



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

Ηλεκτρικές Μηχανές II

Μάθημα 6^ο

Σύγχρονες Γεννήτριες – Μέρος Δ'

Γιώργος Ορφανουδάκης

Περιεχόμενα μαθήματος

1. Χαρακτηριστικές Συχνότητας-Ισχύος και Τάσης-Άεργης Ισχύος στις Σύγχρονες Γεννήτριες
2. Ανάλυση των Γεννητριών που Λειτουργούν Παράλληλα με Μεγάλα Συστήματα Ισχύος

Χαρακτηριστική Συχνότητας-Ισχύος

- Πηγή μηχανικής ενέργειας μιας γεννήτριας: Κινητήρια μηχανή της
 - Συνήθως ατμοστρόβιλος,
 - κινητήριες εσωτερικής καύσεως,
 - αεριοστρόβιλοι,
 - υδροστρόβιλοι
 - αεροστρόβιλοι
- Η αύξηση της ισχύος που προσφέρουν στη γεννήτρια προκαλεί **μείωση της ταχύτητας** περιστροφής τους
 - Δεν είναι γενικά γραμμική
 - Εισάγεται στο σύστημα ένα είδος μηχανισμού ελέγχου που την κάνει γραμμική

Χαρακτηριστική Συχνότητας-Ισχύος (2)

- Ο μηχανισμός ελέγχου δίνει στην ταχύτητα της κινητήριας μηχανής κάποια φθίνουσα χαρακτηριστική με μικρή κλίση, καθώς το φορτίο της γεννήτριας αυξάνεται
- Αυτή η "πτώση της ταχύτητας" (speed droop, SD) της κινητήριας μηχανής περιγράφεται από την εξίσωση

$$SD = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100\%$$

όπου n_{nl} και n_{fl} είναι οι ταχύτητες της κινητήριας μηχανής στις περιπτώσεις λειτουργίας χωρίς φορτίο και υπό πλήρες φορτίο, αντίστοιχα

- Οι πιο συνηθισμένες τιμές της πτώσης της ταχύτητας των γεννητριών, είναι 2 με 4%
- Οι περισσότερες κινητήριες μηχανές που δίνουν μηχανική ισχύ στις γεννήτριες διαθέτουν κάποιο ρυθμιστή κλίμακας (set point adjustment) για τη μεταβολή της ταχύτητάς τους στη λειτουργία χωρίς φορτίο

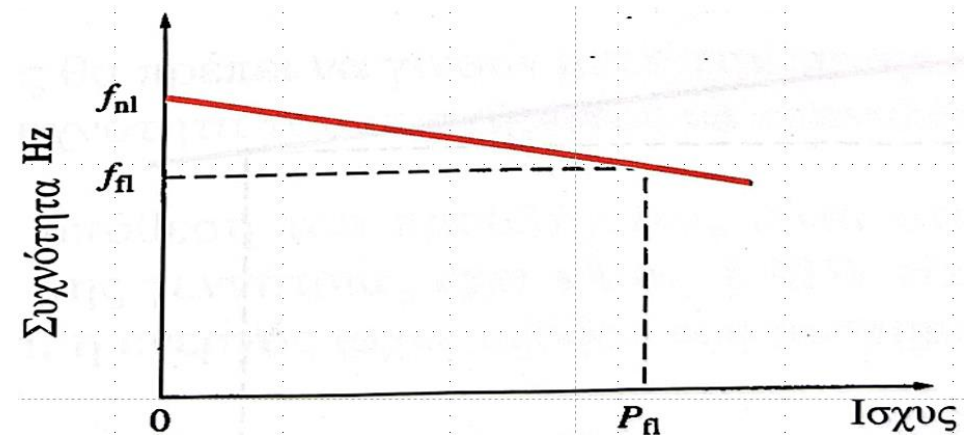
Χαρακτηριστική Συχνότητας-Ισχύος (3)

- Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας συνδέεται με την ηλεκτρική συχνότητά της
- Η σχέση μεταξύ ισχύος και ηλεκτρικής συχνότητας εκφράζεται ποσοτικά με την εξίσωση

$$P = S_P(f_{nl} - f_{sys})$$

Όπου:

- P = η ισχύς εξόδου της γεννήτριας
- f_{nl} = η συχνότητα της γεννήτριας που αντιστοιχεί στη λειτουργία χωρίς φορτίο
- f_{sys} = η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος
- S_P = η κλίση της παραπάνω καμπύλης σε kW/Hz ή MW/Hz

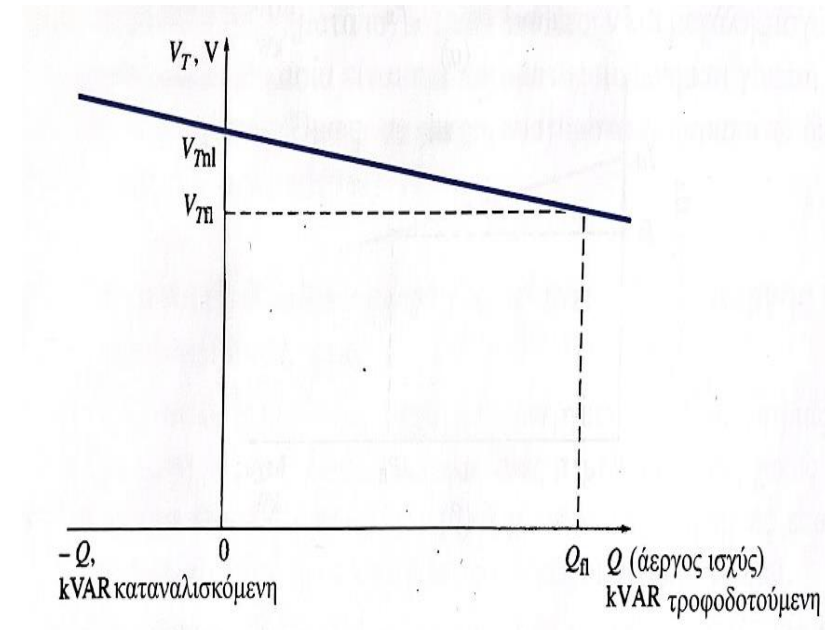


Χαρακτηριστική Τάσης-Άεργης Ισχύος

- Μια παρόμοια εξίσωση είναι δυνατό να περιγράψει τη σχέση της άεργης ισχύος με την τάση V_T στα άκρα της γεννήτριας
- Η εισαγωγή επαγωγικού φορτίου στα άκρα της γεννήτριας προκαλεί μείωση της τάσης V_T ενώ η εισαγωγή χωρητικού φορτίου αυξάνει την τάση V_T
- Είναι δυνατή, η σχεδίαση της γραφικής παράστασης της άεργης ισχύος συναρτήσει της V_T η οποία θα είναι φθίνουσα, όπως ακριβώς αυτή μεταξύ της ισχύος και της συχνότητας
- Αυτή η χαρακτηριστική δεν είναι απαραίτητα γραμμική αλλά συνήθως οι σταθεροποιητές τάσης που συνεργάζονται με τις γεννήτριες μπορούν να προσφέρουν αυτή τη δυνατότητα

Χαρακτηριστική Τάσης-Άεργης Ισχύος (2)

- Μετακίνηση της καμπύλης του σχήματος προς τα πάνω ή κάτω
 - Γίνεται με τη μεταβολή της τάσης E_A της γεννήτριας
 - Υλοποιείται μέσω ρυθμιστή-σταθεροποιητή τάσης
- Η σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου και της άεργης ισχύος είναι παρόμοια με την εξίσωση $P = S_P (f_{nl} - f_{sys})$ μεταξύ της συχνότητας και της ενεργού ισχύος της γεννήτριας (βλ. σχήμα)



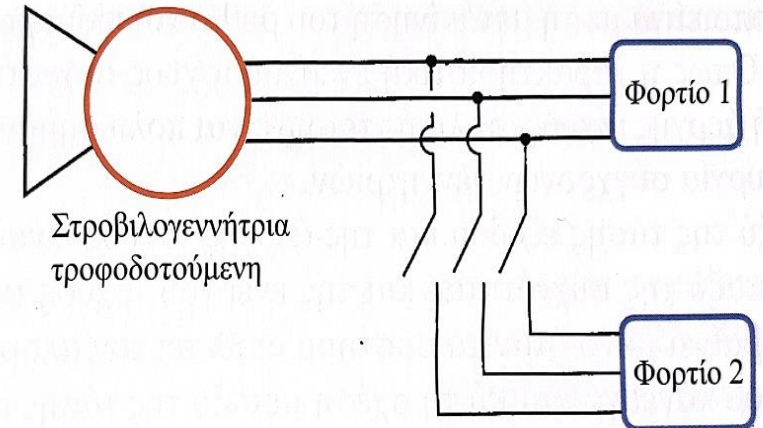
Έλεγχος Ενεργού και Αέργου Ισχύος σε Παραλληλισμένες Σύγχρονες Γεννήτριες

- Στην περίπτωση που μια γεννήτρια τροφοδοτεί **αυτόνομα** το φορτίο της, τόσο η ενεργός όσο και η άεργος ισχύς εξόδου της προσδιορίζονται αποκλειστικά **από το ίδιο το φορτίο**
- Όταν, όμως, περισσότερες από μια γεννήτριες τροφοδοτούν κάποιο φορτίο, είναι δυνατή η μεταβολή της ενεργού/άεργου ισχύος που παρέχει η κάθε γεννήτρια, μέσω κυκλωμάτων που ελέγχουν τη λειτουργία της
 - Για κάθε επιθυμητή τιμή της ενεργού ισχύος τα κυκλώματα ελέγχου της γεννήτριας έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν τη **συχνότητα λειτουργίας** της
 - Για κάθε επιθυμητή τιμή άεργου ισχύος, η τάση στα άκρα της είναι δυνατό να μεταβάλλεται μέσω του **ρεύματος διέγερσης**

Παράδειγμα 4-5

Στο σχήμα δίπλα φαίνεται ένα σύστημα γεννήτριας - φορτίου στο οποίο πρόκειται να προστεθεί κι ένα δεύτερο φορτίο. Η συχνότητα της γεννήτριας στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι 61,0 Hz και η αντίστοιχη καμπύλη ενεργού ισχύος - συχνότητας έχει κλίση 1 MW/Hz. Το Φορτίο 1 έχει συντελεστή ισχύος 0,8 επαγωγικό και καταναλώνει 1000 kW, ενώ το Φορτίο 2 έχει συντελεστή ισχύος 0,707 επαγωγικό και καταναλώνει 800 kW

1. Ποια είναι η συχνότητα του συστήματος πριν την εισαγωγή του δεύτερου φορτίου;
2. Ποια είναι η συχνότητα του συστήματος μετά την εισαγωγή του δεύτερου φορτίου;
3. Ποιες ενέργειες θα πρέπει να γίνουν μετά την εισαγωγή του δεύτερου φορτίου, ώστε η συχνότητα του συστήματος να επανέλθει στα 60 Hz;

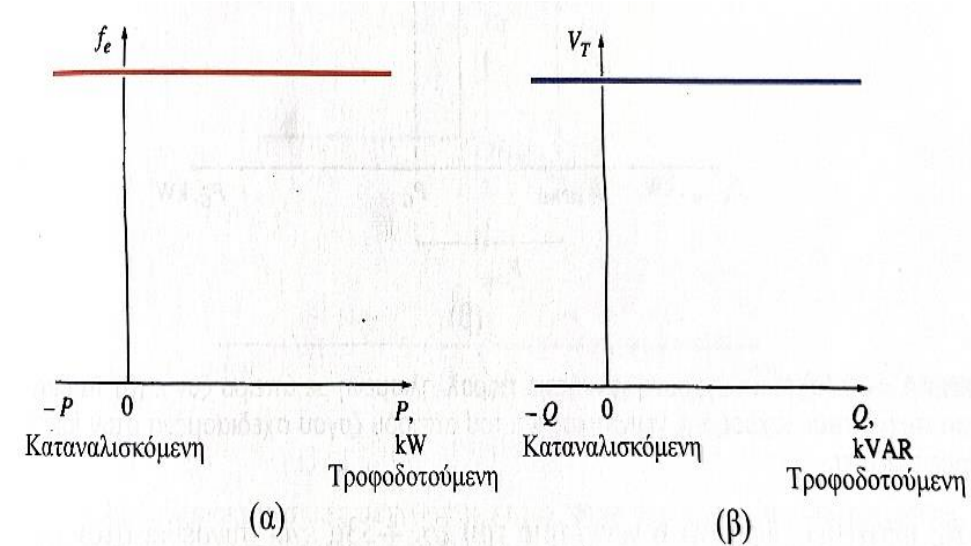


Ανάλυση των Γεννητριών που Λειτουργούν Παράλληλα με Μεγάλα Συστήματα Ισχύος

- Πολύ συχνά, όταν μια σύγχρονη γεννήτρια συνδέεται σε κάποιο σύστημα ισχύος, το σύστημα αυτό είναι τόσο μεγάλο που δεν επηρεάζεται καθόλου από την εισαγωγή της γεννήτριας
- Επειδή αυτό το δίκτυο είναι πάρα πολύ μεγάλο, καμιά μεταβολή στη λειτουργία της γεννήτριας δεν μπορεί να προκαλέσει εμφανή αλλαγή στη συχνότητα λειτουργίας του δικτύου
- Η παρατήρηση αυτή εκφράζει την έννοια του **άπειρου ζυγού**
- Ο **άπειρος ζυγός** είναι ένα πολύ μεγάλο σύστημα ισχύος, του οποίου **η τάση και η συχνότητα παραμένουν αμετάβλητες**, ανεξάρτητα από το ποσό της ενεργού ή της άεργης ισχύος με την οποία τροφοδοτείται ή την οποία προσφέρει

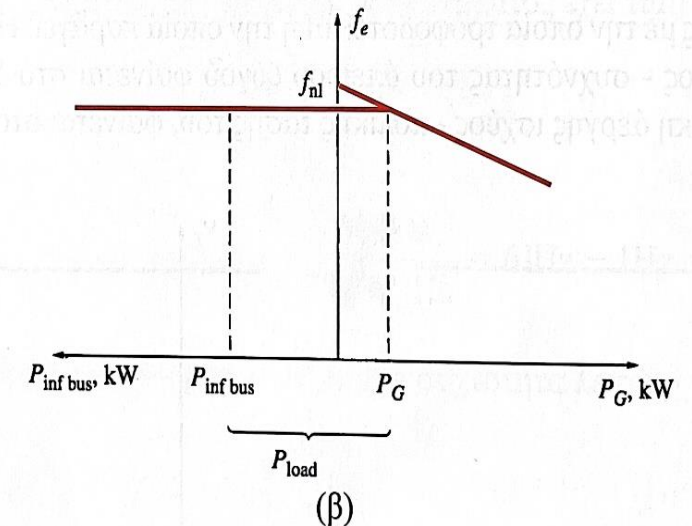
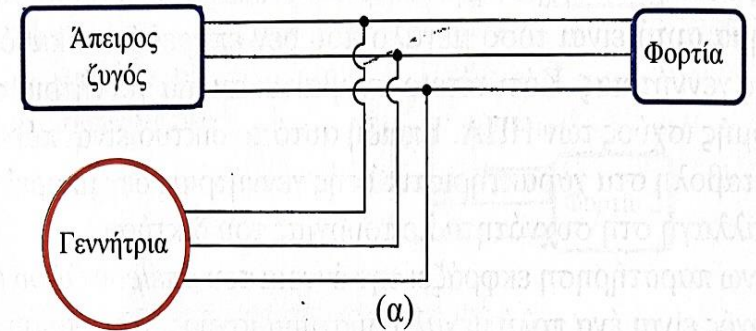
Ανάλυση των Γεννητριών που Λειτουργούν Παράλληλα με Μεγάλα Συστήματα Ισχύος

- Για άπειρο ζυγό
 - Σχήμα (α): Χαρακτηριστική ενεργού ισχύος-συχνότητας
 - Σχήμα (β): Χαρακτηριστική άεργης ισχύος-τάσης
- Εξετάζεται ένα σύστημα όπου
 - μια σύγχρονη γεννήτρια συνδέεται παράλληλα μ' έναν άπειρο ζυγό
 - τροφοδοτούν μαζί κάποιο φορτίο
 - η κινητήρια μηχανή της γεννήτριας διαθέτει κάποιο μηχανισμό ελέγχου της ταχύτητάς της
 - το ρεύμα διέγερσης της γεννήτριας μεταβάλλεται απλά με τη ρύθμιση της αντίστασης διέγερσης (μπορεί να αγνοηθεί)



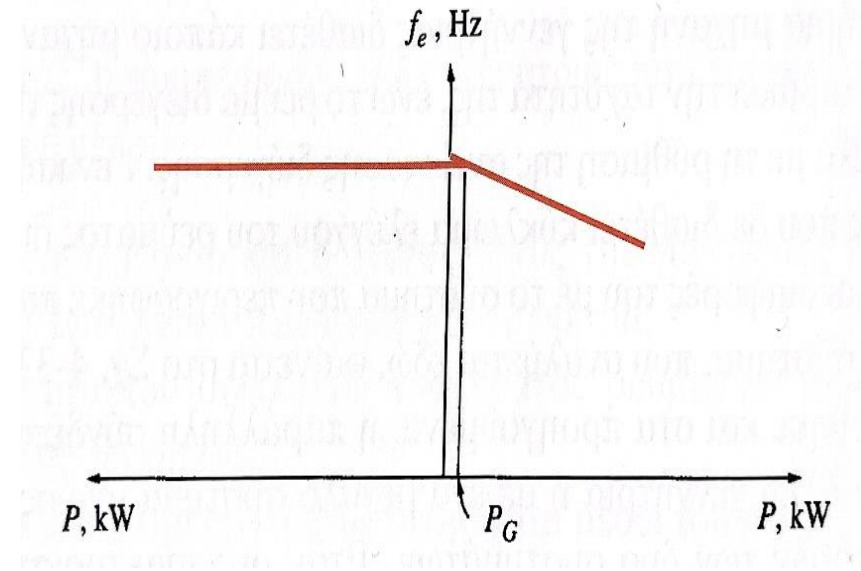
Ανάλυση των Γεννητριών που Λειτουργούν Παράλληλα με Μεγάλα Συστήματα Ισχύος

- Η παράλληλη σύνδεση μιας γεννήτριας με κάποια άλλη γεννήτρια ή με ένα μεγάλο σύστημα ισχύος προϋποθέτει **ισότητα συχνοτήτων** των δυο συστημάτων
- Άρα, οι χαρακτηριστικές ενεργού ισχύος-συχνότητας και οι χαρακτηριστικές άεργης ισχύος-πολικής τάσης των δυο συστημάτων είναι δυνατό να περιλαμβάνονται στο ίδιο διάγραμμα με **κοινό κατακόρυφο άξονα**, όπως φαίνεται στο σχήμα (β)



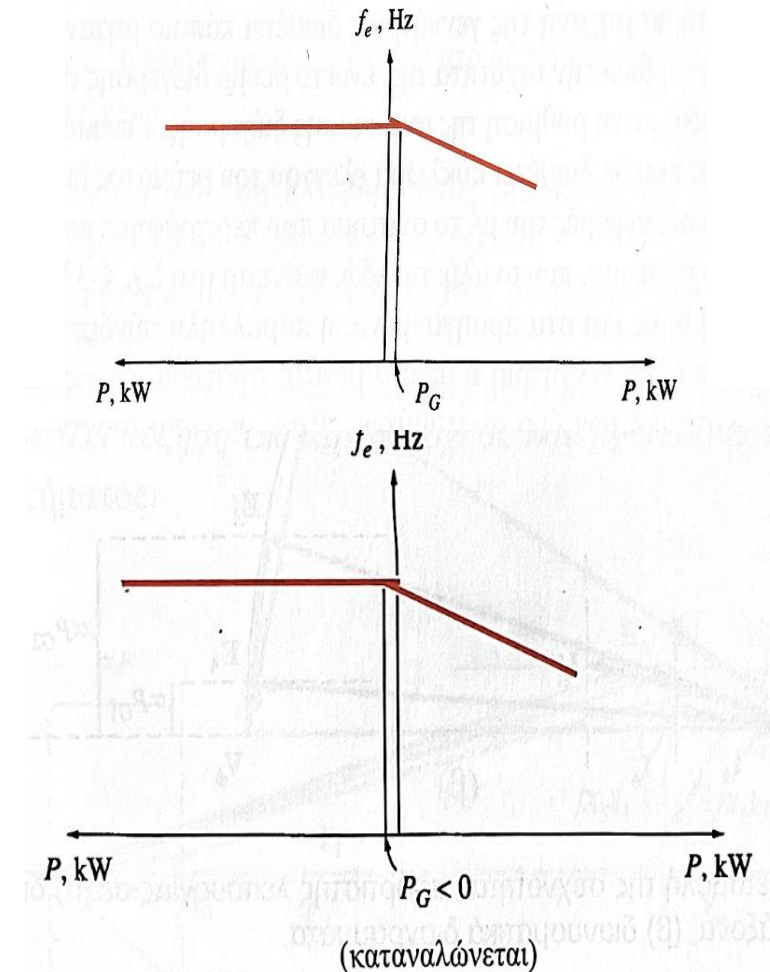
Ανάλυση των Γεννητριών που Λειτουργούν Παράλληλα με Μεγάλα Συστήματα Ισχύος

- Ας υποθεθεί τώρα ότι η γεννήτρια του που παρουσιάστηκε παραπάνω στο σχήμα (α) έχει συνδεθεί στον άπειρο ζυγό
- Η γεννήτρια "στηρίζεται" πάνω στον άπειρο ζυγό προσφέροντας στο φορτίο
 - κάποιο πολύ μικρό ποσοστό της ενεργού ισχύος που αυτό καταναλώνει και
 - ελάχιστη ή μηδενική άεργη ισχύ
- Στο σχήμα δίπλα φαίνονται οι χαρακτηριστικές συχνότητας-ισχύος αμέσως μετά τον παραλληλισμό



Ανάλυση των Γεννητριών που Λειτουργούν Παράλληλα με Μεγάλα Συστήματα Ισχύος

- Αν η συχνότητα της γεννήτριας, αντί να είναι ελαφρά μεγαλύτερη από αυτή του άπειρου ζυγού, ήταν ελαφρά χαμηλότερη, τότε οι χαρακτηριστικές ενεργού ισχύος συχνότητας του συστήματος θα ήταν όπως στο κάτω σχήμα
- Αν η συχνότητα αφόρτιστης λειτουργίας της γεννήτριας ήταν μικρότερη από τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος, η γεννήτρια θα πρόσφερε **αρνητική ισχύ** στο ζυγό ή αλλιώς θα καταναλώνε ισχύ και θα λειτουργούσε σαν **κινητήρας**
- Άρα, η επιλογή μεγαλύτερης συχνότητας από του υπάρχοντος συστήματος κατά την εισαγωγή της νέας γεννήτριας έγινε, για να εξασφαλιστεί η **σωστή ροή ισχύος** στο νέο σύστημα

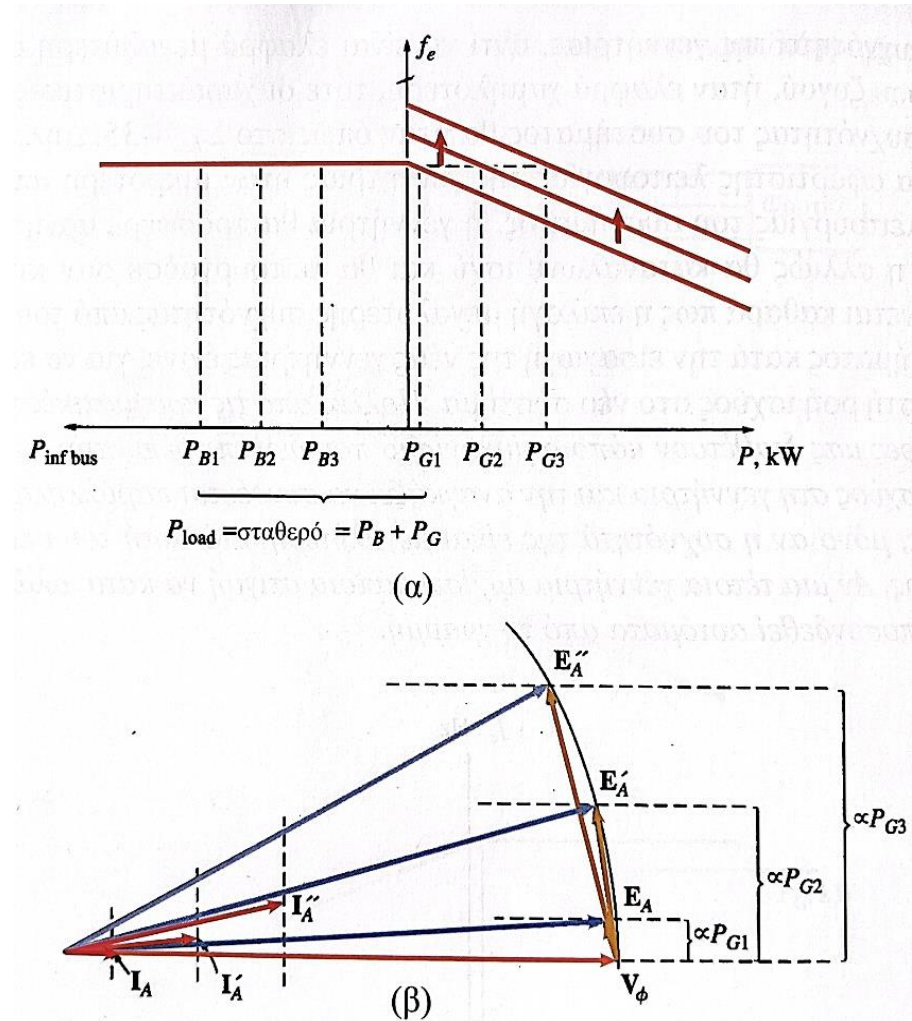


Ενεργός Ισχύς

- Πολλές πραγματικές γεννήτριες διαθέτουν μηχανισμό που δεν επιτρέπει την αντιστροφή της ροής ισχύος στη γεννήτρια
 - την αναγκάζει να συνδέεται παράλληλα με άλλες γεννήτριες, μόνο αν η συχνότητά της είναι μεγαλύτερη από αυτή του υπάρχοντος συστήματος
- Αν μια τέτοια γεννήτρια αρχίσει κάποια στιγμή να καταναλώνει ενέργεια, αποσυνδέεται αυτόματα από τη γραμμή
- Αν υποθεθεί ότι μετά τη σύνδεση της γεννήτριας και μέσω του μηχανισμού ελέγχου της κινητήριας μηχανής αυξάνεται η συχνότητα αφόρτιστης λειτουργίας της γεννήτριας, επειδή είναι αδύνατη η μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας του άπειρου ζυγού, αυτό που μεταβάλλεται είναι η **ροπή** και η **ενεργός ισχύς** που προσφέρει η γεννήτρια στο κοινό φορτίο

Ενεργός Ισχύς (2)

- Αυτό φαίνεται στις καμπύλες του σχήματος (α), αλλά και στο διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος (β)
- Στο τελευταίο σχήμα μάλιστα, φαίνεται η αύξηση της ποσότητας $E_A \sin \delta$ που είναι ανάλογη της ισχύος της γεννήτριας, καθώς η V_T παραμένει σταθερή
- Ακόμη, παρατηρείται ότι η $E_A = K\Phi\omega$ παραμένει σταθερή, αφού τόσο το I_F όσο και η ταχύτητα περιστροφής παραμένουν αμετάβλητα
- Η περαιτέρω αύξηση της συχνότητας περιστροφής αυξάνει τη συχνότητα αφόρτιστης λειτουργίας της γεννήτριας, και την ενεργό ισχύ εξόδου
- Αυτή με τη σειρά της αυξάνει την ποσότητα $E_A \sin \delta$, ενώ η E_A παραμένει πάντα σταθερή



Ενεργός Ισχύς (3)

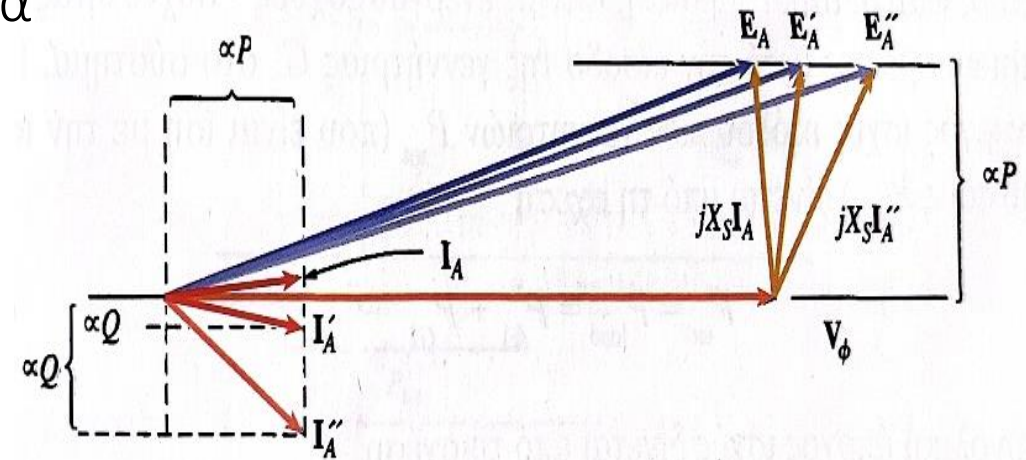
- Στην περίπτωση που η αύξηση της ενεργού ισχύος εξόδου συνεχίζεται ώστε να ξεπεράσει την ισχύ που καταναλώνει το φορτίο, η επιπλέον ισχύς καταναλώνεται από τον άπειρο ζυγό που εξ ορισμού έχει τη δυνατότητα να προσφέρει ή να καταναλώνει ισχύ, χωρίς να μεταβάλλει τη συχνότητα του συστήματος
- Στο διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος (β), παρατηρείται ότι η γεννήτρια λειτουργεί με συντελεστή ισχύος ελαφρά χωρητικό
- Η συμπεριφορά της δηλαδή, είναι όμοια μ' αυτή ενός **πυκνωτή** που παράγει αρνητική άεργο ισχύ ή αλλιώς η γεννήτρια καταναλώνει άεργο ισχύ

Παροχή Αέργου Ισχύος

- Η γεννήτρια μπορεί να τροφοδοτήσει το σύστημα με άεργο ισχύ με τη ρύθμιση του ρεύματος διέγερσης και την τήρηση κάποιων κανόνων που παρουσιάζονται παρακάτω
- Ο πρώτος κανόνας είναι πως το ρεύμα διέγερσης θα πρέπει να μεταβάλλεται διατηρώντας σταθερή την ενεργό ισχύ εξόδου της γεννήτριας
- Η ισχύς εισόδου στη γεννήτρια δίνεται από τη σχέση $P_{in} = \tau_{ind} \omega_m$
- Η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας της κινητήριας μηχανής μεταβάλλεται μόνο μέσω του μηχανισμού ελέγχου που αυτή διαθέτει, ενώ το ότι η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό σημαίνει πως η ταχύτητα της είναι αδύνατο να μεταβληθεί
- Έτσι, αφού η ταχύτητα της μηχανής δεν αλλάζει και δε χρησιμοποιείται ο μηχανισμός ελέγχου της κινητήριας μηχανής, η **ενεργός ισχύς** εξόδου θα πρέπει να παραμένει **σταθερή**
- Στο διανυσματικό διάγραμμα το παραπάνω συμπέρασμα σημαίνει ότι κατά τη μεταβολή του ρεύματος διέγερσης οι ποσότητες $I_A \cos \theta$ και $E_A \sin \delta$ που είναι ανάλογες της ενεργού ισχύος εξόδου δε μεταβάλλονται

Παροχή Αέργου Ισχύος (2)

- Με την αύξηση του ρεύματος διέγερσης παρατηρείται αύξηση της ροής Φ στο εσωτερικό της γεννήτριας και αύξηση της τάσης E_A ($K\Phi \uparrow \omega$)
- Όμως, επειδή η ποσότητα $E_A \sin \delta$ είναι αδύνατο να μεταβληθεί, το πέρας του διανύσματος E_A θα κινείται πάνω στην **ευθεία** σταθερής ενεργού ισχύος, όπως δείχνει και το σχήμα που ακολουθεί
- Επίσης, η τάση V_ϕ δε μεταβάλλεται και το $jX_s I_A$ μεταβάλλεται όπως δείχνει το σχήμα, οπότε το ρεύμα I_A μεταβάλλεται τόσο σε μέτρο όσο και σε φάση
- Τελικά, η ποσότητα $I_A \sin \theta$ που είναι ανάλογη της άεργης ισχύος αυξάνεται



Ανάλυση των Γεννητριών που Λειτουργούν Παράλληλα με Μεγάλα Συστήματα Ισχύος

- Οπότε, ότι η **αύξηση του ρεύματος διέγερσης** μιας γεννήτριας που είναι συνδεδεμένη σ' έναν άπειρο ζυγό προκαλεί **αύξηση της άεργης ισχύος** που προσφέρει η γεννήτρια στο φορτίο του συστήματος
- Η συμπεριφορά μιας σύγχρονης γεννήτριας που συνδέεται στις γραμμές ενός άπειρου ζυγού, συνοψίζεται στα εξής:
 1. Η συχνότητα και η πολική τάση λειτουργίας της γεννήτριας προσδιορίζονται από το σύστημα στο οποίο συνδέεται η γεννήτρια
 2. Μέσω του μηχανισμού ελέγχου της κινητήριας μηχανής της γεννήτριας είναι δυνατό να μεταβληθεί η ισχύς που αυτή προσφέρει στο σύστημα
 3. Μέσω του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας είναι δυνατό να μεταβληθεί η άεργος ισχύς που αυτή προσφέρει στο σύστημα

Σχετικό υλικό

- Από το βιβλίο «Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC», Stephen J. Chapman, εκδ. Τζιόλα, 5^η έκδ.
 - Κεφάλαιο 4, Παράγραφος 4.9