



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

Ηλεκτρικές Μηχανές II

Μάθημα 3^ο

Σύγχρονες Γεννήτριες

Γιώργος Ορφανουδάκης

Περιεχόμενα μαθήματος

1. Ταχύτητα Περιστροφής
2. Παραγόμενη Τάση
3. Ισοδύναμο Κύκλωμα
4. Ανάλυση με Στρεφόμενα Διανύσματα

Ταχύτητα Περιστροφής Σύγχρονων Γεννητριών

- Οι σύγχρονες γεννήτριες λέγονται **σύγχρονες** επειδή οι συχνότητες των τάσεων που παράγουν βρίσκονται σε συγχρονισμό (δηλ. διατηρούν μία ακριβή αναλογία) με την ταχύτητα περιστροφής τους
- Σχέση ηλεκτρικής συχνότητας στάτη με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα:

$$f_{se} = \frac{n_m P}{120}$$

Όπου: f_{se} = ηλεκτρική συχνότητα παραγόμενων τάσεων σε Hz

n_m = ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε rpm

P = αριθμός των πόλων

- Η ταχύτητα περιστροφής για συγκεκριμένο αριθμό πόλων είναι προκαθορισμένη
 - Η εξίσωση δίνει την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής ώστε να παράγεται συγκεκριμένη συχνότητα τάσεων

Παραγόμενη Τάση Σύγχρονης Γεννήτριας

- Το πλάτος της τάσης στα άκρα της κάθε φάσης μιας μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_c \Phi f = 4.44 N_c \Phi f$$

- Η E_A εξαρτάται από την μαγνητική ροή Φ , από τη συχνότητα ή τη ταχύτητα περιστροφής της μηχανής και από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής

- Άλλη μορφή της εξίσωσης:

$$E_A = K\Phi\omega$$

Όπου K σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής και είναι

αν η ω δίνεται σε ηλεκτρικά rad/s

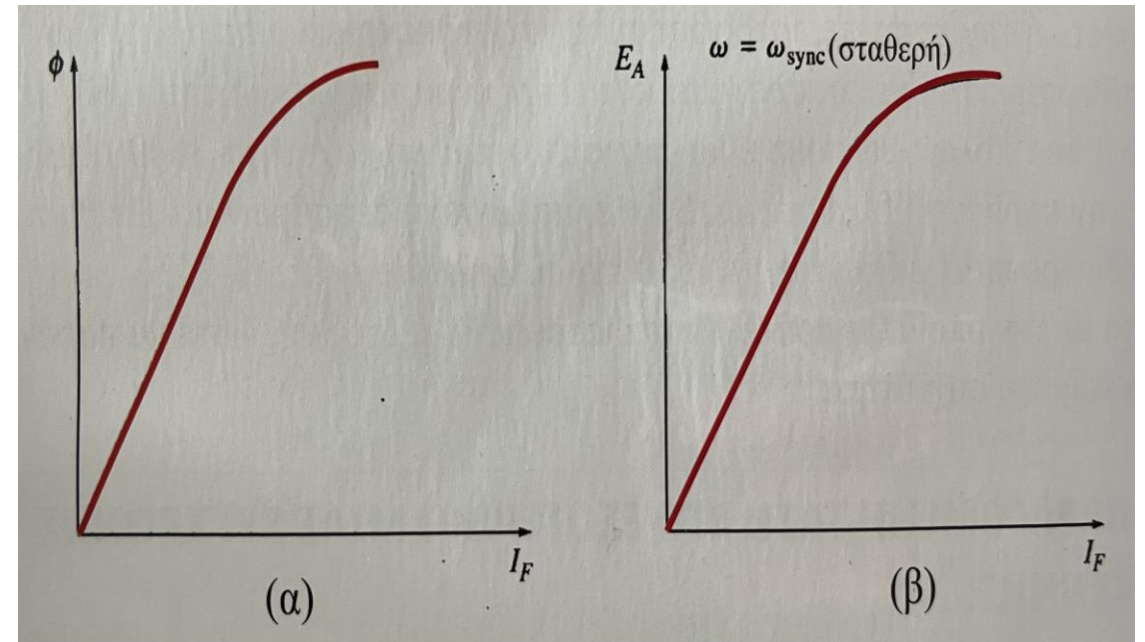
$$K = \frac{N_c}{\sqrt{2}}$$

αν η ω δίνεται σε μηχανικά rad/s

$$K = \frac{N_c P}{\sqrt{2}}$$

Παραγόμενη Τάση Σύγχρονης Γεννήτριας (2)

- Η τάση E_A που παράγεται στο εσωτερικό της γεννήτριας είναι ανάλογη της **μαγνητικής ροής** στη μηχανή και της **ταχύτητας περιστροφής** της
- Η μαγνητική ροή εξαρτάται από το ρεύμα του δρομέα (**ρεύμα διέγερσης**) σύμφωνα με την καμπύλη στο Σχήμα (α)
- Αφού η E_A είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής, η σχέση της με το ρεύμα διέγερσης δίνεται από την καμπύλη στο Σχήμα (β)
- Αυτή είναι και η **καμπύλη μαγνήτισης** ή **χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος** της μηχανής



Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονης Γεννήτριας

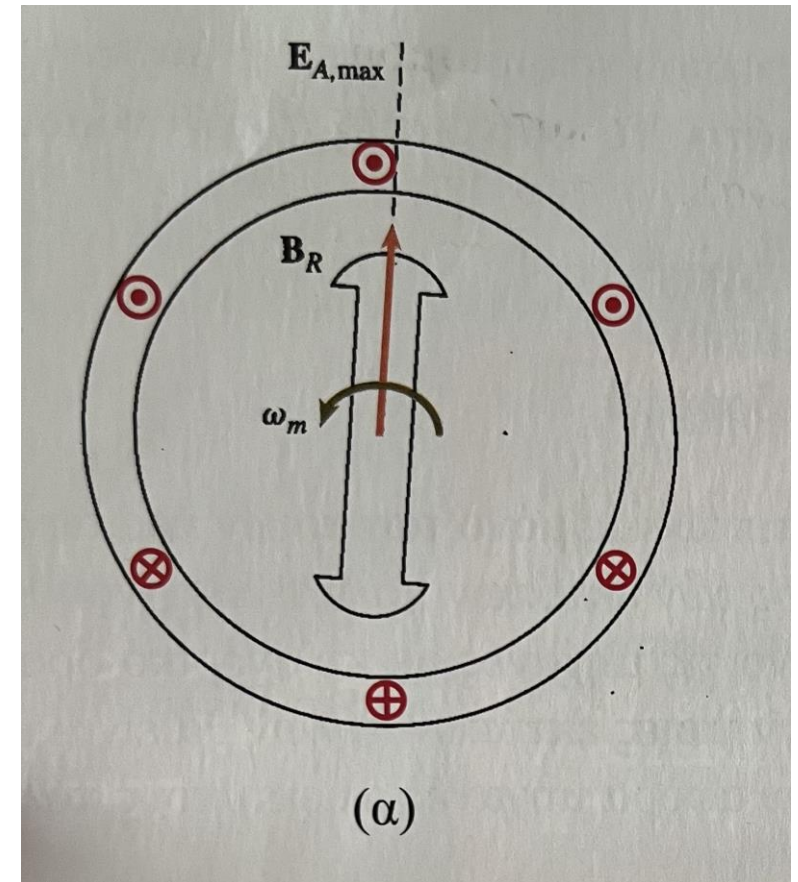
- Η τάση E_A που παράγεται στο εσωτερικό της γεννήτριας στα άκρα της μιας φάσης της, σπάνια εμφανίζεται στους ακροδέκτες της γεννήτριας
- Η αντίστοιχη τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας, V_ϕ , είναι ίση με την E_A μόνο όταν το ρεύμα οπλισμού της γεννήτριας είναι μηδέν
- Οι λόγοι που διαφοροποιούν την E_A από την V_ϕ είναι:
 - Η παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο της μηχανής που προκαλείται από το ρεύμα του στάτη (**αντίδραση οπλισμού**)
 - Οι αυτεπαγωγές των αγωγών του στάτη
 - Οι αντιστάσεις των αγωγών του στάτη
 - Το σχήμα των εκτύπων πόλων

Αντίδραση Οπλισμού

- Η περιστροφή του μαγνητικού πεδίου του δρομέα στο εσωτερικό της γεννήτριας παράγει τάση σε κάθε φάση του στάτη
- Όταν όμως στα άκρα της μηχανής συνδεθεί κάποιο φορτίο, εμφανίζεται ρεύμα στους αγωγούς του στάτη το οποίο παράγει ένα νέο πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής
- Το πεδίο του στάτη με τη σειρά του επηρεάζει το μαγνητικό πεδίο που ήταν πριν διαμορφωμένο στη μηχανή αλλά και την τάση στα άκρα της κάθε φάσης
- Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντίδραση οπλισμού επειδή το τύλιγμα του οπλισμού (στάτη) είναι αυτό που παραμορφώνει την τάση στα άκρα της γεννήτριας

Αντίδραση Οπλισμού (2)

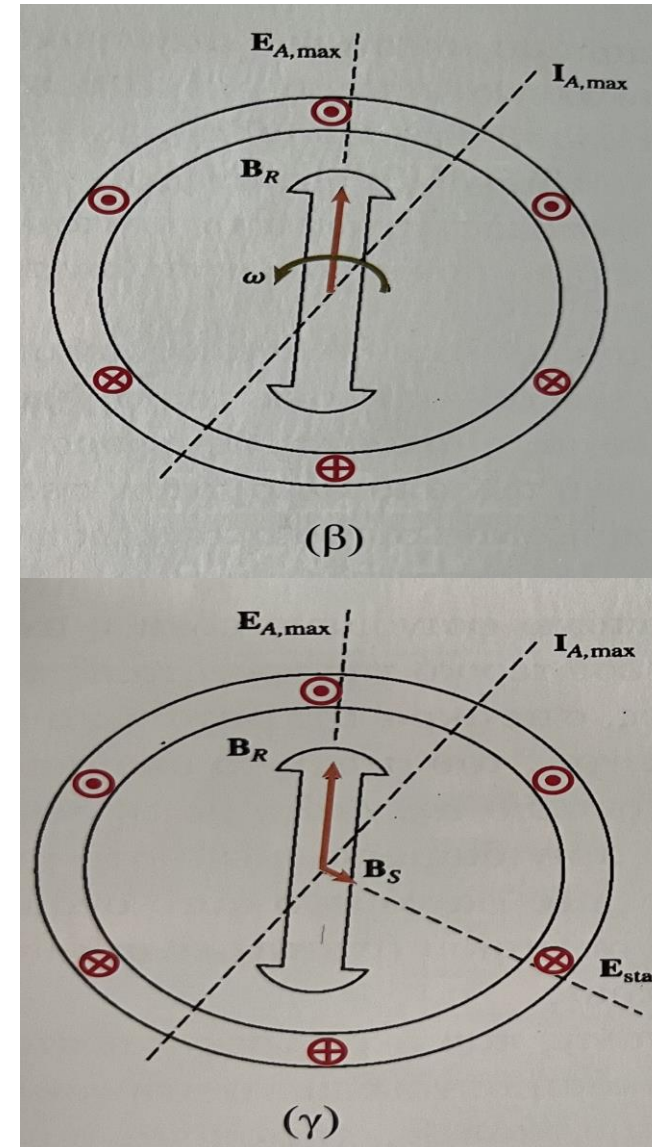
- Στο Σχήμα (α) φαίνεται ο δρομέας της μηχανής που περιστρέφεται στο εσωτερικό του στάτη χωρίς να είναι συνδεδεμένο ακόμα το φορτίο στη γεννήτρια
- Το μαγνητικό πεδίο του δρομέα B_R παράγει την τάση E_A , της οποίας η μέγιστη τιμή συμπίπτει με τη διεύθυνση του B_R
- Επειδή το φορτίο δεν έχει ακόμα συνδεθεί, το ρεύμα οπλισμού είναι μηδενικό και η E_A είναι ίση με τη V_ϕ στα άκρα της αντίστοιχης φάσης



Αντίδραση Οπλισμού (3)

- Στο Σχήμα (β) η γεννήτρια συνδέεται με κάποιο επαγωγικό φορτίο, οπότε η μέγιστη τιμή της τάσης προπορεύεται της μέγιστης τιμής του ρεύματος
- Το ρεύμα του στάτη παράγει και αυτό κάποιο μαγνητικό πεδίο με επαγωγή B_S στο εσωτερικό του και με φορά που δίνεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού όπως φαίνεται στο Σχήμα (γ)
- Το νέο πεδίο παράγει στα άκρα της κάθε φάσης του στάτη μία τάση E_{stat} που φαίνεται στο σχήμα
- Η συνολική τάση στα άκρα του τυλίγματος μιας φάσης του στάτη είναι το άθροισμα της τάσης E_A και E_{stat} που παράγεται λόγω της αντίδρασης οπλισμού:

$$V_{\Phi} = E_A + E_{stat}$$



Αντίδραση Οπλισμού (4)

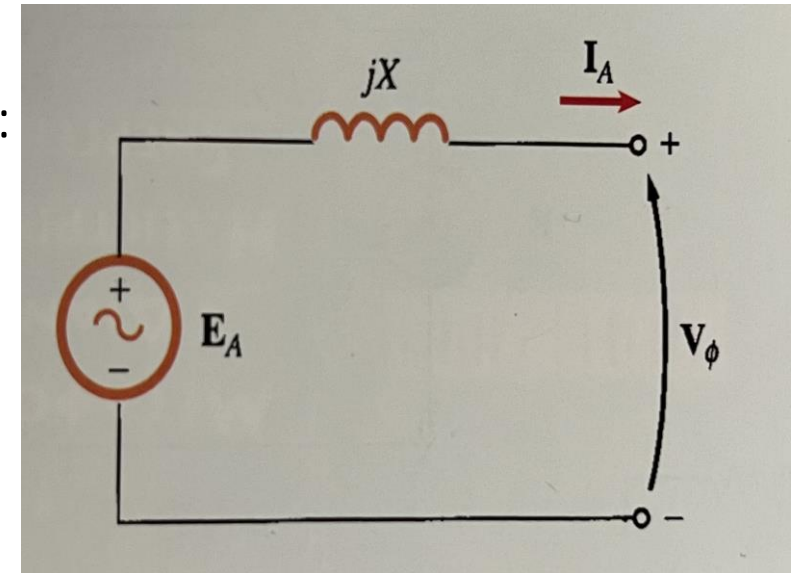
- Μοντελοποίηση της αντίδρασης οπλισμού:
 - Η τάση E_{stat} υστερεί κατά γωνία 90° σε σχέση με το ρεύμα I_A
 - Η τάση E_{stat} είναι ανάλογη του ρεύματος I_A
- Αν ο συντελεστής αναλογίας μεταξύ της E_{stat} και του I_A είναι X , τότε η τάση που οφείλεται στην αντίδραση οπλισμού είναι:

$$E_{stat} = -jXI_A$$

- Οπότε, αν αγνοηθούν οι αυτεπαγωγές και αντιστάσεις των αγωγών του στάτη (βλ. Σχήμα), η τάση στα άκρα της κάθε φάσης του στάτη γίνεται:

$$V_\phi = E_A - jXI_A$$

- Άρα, η αντίδραση οπλισμού μιας σύγχρονης γεννήτριας μπορεί να **παρασταθεί με μια αυτεπαγωγή** συνδεδεμένη σε σειρά με την τάση που παράγεται στο εσωτερικό της μηχανής



Σύγχρονη Αντίδραση

- Όμως, εκτός από την αντίδραση οπλισμού, αυτεπαγωγές και ωμικές αντιστάσεις εμφανίζουν και τα ίδια τα τυλίγματα του στάτη

- Επαγωγική αντίδραση X_A
- Ωμική αντίσταση R_A

- Συνολικά:

$$V_{\Phi} = E_A - jR_A I_A - jX I_A - jX_A I_A = E_A - jR_A I_A - j(X + X_A) I_A$$

- Σύγχρονη αντίδραση:

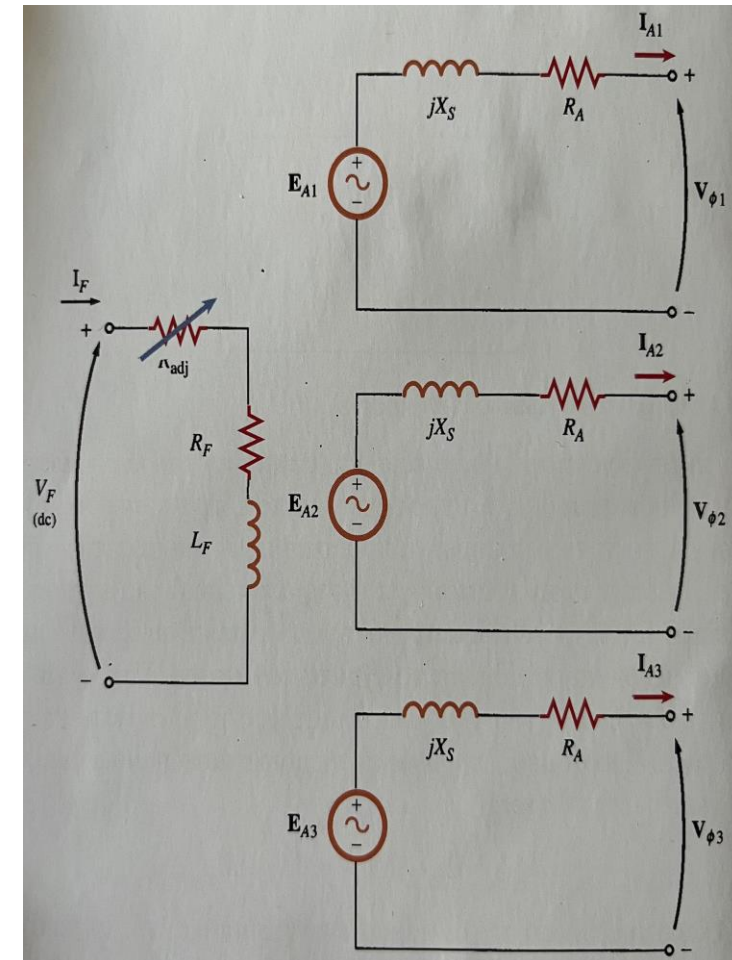
$$X_S = X + X_A$$

- Τελικά η τάση V_{Φ} δίνεται από τη σχέση:

$$V_{\Phi} = E_A - R_A I_A - jX_S I_A$$

Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονης Γεννήτριας

- Στα αριστερά τους σχήματος παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα διέγερσης (δρομέα), που περιλαμβάνει μια αυτεπαγωγή L_F και μια αντίσταση R_F
- Σε σειρά με την R_F έχει συνδεθεί η ρυθμιστική αντίσταση R_{adj} , για να μεταβάλλει το ρεύμα διέγερσης
- Το υπόλοιπο κύκλωμα αποτελείται από τα ισοδύναμα κυκλώματα των τριών φάσεων.
- Φαίνονται οι τάσεις $E_{A1,2,3}$ που παράγονται στο εσωτερικό της μηχανής, σε σειρά με τη σύγχρονη αντίδραση X_S και την αντίσταση R_A



Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονης Γεννήτριας (2)

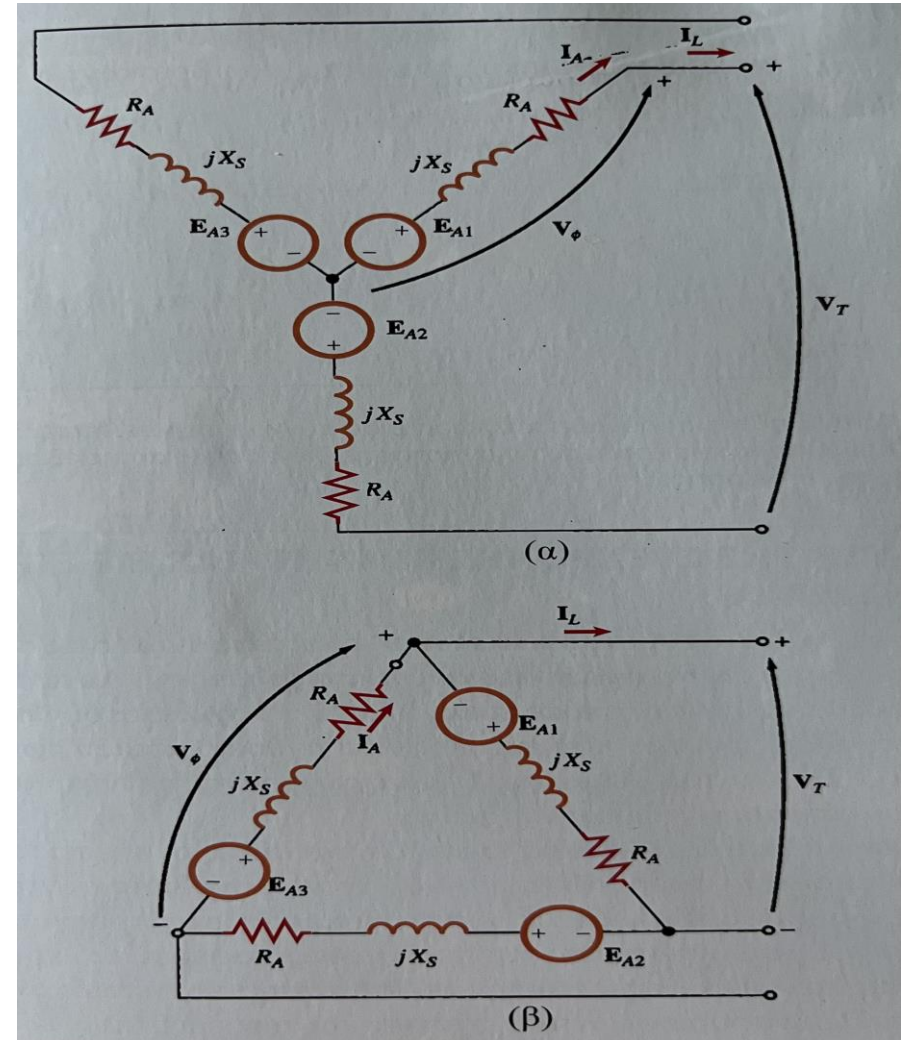
- Στο σχήμα φαίνονται οι τρεις φάσεις του στάτη συνδεδεμένες σε αστέρα ή σε τρίγωνο
- Σε σύνδεση αστέρα (Σχήμα α), οι αντίστοιχες πολικές τάσεις V_T είναι

$$V_T = \sqrt{3}V_\Phi$$

- Ενώ σε σύνδεση τριγώνου (Σχήμα β) ισχύει

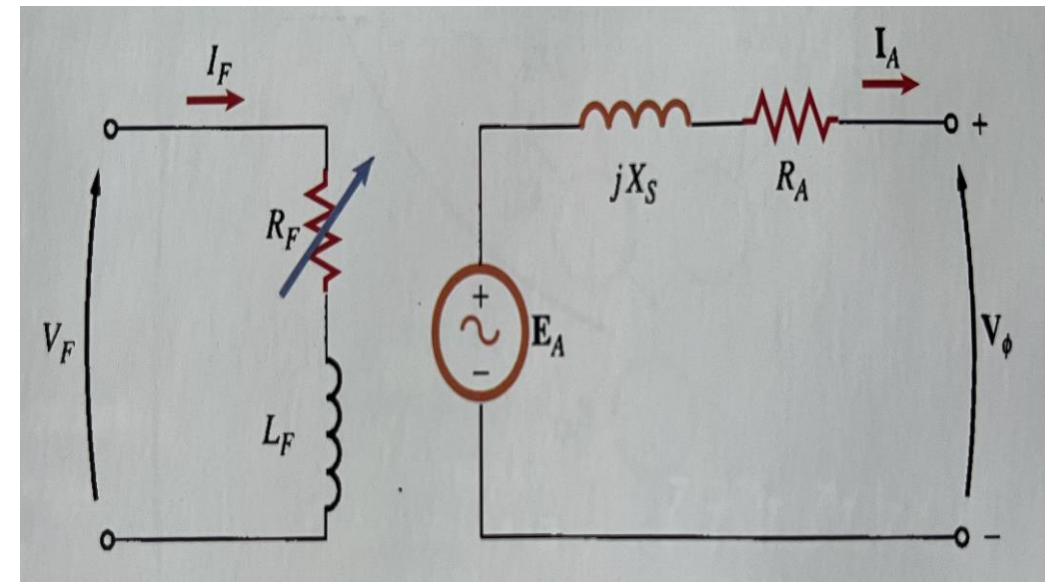
$$V_T = V_\Phi$$

- Όταν το φορτίο της γεννήτριας είναι συμμετρικό, οι τάσεις και τα ρεύματα παρουσιάζουν μεταξύ τους διαφορά φάσης 120°



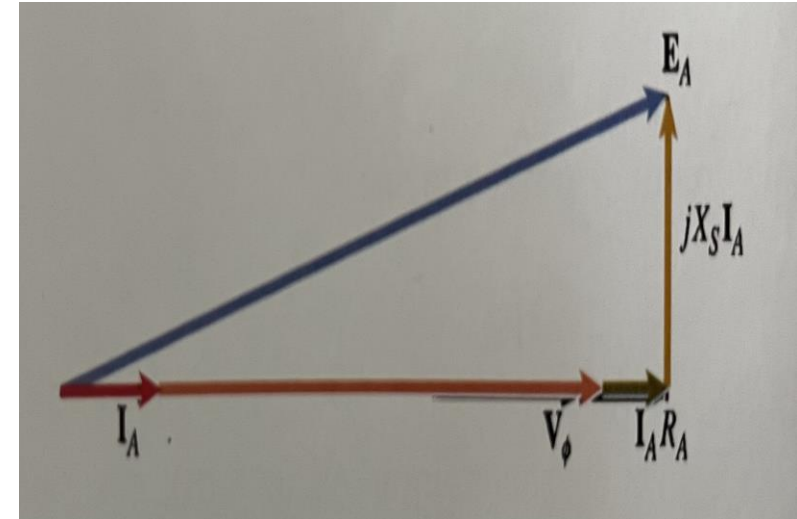
Ισοδύναμο Κύκλωμα ανά Φάση

- Στο σχήμα φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση της παραπάνω μηχανής
- Η αντίσταση R_F συμβολίζει το συνδυασμό της εσωτερικής αντίστασης διέγερσης και της εξωτερικής ρυθμιστικής αντίστασης
- Προσοχή: Όταν το φορτίο της γεννήτριας δεν είναι συμμετρικό, απαιτούνται πιο πολύπλοκες τεχνικές ανάλυσης
- Επειδή $X_S \gg R_A$, η R_A συνήθως αγνοείται. Όταν όμως απαιτούνται ακριβείς ποσοτικοί υπολογισμοί, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.



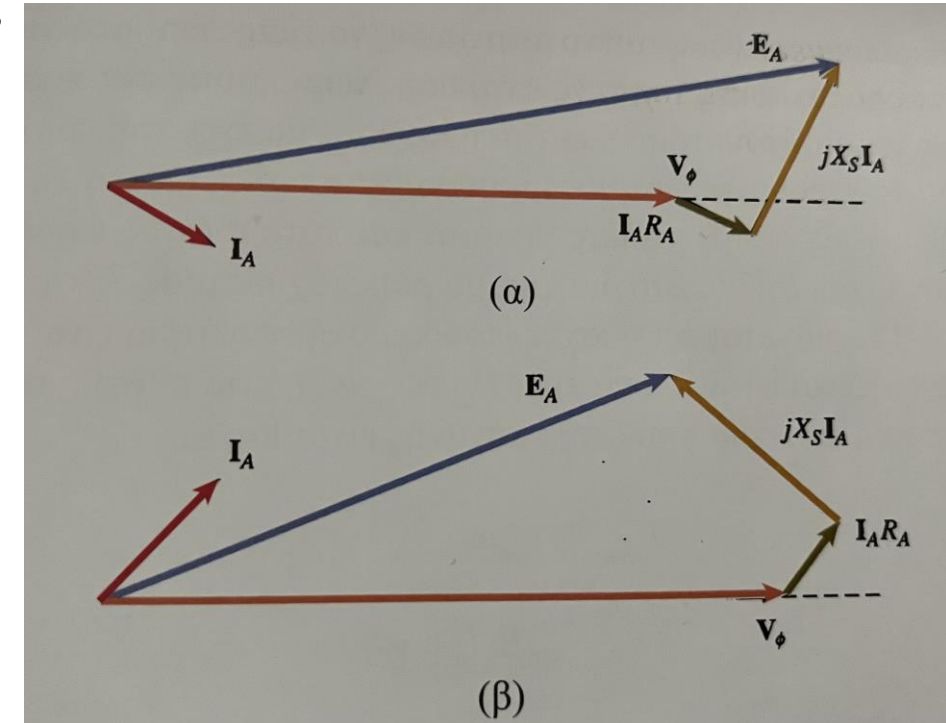
Ανάλυση με Στρεφόμενα Διανύσματα

- Συχνά οι εναλλασσόμενες τάσεις που αναπτύσσονται στις σύγχρονες γεννήτριες εκφράζονται με στρεφόμενα διανύσματα
- Διανυσματικό διάγραμμα: Εκφράζει τις σχέσεις μεταξύ των τάσεων (E_A , V_Φ , $jX_S I_A$, $R_A I_A$) και του ρεύματος I_A μιας σύγχρονης γεννήτριας
- Ως αναφορά όλων των τάσεων και των ρευμάτων εδώ θεωρείται η τάση V_Φ (η φάση της V_Φ λαμβάνεται μηδενική)
- Στο σχήμα παρουσιάζονται αυτές οι σχέσεις στην περίπτωση που η γεννήτρια τροφοδοτεί ένα φορτίο με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος (καθαρά ωμικό φορτίο)
- Η τάση της κάθε φάσης E_A στο εσωτερικό της γεννήτριας διαφέρει από την τάση εξόδου V_Φ της συγκεκριμένης φάσης κατά την πτώση τάσης στην αντίσταση R_A και αυτεπαγωγή X_S



Διανυσματικά Διαγράμματα για Επαγωγικό και Χωρητικό φορτίο

- Διανυσματικό διάγραμμα όταν το φορτίο της γεννήτριας είναι
 - (α) Επαγωγικό: Το ρεύμα I_A καθυστερεί σε σχέση με τη V_Φ
 - (β) Χωρητικό: Το ρεύμα I_A προπορεύεται από τη V_Φ
- Για δεδομένα I_A και V_Φ , απαιτείται παραγωγή μεγαλύτερης τάσης E_A για την τροφοδοσία επαγωγικού φορτίου απ' αυτή που απαιτείται για την τροφοδοσία ωμικού, και ακόμα περισσότερο χωρητικού φορτίου
 - Επειδή $E_A = K\Phi\omega$, απαιτείται μεγαλύτερο ρεύμα διέγερσης για τροφοδοσία ενός επαγωγικού φορτίου με την ίδια τάση
- Ισοδύναμα: Για δεδομένο ρεύμα διέγερσης και I_A η V_Φ είναι μικρότερη στα επαγωγικά φορτία και μεγαλύτερη στα χωρητικά ($V_{\Phi,L} < V_{\Phi,R} < V_{\Phi,C}$)



Σχετικό υλικό

- Από το βιβλίο «Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC», Stephen J. Chapman, εκδ. Τζιόλα, 5^η έκδ.
 - Κεφάλαιο 4, Παράγραφοι 4.2 έως 4.5