



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

Ηλεκτρικές Μηχανές II

Μάθημα 7^ο

Σύγχρονες Γεννήτριες – Μέρος Ε΄

Γιώργος Ορφανουδάκης

Περιεχόμενα μαθήματος

1. Προδιαγραφές Σύγχρονων Γεννητριών
2. Ονομαστική Τάση, Ταχύτητα και Συχνότητα
3. Ονομαστική Φαινόμενη Ισχύς – Ονομαστικός Συντελεστής Ισχύος
4. Διάγραμμα Λειτουργίας της Σύγχρονης Γεννήτριας
5. Βραχυπρόθεσμη Λειτουργία Σύγχρονων Γεννητριών – Παράγοντας Υπερφόρτισης

Προδιαγραφές Σύγχρονων Γεννητριών

- Οι προδιαγραφές (ονομαστικά στοιχεία) της γεννήτριας εκφράζουν τα όρια ασφαλούς λειτουργίας της
- Συνήθως αναγράφονται στην πινακίδα της γεννήτριας
- Οι τυπικές προδιαγραφές μιας σύγχρονης γεννήτριας είναι:
 - η τάση,
 - η συχνότητα,
 - η ταχύτητα,
 - η φαινόμενη ισχύς,
 - ο συντελεστής ισχύος,
 - το ρεύμα διέγερσης,
 - ο συντελεστής υπερφόρτισης

Ονομαστική Ταχύτητα και Συχνότητα

- Η ονομαστική συχνότητα μιας σύγχρονης γεννήτριας, προσδιορίζεται από τη συχνότητα του συστήματος ισχύος στο οποίο είναι συνδεδεμένη
- Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι
 - τα 50 Hz (στην Ευρώπη, στην Ασία κλπ.),
 - τα 60 Hz (στην Αμερική)
 - τα 400 Hz σε ειδικές εφαρμογές (π.χ. αεροπλάνα)
- Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, η συχνότητα μιας γεννήτριας με ορισμένο αριθμό πόλων προσδιορίζει την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής:

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

Ονομαστική Τάση

- Το πιο σημαντικό στοιχείο των προδιαγραφών μιας γεννήτριας είναι η **τάση** που παράγει στην κανονική λειτουργία της
- Αυτή η τάση εξαρτάται από τη **μαγνητική ροή** στο εσωτερικό της μηχανής, από την **ταχύτητα περιστροφής** και από τα **κατασκευαστικά χαρακτηριστικά** της
- Επειδή η ταχύτητα και η δομή της μηχανής είναι δεδομένες, η αύξηση της τάσης στα άκρα της είναι αποτέλεσμα της αύξησης της ροής στο εσωτερικό της
 - Όμως, η μαγνητική ροή δεν είναι δυνατό να αυξάνεται απεριόριστα, αφού εξαρτάται άμεσα από το **ρεύμα διέγερσης** της γεννήτριας το οποίο παρουσιάζει κάποιο **μέγιστο ασφαλούς λειτουργίας**
- Ακόμη ένας παράγοντας που περιορίζει την τάση λειτουργίας μιας σύγχρονης γεννήτριας είναι η τάση διάσπασης της μόνωσης των τυλιγμάτων της
 - Η τάση εξόδου της μηχανής ποτέ δε θα πρέπει να προκαλεί ρεύματα που να πλησιάζουν τα **όρια διάσπασης** αυτής της μόνωσης

Ονομαστική Τάση (2)

- Μια γεννήτρια των 60 Hz μπορεί να λειτουργήσει στα 50 Hz;
 - Ναι, αν προηγουμένως ληφθούν υπόψη κάποιες νέες συνθήκες ασφαλούς λειτουργίας
- Ειδικότερα, όπως αναφέρθηκε, υπάρχει κάποια μέγιστη επιτρεπόμενη μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής
- Επειδή $E_A = K\Phi\omega$, η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση E_A μεταβάλλεται με τη συχνότητα
- Συνεπώς, η τάση λειτουργίας της γεννήτριας θα μειωθεί στα 5/6 ή στο 83,3%
- Μια γεννήτρια των 50 Hz μπορεί να λειτουργήσει στα 60 Hz;
 - ...

Ονομαστική Φαινόμενη Ισχύς

- Οι δυο παράγοντες που προσδιορίζουν τα όρια ισχύος μιας ηλεκτρικής μηχανής είναι
 - η **ροπή** που εφαρμόζεται στον άξονά της
 - η **θερμότητα** που αναπτύσσεται στα τυλίγματα της
- Ροπή: Όλες σχεδόν οι σύγχρονες μηχανές διαθέτουν άξονα με αρκετά μεγάλη μηχανική αντοχή, ώστε να μπορούν να εργαστούν με ροπή πολύ μεγαλύτερη από την ονομαστική στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας
- Άρα πρακτικά, οι περιορισμοί της μέγιστης ισχύος προσδιορίζονται αποκλειστικά από τις **θερμοκρασίες** που αναπτύσσονται στα τυλίγματά τους στη μόνιμη κατάσταση
- Το **μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα οπλισμού** της γεννήτριας ορίζει τη μέγιστη φαινόμενη ισχύ της μέσω της σχέσης

$$S = 3V_{\Phi} I_A$$

Ονομαστική Φαινόμενη Ισχύς (2)

- Αν είναι γνωστή η ονομαστική τάση της γεννήτριας, τότε το μέγιστο ρεύμα οπλισμού προσδιορίζει την ονομαστική φαινόμενη ισχύ της

$$S_{rated} = 3V_{\Phi,rated}I_{A,max} = \sqrt{3}V_{L,rated}I_{L,max}$$

- Ο **συντελεστής ισχύος** του ρεύματος οπλισμού **δεν παίζει κανένα ρόλο** στην υπερθέρμανση των τυλιγμάτων οπλισμού της, αφού η ισχύς που μετατρέπεται σε θερμότητα στο κύκλωμα οπλισμού της (*P_{Stator Copper Losses}*) **δεν εξαρτάται από τη φάση** του I_A

$$P_{SCL} = 3I_A^2 R_A$$

- Γι' αυτόν τον λόγο οι σύγχρονες μηχανές προδιαγράφονται με βάση τη **φαινόμενη ισχύ** (kVA) αντί της ενεργού ισχύος (kW)

Ονομαστικός Συντελεστής Ισχύος

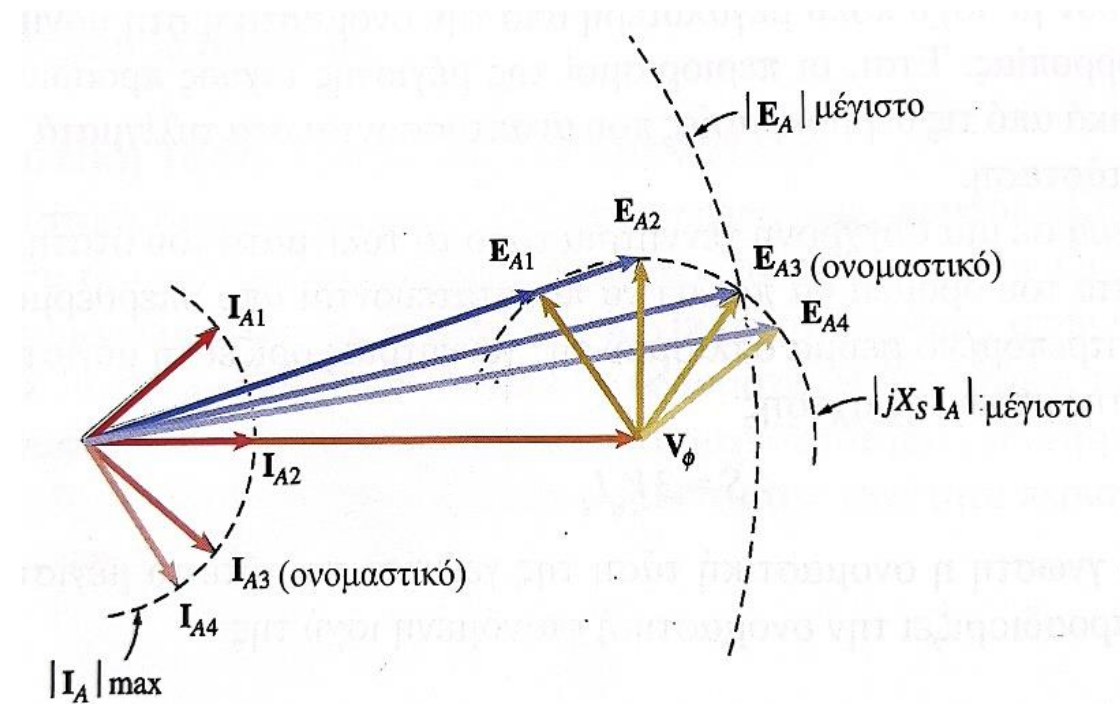
- Η ισχύς που μετατρέπεται σε θερμότητα στο κύκλωμα διέγερσης ($P_{Rotor\ Copper\ Losses}$) είναι ίση με τις αντίστοιχες απώλειες χαλκού

$$P_{RCL} = I_F^2 R_F$$

- Η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία των τυλιγμάτων διέγερσης καθορίζει το μέγιστο ρεύμα διέγερσης κι αυτό με τη σειρά του τη μέγιστη τιμή της τάσης E_A
- Το γεγονός ότι ορίστηκε μέγιστη επιτρεπόμενη τάση στο εσωτερικό της γεννήτριας E_A και μέγιστο ρεύμα διέγερσης I_F , σημαίνει ότι κατά τη λειτουργία με ονομαστική φαινόμενη ισχύ θα πρέπει να οριστεί και κάποιος ελάχιστος επιτρεπτός συντελεστής ισχύος

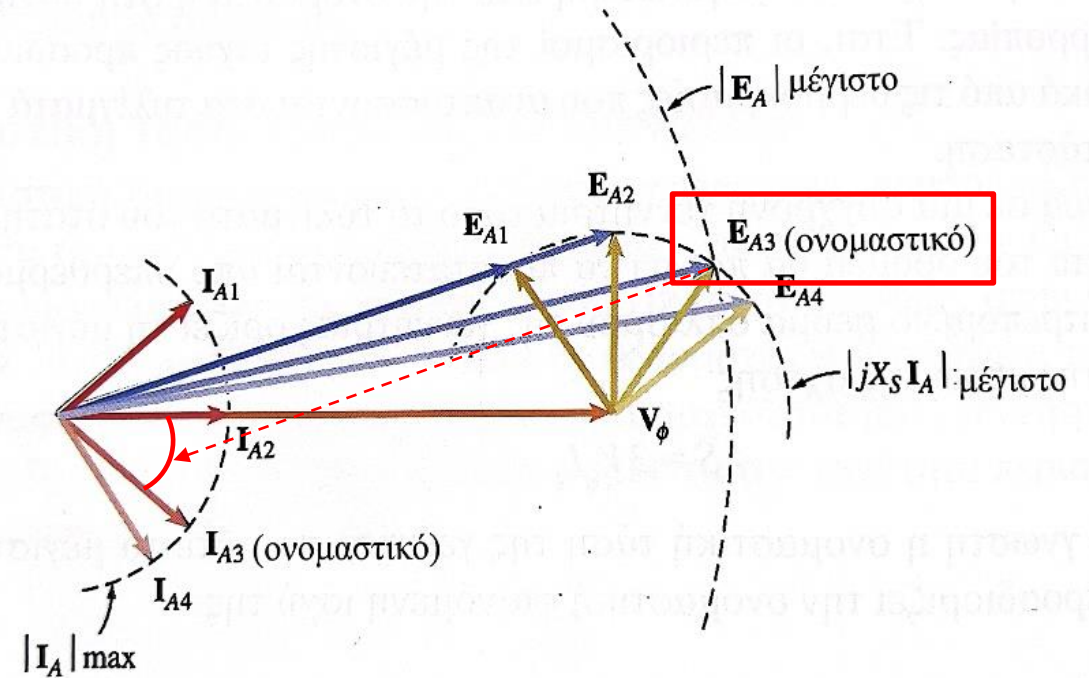
Ονομαστικός Συντελεστής Ισχύος (2)

- Διανυσματικό διάγραμμα γεννήτριας που λειτουργεί με
 - ονομαστικό ρεύμα οπλισμού
 - ονομαστική φασική τάση
 - ενώ η **φάση του ρεύματος οπλισμού** μεταβάλλεται
- Επειδή η E_A είναι το άθροισμα των V_ϕ και $jX_S I_A$, κάποιες τιμές της φάσης του I_A δίνουν για την E_A τιμές μεγαλύτερες της μέγιστης επιτρεπόμενης $E_{A,max}$
- Για να παραχθούν όμως αυτές οι τιμές της E_A , θα πρέπει το ρεύμα διέγερσης να υπερβαίνει το ονομαστικό!



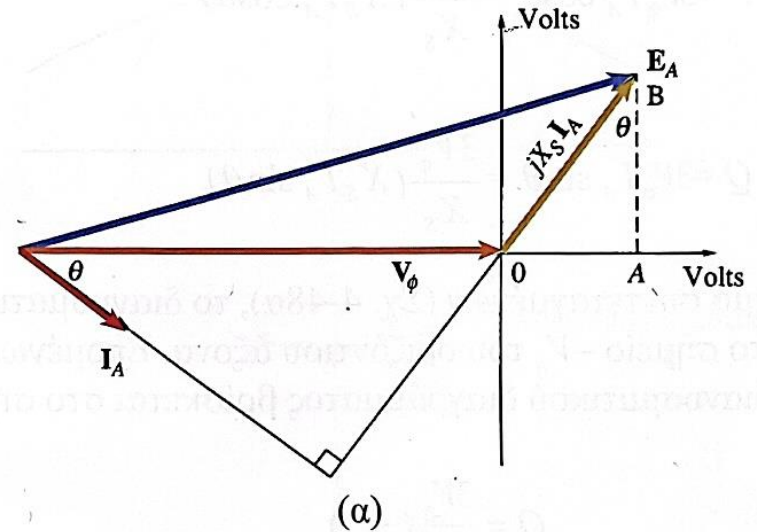
Ονομαστικός Συντελεστής Ισχύος (3)

- Συνεπώς, αν η γεννήτρια λειτουργεί με ονομαστικό ρεύμα οπλισμού και με αντίστοιχους συντελεστές ισχύος, το τύλιγμα διέγερσης θα καταστραφεί λόγω υπερθέρμανσης
- Ο **ονομαστικός συντελεστής ισχύος** ορίζεται κατά τη λειτουργία με ονομαστική τάση V_ϕ , από τη φάση του ονομαστικού ρεύματος I_A που δίνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τάση E_A
- Η λειτουργία με χαμηλότερο (περισσότερο επαγωγικό) συντελεστή ισχύος, είναι δυνατή μόνο όταν η γεννήτρια λειτουργεί με φαινόμενη ισχύ μικρότερη από την ονομαστική



Διάγραμμα Λειτουργίας της Σύγχρονης Γεννήτριας

- Τα όρια ασφαλούς λειτουργίας που θέτουν τα κυκλώματα του στάτη και του δρομέα μιας σύγχρονης γεννήτριας, καθώς και τα όρια που θέτουν κάποιοι εξωτερικοί παράγοντες, συνδυάζονται μεταξύ τους στο διάγραμμα λειτουργίας της γεννήτριας
- Πρόκειται για τη γραφική παράσταση της φαινόμενης ισχύος ($S = P + jQ$) της μηχανής που εξάγεται από το διανυσματικό διάγραμμα της, όπου θεωρείται ότι η τάση V_ϕ είναι σταθερή και ίση με την ονομαστική
- Στο σχήμα δίπλα, φαίνεται το διανυσματικό διάγραμμα της γεννήτριας, όταν αυτή λειτουργεί με κάποιον επαγωγικό συντελεστή ισχύος και με την ονομαστική της τάση



Διάγραμμα Λειτουργίας της Σύγχρονης Γεννήτριας

- Πάνω σ' αυτό το διάγραμμα σχεδιάζεται ένα σύστημα ορθογώνιων συντεταγμένων με την αρχή του στο τέλος του διανύσματος V_Φ , ενώ οι μονάδες του αναφέρονται σε Volt
- Επίσης, όπως φαίνεται, το κατακόρυφο τμήμα AB έχει μήκος $X_S I_A \cos \theta$, ενώ το οριζόντιο τμήμα OA είναι ίσο με $X_S I_A \sin \theta$
- Η ενεργός ισχύς εξόδου της γεννήτριας δίνεται από τη σχέση

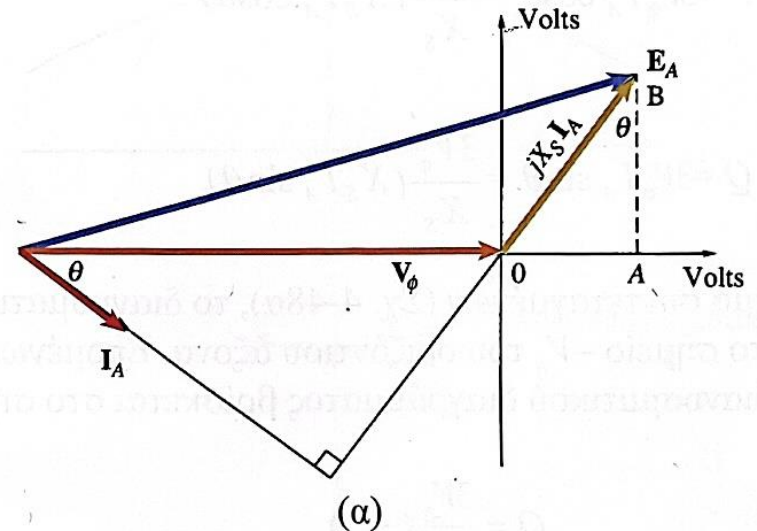
$$P = 3V_\Phi I_A \cos \theta$$

- Η άεργος ισχύς της είναι

$$Q = 3V_\Phi I_A \sin \theta$$

- Και η φαινόμενη ισχύς της είναι

$$S = 3V_\Phi I_A$$

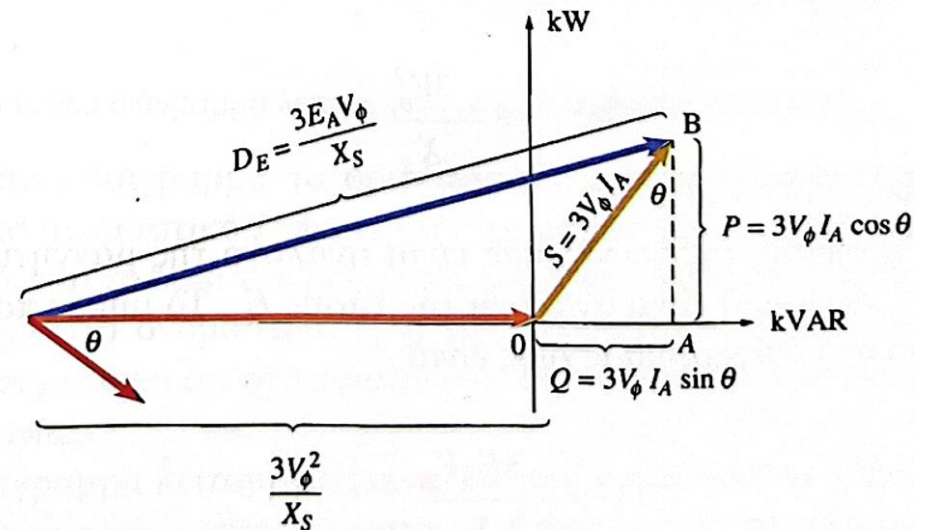


Διάγραμμα Λειτουργίας της Σύγχρονης Γεννήτριας

- Οι μονάδες του συστήματος συντεταγμένων είναι δυνατό να μετατραπούν από Volt σε μονάδες ισχύος (Voltampere)
- Ο συντελεστής αυτής της μετατροπής είναι ο λόγος $\frac{3V_{\Phi}}{X_S}$

$$P = 3V_{\Phi} I_A \cos \theta = \frac{3V_{\Phi}}{X_S} (X_S I_A \cos \theta)$$

$$Q = 3V_{\Phi} I_A \sin \theta = \frac{3V_{\Phi}}{X_S} (X_S I_A \sin \theta)$$



Διάγραμμα Λειτουργίας της Σύγχρονης Γεννήτριας

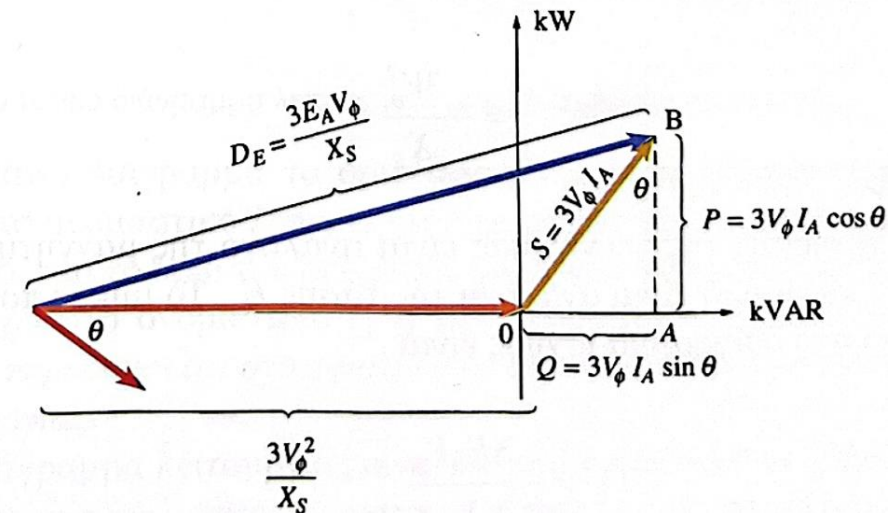
- Στο αρχικό σύστημα συντεταγμένων, το διανυσματικό διάγραμμα έχει την αρχή του στο σημείο $(-V_{\Phi})$ του οριζόντιου άξονα
- Στο νέο σύστημα, η αρχή του διανυσματικού διαγράμματος βρίσκεται στο σημείο

$$Q = \frac{3V_{\Phi}}{X_S} (-V_{\Phi}) = -\frac{3V_{\Phi}^2}{X_S}$$

- Το ρεύμα διέγερσης της γεννήτριας είναι ανάλογο της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό της και η μαγνητική ροή είναι ανάλογη της τάσης E_A
- Το μήκος που αντιστοιχεί στην E_A είναι

$$D_E = -\frac{3E_A V_{\Phi}}{X_S}$$

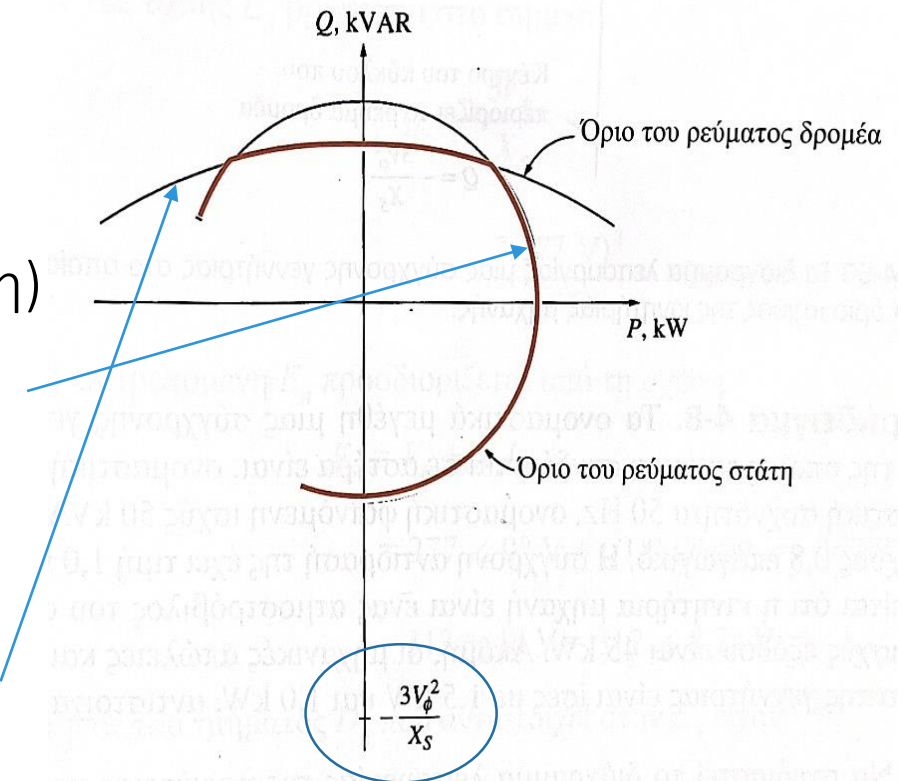
- Το ρεύμα οπλισμού I_A είναι ανάλογο του $X_S I_A$ και αντιστοιχεί στο $3V_{\Phi} I_A$



Διάγραμμα Λειτουργίας της Σύγχρονης Γεννήτριας

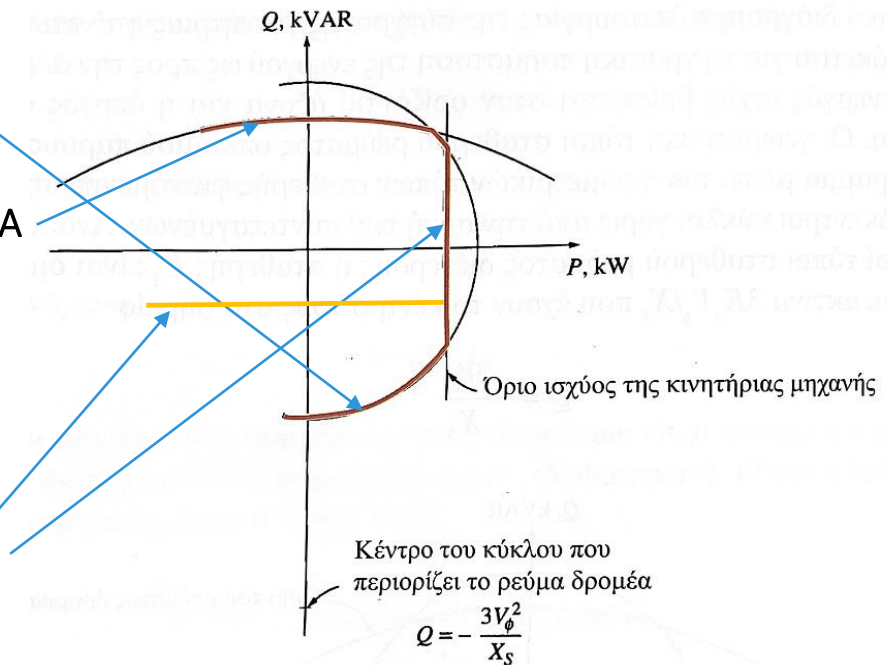
- Τελικό διάγραμμα λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας: Γραφική παράσταση της ενεργού ως προς την άεργο ισχύ
 - η ενεργός ισχύς βρίσκεται στον οριζόντιο άξονα
 - η άεργος στον κατακόρυφο άξονα
- Οι γεωμετρικοί τόποι **σταθερού ρεύματος οπλισμού** (στάτη) παρουσιάζονται στο διάγραμμα μέσω των γεωμετρικών τόπων **σταθερής φαινόμενης ισχύος** που είναι ομόκεντροι κύκλοι γύρω από την αρχή των συντεταγμένων
- Οι γεωμετρικοί τόποι **σταθερού ρεύματος διέγερσης** ή **σταθερής Εα** είναι ομόκεντροι κύκλοι με ακτίνα $3E_a V_\phi / X_s$ που έχουν το κέντρο τους στο σημείο

$$Q = -\frac{3V_\phi^2}{X_s}$$



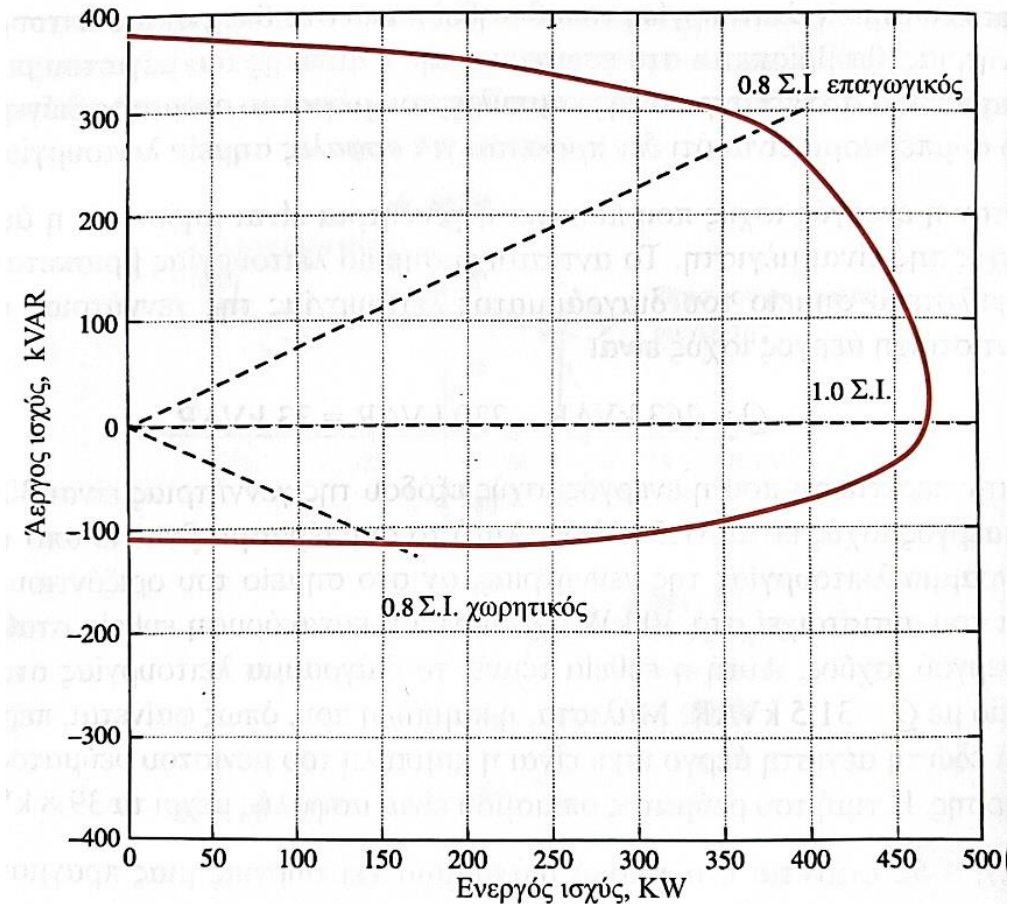
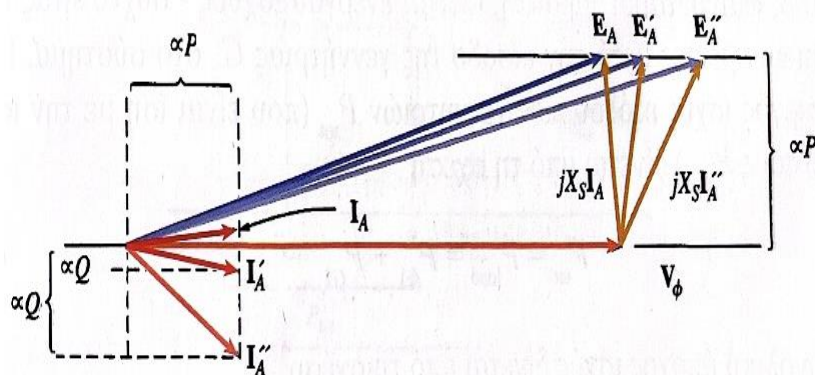
Διάγραμμα Λειτουργίας της Σύγχρονης Γεννήτριας

- Το **όριο ασφαλείας** του ρεύματος οπλισμού που αντιστοιχεί στο **ονομαστικό I_A** περιγράφεται με τον κύκλο της ονομαστικής φαινόμενης ισχύος
- Το **όριο του ρεύματος διέγερσης** παρουσιάζεται με τον κύκλο που αντιστοιχεί στο **ονομαστικό I_f** ή την **ονομαστική E_A**
- Όλα τα σημεία λειτουργίας που περικλείονται στο εσωτερικό αυτών των δυο κύκλων είναι ασφαλή σημεία λειτουργίας
- Είναι δυνατό να φανούν κι άλλοι περιορισμοί, όπως το **όριο της (μηχανικής) ισχύος εισόδου** που προσδιορίζεται από τις ιδιότητες της κινητήριας μηχανής και το **όριο στατικής ευστάθειας**, καθώς και **όριο για τη γωνία ροπής, δ** .



Διάγραμμα Λειτουργίας της Σύγχρονης Γεννήτριας

- Τυπικό διάγραμμα λειτουργίας μιας πραγματικής σύγχρονης γεννήτριας
- Τα όρια ασφαλείας στην περίπτωση αυτή δεν είναι τέλειοι κύκλοι, διότι στις πραγματικές σύγχρονες γεννήτριες εκτύπων πόλων εμφανίζονται επιπρόσθετα φαινόμενα τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη μοντελοποίησή τους



Παράδειγμα 4-8

Τα ονομαστικά μεγέθη μιας σύγχρονης γεννήτριας έξι πόλων της οποίας τα άκρα συνδέονται σε αστέρα είναι: ονομαστική τάση 480 V, ονομαστική συχνότητα 50 Hz, ονομαστική φαινόμενη ισχύς 50 kVA με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγωγικό. Η σύγχρονη αντίδρασή της έχει τιμή 1,0 Ω ανά φάση. Θεωρείται ότι η κινητήρια μηχανή είναι ένας ατμοστρόβιλος του οποίου η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι 45 kW. Ακόμη, οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες πυρήνα της γεννήτριας είναι ίσες με 1,5 kW και 1,0 kW, αντίστοιχα.

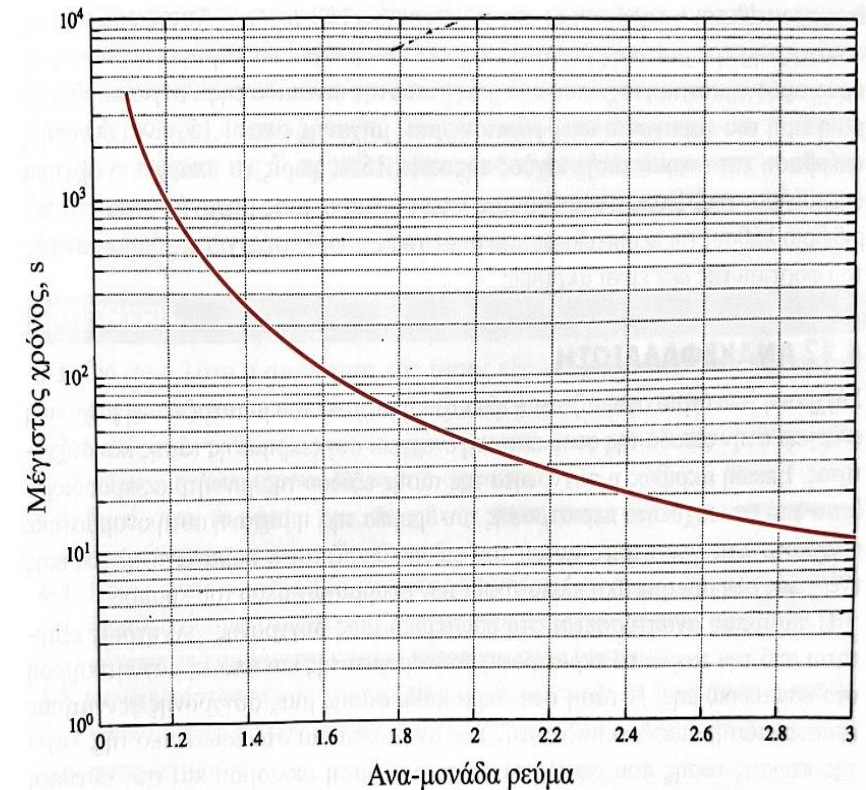
1. Να σχεδιαστεί το διάγραμμα λειτουργίας της γεννήτριας και να περιληφθεί σ' αυτό το όριο ισχύος της κινητήριας μηχανής.
2. Είναι δυνατό η γεννήτρια να τροφοδοτεί φορτίο με συντελεστή ισχύος 0,7 επαγωγικό και με ρεύμα γραμμής 56 A; Η απάντηση να δικαιολογηθεί.
3. Ποια είναι η μέγιστη τιμή της άεργης ισχύος που μπορεί να παράγει η γεννήτρια;
4. Αν η γεννήτρια προσφέρει στο φορτίο της ενεργό ισχύ ίση με 30 kW, πόση είναι η μέγιστη άεργος ισχύς που μπορεί να προσφέρει ταυτόχρονα;

Βραχυπρόθεσμη Λειτουργία Σύγχρονων Γεννητριών – Παράγοντας Υπερφόρτιση

- Οι σοβαρότεροι περιορισμοί μιας σύγχρονης γεννήτριας στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι η θέρμανση των τυλιγμάτων του δρομέα και του στάτη
- Όμως, οι δυνατότητες παραγωγής ισχύος μιας γεννήτριας, από την άποψη των μαγνητικών πεδίων της και της μηχανικής αντοχής της, συνήθως είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που προσδιορίζουν τα παραπάνω όρια
- Στην πραγματικότητα μια τυπική σύγχρονη γεννήτρια έχει τη δυνατότητα να παράγει ισχύ μέχρι και τρεις φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική της, και πάνω από τα όρια ασφαλείας της, για μικρό χρονικό διάστημα, με την προϋπόθεση ότι τα τυλίγματα της δεν προλαβαίνουν να υπερθερμανθούν
- Η δυνατότητα αυτή της γεννήτριας χρησιμοποιείται σε έκτακτες περιπτώσεις για την εξυπηρέτηση ειδικών αναγκών, όπως κατά την εκκίνηση ενός κινητήρα ή κατά τη διάρκεια άλλων παρόμοιων μεταβατικών φαινομένων

Βραχυπρόθεσμη Λειτουργία Σύγχρονων Γεννητριών – Παράγοντας Υπερφόρτιση

- Για παράδειγμα, μια γεννήτρια ονομαστικής ισχύος 1 MW θα μπορούσε να παράγει 1,5 MW για διάστημα ενός λεπτού χωρίς προβλήματα υπερθέρμανσης
- Όσο η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται (πάνω από την ονομαστική ισχύ), τόσο μειώνεται το χρονικό διάστημα στο οποίο η γεννήτρια μπορεί να λειτουργεί χωρίς προβλήματα
- Στο σχήμα φαίνεται το χρονικό διάστημα σε δευτερόλεπτα που χρειάζεται μια υπερφόρτιση για να προκαλέσει θερμική καταστροφή σε μια τυπική ηλεκτρική μηχανή
 - της οποίας τα τυλίγματα ήταν ήδη σε κανονική θερμοκρασία λειτουργίας πριν την εμφάνιση της υπερφόρτισης



Βραχυπρόθεσμη Λειτουργία Σύγχρονων Γεννητριών – Παράγοντας Υπερφόρτιση

- Η συγκεκριμένη μηχανή μπορεί να αντέξει
 - μια υπερφόρτιση 20% για 1000 δευτερόλεπτα (17 λεπτά)
 - μια υπερφόρτιση 100% για 30 περίπου δευτερόλεπτα
 - μια υπερφόρτιση 200% για περίπου 10 δευτερόλεπτα
- Η μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας που μπορεί να αντέξει μια γεννήτρια εξαρτάται από το είδος της μόνωσης των τυλιγμάτων της ή αλλιώς από την κλάση μόνωσής της (A, B, F και H)
- Οι αντίστοιχες θερμοκρασίες ασφαλούς λειτουργίας των παραπάνω κλάσεων μόνωσης μεταβάλλονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της κάθε συγκεκριμένης μηχανής και ανάλογα με τη μέθοδο μέτρησης της θερμοκρασίας, ορίζονται γενικά στους 60, 80, 105 και 125°C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος
- Όσο ανώτερης κλάσης είναι η μόνωση μιας γεννήτριας, τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς που μπορεί να παράγει, χωρίς να καταστραφεί

Βραχυπρόθεσμη Λειτουργία Σύγχρονων Γεννητριών – Παράγοντας Υπερφόρτιση

- Η υπερθέρμανση των τυλιγμάτων είναι ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα των κινητήρων και των γεννητριών
- Ένας πρακτικός κανόνας που ίσχυε σε προγενέστερα χρόνια υποστήριζε πως η μέση διάρκεια ζωής μιας μηχανής μειώνεται στο μισό κάθε φορά που η θερμοκρασία λειτουργίας της ξεπερνάει κατά 10 °C την ονομαστική της θερμοκρασία
- Στις μέρες μας, αν και δεν ισχύει κάτι τέτοιο λόγω βελτίωσης της αντοχής των μονώσεων, κάθε φορά που η θερμοκρασία της μηχανής ξεπερνάει τη θερμοκρασία ασφαλείας, η διάρκεια ζωής της μειώνεται δραστικά
- Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο μια σύγχρονη μηχανή δε θα πρέπει να υπερφορτίζεται, εκτός κι αν αυτό είναι απολύτως απαραίτητο

Βραχυπρόθεσμη Λειτουργία Σύγχρονων Γεννητριών – Παράγοντας Υπερφόρτιση

- Επίσης, όσον αφορά την υπερθέρμανση μιας σύγχρονης μηχανής, σπάνια υπάρχουν ακριβείς εκτιμήσεις για το φορτίο της και για τις διακυμάνσεις του
- Έτσι, στα ονομαστικά μεγέθη μιας σύγχρονης μηχανής γενικής χρήσης συνήθως προστίθεται ο παράγοντας υπερφόρτισης (service factor)
- Αυτός ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής μέγιστης ισχύος, που μπορεί να παράγει η γεννήτρια, προς την ονομαστική ισχύ που αναγράφεται στην πινακίδα της
- Αν για παράδειγμα η τιμή του παράγοντα υπερφόρτισης μιας μηχανής είναι 1,15, είναι δυνατή η υπέρβαση της ονομαστικής ισχύος της κατά 15%, χωρίς να υπάρχει πρόβλημα υπερθέρμανσης
- Έτσι, ο παράγοντας υπερφόρτισης μιας μηχανής δίνει ένα περιθώριο σε περιπτώσεις που οι αρχικές προβλέψεις για τις διακυμάνσεις του φορτίου της δεν είναι ακριβείς

Σχετικό υλικό

- Από το βιβλίο «Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC», Stephen J. Chapman, εκδ. Τζιόλα, 5^η έκδ.
 - Κεφάλαιο 4, Παράγραφοι 4.11 έως 4.12