μηχανής είναι ίση με

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m = 3E_A I_A \cos \gamma$$

- Όπου  $\gamma$  η γωνία μεταξύ των  $E_A$  και  $I_A$
- Η διαφορά μεταξύ  $P_{in}$  και  $P_{conv}$  οφείλεται στις
  - απώλειες πυρήνα
  - μηχανικές απώλειες
  - κατανεμημένες απώλειες



# Ισχύς των Σύγχρονων Γεννητριών (3)

- Ενεργός ισχύς εξόδου της γεννήτριας  $P_{out}$ , σε πολικά/φασικά μεγέθη:

$$P_{out} = \sqrt{3}V_T I_L \cos \theta$$

$$P_{out} = 3V_{\Phi} I_A \cos \theta$$

- Άεργος ισχύς στην έξοδο της μηχανής σε πολικά/φασικά μεγέθη:

$$Q_{out} = \sqrt{3}V_T I_L \sin \theta$$

$$Q_{out} = 3V_{\Phi} I_A \sin \theta$$

- Μια **χρήσιμη προσεγγιστική σχέση** για τον υπολογισμό της ισχύος εξόδου της γεννήτριας εξάγεται αν αγνοηθεί η αντίσταση οπλισμού  $R_A$  (επειδή  $X_S \gg R_A$ )...

# Ισχύς των Σύγχρονων Γεννητριών – Γωνία ροπής

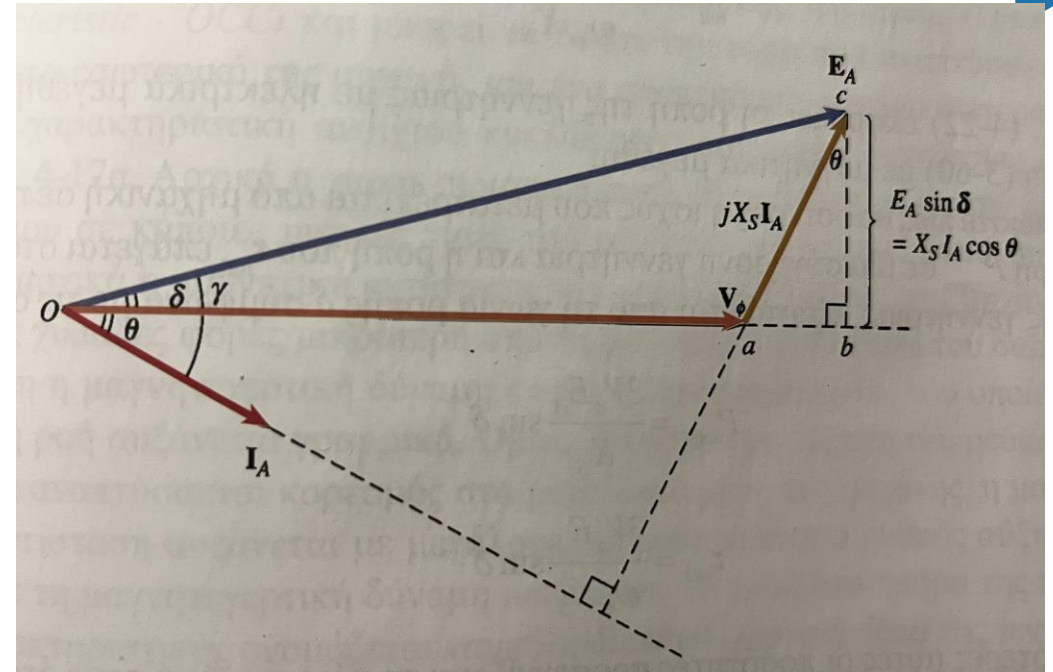
- Το διανυσματικό διάγραμμα της γεννήτριας μετατρέπεται στο παραδίπλα διάγραμμα
- Το τμήμα  $bc$  μπορεί να εκφραστεί ως  $E_A \sin \delta$  ή ως  $X_S I_A \cos \theta$ , οπότε

$$I_A \cos \theta = \frac{E_A \sin \delta}{X_S}$$

- Με αντικατάσταση στην  $P_{out} = 3V_\Phi I_A \cos \theta$ :

$$P_{conv} \approx P_{out} = \frac{3V_\Phi E_A \sin \delta}{X_S}$$

- Επειδή οι ωμικές αντιστάσεις αγνοούνται, η παραπάνω εξίσωση εκφράζει τόσο την ισχύ του μετατρέπεται από μηχανική σε ηλεκτρική  $P_{conv}$  όσο και την ισχύ εξόδου  $P_{out}$
- Η ισχύς εξόδου της μηχανής εξαρτάται από τη **γωνία  $\delta$**  μεταξύ των  $V_\Phi$  και  $E_A$
- Η γωνία  $\delta$  ονομάζεται **γωνία ροπής** της μηχανής – καθορίζει την ισχύ που προσφέρει η γεννήτρια



# Ισχύς των Σύγχρονων Γεννητριών – Γωνία ροπής (2)

- Όταν  $\delta = 90^\circ$ , άρα  $\sin \delta = 1$ , τότε  $P_{out} = P_{max} = \frac{3V_\phi E_A}{X_S}$
- Η  $P_{max}$  ονομάζεται **στατικό όριο ευστάθειας** της γεννήτριας
- Οι πραγματικές γεννήτριες δεν πλησιάζουν ποτέ το όριο αυτό
- Η τιμή της  $\delta$  σε κανονική λειτουργία με πλήρες φορτίο είναι μεταξύ  $15^\circ$  και  $20^\circ$
- Αν η θεωρηθεί σταθερή η  $V_\phi$ :
  - η ενεργός ισχύς εξόδου της γεννήτριας είναι ανάλογη των  $E_A \sin \delta$  και  $I_A \cos \theta$
  - η άεργος ισχύς εξόδου της είναι ανάλογη του  $I_A \sin \theta$

# Ροπή των Σύγχρονων Γεννητριών

- Η ροπή μιας μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος δίνεται από τις σχέσεις

$$\tau_{ind} = k\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_S \quad \text{ή} \quad \tau_{ind} = k\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_{net} = kB_R B_{net} \sin \delta$$

- Όπου  $\delta$  είναι και πάλι η γωνία ροπής

– Επειδή η  $\mathbf{B}_R$  παράγει την  $\mathbf{E}_A$  και η  $\mathbf{B}_{net}$  την  $\mathbf{V}_\Phi$  (αν αγνοηθεί η  $R_A$ ), η γωνία μεταξύ των  $\mathbf{E}_A$  και  $\mathbf{V}_\Phi$  είναι ίση με τη γωνία μεταξύ των  $\mathbf{B}_R$  και  $\mathbf{B}_{net}$

- Από τη σχέση  $P_{conv} = \frac{3V_\Phi E_A \sin \delta}{X_s}$  και επειδή ισχύει η  $P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m$ , η επαγόμενη ροπή

δίνεται από τον τύπο  $\tau_{ind} = \frac{3V_\Phi E_A \sin \delta}{\omega_m X_s}$

- Η παραπάνω εξίσωση εκφράζει τη ροπή της γεννήτριας με ηλεκτρικά μεγέθη



## Ροπή των Σύγχρονων Γεννητριών (2)

- Αμφότερες αυτές οι ποσότητες προσεγγίζουν τη μέγιστη τιμή τους όταν η γωνία ροπής  $\delta$  προσεγγίζει τις  $90^\circ$
- Η γεννήτρια δεν είναι σε θέση να υπερβεί αυτά τα όρια ούτε και στιγμιαία
- Οι πραγματικές γεννήτριες διαθέτουν γωνίες ροπής πλήρους φορτίου έως  $30^\circ$ 
  - Η απόλυτη μέγιστη στιγμιαία ισχύς και ροπή μπορούν να υποστηρίξουν, είναι τουλάχιστον **διπλάσιες** των τιμών πλήρους φορτίου
- Αυτό το απόθεμα ισχύος και ροπής είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για την **ευστάθεια** των συστημάτων ισχύος που περιέχουν αυτές τις γεννήτριες

# Μέτρηση των Παραμέτρων μιας Σύγχρονης Γεννήτριας

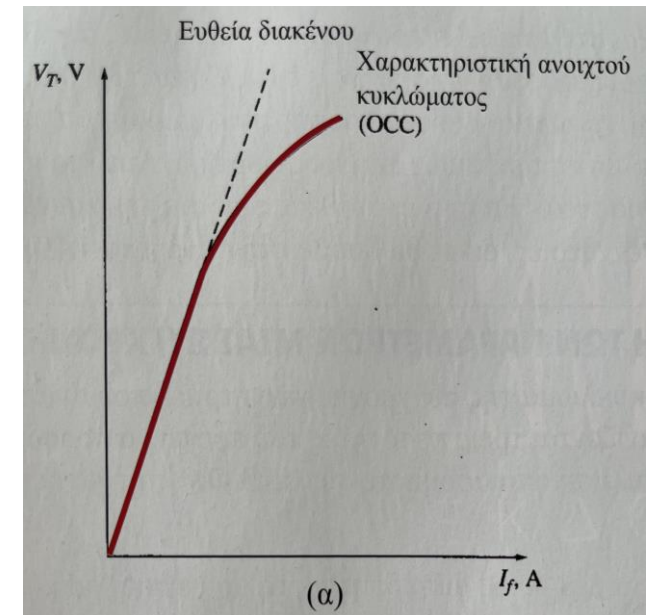
- Στο ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας εμφανίζονται τρεις ποσότητες:
  1. Η σχέση του ρεύματος διέγερσης με τη μαγνητική ροή (ή αλλιώς του ρεύματος διέγερσης  $I_F$  με την  $E_A$ )
  2. Η σύγχρονη αντίδραση,  $X_S$
  3. Η αντίσταση του τυλίγματος οπλισμού,  $R_A$

# Χαρακτηριστική Ανοιχτού Κυκλώματος

- Καθώς στο πείραμα αυτό δεν υπάρχει φορτίο, το ρεύμα οπλισμού της γεννήτριας θα είναι ίσο με μηδέν ( $I_A = 0$ ) ενώ η  $V_{\Phi}$  και η  $E_A$  θα είναι ίσες μεταξύ τους.
- Έτσι, είναι δυνατή η σχεδίαση της γραφικής παράστασης της  $E_A$  ή της  $V_T$  συναρτήσεως του ρεύματος διέγερσης  $I_F$ .
- Αυτή η καμπύλη ονομάζεται χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος της γεννήτριας και δίνει την τάση που αναπτύσσεται κάθε φορά στο εσωτερικό της μηχανής για ένα συγκεκριμένο ρεύμα διέγερσης.

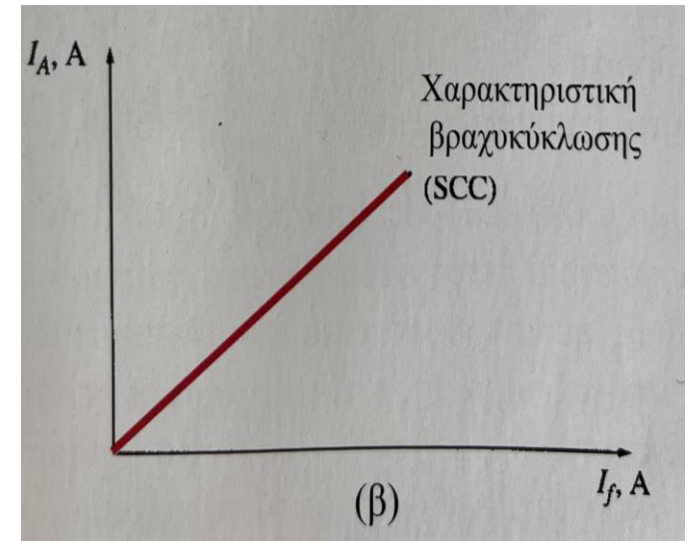
# Χαρακτηριστική Ανοιχτού Κυκλώματος (2)

- Ευθεία μέχρι την εμφάνιση **κορεσμού**, σε υψηλές τιμές του ρεύματος διέγερσης
  - Αρχικά η μαγνητική αντίσταση των μεταλλικών μερών της μηχανής είναι χιλιάδες φορές μικρότερη από τη μαγνητική αντίσταση του διακένου – Όλη η μαγνητεγερτική δύναμη εμφανίζεται στο διάκενο του οποίου η μαγνητική ροή αυξάνεται **γραμμικά**
  - Με την αύξηση του ρεύματος αρχίζει να αναπτύσσεται κορεσμός στα μεταλλικά μέρη της μηχανής, η μαγνητική τους αντίσταση αυξάνεται με μεγάλους ρυθμούς – Ο ρυθμός αύξησης της ροής με τη μαγνητεγερτική δύναμη μειώνεται
- Το γραμμικό τμήμα της παραπάνω χαρακτηριστικής ονομάζεται **καμπύλη διακένου** της γεννήτριας



# Χαρακτηριστική Βραχυκύκλωσης

- Τα άκρα της γεννήτριας βραχυκυκλώνονται μέσω αμπερομέτρων
- Καθώς το ρεύμα διέγερσης αυξάνεται μετριέται το ρεύμα οπλισμού  $I_A$  της γεννήτριας
- Η γραφική παράσταση που σχεδιάζεται με τις παραπάνω μετρήσεις ονομάζεται χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης και είναι **ευθεία γραμμή**



# Χαρακτηριστική Βραχυκύκλωσης (2)

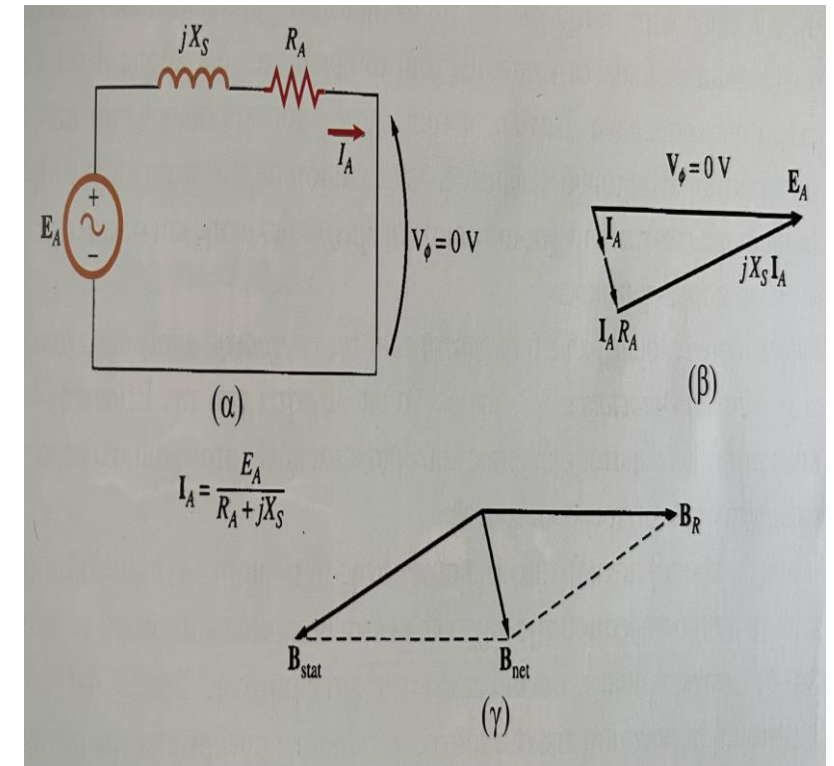
- Γιατί είναι γραμμική;
- Στην περίπτωση του βραχυκυκλώματος, το ρεύμα  $I_A$  είναι:

$$I_A = \frac{E_A}{R_A + jX_S}$$

- Μέτρο:

$$I_A = \frac{E_A}{\sqrt{R_A^2 + X_S^2}}$$

- Επειδή το πεδίο  $B_{stat}$  σχεδόν εξουδετερώνει το  $B_R$ , το πεδίο  $B_{net}$  έχει πολύ μικρή τιμή
- Λόγω της μικρής τιμής του συνολικού πεδίου, **δεν εμφανίζεται κορεσμός**



## Χαρακτηριστική Βραχυκύκλωσης (3)

- Επειδή το πεδίο  $\mathbf{B}_R$  σχεδόν εξουδετερώνει το  $\mathbf{B}_{stat}$ , το πεδίο  $\mathbf{B}_{net}$  έχει πολύ μικρή τιμή (
- Λόγω της μικρής τιμής του συνολικού πεδίου **δεν εμφανίζεται κορεσμός**, οπότε η χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης παραμένει γραμμική
- Αφού η  $V_\Phi$  είναι μηδενική, το μέτρο της εσωτερικής εμπέδησης της μηχανής είναι:

$$Z_s = \sqrt{R_A^2 + X_S^2} = \frac{E_A}{I_A}$$

- ... και επειδή  $X_S \gg R_A$ , γίνεται

$$X_S \approx \frac{E_A}{I_A} = \frac{V_{\Phi,oc}}{I_A}$$

- Άρα, αν τα  $E_A$  και  $I_A$  είναι γνωστά, η σύγχρονη αντίδραση  $X_S$  είναι εύκολο να υπολογιστεί

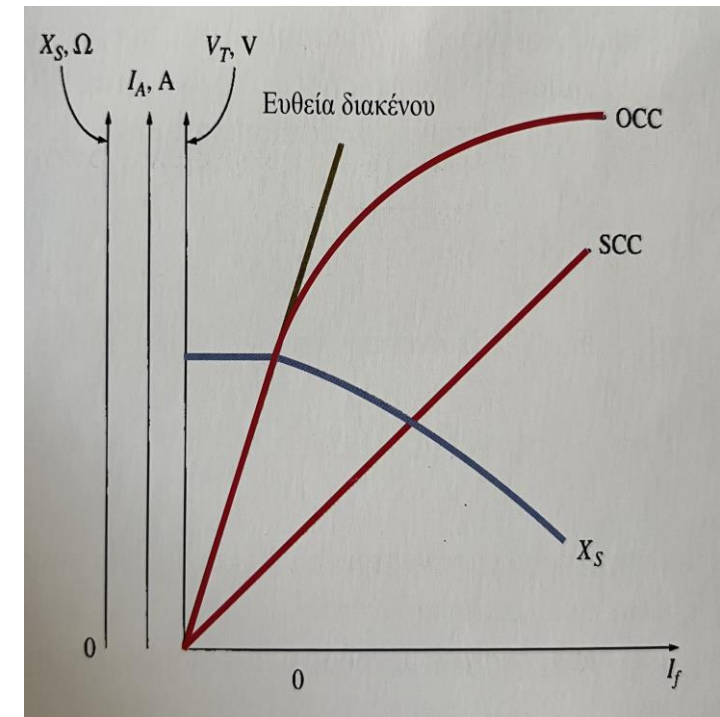
# Υπολογισμός Σύγχρονης Αντίδρασης

- Προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού της σύγχρονης αντίδρασης:
  1. Στη χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος σημειώνεται η  $E_A$  για συγκεκριμένη τιμή του ρεύματος διέγερσης
  2. Στη χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης σημειώνεται το ρεύμα  $I_{A,SC}$  για τη συγκεκριμένη τιμή του ρεύματος διέγερσης
  3. Η  $X_S$  υπολογίζεται από την εξίσωση  $X_S = \frac{E_A}{I_A} = \frac{V_{\Phi,oc}}{I_A}$
- Προσοχή: Η τάση  $E_A$  προσδιορίζεται μέσω της χαρακτηριστικής ανοιχτού κυκλώματος όπου η μηχανή είναι **μερικώς κορεσμένη** σε μεγάλες τιμές του ρεύματος διέγερσης
- Από την άλλη το  $I_A$  προσδιορίζεται μέσω της χαρακτηριστικής βραχυκύκλωσης όπου η μηχανή παραμένει **ακόρεστη** για κάθε τιμή του ρεύματος διέγερσης
- Όταν το ρεύμα διέγερσης είναι μεγάλο, η τιμή της  $E_A$  που προσδιορίζεται από την χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος, δεν είναι ίση με την αντίστοιχη τιμή της που προσδιορίζεται από την χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης!



## Υπολογισμός Σύγχρονης Αντίδρασης (2)

- Όταν το ρεύμα διέγερσης είναι μικρό, η τιμή της  $X_S$  παραμένει σταθερή και ονομάζεται **ακόρεστη σύγχρονη αντίδραση**,  $X_{Su}$
- $X_{Su} = \frac{E_A}{I_A} = \frac{V_{\Phi,oc}}{I_A}$  για κάθε τιμή του ρεύματος διέγερσης που βρίσκεται πάνω στο **γραμμικό μέρος** της χαρακτηριστικής ανοιχτού κυκλώματος
- Η προσεγγιστική τιμή της σύγχρονης αντίδρασης μεταβάλλεται ανάλογα με το βαθμό κορεσμού της μηχανής
- Θα πρέπει να υπολογίζεται στις **συγκεκριμένες συνθήκες** φόρτισης της μηχανής
- Γραφική παράσταση της σύγχρονης αντίδρασης συναρτήσει του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας



# Υπολογισμός Ωμικής Αντίστασης

- Ο υπολογισμός της ωμικής αντίστασης μπορεί να γίνει προσεγγιστικά με την εφαρμογή **συνεχούς τάσης** στα τυλίγματα του στάτη
- Η συνεχής τάση εξασφαλίζει τον αποκλεισμό της επαγωγικής αντίδρασης των τυλιγμάτων από τη μέτρηση
- Η  $R_A$  μπορεί να αφαιρεθεί από την  $|Z_S| = \frac{E_A}{I_A} = \frac{V_{\Phi,oc}}{I_A}$ , με σκοπό τη βελτίωση της προσέγγισης της σύγχρονης αντίδρασης:

$$X_s = \sqrt{Z_S^2 - R_A^2}$$

- Μικρή διαφορά – Κύρια αιτία του σφάλματος στον υπολογισμό της σύγχρονης αντίδρασης είναι ο κορεσμός της γεννήτριας

# Λόγος Βραχυκύκλωσης

- Ορίζεται ως ο **λόγος**
  - του ρεύματος διέγερσης που απαιτείται για την παραγωγή της **ονομαστικής τάσης** στο πείραμα ανοιχτού κυκλώματος
  - προς το ρεύμα διέγερσης που απαιτείται για την παραγωγή του **ονομαστικού ρεύματος** οπλισμού στο πείραμα βραχυκύκλωσης
- Ο λόγος βραχυκύκλωσης είναι το **αντίστροφο** της ανά μονάδα (per-unit) τιμής της σύγχρονης αντίδρασης, υπολογισμένης με τον τύπο που αναφέρεται παραπάνω
- Δεν προσφέρει κάποια παραπάνω πληροφορία απ' ότι η κορεσμένη σύγχρονη αντίδραση
- Ωστόσο, συναντάται πολύ συχνά στις προδιαγραφές των γεννητριών της βιομηχανίας

# Παράδειγμα 4-1

Μια σύγχρονη γεννήτρια με ονομαστική ισχύ, τάση και συχνότητα ίσες με  $200kVA$ ,  $480 V$  και  $50Hz$ , αντίστοιχα, συνδέεται σε αστέρα. Το ονομαστικό ρεύμα διέγερσης είναι  $5A$  και οι πληροφορίες που υπάρχουν γι' αυτήν είναι οι ακόλουθες:

1. Τάση γραμμής στο πείραμα ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{T,OC}$ ), με ονομαστικό ρεύμα διέγερσης  $I_F$ , ίση με  $540 V$ .
2. Ρεύμα γραμμής κατά το πείραμα βραχυκύκλωσης ( $I_{L,SC}$ ), με ονομαστικό ρεύμα διέγερσης  $I_F$ , ίσο με  $300 V$ .
3. Κατά την εφαρμογή συνεχούς τάσης  $10 V$  στα δύο άκρα της, μετρήθηκε ρεύμα  $25 A$ .

Να υπολογιστούν η τιμή της αντίστασης οπλισμού και η προσεγγιστική τιμή της σύγχρονης αντίδρασης σε  $\Omega$ , ώστε να διαμορφωθεί το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας.

# Σχετικό υλικό

- Από το βιβλίο «Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC», Stephen J. Chapman, εκδ. Τζιόλα, 5<sup>η</sup> έκδ.
  - Κεφάλαιο 4, Παράγραφοι 4.6 έως 4.7