



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Έλεγχος και Ευστάθεια Σ.Η.Ε

Ενότητα 2: Έλεγχος Πραγματικής Ισχύος-Συχνότητας

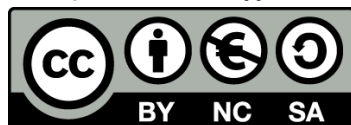
Νικόλαος Βοβός, Γαβριήλ Γιαννακόπουλος
Πολυτεχνική Σχολή

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:

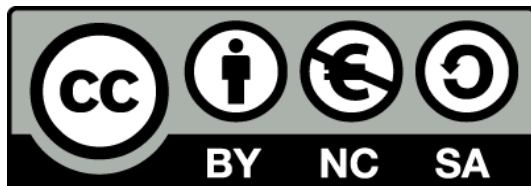
- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

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

- Ο έλεγχος των ΣΗΕ είναι απαραίτητος για να διατηρεί μια συνεχή ισορροπία μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και του μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού φορτίου, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να διατηρούν τις ονομαστικές τους τιμές η συχνότητα και οι τάσεις των ζυγών με εξασφαλισμένη την ομαλή λειτουργία του συστήματος.
- Επί πλέον, επιδιώκεται το κόστος παραγωγής να είναι ελάχιστο.



Κέντρο κατανομής φορτίου(1)

- Το μεγάλο πλήθος σε γραμμές, υποσταθμούς, μετασχηματιστές, διακόπτες ισχύος κ.λ.π. έκανε απαραίτητη τη ταυτόχρονη παρακολούθηση της λειτουργίας όλου του συστήματος από ένα συγκεκριμένο χώρο, που ονομάζεται **Κέντρο Κατανομής Φορτίου (ΚΚΦ)**.
- Σκοπός του ΚΚΦ είναι να αυξάνει την αξιοπιστία και να επιτυγχάνει οικονομική λειτουργία του συστήματος, αλλά η λειτουργία του συστήματος είναι δυνατή και χωρίς το κέντρο κατανομής φορτίου.
- Ο ψηφιακός υπολογιστής του ΚΚΦ δέχεται το σύνολο των δεδομένων, που στέλνονται απ' όλες τις συσκευές, ανακαλύπτει ανωμαλίες και ειδοποιεί τους χειριστές με το άναμμα λυχνιών, ηλεκτρικών κουδουνιών ή εμφάνιση σημάτων στις τερματικές οθόνες.
- Ο έλεγχος του συστήματος σε κανονικές συνθήκες ή ακίνδυνες ανώμαλες καταστάσεις γίνεται από το ψηφιακό υπολογιστή, ενώ οι αποφάσεις για τη διόρθωση επικίνδυνων καταστάσεων παίρνονται από το **χειριστή (dispatcher)**.



Κέντρο κατανομής φορτίου(2)



Εσωτερικό του ΚΚΦ της ΔΕΗ. Ο χειριστής κάθεται σε ένα παρατηρητήριο, όπου υπάρχουν τερματικές οθόνες, πληκτρολόγια και τηλεφωνικές γραμμές. Στον τοίχο υπάρχει το μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος με ενδεικτικές λυχνίες (Φωτογραφία ΔΕΗ).



Κέντρο κατανομής φορτίου(3)



Στα ΚΚΦ η επικοινωνία ανθρώπου-μηχανής βασίζεται σε πλήρη γραφικά συστήματα απεικόνισης. (Φωτογραφία ΔΕΗ).

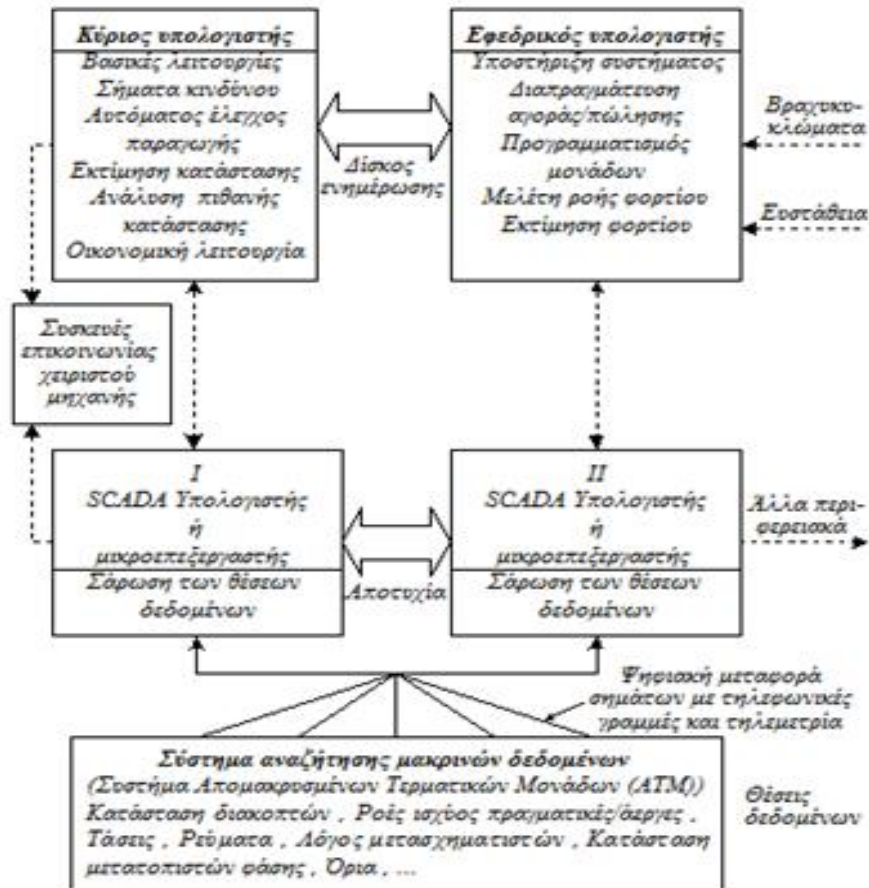


Δομή ψηφιακού συστήματος(1)

- Για λόγους αυξημένης αξιοπιστίας, τα ΚΚΦ χρησιμοποιούν δύο ψηφιακούς υπολογιστές για έλεγχο αναζήτησης μακρινών δεδομένων, ενεργειακή διαχείριση και ασφάλεια του συστήματος.
- Συνήθως ο ένας υπολογιστής χρησιμοποιείται για παρακολούθηση και έλεγχο του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, ενώ ο άλλος είναι εφεδρικός και χρησιμοποιείται για εκτέλεση προγραμμάτων, όπως πρόβλεψη φορτίου, κατανομή της ισχύος μεταξύ των θερμικών και υδροηλεκτρικών σταθμών κ.λ.π.
- Ο υπολογιστής που ελέγχει το σύστημα, περιοδικά (περίπου κάθε τριάντα δευτερόλεπτα), ενημερώνει ένα δίσκο, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από τους δύο υπολογιστές, ώστε να μπορεί να αναλάβει τον έλεγχο του συστήματος και ο εφεδρικός υπολογιστής αν αυτό ζητηθεί.



Δομή ψηφιακού συστήματος(2)



Τυπικός έλεγχος ψηφιακού υπολογιστή και παρακολούθηση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): Εποπτικός έλεγχος και αναζήτηση δεδομένων.



Δομή ψηφιακού συστήματος(3)

- Όλες οι περιφερειακές μονάδες επικοινωνούν με τους υπολογιστές με τη βοήθεια μικροεπεξεργαστών εισόδου-εξόδου. Οι μικροεπεξεργαστές μπορούν να εισάγουν ή να εξάγουν δεδομένα από τη μνήμη του υπολογιστή χωρίς να διακόπτουν την κεντρική μονάδα επεξεργασίας.
- Αποτέλεσμα όλων αυτών των προφυλακτικών μέτρων είναι να υπάρχει μια εξασφάλιση για την εκτέλεση όλων των κρίσιμων λειτουργιών μεγαλύτερη από 99.8%.
- Ο υπολογιστής εκτελεί περιοδικά ορισμένες λειτουργίες. Οι πιο σοβαρές λειτουργίες έχουν το μικρότερο περιοδικό χρόνο εκτέλεσης.



Δομή ψηφιακού συστήματος(4)



Αίθουσα υπολογιστών και μικροεπεξεργαστών για την επικοινωνία των υπολογιστών με τα κανάλια τηλεμετρίας (Φωτογραφία ΔΕΗ).



Σύστημα ελέγχου ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδος(1)

- Το σύστημα ελέγχου παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδος αποτελείται από ένα Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας (ΕΚΕΕ) και δύο Περιφερειακά Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας (ΠΚΕΕ), μέσω των οποίων το ΕΚΕΕ συνδέεται με τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τους υποσταθμούς μεταφοράς του διασυνδεδεμένου συστήματος της Ελλάδος.
- Το βόρειο ΠΚΕΕ είναι εγκατεστημένο στη Πτολεμαΐδα και το νότιο ΠΚΕΕ στον Άγιο Στέφανο Αττικής μαζί με το ΕΚΕΕ. Το βόρειο ΠΚΕΕ μπορεί να αναλάβει βασικές λειτουργίες του ΕΚΕΕ, αν αυτό επιβληθεί από έκτακτες ανάγκες λειτουργίας.
- Αυτή η διάταξη και οργάνωση του ΚΕΕ επελέγη λόγω της ιδιομορφίας του Ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος, όπου το 68% της εγχώριας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται στο βορρά ενώ το 33% του ηλεκτρικού φορτίου βρίσκεται στην Αττική.



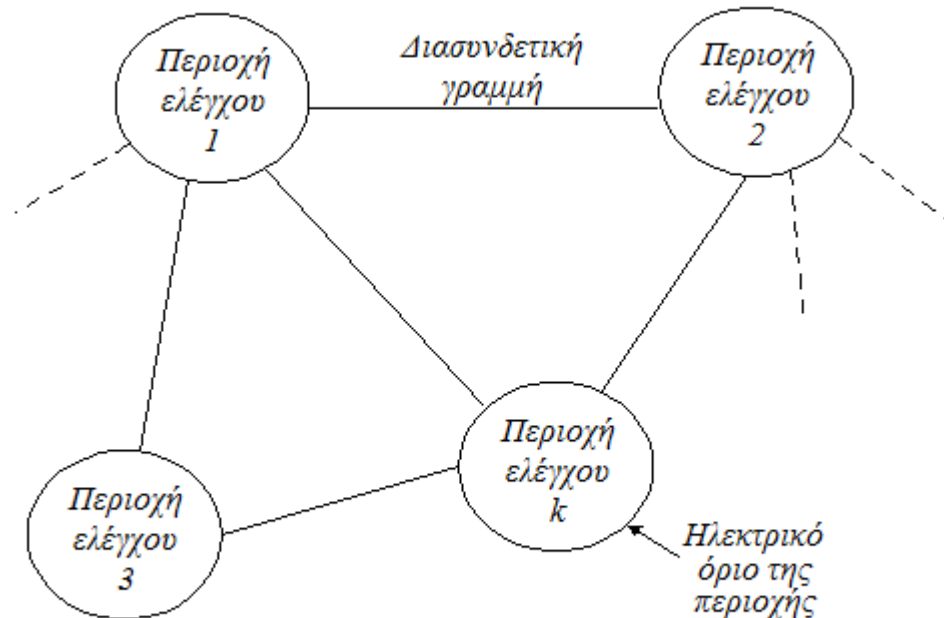
Σύστημα ελέγχου ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδος(2)

- Η εμπορική λειτουργία του Συστήματος Ελέγχου Ενέργειας (ΣΕΕ) άρχισε το Νοέμβριο του 1994, ανέλαβε τον πλήρη έλεγχο του ηλεκτρικού συστήματος στις αρχές του 1996 και στοίχισε 36.7 εκατομμύρια ευρώ.
- Το ΣΕΕ περιλαμβάνει 93 απομακρυσμένες τερματικές μονάδες (ATM), ενώ μπορεί να διαχειριστεί 240 ATM που μπορούν να συλλέγουν 15.000 αναλογικές μετρήσεις, 47.500 ψηφιακές σημάνσεις, 550 μετρήσεις ενέργειας και 11.400 εντολές τηλεχειρισμού.



Έλεγχος αυτόματης παραγωγής σε ηλεκτρικά συστήματα(1)

- Συνήθως γειτονικά ηλεκτρικά συστήματα διασυνδέονται με μια ή περισσότερες ηλεκτρικές γραμμές, που ονομάζονται **διασυνδετικές γραμμές (ties lines)**.



Διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά συστήματα.



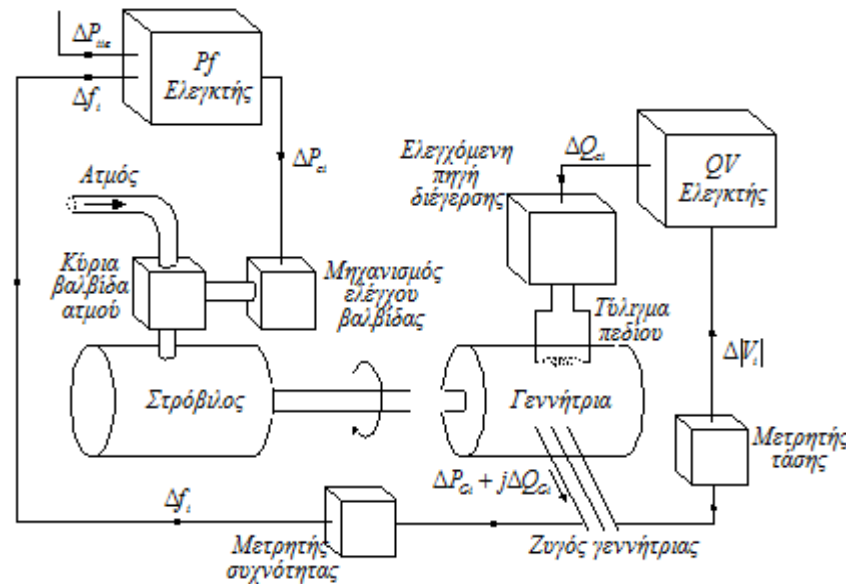
Έλεγχος αυτόματης παραγωγής σε ηλεκτρικά συστήματα(2)

- Ο έλεγχος αυτόματης παραγωγής είναι ένας έλεγχος σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση υπολογιστή, που σκοπός του είναι να διατηρεί την ονομαστική συχνότητα σε ολόκληρο το σύστημα και να κρατάει την ισχύ στις διασυνδεδετικές γραμμές ίση με την προδιαγεγραμμένη τιμή.
- Η **βέλτιστη οικονομική λειτουργία** είναι επίσης ένας έλεγχος σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση υπολογιστή, που σκοπός του είναι να τροφοδοτεί το φορτίο από όλες τις γεννήτριες που λειτουργούν με τον πιο οικονομικό τρόπο, επιτυγχάνοντας δηλαδή ελάχιστο κόστος καυσίμου.



Λειτουργία χωρίς κεντρικό έλεγχο(1)

- Πρέπει να τονίσουμε ότι τα ηλεκτρικά συστήματα είναι ικανά να εργάζονται χωρίς κεντρικό έλεγχο. Αυτό επιτυγχάνεται με τα δύο συστήματα ελέγχου που διαθέτει κάθε στροβιλογεννήτρια, δηλαδή τον έλεγχο πραγματικής ισχύος-συχνότητας $P - f$ και τον έλεγχο αέργου ισχύος-τάσης $Q - V$, που αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.



Βρόχοι ελέγχου στροβιλογεννήτριας.



Λειτουργία χωρίς κεντρικό έλεγχο(2)

- Η διαίρεση στους πιο πάνω βρόχους ελέγχου στηρίζεται στις ιδιότητες ευαισθησίας ΣΗΕ που είναι οι εξής:
- **1.** Στατικές μεταβολές ΔP_i στην πραγματική ισχύ του ζυγού επηρεάζουν, κύρια, μόνο τη φασική γωνία της τάσης ζυγού και άρα και τις ροές πραγματικής ισχύος των γραμμών, που συνδέονται στο ζυγό και αφήνουν σχεδόν ανεπηρέαστο το μέτρο της τάσης του ζυγού και άρα και την άεργο ισχύ των γραμμών, που συνδέονται στο ζυγό.
- **2.** Αντίθετα, στατικές μεταβολές ΔQ_i στην άεργο ισχύ του ζυγού επηρεάζουν, κύρια, μόνο το μέτρο της τάσης του ζυγού και άρα και την άεργο ισχύ των γραμμών, που συνδέονται στο ζυγό και αφήνουν σχεδόν ανεπηρέαστη τη φασική γωνία της τάσης ζυγού και άρα και τις ροές πραγματικής ισχύος των γραμμών.
- **3.** Στατικές μεταβολές στην άεργο ισχύ ενός ζυγού επηρεάζουν, κύρια, το μέτρο της τάσης του ίδιου ζυγού και πολύ λίγο το μέτρο της τάσης των άλλων ζυγών.



Δυναμική αλληλεπίδραση βρόγχων

$P - f$ και $Q - V$

- Κατά τη διάρκεια μεγάλων μεταβολών παρατηρείται σημαντική σύζευξη μεταξύ των δύο βρόγχων ελέγχου, για δύο κυρίως λόγους:
- **1.** Καθώς μεταβάλλεται το μέτρο της τάσης ζυγού, μεταβάλλεται και το πραγματικό φορτίο του ζυγού, λόγω της εξάρτησής του από την τάση, δηλαδή έχουμε .
- **2.** Καθώς μεταβάλλεται το μέτρο της τάσης ζυγού, μεταβάλλονται και οι συντελεστές συγχρονισμού των γραμμών, που συνδέονται στο ζυγό και άρα μεταβάλλεται και η πραγματική ισχύς που μεταφέρουν.
- Μπορούμε όμως να αμελήσουμε τη σύζευξη μεταξύ των δύο βρόγχων επειδή ο βρόχος $Q - V$ είναι πολύ ταχύτερος από το βρόχο $P - f$, λόγω των μηχανικών σταθερών αδράνειας που περιλαμβάνει ο βρόχος $P - f$.



Δυναμικές μεταβλητές κατάστασης διαφορών(1)

Στη μόνιμη κατάσταση είχαμε ορίσει σαν στατικές μεταβλητές κατάστασης τις $|V^0_i|$ και δ^0_i .

Όταν στο σύστημα έχουμε μικρές μεταβολές ΔP_i και ΔQ_i , οι στατικές μεταβλητές κατάστασης υφίστανται μικρές μεταβολές, δηλαδή μπορούμε να γράψουμε:

$$\begin{aligned}\delta_i &= \delta^0_i + \Delta\delta_i \\ |V_i| &= |V^0_i| + \Delta|V_i|\end{aligned}$$

και οι τάσεις των ζυγών θα έχουν τη μορφή:

$$u_i = \sqrt{2}(|V^0_i| + \Delta|V_i|) \sin(\omega^0_t + \delta^0_i + \Delta\delta_i)$$



Δυναμικές μεταβλητές κατάστασης διαφορών(2)

Επομένως στο ζυγό i η γωνιακή ταχύτητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega_i = \frac{d}{dt} (\omega^0_t + \delta^o_i + \Delta\delta_i) = \omega^0 + \frac{d}{dt} \Delta\delta_i$$

και επειδή $\Delta\omega_i = \omega_i - \omega^0$ έχουμε:

$$\Delta\omega_i = \frac{d}{dt} \Delta\delta_i \text{ ή } \Delta f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \Delta\delta_i$$

Λόγω της μεγάλης σταθεράς αδράνειας των σύγχρονων γεννητριών, γενικά ισχύει ότι:

$$|\Delta f_i| \ll f^0 = 50 \text{ Hz}$$



Δυναμικές μεταβλητές κατάστασης διαφορών(3)

- Σύμφωνα με τα προηγούμενα για τον προσδιορισμό της κατάστασης του συστήματος, που υφίσταται μικρές δυναμικές διαταραχές, χρειαζόμαστε τις δυναμικές μεταβλητές κατάστασης $\Delta|V_i|$, Δf_i και $\Delta\delta_i$.
- Εκτός από τις τρεις **κύριες** μεταβλητές κατάστασης, που αφορούν το ηλεκτρικό σύστημα, χρειαζόμαστε και τις **δευτερεύουσες** μεταβλητές κατάστασης, που περιγράφουν τους βρόχους ελέγχου που θα αναλύσουμε στη συνέχεια.

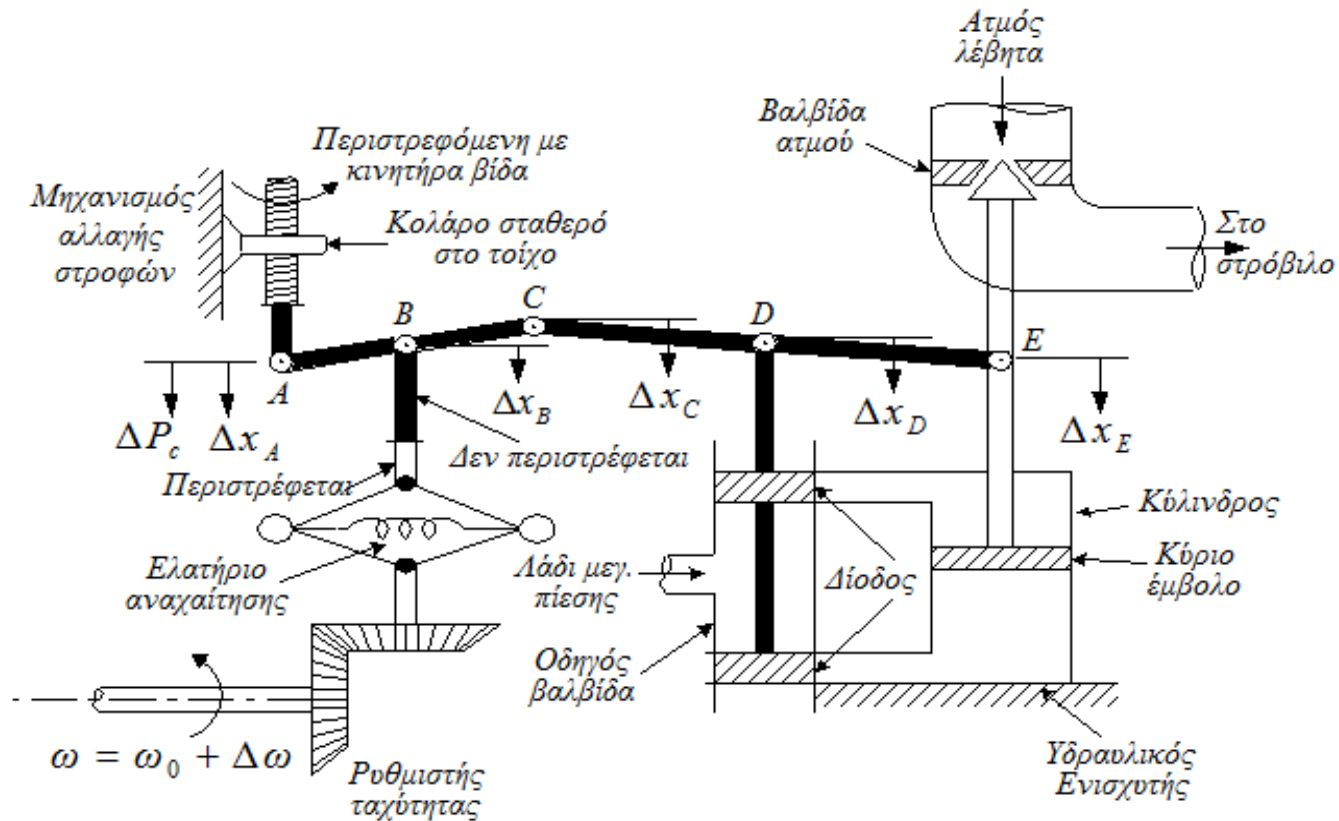


Αυτόματος έλεγχος φορτίου- συχνότητας γεννητριών(1)

- Ο έλεγχος στην ισχύ εξόδου των γεννητριών γίνεται με έλεγχο της μηχανικής ισχύος στην είσοδό τους, που τροφοδοτείται στη γεννήτρια από ατμοστρόβιλο ή υδροστρόβιλο ή πετρελαιοκινητήρα, οπότε αντίστοιχα για τον έλεγχο της μηχανικής ισχύος ρυθμίζουμε τη ροή ατμού ή νερού ή πετρελαίου.
- Αν η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι μεγαλύτερη από το φορτίο, η ταχύτητα της γεννήτριας ή η συχνότητα του συστήματος αυξάνουν, ενώ στην αντίθετη περίπτωση ελαττώνονται.
- Θα περιγράψουμε τώρα τη συσκευή που ελέγχει τη ροή ατμού στον ατμοστρόβιλο και ονομάζεται **ρυθμιστής ταχύτητας** (speed governor). Ανάλογη συσκευή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροής νερού ή της θέσης των σταθερών πτερυγίων στον υδροστρόβιλο.



Αυτόματος έλεγχος φορτίου- συχνότητας γεννητριών(2)



Σχηματική παράσταση του ρυθμιστή ταχύτητας.



Μαθηματικό μοντέλο του ρυθμιστή ταχύτητας

Όλες οι μεταβολές $\Delta\omega, \Delta x_A, \dots, \Delta x_E$, υποθέτουμε ότι είναι μικρές και θετικές στις διευθύνσεις που δείχνονται.

$$\Delta x_C = K_B \Delta x_B - K_A \Delta x_A = K_1 \Delta f - K_2 \Delta P_C \quad (5.6)$$

$$\Delta x_D = K_3 \Delta x_C + K_4 \Delta x_E \quad (5.7)$$

$$\frac{d\Delta x_E}{dt} = -K_5 \Delta x_D \quad (5.8)$$

Αν πάρουμε τους μετασχηματισμούς Laplace των εξισώσεων 5.6, 5.7 και 5.8 και απαλείψουμε τις μεταβλητές και παίρνουμε την εξίσωση:

$$\begin{aligned} \Delta x_E(s) &= \frac{\frac{K_2 K_3}{K_4}}{1 + \frac{s}{K_4 K_5}} \left(\Delta P_C(s) - \frac{K_1}{K_2} \Delta F(s) \right) = \frac{K_g}{1 + T_g(s)} \left(\Delta P_C(s) - \frac{1}{R} \Delta F(s) \right) = \\ &= G_g(s) \left(\Delta P_C(s) - \frac{1}{R} \Delta F(s) \right) \end{aligned} \quad (5.9)$$

όπου : $R = \frac{K_2}{K_1}$ = ρύθμιση ταχύτητας, που οφείλεται στη δράση του ρυθμιστή ταχύτητας.

$K_g = \frac{K_2 K_3}{K_4}$ = στατικό κέρδος του ρυθμιστή ταχύτητας.

$T_g = \frac{1}{K_4 K_5}$ = χρονική σταθερά του ρυθμιστή ταχύτητας.

$G_g(s) = \frac{K_g}{1 + T_g s}$ = συνάρτηση μεταφοράς του ρυθμιστή ταχύτητας.

Μαθηματικό μοντέλο του στροβίλου(1)

Εμείς δεν ενδιαφερόμαστε για τη θέση της βαλβίδας του στροβίλου, αλλά για τη μεταβολή της παραγόμενης ισχύος ΔP_G της γεννήτριας .

Αν αμελήσουμε τις απώλειες της γεννήτριας, μπορούμε να υποθέσουμε ότι:

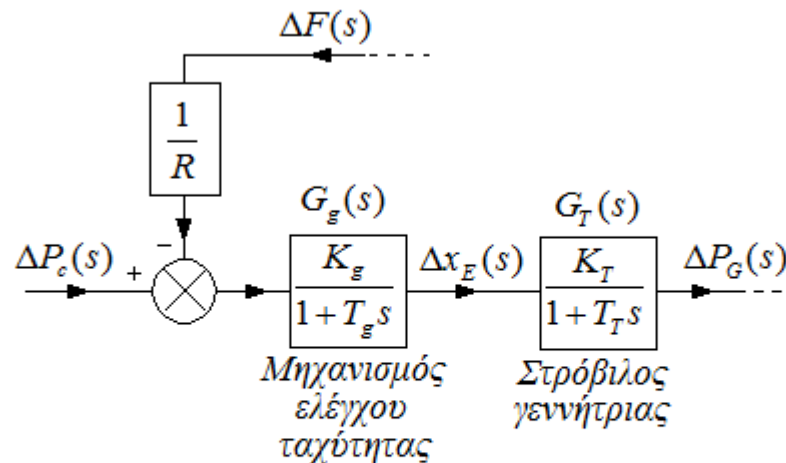
$$\Delta P_T = \Delta P_G$$

Το απλούστερο μοντέλο ενός στροβίλου χωρίς αναθέρμανση μπορεί να χαρακτηριστεί από έναν απλό συντελεστή κέρδους K_T και από μια απλή χρονική σταθερά T_T και να το περιγράψουμε με την παρακάτω συνάρτηση μεταφοράς:

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_G(s)}{\Delta x_E(s)} = \frac{K_T}{1 + T_T s}$$



Μαθηματικό μοντέλο του στροβίλου(2)



Συναρτήσεις μεταφοράς στροβίλου χωρίς αναθέρμανση και του ρυθμιστή ταχύτητάς του.

Ένας στρόβιλος με αναθέρμανση μπορεί να παρασταθεί ικανοποιητικά από τη συνάρτηση μεταφοράς:

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_G(s)}{\Delta x_E(s)} = \frac{K_T(1 + K_r T_r s)}{(1 + T_T s)(1 + T_r s)}$$

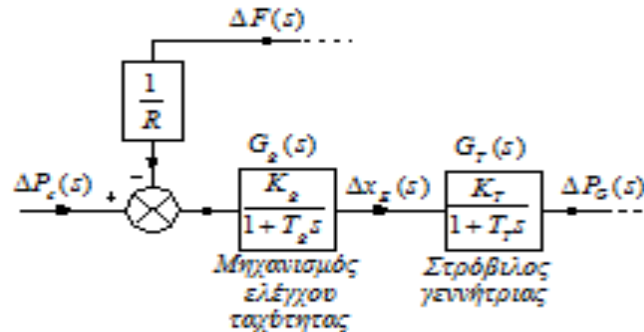


Παράδειγμα

Θα αναλύσουμε την απόκριση μιας στροβιλογεννήτριας με το ρυθμιστή ταχύτητάς της σε δύο περιπτώσεις: **α)** Η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε ένα τόσο μεγάλο δίκτυο, που οποιαδήποτε μεταβολή στη ισχύ εξόδου της αφήνει αμετάβλητη τη συχνότητα του συστήματος. Θα υποθέσουμε μια βηματική μεταβολή στην εντολή εισόδου ΔP_C και θα υπολογίσουμε την τελική μεταβολή στην ηλεκτρική ισχύ εξόδου ΔP_G . **β)** Η γεννήτρια είναι απλά συνδεδεμένη σε ένα ωμικό φορτίο και δεν υπάρχει εξωτερικό δίκτυο. Θα υπολογίσουμε την τελική μεταβολή της συχνότητας για μια βηματική μεταβολή του φορτίου ΔP_D (υποθέτουμε $\Delta P_C = 0$).



Λύση(1)



α) Από το Σχήμα και για $\Delta F(s) = 0$ παίρνουμε:

$$\Delta P_G(s) = \frac{K_g}{1+T_g s} \frac{K_T}{1+T_T s} \Delta P_C(s)$$

Για μια βηματική μεταβολή ΔP_C παίρνουμε:

$$\Delta P_C(s) = \frac{\Delta P_C}{s}$$

Με αντικατάσταση αυτής της εξίσωσης παίρνουμε:

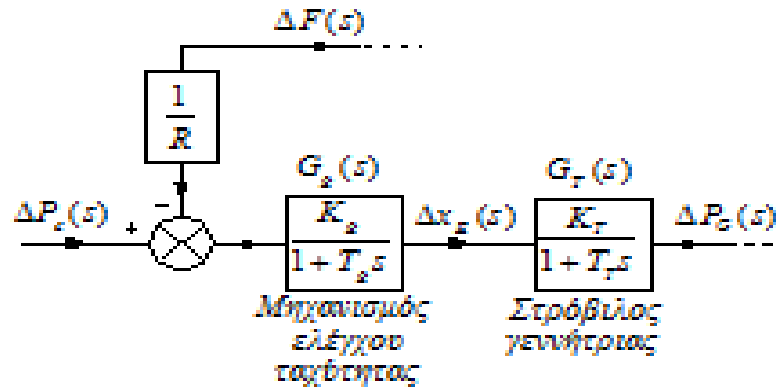
$$\Delta P_G(s) = \frac{K_g}{1+T_g s} \frac{K_T}{1+T_T s} \frac{\Delta P_C}{s}$$

Με τη χρήση του θεωρήματος της τελικής τιμής, από αυτήν την εξίσωση υπολογίζουμε τη μόνιμη τιμή $\Delta P_{G,\mu\omicron\nu\nu}$, δηλαδή:

$$\Delta P_{G,\mu\omicron\nu\nu} = \lim_{s \rightarrow 0} [s \Delta P_G(s)] = K_g K_T \Delta P_C$$



Λύση(2)



β) Επειδή τώρα έχουμε μια ξαφνική αύξηση του φορτίου ΔP_D και η παραγωγή της γεννήτριας δεν είναι δυνατόν να αυξηθεί αμέσως, την επί πλέον ισχύ η γεννήτρια την παίρνει από την αποθηκευμένη κινητική ενέργεια των στρεφόμενων μερών της, με ρυθμό ΔP_D MW, που οδηγεί σε μείωση της ταχύτητας.

Από το Σχήμα, για $\Delta P_C = 0$ παίρνουμε:

$$\Delta P_G(s) = \frac{1}{(1 + T_g s)(1 + T_T s)} \left(-\frac{\Delta F(s)}{R} \right)$$

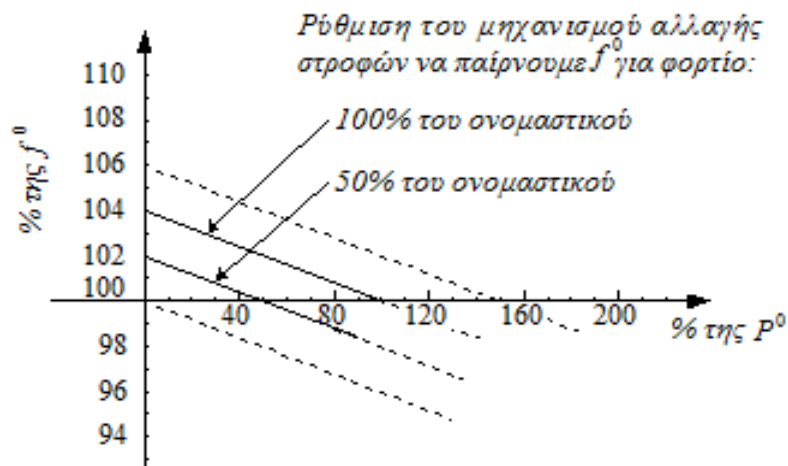
Με τη χρήση του θεωρήματος της τελικής τιμής, βρίσκουμε :

$$\frac{\Delta f_{\mu\text{ον}}}{\Delta P_{G,\mu\text{ον}}} = -R \text{ Hz/MW}$$





Διαίρεση φορτίου μεταξύ γεννητριών(1)



Χαρακτηριστικές καμπύλες συχνότητας-φορτίου για το ρυθμιστή ταχύτητας.

Για αυτήν τη στροβιλογεννήτρια έχουμε:

$$R = \frac{0.04 * 50}{1} = 2 \frac{Hz}{pu} MW$$

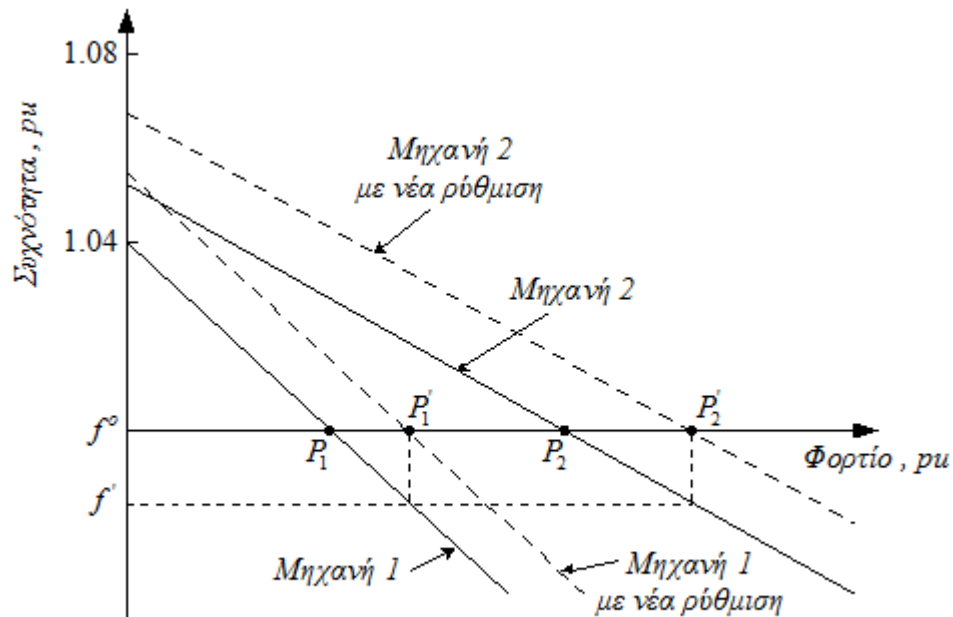
Έτσι μια μεταβολή φορτίου $0.05 puMW$ θα προκαλέσει μια τελική μεταβολή συχνότητας:

$$2 * 0.05 = 0.1 Hz$$

Ο μηχανισμός ελέγχου του σήματος ΔP_C ή ο μηχανισμός αλλαγής στροφών, όπως ονομάζεται μερικές φορές, παράγει μια οικογένεια παράλληλων χαρακτηριστικών, όπως δείχνεται στο Σχ. 5.10.

Διαίρεση φορτίου μεταξύ γεννητριών(2)

- Αξιοποιώντας αυτά τα χαρακτηριστικά είναι δυνατόν να επιτυγχάνουμε οποιαδήποτε ισχύ εξόδου της γεννήτριας (π.χ. λειτουργία για βέλτιστη κατανομή φορτίου) χωρίς να μεταβάλλεται η ονομαστική της συχνότητα, μια απαίτηση που είναι επιθυμητή κατά την αλλαγή της παραγόμενης ισχύος.



Κατανομή φορτίου σε δύο γεννήτριες.



Παράδειγμα

Δύο σύγχρονες γεννήτριες λειτουργούν παράλληλα και τροφοδοτούν ένα φορτίο 200 MW. Η ονομαστική ισχύς των μηχανών είναι 100 MW και 200 MW και έχουν 4% μεταβολή της συχνότητας για μια μεταβολή φορτίου από μηδέν σε πλήρες φορτίο. Να υπολογιστεί το φορτίο που τροφοδοτεί κάθε μηχανή, αν υποθέσουμε ελεύθερη δράση των ρυθμιστών ταχύτητας.

Λύση:

Οι μηχανές πρέπει να εργάζονται με την ίδια συχνότητα, γι' αυτό οι μεταβολές της συχνότητάς τους, ώστε να αναλάβουν το φορτίο των 200 MW, θα είναι ίσες. Άρα :

$$\Delta f = R_1 \Delta P^{pu}_{G1} = R_2 \Delta P^{pu}_{G2} \quad \text{ή} \quad 0.04 \frac{\Delta P_{G1}}{100} = 0.04 \frac{\Delta P_{G2}}{200} \quad \text{δηλαδή}$$
$$\Delta P_{G2} = 2 \Delta P_{G1}$$

$$\text{Αλλά: } \Delta P_{G1} + \Delta P_{G2} = 200 \text{ MW} \quad \text{ή} \quad \Delta P_{G1} + 2 \Delta P_{G1} = 200 \text{ MW}$$

$$\text{Συνεπώς: } \Delta P_{G1} = 66.66 \text{ MW} \text{ και } \Delta P_{G2} = 133.33 \text{ MW}$$



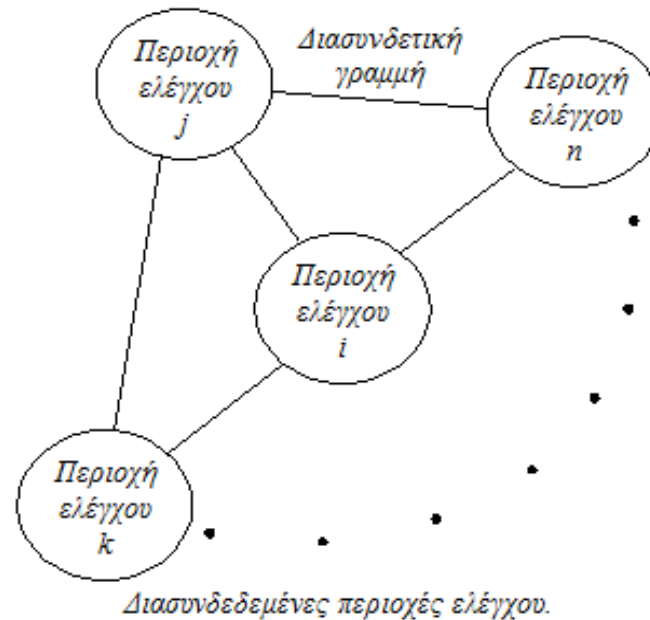
Διαίρεση του συστήματος σε περιοχές ελέγχου

- **Περιοχή ελέγχου** είναι ένα κομμάτι ενός ΣΗΕ στο οποίο όλες οι γεννήτριες, που υπάρχουν, υφίστανται τις ίδιες μεταβολές συχνότητας Δf , δηλαδή οι γεννήτριες ταλαντεύονται σαν ένα ενιαίο σύνολο.
- **Ελεγχόμενο διασυνδεδεμένο σύστημα** είναι το ΣΗΕ που περιλαμβάνει περισσότερες από μία περιοχές ελέγχου διασυνδεδεμένες μεταξύ τους με **ασθενείς** διασυνδετικές γραμμές (**ασθενείς** χαρακτηρίζονται οι διασυνδετικές γραμμές επειδή η ισχύς που μεταφέρουν είναι πολύ μικρό ποσοστό της ισχύος των περιοχών ελέγχου, που συνδέουν).





Ισορροπία μεταβολών ισχύος σε περιοχή ελέγχου(1)



Υποθέτουμε ότι στην περιοχή i γίνεται μια μεταβολή πραγματικού φορτίου ΔP_{Di} , οπότε η περιοχή μεταβάλλει την παραγωγή της κατά ΔP_{Gi} και η καθαρή μεταβολή ισχύος στην περιοχή είναι $\Delta P_{Gi} - \Delta P_{Di}$.

Αυτή η μεταβολή καλύπτεται από το σύστημα με τρεις τρόπους:



Ισορροπία μεταβολών ισχύος σε περιοχή ελέγχου(2)

α) Με μεταβολή της κινητικής ενέργειας $W_{κιν,i}$ της περιοχής με ρυθμό $\frac{dW_{κιν,i}}{dt}$, που οδηγεί σε μεταβολή της συχνότητας κατά Δf_i .

β) Με μεταβολή του φορτίου. Όλα τα τυπικά φορτία (επειδή περιέχουν σε σημαντικό ποσοστό κινητήρες) υφίστανται μια μεταβολή με την ταχύτητα ή τη συχνότητα, που εκφράζεται από τη χαρακτηριστική παράμετρο του φορτίου $D = \frac{\partial P_D}{\partial f}$. Η σταθερά D υπολογίζεται μόνο εμπειρικά και ονομάζεται συντελεστής αυτορρυθμισμού του φορτίου.

γ) Με μεταβολή της ισχύος, που μεταφέρουν οι διασυνδετικές γραμμές της περιοχής, σε συνολικό ποσό $\Delta P_{tie,i} MW$, που ορίζεται θετικό όταν εξέρχεται από την περιοχή.

Την εξίσωση των μεταβολών ισχύων, που αναφέραμε, μπορούμε να την εκφράσουμε μαθηματικά με τη σχέση:

$$\Delta P_{Gi} - \Delta P_{Di} = \frac{dW_{κιν,i}}{dt} + D_i \Delta f_i + \Delta P_{tie,i}$$

Θα εκφράσουμε τώρα ως συνάρτηση της μεταβολής της συχνότητας Δf_i τον πρώτο και τρίτο όρο στο δεξί μέρος αυτής της εξίσωσης.

Ισορροπία μεταβολών ισχύος σε περιοχή ελέγχου(3)

Μεταβολή της κινητικής ενέργειας $W_{κιν,i}$:

$$W_{κιν,i} = \left(\frac{f_i}{f^0} \right)^2 W_{κιν,i}^0$$

αλλά

$$f_i = f^0 + \Delta f_i$$

οπότε:

$$W_{κιν,i} = \left(\frac{f^0 + \Delta f_i}{f^0} \right)^2 W_{κιν,i}^0 = \left[1 + 2 \frac{\Delta f_i}{f^0} + \left(\frac{\Delta f_i}{f^0} \right)^2 \right] W_{κιν,i}^0 = \left(1 + 2 \frac{\Delta f_i}{f^0} \right) W_{κιν,i}^0$$

και

$$\frac{dW_{κιν,i}}{dt} = \frac{2 W_{κιν,i}^0}{f^0} \frac{d\Delta f_i}{dt} MW$$



Ισορροπία μεταβολών ισχύος σε περιοχή ελέγχου(4)

Συνολική μεταβολή της ισχύος των διασυνδεδεικτών γραμμών $\Delta P_{tie,i}$:

$$\Delta P_{tie,i} = \sum_{v=1}^n \Delta P_{tie,iv} \text{ MW}$$

$$P_{tie,iv} = \frac{|V_i||V_v|}{X} \sin(\delta_i - \delta_v) = P_{max,iv} \sin(\delta_i - \delta_v)$$

$$\frac{dP_{tie,iv}}{dt} = P_{max,iv} \cos(\delta_i^0 - \delta_v^0) \left(\frac{d\delta_i}{dt} \Big|_{\delta_i^0} - \frac{d\delta_v}{dt} \Big|_{\delta_v^0} \right)$$

ή $\Delta P_{tie,iv} = P_{max,iv} \cos(\delta_i^0 - \delta_v^0) (\Delta\delta_i - \Delta\delta_v) = T_{iv}^0 (\Delta\delta_i - \Delta\delta_v) \text{ MW}$

όπου:

- $T_{iv}^0 = P_{max,iv} \cos(\delta_i^0 - \delta_v^0) \text{ MW/rad}$ ο συντελεστής ηλεκτρικής σκληρότητας ή συντελεστής συγχρονισμού της διασυνδεδεικτής γραμμής.
- $\Delta\delta_i = \delta_i - \delta_i^0$
- $\Delta\delta_v = \delta_v - \delta_v^0$

Αν αντικαταστήσουμε τις μεταβολές των φασικών γωνιών με τις μεταβολές των συχνοτήτων, καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$\Delta P_{tie,iv} = 2\pi T_{iv}^0 \left(\int \Delta f_i dt - \int \Delta f_v dt \right)$$

και η συνολική μεταβολή ισχύος των διασυνδεδεικτών γραμμών που συνδέονται στην περιοχή i , γράφεται:

$$\Delta P_{tie,i} = 2\pi \sum_{v=1}^n T_{iv}^0 \left(\int \Delta f_i dt - \int \Delta f_v dt \right)$$



Σχηματική παράσταση της περιοχής ελέγχου(1)

Τους όρους που υπολογίσαμε τους αντικαθιστούμε στην εξίσωση των μεταβολών ισχύων και διαιρούμε όλους τους όρους της με τη συνολική ονομαστική ισχύ P_{ri} της περιοχής i , οπότε παίρνουμε την εξίσωση:

$$\Delta P_{Gi} - \Delta P_{Di} = \frac{2H_i}{f^0} \frac{d(\Delta f_i)}{dt} + D_i \Delta f_i + \Delta P_{tie,i}$$

Σε αυτήν την εξίσωση όλες οι μεταβλητές ΔP και το D μετρούνται σε ανά μονάδα τιμές της P_{ri} και έχει χρησιμοποιηθεί η σταθερά:

$$H_i = \frac{W_{κιν,i}^0}{P_{ri}}$$

που έχει διαστάσεις σε δευτερόλεπτα, είναι η ανά μονάδα σταθερά αδράνειας του συστήματος, οι τιμές της μεταβάλλονται λίγο με το μέγεθος του συστήματος και κυμαίνονται μεταξύ 2 και 8 δευτερόλεπτα.



Σχηματική παράσταση της περιοχής ελέγχου(2)

Με μετασχηματισμό Laplace των εξισώσεων καταλήγουμε:

$$\Delta P_{tie,i}(s) = \frac{2\pi}{s} \sum_{v=1}^n T_{iv}^0 [\Delta F_i(s) - \Delta F_v(s)]$$

$$\Delta P_{Gi}(s) - \Delta P_{Di}(s) - \Delta P_{tie,i}(s) = \frac{2H_i}{f^0} s \Delta F_i(s) + D_i \Delta F_i(s)$$

ή

$$\Delta P_{Gi}(s) - \Delta P_{Di}(s) - \Delta P_{tie,i}(s) = \frac{1 + \left(\frac{2H_i}{f^0 D_i}\right)s}{1/D_i} \Delta F_i(s)$$

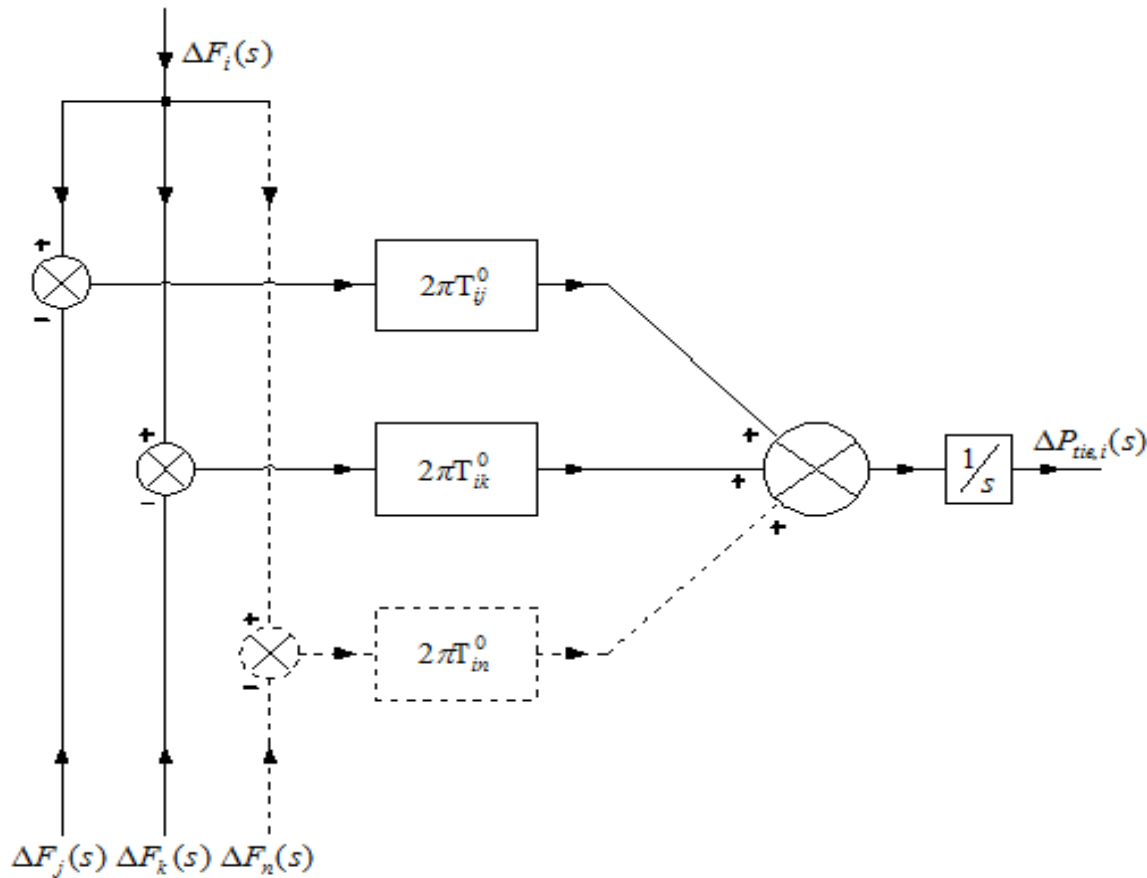
και

$$[\Delta P_{Gi}(s) - \Delta P_{Di}(s) - \Delta P_{tie,i}(s)] G_{pi}(s) = \Delta F_i(s)$$

όπου:

- $G_{pi}(s) = \frac{K_{pi}}{1 + T_{pi}s}$
- $T_{pi} = \frac{2H_i}{f^0 D_i}$ δευτερόλεπτα
- $K_{pi} = \frac{1}{D_i} \text{HZ}/\mu\text{MW}$

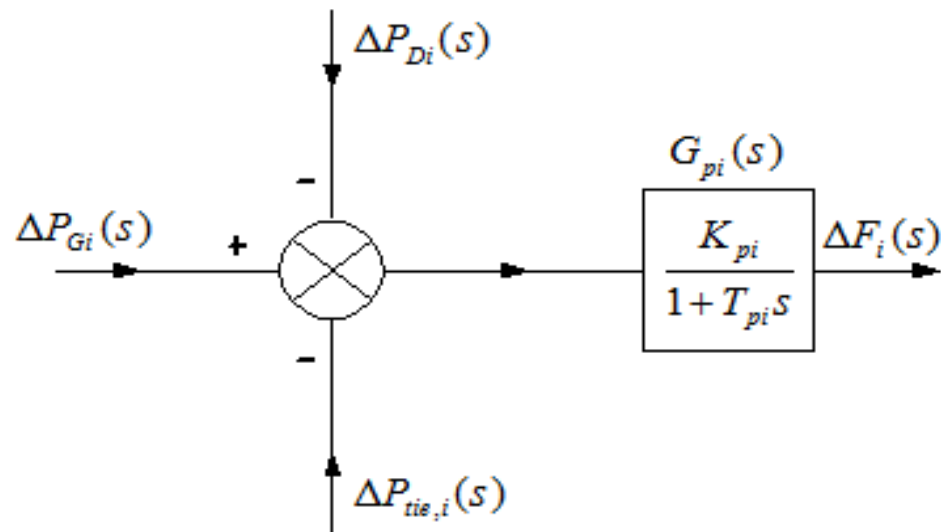
Σχηματική παράσταση της περιοχής ελέγχου(3)



Σχηματική παράσταση της παραγωγής της εξ. ισχύος διασυνδεδετικών γραμμών.



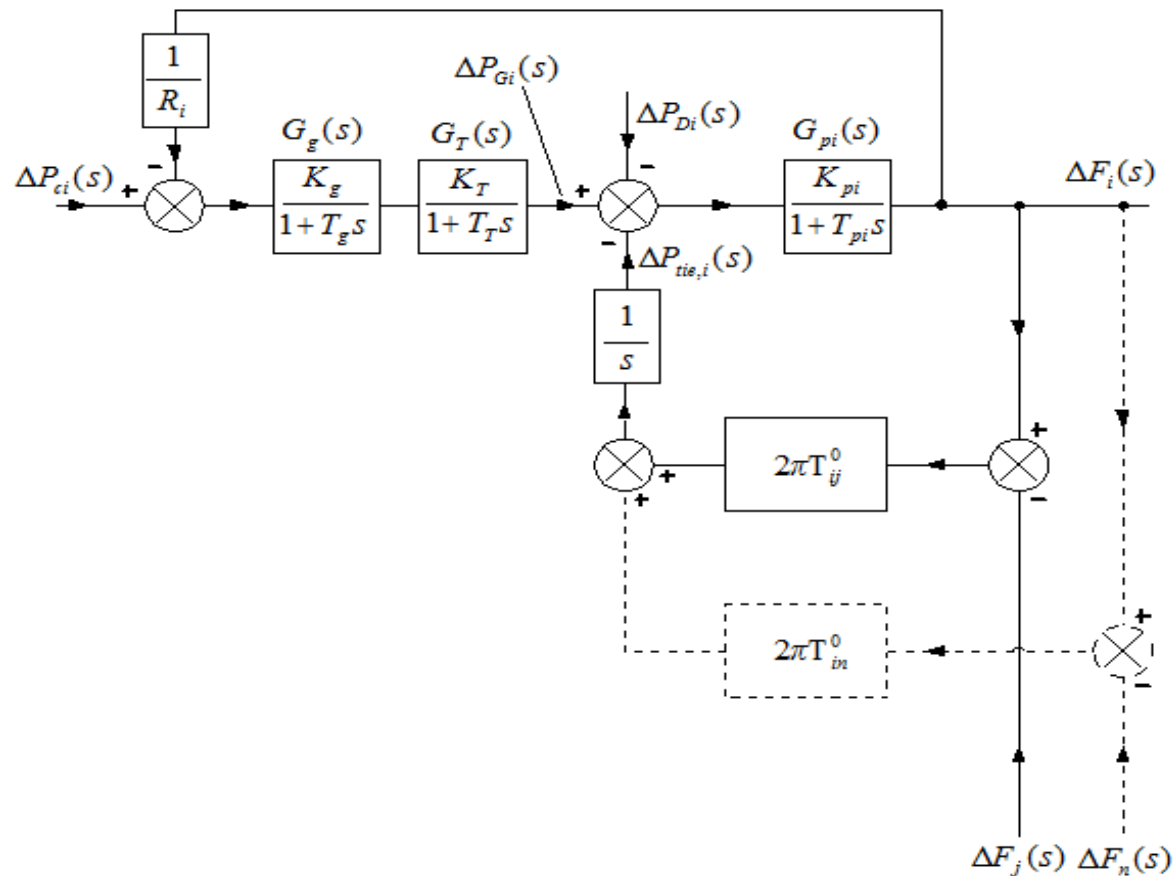
Σχηματική παράσταση της περιοχής ελέγχου(4)



Σχηματική παράσταση της εξ. περιοχής ελέγχου.



Σχηματική παράσταση της περιοχής ελέγχου(5)



Πλήρης σχηματική παράσταση της περιοχής ελέγχου i .



Παράδειγμα

Μια σύγχρονη γεννήτρια **150 MVA** και συντελεστή ισχύος μονάδα λειτουργεί με πλήρες φορτίο στα **50 Hz**. Ξαφνικά το φορτίο ελαττώνεται στα **100 MW**. Ο ρυθμιστής ταχύτητας ενεργοποιείται μετά από **0.4** δευτερόλεπτα, λόγω της χρονικής καθυστέρησής του. Αν η σταθερά αδράνειας της γεννήτριας είναι **H=8** δευτερόλεπτα, να προσδιορίσετε τη συχνότητα στο τέλος των **0.4** δευτερολέπτων.

Λύση:

Η κινητική ενέργεια των στρεφόμενων μερών της γεννήτριας στα 50 Hz είναι:

$$W_{κιν,i}^0 = H * P_r = 8 * 150 = 1200 \text{ MW} - \text{sec}$$

Η αποδιδόμενη στα κινούμενα μέρη κινητική ενέργεια, από την πλεονάζουσα ισχύ των 50 MW, στο διάστημα των 0.4 s είναι:

$$\Delta W_{κιν} = 50 * 0.04 = 20 \text{ MW} - \text{sec}$$

Αλλά

$$\left(\frac{f}{f^0}\right)^2 = \left(\frac{W_{κιν}^0 + \Delta W_{κιν}}{W_{κιν}^0}\right) \quad \text{ή} \quad f = f^0 \left(\frac{W_{κιν}^0 + \Delta W_{κιν}}{W_{κιν}^0}\right)^{1/2}$$

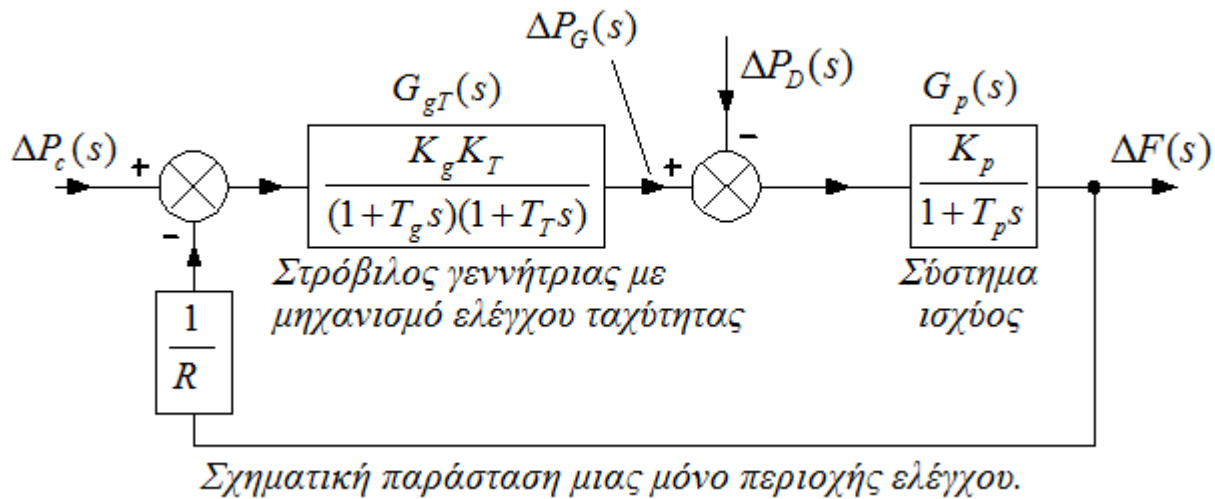
Επομένως η ζητούμενη νέα συχνότητα είναι:

$$f = 50 * \left(\frac{1200 + 20}{1200}\right)^{\frac{1}{2}} = 50.415 \text{ Hz}$$



Έλεγχος Ισχύος-Συχνότητας απομονωμένης περιοχής ελέγχου

- Για να παρακολουθήσουμε τη δυναμική συμπεριφορά του $P - f$ βρόχου ελέγχου συστημάτων, θα αρχίσουμε τη μελέτη με μια απομονωμένη περιοχή ελέγχου.



Εντολή ελέγχου $\Delta P_c = 0$

Για να κάνουμε πιο πραγματική τη μελέτη θα εργαστούμε με τις παρακάτω αριθμητικές τιμές:

Ονομαστική συνολική ισχύ της περιοχής $P_r = 2000 \text{ MW}$

Ονομαστικό φορτίο της περιοχής $P_D = 1000 \text{ MW}$

Σταθερά αδράνειας $H = 5$ δευτερόλεπτα.

Ονομαστική συχνότητα $f^0 = 50 \text{ Hz}$.

Ταχύτητα ρύθμισης $R = 2.4 \text{ Hz/puMW}$

$$K_g K_T = 1$$

Υποθέτουμε επίσης ότι το φορτίο εξαρτάται γραμμικά από τη συχνότητα, δηλαδή:

$$D = \frac{1000 \text{ MW}}{50 \text{ Hz}} \frac{1000}{50 * 2000} = 10^{-2} \text{ puMW/Hz}$$

και

$$T_p = \frac{2 * 5}{50 * 10^{-2}} = 20 \text{ δευτερόλεπτα}$$

$$K_p = \frac{1}{10^{-2}} = 100 \text{ Hz/puMW}$$



Μόνιμο βύθισμα συχνότητας για βηματική αύξηση φορτίου(1)

Από τη διαγραμματική παράσταση της περιοχής για $\Delta P_c = 0$ παίρνουμε:

$$\Delta F(s) = -\frac{G_p(s)}{1 + \left(\frac{1}{R}\right) G_p(s) G_{gT}(s)} \Delta P_D(s)$$

Για βηματική αύξηση του φορτίου ΔP_D έχουμε: $\Delta P_D(s) = \frac{\Delta P_D(s)}{s}$

Χρησιμοποιώντας το θεώρημα τελικής τιμής παίρνουμε:

$$\Delta f_{\mu\omicron\nu} = \lim_{s \rightarrow 0} [s \Delta F(s)] = -\frac{K_p}{1 + \frac{K_p}{R}} \Delta P_D = -\frac{\Delta P_D}{D + \frac{1}{R}} = -\frac{\Delta P_D}{\beta} \text{ Hz}$$

όπου:

$$\beta = D + \frac{1}{R} \text{ puMW/Hz}$$

είναι η χαρακτηριστική απόκριση συχνότητας της περιοχής (ΧΑΣΠ).

Με αντικατάσταση των αριθμητικών δεδομένων παίρνουμε:

$$\beta = 10^{-2} + \frac{1}{2.4} = 0.427 \text{ puMW/Hz}$$



Μόνιμο βύθισμα συχνότητας για βηματική αύξηση φορτίου(2)

Για παράδειγμα μια αύξηση φορτίου:

$$\Delta P_D = 20 \text{ MW} = \frac{20}{2000} = 0.01 \text{ pu MW}$$

προκαλεί ένα μόνιμο βύθισμα συχνότητας:

$$\Delta f_{\mu\text{ον}} = -\frac{0.01}{0.427} = -0.0234 \text{ Hz}$$

Στη περίπτωση που n γεννήτριες, κάθε μια με το δικό της ρυθμιστή ταχύτητας, συνδέονται στο ίδιο σύστημα, η μεταβολή της συχνότητας για μια μεταβολή φορτίου δίδεται από τη σχέση:

$$\Delta f_{\mu\text{ον}} = \frac{-\Delta P_D}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} + D}$$

όπου όλες οι ποσότητες είναι σε pu, σε ένα κοινό σύστημα βάσεων



Χρονική απόκριση(1)

Η χρονική σταθερά του συστήματος είναι 20 δευτερόλεπτα, ενώ οι χρονικές σταθερές του ρυθμιστή ταχύτητας και του στροβίλου είναι μικρότερες από 1 δευτερόλεπτο, γι' αυτό η δράση τους μπορεί να θεωρηθεί στιγμιαία και να θέσουμε $T_g = T_T = 0$. Με αυτή την υπόθεση, για μια βηματική μεταβολή του φορτίου $\Delta P_D = 0.01 pu MW$ παίρνουμε:

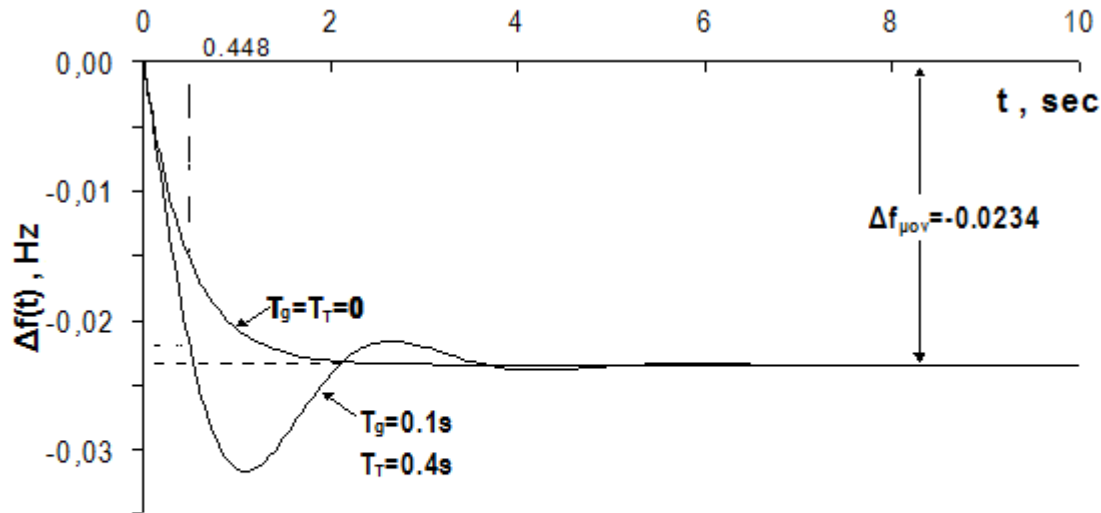
$$\begin{aligned}\Delta F(s) &= -\frac{\frac{K_p}{1 + T_p s}}{1 + \frac{1}{R} \frac{K_p}{1 + T_p s}} \frac{\Delta P_D(s)}{s} = \frac{RK_p}{R + K_p} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{R + K_p}{RT_p}} \right) \Delta P_D = \\ &= -0.0234 \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + 2.13} \right) Hz\end{aligned}$$

και

$$\Delta f(t) = -0.0234(1 + e^{-2.13t}) Hz$$



Χρονική απόκριση(2)



Χρονική απόκριση της συχνότητας για βηματική αύξηση φορτίου και $\Delta P_c=0$.

- **1.** Η χρονική σταθερά του συστήματος κλειστού βρόχου είναι 0.448 δευτερόλεπτα (για T_g και $T_T \neq 0$), που είναι μια σημαντική ελάττωση από την τιμή $T_p = 20$ δευτερόλεπτα, που χαρακτηρίζει την περιοχή μόνη της. Μπορούμε να κάνουμε το σύστημα ακόμα πιο γρήγορο, αν ελαττώσουμε το R , δηλαδή αν αυξήσουμε το στατικό κέρδος του βρόχου.



Χρονική απόκριση(3)

- 1. Η ελάττωση του R ελαττώνει και το μόνιμο σφάλμα συχνότητας.
- 2. Όταν συμπεριλάβουμε στην ανάλυση και τις χρονικές σταθερές T_T και T_g , η απόκριση δεν είναι τελείως εκθετική.
- 3. Έχουμε ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας $\frac{1}{\beta} = 2.34 \text{ Hz}$, για μεταβολή του φορτίου από 0 σε 2000 MW. Αυτό το μόνιμο σφάλμα συχνότητας, που παίρνουμε χωρίς εντολή ελέγχου ΔP_c , είναι τελείως απαράδεκτο.



Φυσική ερμηνεία των αποτελεσμάτων(1)

- Όταν συνδέουμε ξαφνικά ένα φορτίο, π.χ. **1%** (**20 MW** για τα δεδομένα του συστήματος που εξετάσαμε), αμέσως μετά το επιπλέον φορτίο των **20 MW** απορροφάται από την κινητική ενέργεια των στρεφόμενων μερών του συστήματος, που έτσι ελαττώνεται με έναν αρχικό ρυθμό **20 MW**. Η κινητική ενέργεια ελευθερώνεται με ελάττωση της ταχύτητας.
- Επειδή η ταχύτητα ελαττώνεται και μάλιστα με αρχική επιβράδυνση $0.0234/0.469 = 0.05 \text{ Hz/s}$, η βαλβίδα του στροβίλου ανοίγει και αυξάνει η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς.
- Επίσης, επειδή ελαττώνεται η συχνότητα, το παλιό αρχικό φορτίο (**1000 MW** στην περίπτωση μας) ελαττώνεται και αυτό με έναν ρυθμό $D = 1000/50 = 20 \text{ MW/Hz}$. Αυτή η ελάττωση του παλιού φορτίου μπορεί να θεωρηθεί επίσης ότι συμβάλει στην αντιμετώπιση του νέου φορτίου.
- Αρχικά, οι δύο τελευταίοι παράγοντες είναι μηδέν, αλλά καθώς ελαττώνεται η ταχύτητα συνεισφέρουν με αυξανόμενο ρυθμό, ενώ η απορρόφηση κινητικής ενέργειας γίνεται με φθίνοντα ρυθμό. Όταν η συχνότητα φτάσει στη νέα μικρότερη μόνιμη τιμή της, η αύξηση του φορτίου καλύπτεται πλήρως από τους δύο τελευταίους παράγοντες.



Φυσική ερμηνεία των αποτελεσμάτων(2)

Είναι ενδιαφέρον να δούμε σε τι ποσοστό κάθε παράγοντας από τους δύο καλύπτει το φορτίο, αφού γνωρίζουμε ότι το μόνιμο βύθισμα συχνότητας είναι **0.0234 Hz**.

1. Η ταχύτητα ρύθμισης $R = 2.4 \text{ Hz}/\mu\text{MW}$ και η αύξηση της παραγωγής στη νέα μόνιμη κατάσταση είναι:

$$\frac{0.0234}{2.4} = 0.00976 \mu\text{MW} = 0.00976 * 2000 = 19.53 \text{ MW}$$

2. Επειδή το παλιό φορτίο ελαττώνεται με ρυθμό $20 \text{ MW}/\text{Hz}$, μια ελάττωση συχνότητας **0.0234 Hz** θα απελευθερώσει φορτίο:

$$0.0234 * 20 = 0.47 \text{ MW}$$



Εντολή ελέγχου $\Delta P_c \neq 0$

Επειδή για $\Delta P_c = 0$ έχουμε ένα απαράδεκτο μόνιμο σφάλμα συχνότητας, χρειαζόμαστε μια στρατηγική ελέγχου του ΔP_c με σκοπό τη βελτίωση της απόκρισης συχνότητας.

- Η στρατηγική ελέγχου θα πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες προδιαγραφές :
- **1.** Ο βρόχος ελέγχου θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ικανοποιητικό βαθμό ευστάθειας
- **2.** Μετά από μια μεταβολή φορτίου, το σφάλμα συχνότητας θα πρέπει να γίνεται μηδέν. Επίσης, η μέγιστη μεταβατική μεταβολή της συχνότητας, μετά από μια συγκεκριμένη μεταβολή φορτίου, θα πρέπει να ελαχιστοποιείται.
- **3.** Το ολοκλήρωμα του σφάλματος συχνότητας (που έχει διαστάσεις κύκλων) δεν πρέπει να ξεπερνά μια μέγιστη τιμή. Για τη Βόρειο Αμερική προτείνεται η μέγιστη τιμή να είναι 180 κύκλοι.



Ολοκληρωτικός έλεγχος(1)

Για την ικανοποίηση των προδιαγραφών 1 και 2 προτείνουμε την ακόλουθη στρατηγική ελέγχου:

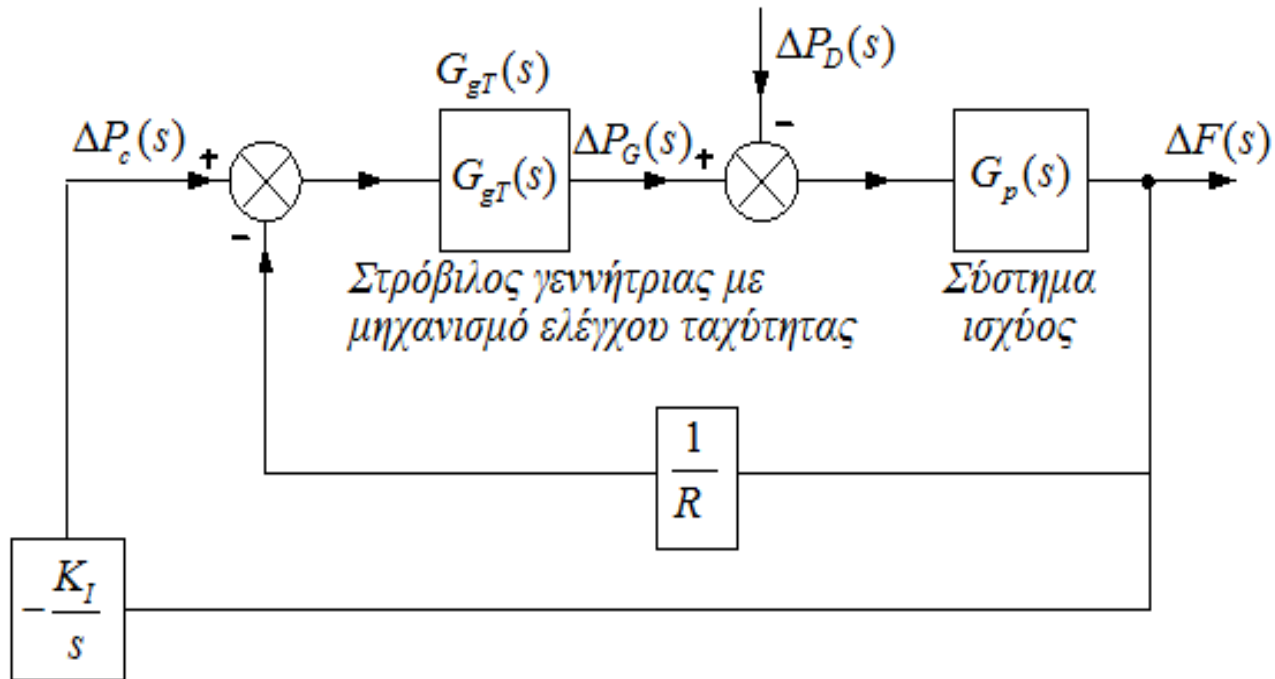
$$\Delta P_c = -K_I \int \Delta f dt$$

- Το αρνητικό πρόσημο χρειάζεται γιατί ένα θετικό σφάλμα συχνότητας πρέπει να προκαλεί μια εντολή **μείωσης** της ισχύος εξόδου.
- Σε ένα κεντρικό έλεγχο φορτίου-συχνότητας μιας περιοχής ελέγχου, το σήμα που τροφοδοτείται στον ολοκληρωτή, ονομάζεται **σφάλμα ελέγχου περιοχής** (ΣΕΠ) (Area Control Error(ACE)), δηλαδή:

$$\text{ΣΕΠ} = \Delta f$$



Ολοκληρωτικός έλεγχος(2)



Ολοκληρωτικός έλεγχος συστήματος μιας περιοχής.



Ολοκληρωτικός έλεγχος(3)

Θα μελετήσουμε τώρα την απόκριση του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου σε μια βηματική μεταβολή φορτίου. Για να απλοποιήσουμε την αριθμητική ανάλυση, θα αμελήσουμε τις χρονικές σταθερές T_T και T_g καθώς και τη χρονική καθυστέρηση, που έχει στην απόκρισή του ο ολοκληρωτής.

Με μετασχηματισμό Laplace της εξίσωσης ελέγχου παίρνουμε:

$$\Delta P_C(s) = -\frac{K_I}{s} \Delta F(s)$$

Με χρήση αυτής της εξίσωσης, από το διάγραμμα της περιοχής και για βηματική μεταβολή φορτίου, παίρνουμε μετά από μερικές αριθμητικές πράξεις:

$$\Delta F(s) = -\frac{K_p}{T_p} \frac{\Delta P_D}{s^2 + \left(\frac{1 + \frac{K_p}{R}}{T_p}\right)s + \frac{K_I K_p}{T_p}}$$

Η χρονική απόκριση του συστήματος εξαρτάται από τους πόλους αυτής της εξίσωσης, γι' αυτό θα ασχοληθούμε πρώτα με το δεύτερης τάξης πολυώνυμο του παρονομαστή, που μπορεί να γραφεί:

$$s^2 + \frac{1 + \frac{K_p}{R}}{T_p} s + \frac{K_I K_p}{T_p} = \left(s + \frac{1 + \frac{K_p}{R}}{2T_p}\right)^2 + \frac{K_I K_p}{T_p} - \left(\frac{1 + \frac{K_p}{R}}{2T_p}\right)^2$$





Ολοκληρωτικός έλεγχος(4)

Η φύση των πόλων εξαρτάται από την τιμή του ολοκληρωτικού κέρδους K_I . Αν το άθροισμα των δύο τελευταίων όρων είναι θετικό, δηλαδή όταν:

$$\frac{K_I K_p}{T_p} > \left(\frac{1 + \frac{K_p}{R}}{2T_p} \right)^2 \quad \text{ή} \quad K_I > \frac{1}{4T_p K_p} \left(1 + \frac{K_p}{R} \right)^2 = K_{I, \text{κρισ}}$$

τότε ο παρανομαστής μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$(s + a)^2 = \omega^2 \quad \text{όπου } a \text{ και } \omega \text{ είναι θετικά.}$$

Αυτή είναι μια **υπερκρίσιμη κατάσταση**, όπου έχουμε ένα ζεύγος συζυγών μιγαδικών πόλων στο ευσταθές s -επίπεδο και η χρονική απόκριση $\Delta f(t)$ περιέχει αποσβενύμενους όρους της μορφής:

$$e^{-at} \sin \omega t \text{ και } e^{-at} \cos \omega t$$

Αν αντίθετα:

$$K_I < K_{I, \text{κρισ}}$$

τότε το πολυώνυμο του παρανομαστή μπορεί να γραφεί στη μορφή:

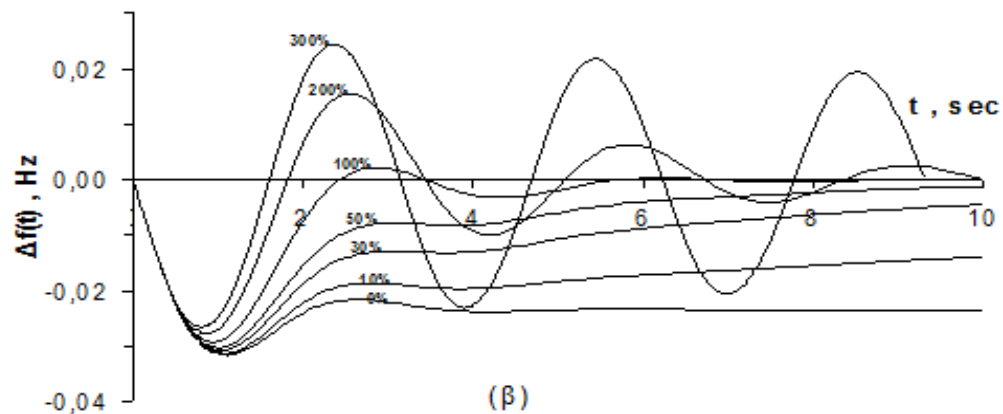
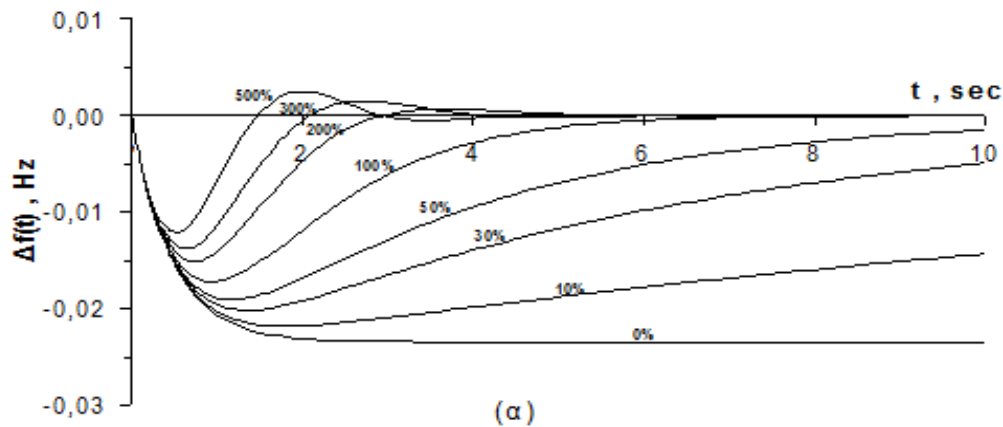
$$(s + \beta_1)(s + \beta_2) \quad \text{όπου τα } \beta_1 \text{ και } \beta_2 \text{ είναι θετικά.}$$

Αυτή είναι μια **υποκρίσιμη κατάσταση**, όπου έχουμε ένα ζεύγος πραγματικών πόλων στο ευσταθές s -επίπεδο και η χρονική απόκριση $\Delta f(t)$ περιέχει αποσβενύμενους όρους της μορφής:

$$e^{-\beta_1 t} \text{ και } e^{-\beta_2 t}$$

Για $K_I = K_{I, \text{κρισ}}$ έχουμε την **κρίσιμη κατάσταση**, όπου έχουμε μια διπλή πραγματική ρίζα στο ευσταθές s -επίπεδο.

Ολοκληρωτικός έλεγχος(5)



Χρονική απόκριση συχνότητας για διαφορετικές τιμές του K_I , όπου $K_I=100\%$ σημαίνει $K_I=K_{\text{κρ}\omega}=0.22755$.

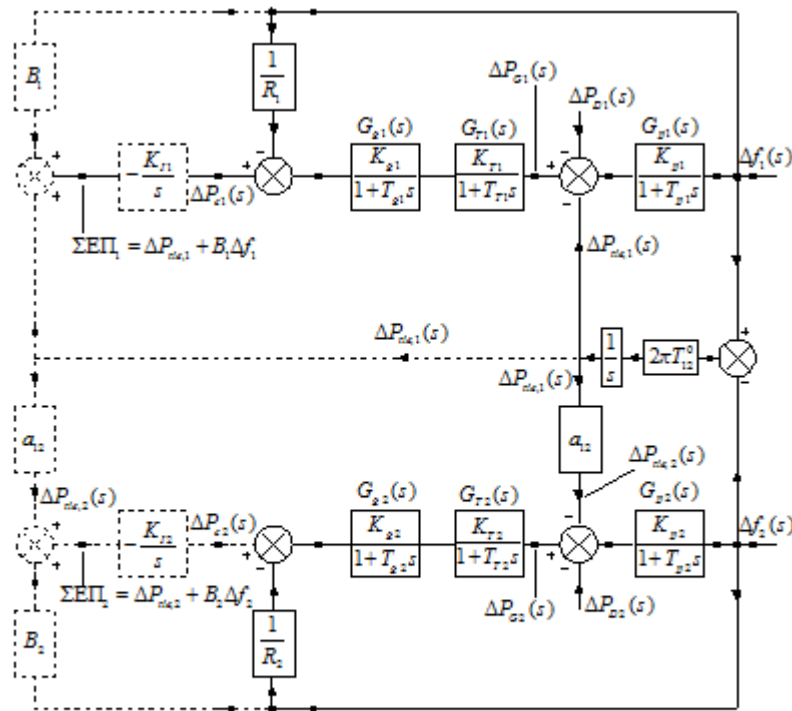
α) $T_\xi=T_T=0$ β) $T_\xi=0.1$ και $T_T=0.4$ δευτερόλεπτα



Σύστημα δύο περιοχών ελέγχου

Το αντικείμεμο του ελέγχου είναι τώρα να ρυθμίζει τη συχνότητα σε κάθε περιοχή ελέγχου και ταυτόχρονα να διατηρεί την ισχύ της διασυνδεδετικής γραμμής στα επίπεδα που ορίζουν πιθανές συμβάσεις.

Θα εξετάσουμε πρώτα την περίπτωση, όπου $\Delta P_c = 0$.



$$a_{12} = -\frac{P_{r1}}{P_{r2}}$$

Σχηματική παράσταση συστήματος με δύο περιοχές ελέγχου.



Νέα μόνιμη κατάσταση συστήματος δύο περιοχών με $\Delta P_{c1} = \Delta P_{c2} = 0$ (1)

Υποθέτουμε ότι έχουμε μια ταυτόχρονη βηματική αύξηση του φορτίου σε κάθε περιοχή ΔP_{D1} και ΔP_{D2} αντίστοιχα και θα υπολογίσουμε το μόνιμο σφάλμα συχνότητας $\Delta f_{\mu\omicron\nu}$ και ισχύος στη διασυνδετική γραμμή $\Delta P_{tie,1,\mu\omicron\nu}$.

$$\Delta P_{G1,\mu\omicron\nu} = -\frac{1}{R_1} \Delta f_{\mu\omicron\nu}$$

$$\Delta P_{G2,\mu\omicron\nu} = -\frac{1}{R_2} \Delta f_{\mu\omicron\nu}$$

$$-\frac{1}{R_1} \Delta f_{\mu\omicron\nu} - \Delta P_{D1} = D_1 \Delta f_{\mu\omicron\nu} + \Delta P_{tie,1,\mu\omicron\nu}$$

$$-\frac{1}{R_2} \Delta f_{\mu\omicron\nu} - \Delta P_{D2} = D_2 \Delta f_{\mu\omicron\nu} + a_{12} \Delta P_{tie,1,\mu\omicron\nu}$$

Με λύση αυτών των εξισώσεων, βρίσκουμε:

$$\Delta f_{\mu\omicron\nu} = -\frac{\Delta P_{D2} - a_{12} \Delta P_{D1}}{\beta_2 - a_{12} \beta_1} \text{ Hz}$$

$$\Delta P_{tie,1,\mu\omicron\nu} = \frac{\beta_1 \Delta P_{D2} - \beta_2 \Delta P_{D1}}{\beta_2 - a_{12} \beta_1}$$

$$\beta_1 = D_1 + \frac{1}{R_1} \quad \beta_2 = D_2 + \frac{1}{R_2}$$



Νέα μόνιμη κατάσταση συστήματος δύο περιοχών με $\Delta P_{c1} = \Delta P_{c2} = 0$ (2)

Αν υποθέσουμε ότι οι δύο περιοχές είναι ίδιες παίρνουμε :

$$D = D_1 = D_2, R = R_1 = R_2, \beta = \beta_1 = \beta_2, a_{12} = -1$$

$$\Delta f_{\mu\omicron\nu} = -\frac{\Delta P_{D2} + \Delta P_{D1}}{2\beta} \text{ Hz}$$

$$\Delta P_{tie,1,\mu\omicron\nu} = -\Delta P_{tie,2,\mu\omicron\nu} = \frac{\Delta P_{D2} - \Delta P_{D1}}{2} \text{ pu MW}$$

Για παράδειγμα, αν έχουμε μια βηματική μεταβολή φορτίου μόνο στην περιοχή 2, παίρνουμε:

$$\Delta f_{\mu\omicron\nu} = -\frac{\Delta P_{D2}}{2\beta} \text{ Hz}$$

$$\Delta P_{tie,1,\mu\omicron\nu} = \frac{\Delta P_{D2}}{2} \text{ pu MW}$$



Χρονική απόκριση συστήματος δύο περιοχών με $\Delta P_{c1} = \Delta P_{c2} = 0$ (1)

Αναλυτική λύση είναι δυνατόν να πάρουμε, αν κάνουμε μερικές λογικές υποθέσεις, που είναι:

Θεωρούμε ότι ο.ι περιοχές είναι ίδιες, $T_T = T_g = 0$, $K_g * K_T = 1$, $D_1 = D_2 = 0$.

Σ' αυτήν την περίπτωση η ισχύς στη διασυνδεδετική γραμμή είναι:

$$\Delta P_{tie,1}(s) = \frac{\Delta P_{D2}(S) - \Delta P_{D1}(S)}{s^2 + \left(\frac{f^0}{2RH}\right)s + \frac{2\pi f^0 T_{12}^0}{H}} \frac{\pi f^0 T_{12}^0}{H}$$

$$a^2 = \left(\frac{f^0}{4RH}\right)^2$$
$$\omega^2 = \frac{2\pi f^0 T_{12}^0}{H}$$

Από αυτήν τη σχέση μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

1. Ο παρανομαστής της είναι της μορφής:

$$s^2 + 2as + \omega^2 = (s + a)^2 + \omega^2 - a^2$$

2. Μετά από μια διαταραχή το σύστημα θα ταλαντεύεται αποσβεννύμενα με τη γωνιακή συχνότητα:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega^2 - a^2} = \sqrt{\frac{2\pi f^0 T_{12}^0}{H} - \left(\frac{f^0}{4RH}\right)^2}$$



Χρονική απόκριση συστήματος δύο περιοχών με $\Delta P_{c1} = \Delta P_{c2} = 0$ (2)

3. Η απόσβεση του συστήματος εξαρτάται πολύ από την παράμετρο a . Μικρές τιμές του R δίνουν ισχυρή απόσβεση, ενώ μεγάλες τιμές του δίνουν ασθενή απόσβεση.

Με την προηγούμενη προσεγγιστική ανάλυση προέκυψε ότι το σύστημα είναι ευσταθές. Πιο λεπτομερή όμως ανάλυση, αποκαλύπτει ότι για ορισμένους συνδυασμούς παραμέτρων το σύστημα γίνεται ασταθές.

$$a^2 = \left(\frac{f^0}{4RH} \right)^2$$
$$\omega^2 = \frac{2\pi f^0 T_{12}^0}{H}$$





Παράδειγμα(1)

Το προηγούμενο σύστημα διασυνδέεται με ένα ίδιο σύστημα με μια διασυνδετική γραμμή, που έχει συντελεστή συγχρονισμού $T_{12}^0 MW/rad$. Για μια αύξηση φορτίου **400 MW** στο σύστημα υπολογίστε: **α)** Με τις προσεγγιστικές σχέσεις το μόνιμο σφάλμα συχνότητας και ισχύος στη διασυνδετική γραμμή καθώς και τη γωνιακή συχνότητα απόσβεσης ω_0 . **β)** Εξομοιώστε με ψηφιακό υπολογιστή την ακριβή απόκριση των συστημάτων και υπολογίστε από αυτή τους αγνώστους της ερώτησης **α**.

Λύση:

$$\text{α)} \quad T_{12}^0 = \frac{400}{2000} = 0.2 \text{ pu MW/rad}$$

$$\Delta P_{D2} = 0.2 \text{ pu MW}$$

$$\beta = D + \frac{1}{R} = 10^{-2} + \frac{1}{2.4} = 0.4266 \text{ pu MW/Hz}$$

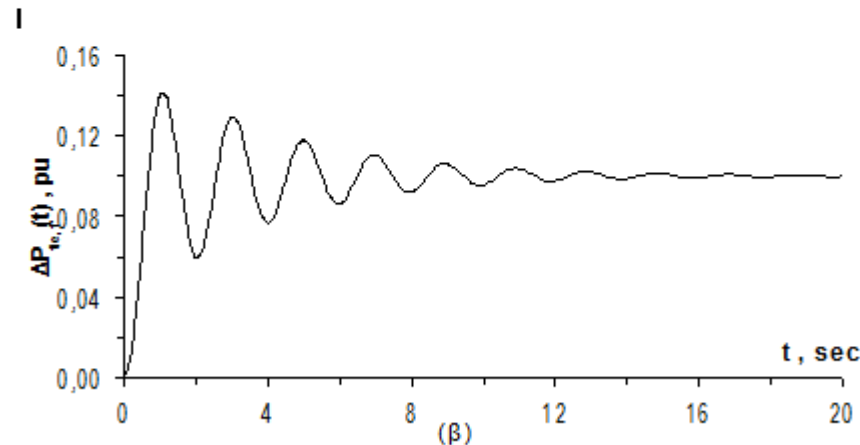
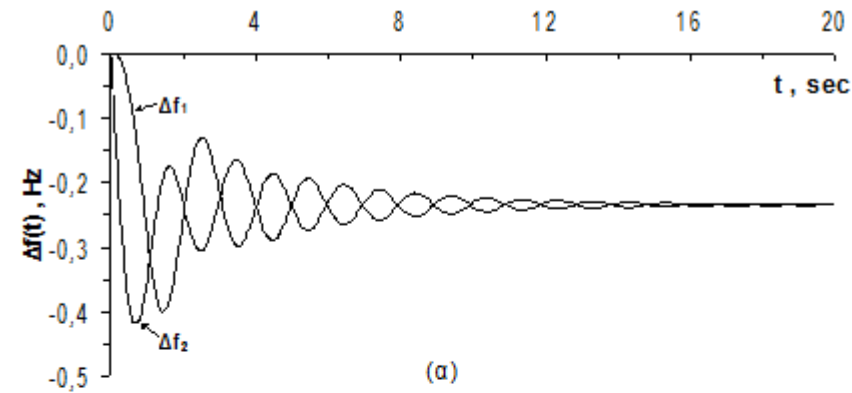
$$\Delta f_{\mu\text{ov}} = -\frac{\Delta P_{D2}}{2\beta} = -\frac{0.2}{2 \cdot 0.4266} = -0.2344 \text{ Hz}$$

$$\Delta P_{tie,1,\mu\text{ov}} = \frac{\Delta P_{D2}}{2} = \frac{0.2}{2} = 0.1 \text{ pu MW}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2\pi f^0 T_{12}^0}{H} - \left(\frac{f^0}{4RH}\right)^2} = \sqrt{\frac{2\pi * 50 * 0.2}{5} - \left(\frac{50}{4 * 2.4 * 5}\right)^2} = 3.3884 \text{ rad/s}$$



Παράδειγμα(2)



$$\Delta f_{\mu\text{ov}} = -0.2344 \text{ Hz}$$

$$\Delta P_{tie,1,\mu\text{ov}} = 0.1 \text{ pu MW}$$

$$\omega_0 = 3.3884 \text{ rad/s}$$

Απόκριση συχνοτήτων και ισχύος της διασυνδετικής γραμμής για βηματική μεταβολή φορτίου στο σύστημα 2.

Από το Σχήμα επιβεβαιώνονται οι τιμές:

$$\Delta f_{\mu\text{ov}} = -0.2344 \text{ Hz} \text{ και } \Delta P_{tie,1,\mu\text{ov}} = 0.1 \text{ pu MW}$$

και μετράται μια περίοδος ταλάντωσης $T = 1.968s$, δηλαδή $\omega_0 = 3.192 \text{ rad/s}$ που διαφέρει λίγο από την προσεγγιστική τιμή ω_0 .

Σύστημα δύο περιοχών ελέγχου με

$$\Delta P_c \neq 0$$



Τώρα ορίζουμε τα σήματα ελέγχου κάθε περιοχής από τις εξισώσεις:

$$\Sigma \epsilon \Pi_1 = \Delta P_{tie,1} + B_1 \Delta f_1$$

$$\Sigma \epsilon \Pi_2 = \Delta P_{tie,2} + B_2 \Delta f_2$$

και οι εντολές ελέγχου θα έχουν τη μορφή:

$$\Delta P_{c1} = -K_{I1} \int (\Delta P_{tie,1} + B_1 \Delta f_1) dt$$

$$\Delta P_{c2} = -K_{I2} \int (\Delta P_{tie,2} + B_2 \Delta f_2) dt$$

Οι σταθερές K_{I1} και K_{I2} είναι τα κέρδη των ολοκληρωτών και οι σταθερές B_1 και B_2 είναι οι συντελεστές **βαρύτητας** του σήματος διακύμανσης της συχνότητας σε σχέση με το σήμα διακύμανσης της ισχύος στη διασυνδετική γραμμή.

Απόκριση μόνιμης κατάστασης

Μετά από μια βηματική μεταβολή φορτίου σε κάθε περιοχή, μια νέα μόνιμη κατάσταση, αν υπάρχει, θα επιτευχθεί μόνο εφ' όσον η συνεισφορά των ολοκληρωμάτων ελέγχου γίνει μηδέν. Για να συμβεί αυτό πρέπει:

$$\Delta P_{tie,1,\mu\omicron\nu} + B_1 \Delta f_{\mu\omicron\nu} = 0$$

$$\Delta P_{tie,2,\mu\omicron\nu} + B_2 \Delta f_{\mu\omicron\nu} = 0$$

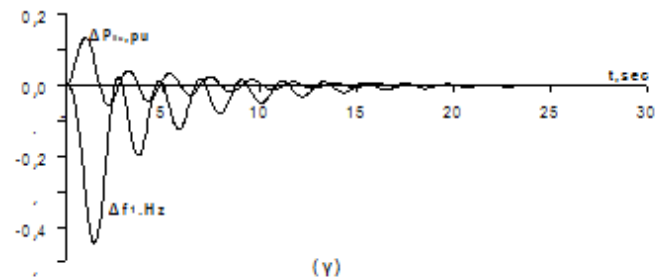
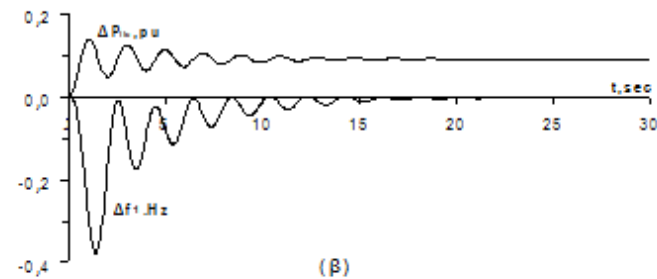
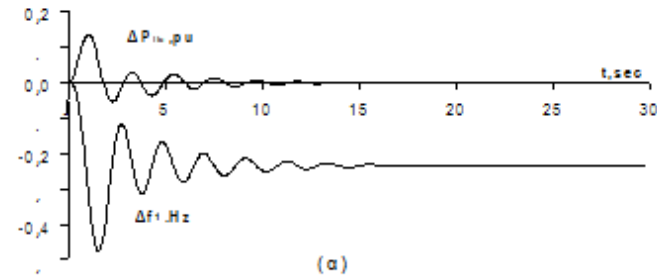
Αυτές οι εξισώσεις ικανοποιούνται μόνο όταν:

$$\Delta f_{\mu\omicron\nu} = \Delta P_{tie,1,\mu\omicron\nu} = \Delta P_{tie,2,\mu\omicron\nu} = 0$$

δηλαδή η στρατηγική ελέγχου που επελέγη, μηδενίζει τις μεταβολές της συχνότητας και της ισχύος στη μόνιμη κατάσταση.



Χρονική απόκριση του συστήματος



Απόκριση συστήματος δύο ίδιων περιοχών για $\Delta P_c \neq 0$.

α) $B=0$ $K_f=1$ β) $\Delta P_{c2}=0$ $K_f B=0.1$ γ) $B=0.1$ $K_f=1$



Έλεγχος $P - f$ για σύστημα n – περιοχών ελέγχου

Σε αυτήν την περίπτωση, για την περιοχή ν , το ΣΕΠ παίρνει τη μορφή:

$$\Sigma E\Pi_{\nu} = \Delta P_{tie,\nu} + B_{\nu} \Delta f_{\nu}$$

όπου

$$\Delta P_{tie,\nu} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{tie,\nu i}$$

και η εντολή ελέγχου του ρυθμιστή ταχύτητας παίρνει τη μορφή:

$$\Delta P_{c\nu} = -K_{I\nu} \int (\Sigma E\Pi_{\nu}) dt$$

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε $2n$ συνολικά παραμέτρους $K_{I\nu}$ και $B_{I\nu}$ για να επιλέξουμε.



Βέλτιστη ρύθμιση παραμέτρων

- **Κριτήριο ρύθμισης:** Για να μεθοδεύσουμε τον τρόπο εύρεσης των βέλτιστων παραμέτρων, χρησιμοποιούμε συνήθως **συναρτήσεις κόστους**, που επιλέγονται έτσι ώστε να παίρνουν μέγιστη ή ελάχιστη τιμή, όταν οι προς ρύθμιση παράμετροι παίρνουν βέλτιστη τιμή.

Ένα δημοφιλές κριτήριο κόστους είναι το **ολοκλήρωμα των τετραγώνων των σφαλμάτων**, δηλαδή:

$$C = \int_0^{\infty} (a_1 \sigma_1^2 + a_2 \sigma_2^2 + \dots + a_n \sigma_n^2) dt$$

όπου:

- $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ είναι τα διάφορα **σφάλματα** που το σύστημα ελέγχου σχεδιάστηκε για να τα μηδενίσει.
- a_1, a_2, \dots, a_n είναι οι **συντελεστές βάρους**, που προσδιορίζουν τη σχετική σπουδαιότητα, που δίνουμε στα διάφορα σφάλματα σ_n .

Για τη διευκρίνιση της μεθόδου θα εξετάσουμε το σύστημα με δύο ίδιες περιοχές ελέγχου (δηλαδή $K_{I1} = K_{I2} = K_I$, $B_1 = B_2 = B$) και θα επιλέξουμε την παρακάτω συνάρτηση κόστους:

$$C = \int_0^{\infty} (\Delta P_{tie}^2 + a \Delta f_1^2) dt$$





Μεθοδολογία για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων(1)

Θα ακολουθήσουμε τα εξής βήματα:

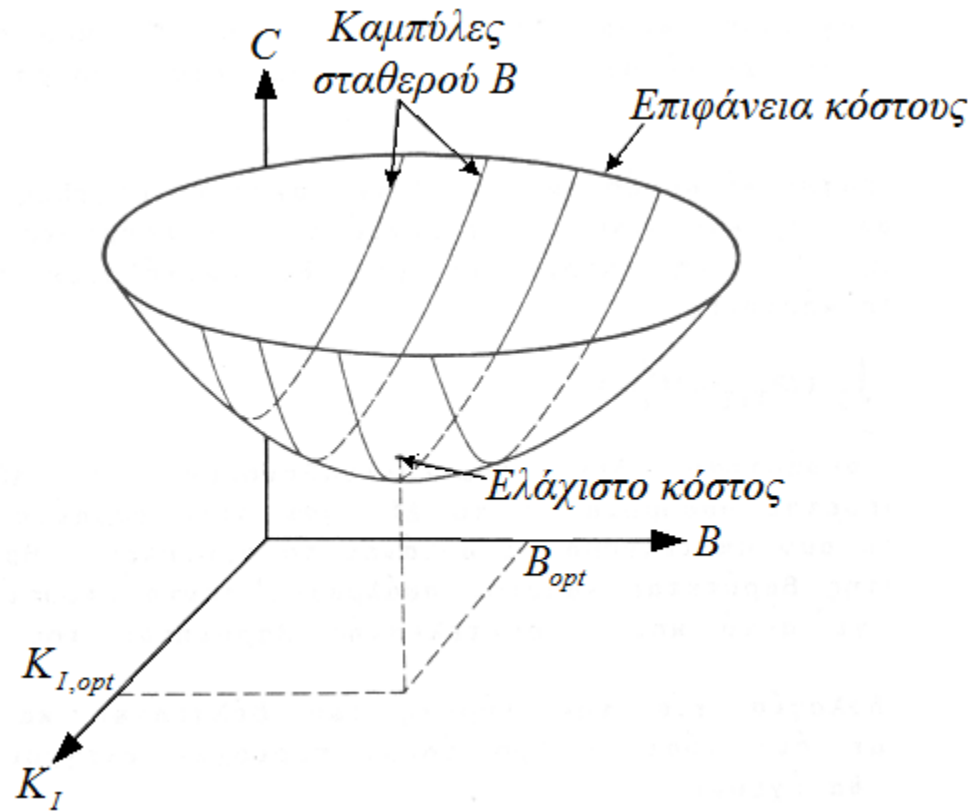
1. Θα αποφασίσουμε για ένα συντελεστή βαρύτητας a .
2. Θα διερευνήσουμε πως οι τιμές της συνάρτησης C εξαρτώνται από τα K_I και B , που θέλουμε να επιλέξουμε. Όταν δοκιμάσουμε όλους τους συνδυασμούς, επιλέγουμε εκείνες τις παραμέτρους που δίνουν ελάχιστη τιμή στο C .

Το τελευταίο βήμα σημαίνει ότι πρέπει να λύσουμε τις εξισώσεις μας ως προς ΔP_{tie} και Δf_1 , να αντικαταστήσουμε αυτές τις λύσεις στην εξίσωση κόστους και να υπολογίσουμε το ολοκλήρωμα, που θα είναι συνάρτηση των δύο παραμέτρων, δηλαδή:

$$C = C(K_I, B)$$

Αυτή η συνάρτηση δίνει μια σφαιροειδή **επιφάνεια κόστους** και το κατώτερο σημείο αυτής της επιφάνειας αντιστοιχεί στην τιμή των βέλτιστων παραμέτρων.

Μεθοδολογία για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων(2)



Επιφάνεια κόστους για τον υπολογισμό των βέλτιστων παραμέτρων



Βέλτιστος έλεγχος ΣΗΕ

- Οι **κλασσικές** μέθοδοι ελέγχου των ΣΗΕ, που περιεγράφησαν μέχρι τώρα, ακόμα και όταν χρησιμοποιούμε μεθόδους βέλτιστης επιλογής παραμέτρων δίνουν απόκριση του συστήματος ταλαντωτική.
- Στη συνέχεια θα περιγράψουμε σύντομα μια σύγχρονη στρατηγική ελέγχου ΣΗΕ, που ονομάζεται **βέλτιστος έλεγχος** και έχει τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά:
 - 1. Δεν χρειάζεται να γίνουν εκ των προτέρων υποθέσεις για τη δομή του συστήματος ελέγχου ή της στρατηγικής ελέγχου.
 - 2. Πρέπει να προεπιλέξουμε ένα βέλτιστο κριτήριο ελέγχου.
 - 3. Η θεωρία μπορεί να εφαρμοστεί με τη χρήση ψηφιακών υπολογιστών σε συστήματα οποιασδήποτε τάξης.
 - 4. Για την εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου χρειάζεται να περιγράψουμε το σύστημα με τη μέθοδο των **μεταβλητών κατάστασης**, όπως δείχνεται στη συνέχεια.



Μοντέλο μεταβλητών κατάστασης για σύστημα δύο περιοχών(1)

- Διευκρινίζουμε ότι οι μεταβλητές κατάστασης είναι το ελάχιστο σύνολο μεταβλητών που μπορούν να περιγράψουν τη μελλοντική κατάσταση του συστήματος, με την προϋπόθεση ότι γνωρίζουμε τις αρχικές τιμές τους, όλες τις μελλοντικές εισόδους ελέγχου και τις διαφορικές εξισώσεις, που συναρτήσει των μεταβλητών κατάστασης περιγράφουν το σύστημα.
- Για το σύστημα των δύο περιοχών ελέγχου παίρνουμε τις εξισώσεις:

$$\Delta F_1 = \frac{K_{p1}}{1+T_{p1}s} (\Delta P_{G1} - \Delta P_{D1} - \Delta P_{tie,1})$$

$$\Delta F_2 = \frac{K_{p2}}{1+T_{p2}s} (\Delta P_{G2} - \Delta P_{D2} - a_{12}\Delta P_{tie,1})$$

$$\Delta X_{e1} = \frac{K_{g1}}{1+T_{g1}s} \left(\Delta P_{c1} - \frac{1}{R_1} \Delta F_1 \right)$$

$$\Delta X_{e2} = \frac{K_{g2}}{1+T_{g2}s} \left(\Delta P_{c2} - \frac{1}{R_2} \Delta F_2 \right)$$

$$\Delta P_{G1} = \frac{K_{T1}}{1+T_{T1}s} \Delta X_{e1}$$

$$\Delta P_{G2} = \frac{K_{T2}}{1+T_{T2}s} \Delta X_{e2}$$

$$\Delta P_{tie,1} = \frac{2\pi T_{12}^0}{s} (\Delta F_1 - \Delta F_2)$$





Μοντέλο μεταβλητών κατάστασης για σύστημα δύο περιοχών(2)

Με αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace παίρνουμε :

$$\frac{d}{dt} \Delta F_1 = \frac{1}{T_{p1}} (-\Delta F_1 + K_{p1} \Delta P_{G1} - K_{p1} \Delta P_{D1} - K_{p1} \Delta P_{tie,1})$$

$$\frac{d}{dt} \Delta F_2 = \frac{1}{T_{p2}} (-\Delta F_2 + K_{p2} \Delta P_{G2} - K_{p2} \Delta P_{D2} - K_{p2} \Delta P_{tie,2})$$

$$\frac{d}{dt} \Delta X_{e1} = \frac{1}{T_{g1}} (-\Delta X_{e1} + K_{g1} \Delta P_{c1} - \frac{K_{g1}}{R_1} \Delta F_1)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta X_{e2} = \frac{1}{T_{g2}} (-\Delta X_{e2} + K_{g2} \Delta P_{c2} - \frac{K_{g2}}{R_2} \Delta F_2)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta P_{G1} = \frac{1}{T_{T1}} (-\Delta P_{G1} + \Delta X_{e1})$$

$$\frac{d}{dt} \Delta P_{G2} = \frac{1}{T_{T2}} (-\Delta P_{G2} + \Delta X_{e2})$$

$$\frac{d}{dt} \Delta P_{tie,1} = 2\pi T_{12}^0 (\Delta f_1 - \Delta f_2)$$

Ορίζουμε τώρα το διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης x , μεταβλητών ελέγχου u και μεταβλητών διαταραχής w , όπως παρακάτω:



Μοντέλο μεταβλητών κατάστασης για σύστημα δύο περιοχών(3)

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta x_{e1} \\ \Delta x_{e2} \\ \Delta P_{G1} \\ \Delta P_{G2} \\ \Delta P_{tie,1} \end{bmatrix} \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_{C1} \\ \Delta P_{C2} \end{bmatrix} \quad \mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_{D1} \\ \Delta P_{D2} \end{bmatrix}$$

Με τη χρήση αυτών των διανυσμάτων, οι εξισώσεις 5.75 γράφονται:

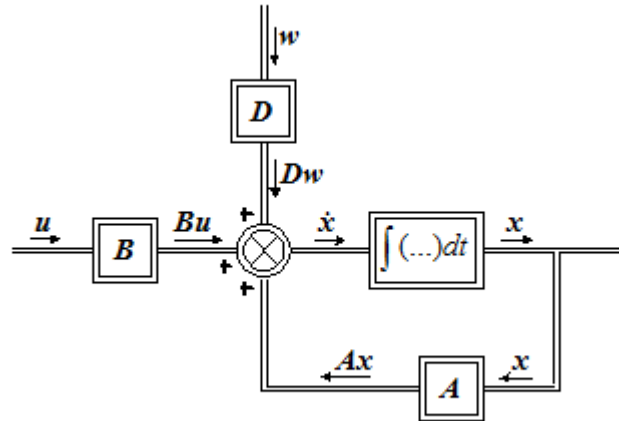
$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}\mathbf{w}$$

όπου η *μήτρα συστήματος* \mathbf{A} , η *μήτρα κατανομής εισόδων* \mathbf{B} , και η *μήτρα κατανομής διαταραχών* \mathbf{D} , ορίζονται από τις σχέσεις:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{p1}} & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{p1}}{T_{p1}} & 0 & -\frac{K_{p1}}{T_{p1}} \\ 0 & -\frac{1}{T_{p2}} & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{p2}}{T_{p2}} & -\frac{K_{p2}}{T_{p2}} \\ -\frac{K_{g1}}{R_1 T_{g1}} & 0 & -\frac{1}{T_{g1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_{g2}}{R_2 T_{g2}} & 0 & -\frac{1}{T_{g2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{T1}} & 0 & -\frac{1}{T_{T1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{T2}} & 0 & -\frac{1}{T_{T2}} & 0 \\ 2\pi T_{12}^0 & -2\pi T_{12}^0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{K_{g1}}{T_{g1}} & 0 \\ 0 & \frac{K_{g2}}{T_{g2}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{p1}}{T_{p1}} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{p2}}{T_{p2}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$



Μοντέλο μεταβλητών κατάστασης για σύστημα δύο περιοχών(4)



Σχηματική παράσταση του μοντέλου κατάστασης.

Όμως για να έχει ελάχιστο η συνάρτηση κόστους που χρησιμοποιούμε στο βέλτιστο έλεγχο, πρέπει οι μεταβλητές ελέγχου και κατάστασης να είναι μηδέν στη μόνιμη κατάσταση και αυτό δεν το επιτρέπει ο όρος διαταραχής Dw .

Για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα αντικαθιστούμε :

$$x = x' + x_{\mu\omicron\nu}$$

$$u = u' + u_{\mu\omicron\nu}$$

όπου με x' και u' παριστάνουμε τις μεταβατικές τιμές των μεταβλητών που μηδενίζονται στη μόνιμη κατάσταση για ευσταθές σύστημα

Μοντέλο μεταβλητών κατάστασης για σύστημα δύο περιοχών(5)

Για μια σταθερή διαταραχή w , επειδή στη μόνιμη κατάσταση $\dot{x} = 0$ παίρνουμε:

$$0 = Ax_{\mu\omicron\nu} + Bu_{\mu\omicron\nu} + Dw$$

Αν χρησιμοποιήσουμε αυτήν την εξίσωση, παίρνουμε:

$$\dot{x}'A(x' + x_{\mu\omicron\nu}) + B(u' + u_{\mu\omicron\nu}) + Dw \quad \text{ή}$$
$$\dot{x}' = Ax' + Bu'$$

Τώρα οι νέες μεταβλητές κατάστασης και ελέγχου είναι x' και u' αντίστοιχα και αυτή η εξίσωση είναι το δυναμικό **μοντέλο μεταβλητών κατάστασης**, που χρησιμοποιείται τελικά.

Αυτό το δυναμικό μοντέλο του συστήματος έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Η σύγχρονη θεωρία ελέγχου χρησιμοποιεί αυτήν την **τυπική** μορφή εξισώσεων.
- Αυτή η μορφή της εξίσωσης προσφέρεται για την επίλυση των εξισώσεων με υπολογιστή. Αυτό είναι σημαντικό για μεγάλα συστήματα, όπου η έλλειψη οργάνωσης εύκολα καταλήγει σε σφάλματα.



Βέλτιστη στρατηγική ελέγχου(1)

Στο κριτήριο βέλτιστου ελέγχου θα συμπεριλάβουμε και τις μεταβολές των σημάτων ελέγχου, ώστε έμμεσα να περιορίσουμε τα σήματα ελέγχου μέσα στις φυσικές δυνατότητες των συνιστωσών του συστήματος.

Αν στο κριτήριο ελέγχου θέλουμε να συμπεριλάβουμε όλες τις n μεταβλητές κατάστασης και τις m μεταβλητές ελέγχου, το κριτήριο ελέγχου γράφεται:

$$J = \int_0^{\infty} (a_1 x'_1{}^2 + \dots + a_n x'_n{}^2 + \beta_1 u'_1{}^2 + \dots + \beta_m u'_m{}^2) dt$$

ή γραμμένο με τη χρήση μητρών:

$$J = \int_0^{\infty} (x'^T Q x' + u'^T R u') dt$$

όπου Q και R οι διαγώνιες μήτρες των συντελεστών βαρύτητας a_i και β_i .

Για τον προσδιορισμό των Q και R , παρόλο που έχουν διατυπωθεί κάποια κριτήρια, δεν υπάρχει καθορισμένη μέθοδος υπολογισμού τους.





Βέλτιστη στρατηγική ελέγχου(2)

Αν ευρεθεί ένα σύστημα ελέγχου που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση J , ο βρόχος ελέγχου που θα προκύψει θα είναι **βέλτιστα ευσταθής**.

Η εργασία που πρέπει να κάνει ο βέλτιστος έλεγχος είναι :

Το σύστημα αρχικά βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση και ξαφνικά διαταράσσεται από ένα σύνολο βηματικών διαταραχών. Μετά από μια αναπόφευκτη μεταβατική περίοδο, θέλουμε το σύστημα να φτάσει σε μια νέα επιθυμητή μόνιμη κατάσταση (για παράδειγμα την αρχική). Θέλουμε να βρούμε ένα σύνολο σημάτων ελέγχου u' , που όχι μόνο θα οδηγήσει το σύστημα στη νέα επιθυμητή κατάσταση, αλλά να το κάνει αυτό ενώ ταυτόχρονα θα ελαχιστοποιεί το κριτήριο ελέγχου J , που έχει επιλεγεί.

Βέλτιστη στρατηγική ελέγχου(3)

Αν το μοντέλο του συστήματος είναι γραμμικό και αν το κριτήριο ελέγχου είναι τετραγωνικό, τότε οι βέλτιστες τιμές των σημάτων ελέγχου κατασκευάζονται από το γραμμικό συνδυασμό όλων των μεταβλητών κατάστασης, δηλαδή:

$$u' = Kx'$$

όπου η μήτρα κέρδους K είναι μια $m * n$ μήτρα σταθερών, που υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$K = -R^{-1}B^T S$$

Η μήτρα S υπολογίζεται από τη λύση της εξίσωσης Riccati (ένα σύνολο γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων), που είναι η ακόλουθη:

$$A^T S + SA - SBR^{-1}B^T S + Q = 0$$

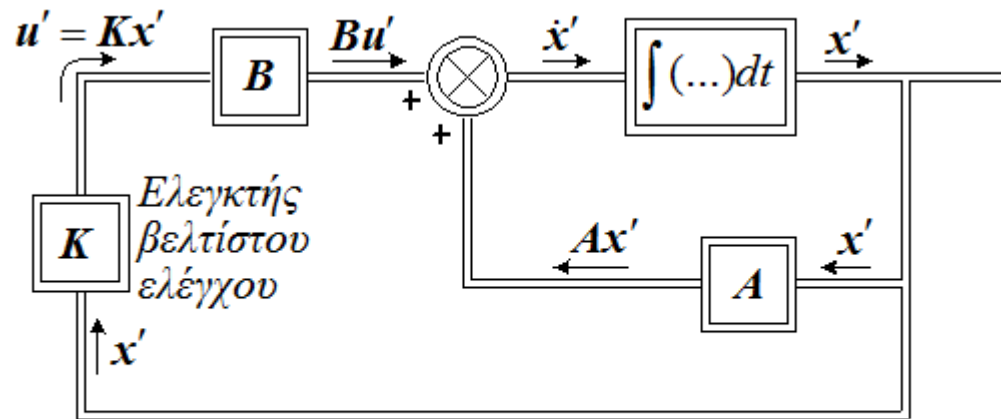
Η εξίσωση του συστήματος κλειστού βρόχου ορίζεται από τη σχέση:

$$\dot{x}' = (A + BK)x'$$



Βέλτιστη στρατηγική ελέγχου(4)

- Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του βέλτιστου ελέγχου είναι:
- 1. Για να εφαρμόσουμε τη βέλτιστη στρατηγική ελέγχου χρειάζεται να μετράμε όλες τις μεταβλητές κατάστασης.
- 2. Τα διάφορα στοιχεία της μήτρας \mathbf{K} παριστούν τους **συντελεστές βαρύτητας**, που τα μέτρα τους καθορίζουν τη σημασία που έχει κάθε μεταβλητή κατάστασης στον καθορισμό του σήματος ελέγχου.
- 3. Η σχηματική παράσταση του συστήματος βέλτιστου ελέγχου είναι :

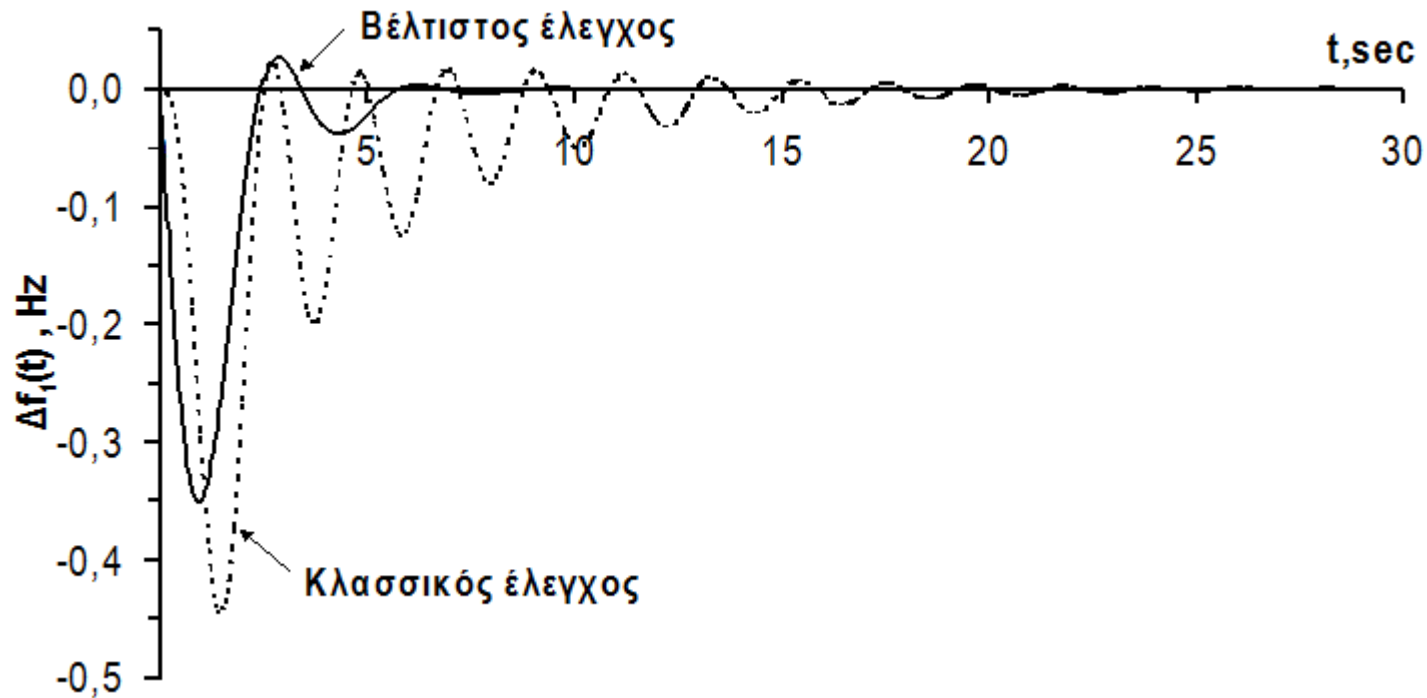


Σχηματική παράσταση συστήματος με βέλτιστο έλεγχο.



Βέλτιστη στρατηγική ελέγχου(5)

Τη στρατηγική του βέλτιστου ελέγχου την εφαρμόσαμε στο σύστημα των δύο ίδιων περιοχών.



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.

