

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ



ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

— ΑΣΠΑΙΤΕ —

**ΤΜΗΜΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



— ΑΣΠΑΙΤΕ —

**ΤΜΗΜΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Καταστατικές εξισώσεις και σχεδίαση ελέγχου τύπου
«PI» Ενεργού Ισχύος/Συχνότητας ('P-f') σε Σ.Η.Ε. με
δύο περιοχές ελέγχου και διασυνδετική γραμμή.**

Πτυχιακή Εργασία

Φοιτητής: ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΚΑΛΛΙΟΠΗ

ΑΜ: 790

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΕΚΠ/ΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Δρ. Δρίτσας Λεωνίδα

Ημερομηνία: 30/06/2016



— ΑΣΠΑΙΤΕ —

**ΤΜΗΜΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**State Equations and «PI» control design for Active
Power / Frequency ('P-f') in Power System with two
control areas and interconnecting line.**

Degree Thesis

Student(s): ANTONIOU KALLIOPI

Registration Number: 790

Degree Option: Electrical Engineering Educators

Dr. Dritsas Leonidas

Date: 30/06/2016

.....:

ΑΝΤΩΝΙΟΥ Α. ΚΑΛΛΙΟΠΗ

Copyright © Αντωνίου Καλλιόπη , 30/06/2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της ΑΣΠΑΙΤΕ.



— ΑΣΠΑΙΤΕ —

**ΤΜΗΜΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Καταστατικές εξισώσεις και σχεδίαση ελέγχου τύπου
«PI» Ενεργού Ισχύος/Συχνότητας ('P-f') σε Σ.Η.Ε. με
δύο περιοχές ελέγχου και διασυνδετική γραμμή**

Πτυχιακή Εργασία

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Δρίτσας Λεωνίδα
(Θέση – Τίτλος Επιβλέποντος Καθηγητή)

.....
Εξεταστής
(Όνομα)
(Θέση / Τίτλος)

.....
Εξεταστής
(Όνομα)
(Θέση / Τίτλος)

.....
Εξεταστής
(Όνομα)
(Θέση / Τίτλος)

Ημερομηνία: 30/06/2016

Λέξεις – κλειδιά

Βρόχος Ενεργού Ισχύος/Συχνότητας 'P-f', Σύστημα δύο περιοχών ελέγχου, Διασυνδεδετική γραμμή, Σφάλμα ελέγχου περιοχής (Σ.Ε.Π.), Σχεδιασμός αποκεντρωμένου πολυμεταβλητού ελεγκτή «PI»

Keywords

Active Power/Frequency 'P-f' Loop, System with two control areas, interconnecting "Tie" line, Area Control Error, Design decentralized multivariable "PI" controller

ΣΥΝΟΨΗ

Στη παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζουμε την μοντελοποίηση του βρόχου ελέγχου «Ενεργού Ισχύος – Συχνότητας» (“P-f” Active Power & Frequency control) σε Σ.Η.Ε με δύο Περιοχές Ελέγχου διασυνδεδεμένες με διασυνδεδετική γραμμή μεταφοράς. Στη συνέχεια ως δεύτερο βήμα μετά την κατάστρωση των καταστατικών εξισώσεων θα σχεδιασθεί Νόμος Ελέγχου της μορφής P-I και θα παρουσιασθούν αποτελέσματα προσομοίωσης τόσο του «ανοιχτού» όσο και του «κλειστού» συστήματος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολούμαστε κυρίως με την καταστροφή των καταστατικών εξισώσεων και την σχεδίαση αναλογικού ολοκληρωτικού ελεγκτή τύπου <PI> για τον έλεγχο ενεργού ισχύος- συχνότητας 'P-f' σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με δύο περιοχές ελέγχου και μία διασυνδεδετική γραμμή. Ο αυτοματος έλεγχος των Σ.Η.Ε. είναι σημαντικός για να διατηρεί μία συνεχή ισορροπία μεταξύ της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και του μεταβλητού ηλεκτρικού φορτίου.

Σκοπός του ελέγχου μεταξύ πραγματικής ισχύος και συχνότητας είναι να ελέγχει τη συχνότητα και την ισχύ στις διασυνδεδετικές γραμμές. Σε αυτό βοηθάνε μαθηματικά μοντέλα καθώς και σχηματικές παραστάσεις που διακρίνουν κάθε μία περιοχή ξεχωριστά, δύο περιοχές μαζί συνδεδεμένες με μία γραμμή καθώς και ύπαρξη βέλτιστου ελέγχου με τη δημιουργία ενός ελεγκτή.

Το πρώτο Κεφάλαιο αποτελεί μία σύντομη αναφορά σε βασικές γνώσεις σε μαθηματικό και γνωστικό υπόβαθρο ,χρήσιμες προς τον αναγνώστη ώστε να βοηθηθεί για την ορθή εξέλιξη κα παρακολούθηση της εργασίας.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή σε κάποιες βασικές έννοιες και στα μαθηματικά μοντέλα των εμπλεκόμενων συνιστωσών (στροβίλος, ελεγκτής στροφών, περιοχή ελέγχου, διασυνδεδετική γραμμή). Ακολουθως γίνεται ανάλυση ευσταθειας και επιδοσεων (ι) μίας περιοχής και (ιι) δύο περιοχών συνδεδεμένων με μία διασυνδεδετική γραμμή.

Στο τρίτο Κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά ο σχεδιασμός του ελεγκτή PI για το συστημα με τις δύο περιοχές. Αρχικά γίνεται ρύθμιση κάποιων σημαντικών παραμέτρων του ελεγκτή και στη συνέχεια γίνεται πειραματα προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται μας δείχνουν οτι η ρυθμιση συχνοτητας που επιτυγχανεται με PI ελεγκτή είναι καλύτερη απο αυτα που λαμβανονται με ελεγκτες τυπου P ή I .

Στο τέταρτο και τελευταίο Κεφάλαιο γίνεται μια ανακεφαλαιωση και τιθενται οι στοχοι για μελλοντική έρευνα.

ABSTRACT

In this thesis we start by formulating the state equations of power systems with two Control Areas and an interconnecting “Tie” transmission line. Our objective is to analyze the stability and performance of the “open loop” system and then to design a feedback controller (decentralized “PI” architecture) in order to improve its performance (steady state errors and settling times). Extensive simulation results prove the success of our proposed methodology.

SUMMARY

In this thesis we deal mainly with the design Proportional-Integral type controller for the active power/ frequency (P-f) subsystem of “two control areas Electrical Power system”. The control of power systems is important to maintain a constant balance between electricity generation and variable electric load so that the frequency remains constant while respecting the limits of the Tie Line.

The first chapter is a brief presentation of all basic concepts needed and background knowledge useful for the problem statement at hand.

The second chapter focuses on the mathematical model of all the components (Power Area, Speed Governor, Turbine, Tie Line) and the system stability and performance analysis starting with one Area and then investigating the interconnection of the two Areas via a “Tie” line.

The third chapter presents the design of a decentralized “PI” controller for both areas. Tuning of the PI Gains is based on extensive simulations . The derived results show why it is indeed preferable to use a PI controller instead of simply P or I.

In the fourth and final chapter we present a synopsis of our work along with issues for future research.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΒΑΣΙΚΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ

- 1.1.Εισαγωγή-Στόχοι Κεφαλαίου
- 1.2.Διατύπωση Προβλήματος
- 1.3.Δομή Δικτύου Ενέργειας
- 1.4. Ηλεκτρικό Δίκτυο
- 1.5.Βασικές Αρχές Ελέγχου Ενεργού και Άεργου Ισχύος
- 1.6.Είδη Ευστάθειας
- 1.7.Περιγραφή Ελέγχου Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας
- 1.8.Δυναμική Αλληλεπίδραση των Βρόγχων P-F και Q-V

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΥΟ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

- 2.1 Μεθοδολογία Μοντελοποίησης
- 2.2 Μοντέλο Ρυθμιστή Ταχύτητας
- 2.3 Μαθηματικό Μοντέλο του Στροβίλου
 - 2.3.1. Στρόβιλος Χωρίς Αναθέρμανση
 - 2.3.2. Στρόβιλος Με Αναθέρμανση
- 2.4 Σύστημα μίας περιοχής ελέγχου
- 2.5 Εντολή Ελέγχου $\Delta P_c = 0$
- 2.6 Εντολή Ελέγχου $\Delta P_c \neq 0$
- 2.7 Σύστημα δύο περιοχών
- 2.8 Μοντέλο Διασυνδεδετικής Γραμμής
- 2.9 Μόνιμη κατάσταση Συστήματος δύο περιοχών με $\Delta P_{c1} = \Delta P_{c2} = 0$
- 2.10 Προδιαγραφές Ελέγχου
- 2.11 Μοντέλο μεταβλητών κατάστασης για Σύστημα δύο περιοχών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΟΛΥΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΕΛΕΓΚΤΗ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΥΟ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

- 3.1 Εισαγωγή-Στόχοι Κεφαλαίου
- 3.2 Εισαγωγή στα ΣΑΕ
 - 3.2.1. Συστήματα Ανοιχτού Βρόχου
 - 3.2.2. Συστήματα Κλειστού Βρόχου
- 3.3 Γιατί χρειάζεται ΣΑΕ κλειστού βρόχου
- 3.4 Θεωρητικό υπόβαθρο σχεδιασμού ελεγκτών με ολοκληρωτική δράση (PI) στον χώρο κατάστασης
 - 3.4.1. Αναλογικός Ελεγκτής (P)
 - 3.4.2. Ολοκληρωτικός Ελεγκτής (I)
 - 3.4.3. Αναλογικός-Ολοκληρωτικός Ελεγκτής (PI)
- 3.5 Σύστημα κλειστού βρόχου με ολοκληρωτική δράση
- 3.6 Ρύθμιση παραμέτρων ελεγκτή-Τελικός Σχεδιασμός
- 3.7 Προτεινόμενοι (αποκεντρωμένοι) PI ελεγκτές
- 3.8 Σχεδιασμός Ελεγκτή Κλειστού Βρόχου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

- 4.1 Συμπεράσματα
- 4.2 Μελλοντική Έρευνα

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΚΩΔΙΚΕΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB

A1. Κώδικας Κεφαλαίου 2

Ενότητα 2.5

A2. Κώδικας Κεφαλαίου 3

Ενότητα 3.6

A3. Κώδικας Κεφαλαίου 3

Ενότητα 3.7

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την συγγραφή της παρούσας πτυχιακής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου , Δρ. Δρίτσα Λεωνίδα ,ο οποίος με καθοδήγησε ορθά και με στήριξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας, συμβάλλοντας στο έπακρο στην επιτυχή της ολοκλήρωση, μεταλαμπαδεύοντάς μου τις γνώσεις του. Εύχομαι να συνεχίσει το σπουδαίο διδακτικό και ερευνητικό του έργο.

Θερμές ευχαριστίες αρμόζουν επίσης και στους καθηγητές της επιτροπής Κα. Βασιλάκη Μαρίνα και Κ. Χατζαράκη Γεώργιο ,οι οποίοι αποτέλεσαν σημαντικοί καθηγητές καθ' όλη τη διάρκεια της πενταετούς φοίτησής μου στην Ανώτατη Σχολή Παιδαγωγικής και Τεχνολογικής Εκπαίδευσης (Α.Σ.ΠΑΙ.Τ.Ε.) καθώς με τις γνώσεις τους διεύρυναν τους ορίζοντές μου ως προς τη σκοπιά της ηλεκτρικής εφαρμοσμένης μηχανικής, δηλαδή της επιστήμης του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού. Εύχομαι στον καθένα ξεχωριστά να συνεχίσει το σπουδαίο διδακτικό και ερευνητικό του έργο.

Ολοκληρώνοντας τις ευχαριστίες, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την εμπιστοσύνη, στήριξη και ενθάρρυνση που μου έδειξαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και των αποφάσεών μου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι μέθοδοι και οι συσκευές για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας βελτιώνονται με ραγδαίους ρυθμούς σε απόδοση και αξιοπιστία.

Η λειτουργία των ΣΗΕ σε μορφή διασυνδεδεμένων δικτύων προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Ο έλεγχος αυτόματης παραγωγής και η βέλτιστη οικονομική λειτουργία είναι δύο βασικές λειτουργίες, που σχετίζονται με τον έλεγχο παραγωγής σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο έλεγχος της πραγματικής ισχύος-συχνότητας 'P-f' είναι να ελέγχει τη συχνότητα και την ισχύ στις διασυνδετικές γραμμές. Φλέγον ζήτημα της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η μελέτη του αποκεντρωμένου πολυμεταβλητού ελεγκτή «PI».

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΒΑΣΙΚΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ

1.1.Εισαγωγή-Στόχοι Κεφαλαίου

Το παρόν κεφάλαιο έχει κύριο στόχο να δημιουργήσει το απαραίτητο μαθηματικό και γνωστικό υπόβαθρο ώστε να γίνονται κατανοητά σε μεγαλύτερο βαθμό όσα ακολουθήσουν σε επόμενες ενότητες.

1.2.Διατύπωση Προβλήματος

Όπως είναι γνωστό 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. Επιπλέον, επιδιώκεται το κόστος παραγωγής να είναι ελάχιστο. Ο έλεγχος αυτόματης παραγωγής και η βέλτιστη οικονομική λειτουργία είναι δύο βασικές λειτουργίες, που σχετίζονται με τον έλεγχο παραγωγής σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός της μελέτης είναι η ανάπτυξη συστηματικής διαδικασίας μοντελοποίησης βρόχου P-f ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Ο σχεδιασμός δυναμικών ελεγκτών για τη ρύθμιση της ροής ενεργού ισχύος και της ηλεκτρικής συχνότητας. Ως αποτέλεσμα να είναι η εξαγωγή γραμμικού χρονικά αμετάβλητου μοντέλου και ο έλεγχος δικτύου με χρήση ελεγκτή PI.

1.3.Δομή Δικτύου Ενέργειας

Ο έλεγχος αυτόματης παραγωγής και η βέλτιστη οικονομική λειτουργία είναι δύο βασικές λειτουργίες, που σχετίζονται με τον έλεγχο παραγωγής σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως γειτονικά ηλεκτρικά συστήματα διασυνδέονται με μια ή περισσότερες ηλεκτρικές γραμμές, που ονομάζονται **διασυνδετικές γραμμές (ties lines)**.

Περιοχές έλεγχου:

- Ονομαστική τιμή ηλεκτρικής συχνότητας

$$f_i = f_0, \forall i = 1, 2, \dots, N$$

- Μεταβολές ηλεκτρικής συχνότητας

$$\Delta f_{Gij}(t) = \Delta f_{it}, \forall j = 1, 2, \dots, p_i$$

- Τάσεις ζυγών

$$u_i(t) = \sqrt{2} (|V_i^0| + \Delta |V_i|(t)) \sin(\omega^0 t + \delta i^0 + \Delta \delta i(t))$$

Διασυνδετικές γραμμές:

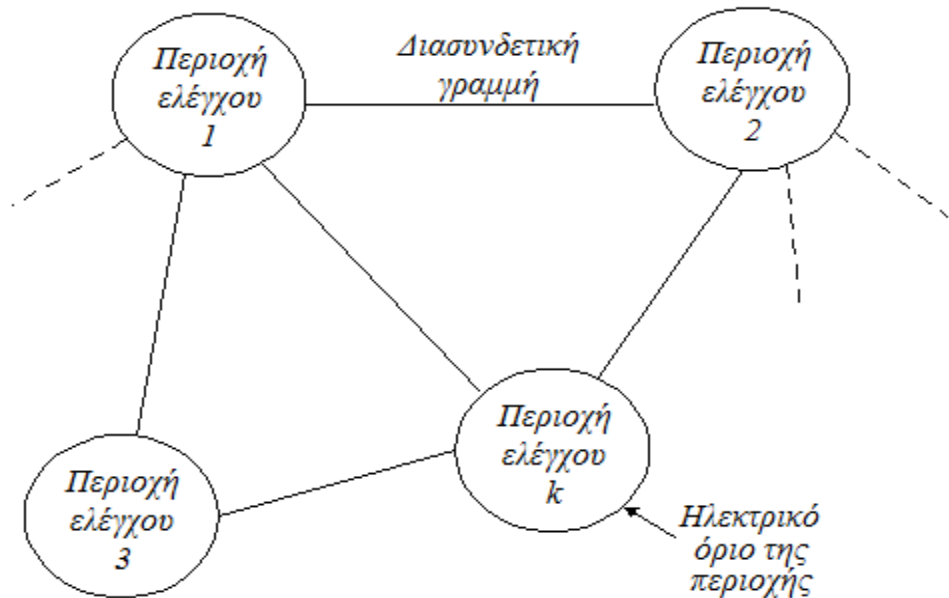
- Ονομαστική τιμή μεταφερόμενης ενεργού ισχύος

$$P_{tie,i} = P_{tie,i}^0, \forall i = 1, 2, \dots, N$$

- Συνθήκη ασθενών διασυνδετικών γραμμών

$$P_{tie,i} \ll P_{Bi}, \forall i = 1, 2, \dots, N \quad \text{και } P_{Bi} \text{ είναι η ονομαστική ισχύς [MW] της περιοχής } i$$

$$\text{Αποδεικνύεται ότι : } \Delta f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Delta\delta_i(t)}{dt} \quad (1.1)$$



Διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά συστήματα.

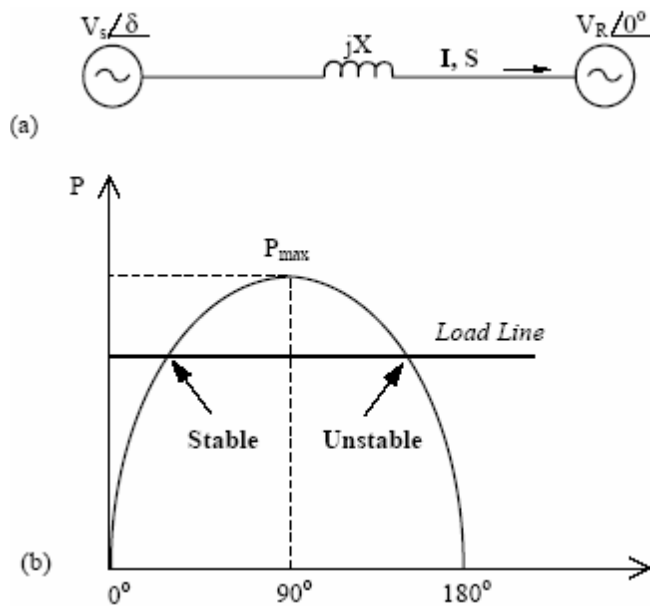
Σχ. 1.1 Διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά συστήματα

1.4. Ηλεκτρικό Δίκτυο

Το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους παραγωγούς στους καταναλωτές. Συνίσταται από τρία μέρη: **Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας** : στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται η παραγωγή με χρήση ορυκτών καυσίμων (άνθρακα, φυσικού αερίου, βιομάζας) ή τον αέρα ,το νερό ,τα πυρηνικά καύσιμα και τον ήλιο. **Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας** : οι γραμμές μεταφοράς μεταφέρουν την ενέργεια από τα εργοστάσια στα κέντρα ζήτησης. **Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας** : η ενέργεια φτάνει στους υποσταθμούς ,γίνεται υποβιβασμός της τάσης με τη βοήθεια μετασχηματιστών και μεταφέρεται μέσω των γραμμών διανομής , με περαιτέρω υποβιβασμό τάσης ,γίνεται κατάλληλη για χρήση από οικιακά δίκτυα.

1.5.Βασικές Αρχές Ελέγχου Ενεργού και Άεργου Ισχύος

Η ενεργός και άεργος ισχύς σε μια γραμμή μεταφοράς εξαρτάται από τα μέτρα των τάσεων αναχώρησης και άφιξης και από τις αντίστοιχες φασικές τους γωνίες τους καθώς και από την επαγωγική αντίδραση της γραμμής. Για να γίνει πιο ευκολότερη η κατανόηση των βασικών εννοιών περί της ροής ισχύος, χρησιμοποιούμε το απλό μοντέλο των δύο μηχανών, το οποίο φαίνεται στο σχήμα 1.2



Σχ. 1.2 Ροή Ισχύος (a) Μοντέλο δύο ζυγών (b) Καμπύλη ενεργού ισχύος-γωνίας

1.6. Είδη Ευστάθειας

Δυναμική ευστάθεια είναι η ικανότητα που έχει το Σ.Η.Ε να παραμένει συγχρονισμένο κάτω από μικρές διαταραχές, ενώ **μεταβατική ευστάθεια** είναι η ικανότητα που διαθέτει το Σ.Η.Ε να παραμένει συγχρονισμένο όταν υπόκειται σε διάφορες μεταβατικές διαταραχές, όπως σφάλματα (βραχυκυκλώματα, απώλεια γραμμών μεταφοράς) ή απώλειες στην παραγωγή. Μια τυπική ισχύ μεταφοράς 33 αντιστοιχεί σε γωνίες ισχύος κάτω των 30° . Για να είμαστε σίγουροι για την μόνιμη ευσταθή κατάσταση του δρομέα, οι τιμές των γωνιών στα διάφορα σημεία του συστήματος μεταφοράς, συνήθως είναι κάτω των 45° .

1.7. Περιγραφή Ελέγχου Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται από πολλές μονάδες παραγωγής και φορτία, ενώ ολοένα αυξάνουν σε μέγεθος και πολυπλοκότητα. Η συνολική ζήτηση της ισχύος που καλούνται να καλύψουν μεταβάλλεται συνεχώς κατά την διάρκεια της ημέρας. Οι μεγάλες αργές μεταβολές στη ζήτηση της ισχύος ικανοποιούνται κεντρικά, αποφασίζοντας σε τακτά χρονικά διαστήματα κατάλληλη ένταξη μονάδων. Σε πιο μικρά διαστήματα η βέλτιστη οικονομική λειτουργία προσδιορίζει την πραγματική έξοδο ισχύος η οποία απαιτείται από κάθε μια από τις γεννήτριες (έλεγχος τρίτου επιπέδου-tertiary control). Οι άμεσες αλλαγές φορτίου αντιμετωπίζονται με τον Αυτόματο Έλεγχο της Παραγωγής (ΑΕΠ) έτσι ώστε να διατηρείται:

- η συχνότητα στην προκαθορισμένη τιμή (έλεγχος συχνότητας)
- η ανταλλαγή ενεργού ισχύος με γειτονικές περιοχές ελέγχου στις γραμμές διασύνδεσης σε προκαθορισμένες τιμές (tie-line control)

- ο καταμερισμός ισχύος ανάμεσα στις γεννήτριες παραγωγής κάθε περιοχής ελέγχου. Ο έλεγχος αυτός είναι γνωστός ως έλεγχος συχνότητας-φορτίου.

1.8.Δυναμική Αλληλεπίδραση των Βρόχων P-f και Q-V

Για μικρές μεταβολές υπάρχει μικρή μόνο αλληλεπίδραση μεταξύ των βρόχων P-f και Q-V. Κατά τη διάρκεια όμως μεγάλων μεταβολών παρατηρείται σημαντική σύζευξη μεταξύ των δύο βρόχων 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 $\frac{\partial p_D}{\partial |V|} \neq 0$
2. Καθώς μεταβάλλεται το μέτρο της τάσης του ζυγού, μεταβάλλονται και οι συντελεστές συγχρονισμού των γραμμών, που συνδέονται στο ζυγό και άρα μεταβάλλεται και η πραγματική ισχύς που μεταφέρουν.

Μία δυναμική μεταβολή στο βρόχο Q-V επηρεάζει την ισορροπία πραγματικής ισχύος στο σύστημα, ενώ μια μεταβολή στο βρόχο P-f επηρεάζει πολύ λίγο την ισορροπία άεργου ισχύος στο σύστημα και τις τάσεις. Γενικά όμως ο βρόχος Q-V είναι πολύ ταχύτερος από το βρόχο P-f, λόγω των μηχανικών σταθερών αδράνειας που περιλαμβάνει ο βρόχος P-f. Υποθέτουμε ότι η μεταβατική περίοδος του βρόχου Q-V έχει ουσιαστικά περάσει πριν αρχίσει τη δράση του ο βρόχος P-f και επομένως μπορούμε να αμελήσουμε τη σύζευξη μεταξύ των δύο βρόχων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΥΟ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

2.1. Μεθοδολογία Μοντελοποίησης

Θεωρούμε **αποξυγμένους** τους βρόχους $P-f$ (μηχανικός) και $Q-V$ (ηλεκτρικός), καθώς για τις αντίστοιχες σταθερές χρόνου ισχύει

$$\tau_{mech} \gg \tau_{electr}$$

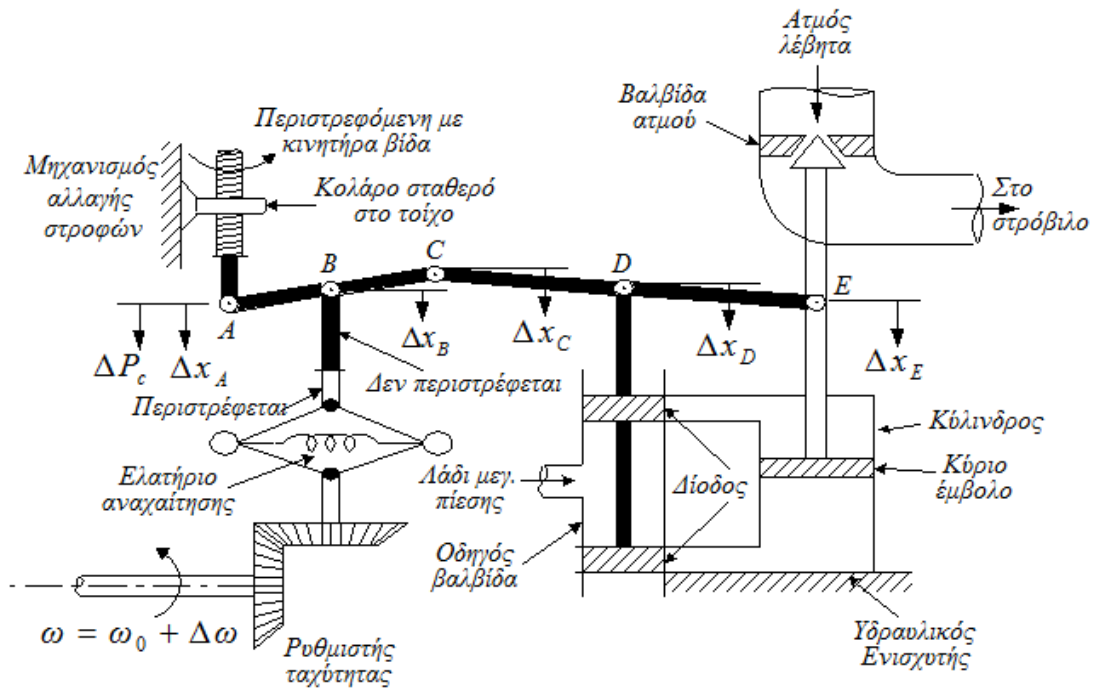
Θεωρούμε αμελητέες απώλειες ενεργού ισχύος επί της σύγχρονης γεννήτριας και των διασυνδετικών γραμμών ή ισοδύναμα θεωρούμε τους αντίστοιχους βαθμούς απόδοσης ίσους με τη **μονάδα**

$$\eta_{Gi}=1, \forall i=1,2,\dots,N$$
$$\eta_{tie,ij}=1, \forall i,j=1,2,\dots,N \Rightarrow P_{tie,ij} = -P_{tie,ji}$$

Αγνοούμε την ηλεκτρική δυναμική συμπεριφορά της μηχανής
Θεωρούμε ποσότητες ενεργού ισχύος σε [MW]

2.2. Μοντέλο Ρυθμιστή Ταχύτητας

Έχουμε συνεχή μεταβολή του φορτίου ενός συστήματος, η ισχύς εξόδου μια γεννήτριας στο σύστημα πρέπει να ακολουθεί αυτές τις μεταβολές, για να έχουμε ισορροπία ισχύων. Ο έλεγχος στην ισχύ εξόδου των γεννητριών γίνεται με έλεγχο της μηχανικής ισχύος στην είσοδό τους, που τροφοδοτείται στη γεννήτρια από αμοστρόβιλο ή υδροστρόβιλο ή πετρελαιοκινητήρα, οπότε αντίστοιχα για τον έλεγχο της μηχανικής ισχύος ρυθμίζουμε τη ροή ατμού ή νερού ή πετρελαίου. Η συσκευή που ελέγχει τη ροή ατμού στον αμοστρόβιλο ονομάζεται **ρυθμιστής ταχύτητας** (speed governor). Ο ρυθμιστής ταχύτητας ανακαλύπτει τις μεταβολές της γωνιακής ταχύτητας του στροβίλου και τις χρησιμοποιεί για να ρυθμίσει τη βαλβίδα τροφοδοσίας ατμού στον αμοστρόβιλο. Θα υπολογίσουμε το δυναμικό μοντέλο αυτής της συσκευής και αργότερα θα το ενώσουμε με το δυναμικό μοντέλο του στροβίλου και της γεννήτριας για να δημιουργήσουμε το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος που καθορίζει την ισχύ εξόδου της γεννήτριας και τη συχνότητα. Στο Σχ.2.1 φαίνεται η σχηματική παράσταση του ρυθμιστή ταχύτητας που χρησιμοποιεί το φυγοκεντρικό ρυθμιστή του Watt.



Σχ. 2.1 Σχηματική παράσταση του ρυθμιστή ταχύτητας

Θα αναπτύξουμε το γραμμικό μοντέλο του ρυθμιστή ταχύτητας κοντά σε ένα ονομαστικό σημείο λειτουργίας. Όλες οι μεταβολές $\Delta\omega, \Delta x_A, \dots, \Delta x_E$, υποθέτουμε ότι είναι θετικές στις διευθύνσεις που δείχνονται. Επειδή τα σημεία A, B και C καθορίζεται από τις θέσεις των A και B. Έτσι για μικρές μεταβολές υπάρχουν θετικές σταθερές ώστε να ισχύουν οι γραμμικές σχέσεις:

Προσεγγιστικές γραμμικές δυναμικές εξισώσεις:

$$\Delta x_C = K_B \Delta x_B - K_A \Delta x_A = K_1 \Delta f - K_2 \Delta P_c \quad (2.1)$$

Η γεωμετρική σταθερά K_B περιλαμβάνεται στο K_1 μαζί με την ευαισθησία μεταβολής του ρυθμιστή Watt, $\frac{\partial x_B}{\partial f}$. Η γεωμετρική σταθερά K_A περιλαμβάνεται στη σταθερά K_2 μαζί με το συντελεστή κλίμακας $\frac{\partial x_A}{\partial P_c}$.

$$\Delta x_D = K_3 \Delta x_C + K_4 \Delta x_E \quad (2.2)$$

Όπου K_3 και K_4 είναι σταθερές, που εξαρτώνται από την απόσταση των σημείων C,D και E.

$$\frac{d\Delta x_E}{dt} = -K_5 \Delta x_D \quad (2.3)$$

Όπου η θετική σταθερά K_5 εξαρτάται από τη γεωμετρία του υδραυλικού ενισχυτή και την πίεση του λαδιού.

Συνάρτηση Μεταφοράς:

$$\begin{aligned} \Delta X_E(s) &= G_g(s)U(s) = \frac{K_2 K_3 / K_4}{1+s/K_4 K_5} \left(\Delta P_c(s) - \frac{K_1}{K_2} \Delta F(s) \right) = \frac{K_g}{1+T_g s} \left(\Delta P_c(s) - \right. \\ &\left. \frac{1}{R} \Delta F(s) \right) = G_g(s) \left(\Delta P_c(s) - \frac{1}{R} \Delta F(s) \right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Συνάρτηση Μεταφοράς του Ρυθμιστή Ταχύτητα:·

$$G_g(s) = \frac{K_g}{1+T_g s} \quad (2.5)$$

Στατικό Κέρδος:

$$K_g = \frac{K_2 K_3}{K_4} \quad (2.6)$$

Σταθερά Χρόνου:

$$T_g = \frac{1}{K_4 K_5} \text{ [s]} \quad (2.7)$$

Ρύθμιση Στροφών – Ταχύτητας:

$$R = \frac{K_2}{K_1} \text{ [Hz/MW]} \quad (2.8)$$

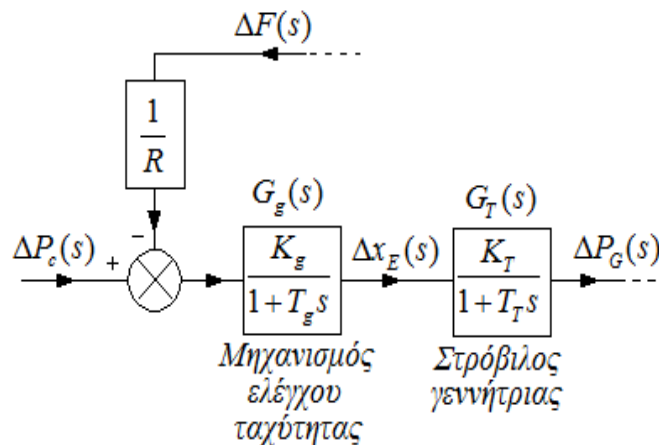
2.3. Μαθηματικό Μοντέλο Στροβίλου

2.3.1 Στρόβιλος Χωρίς Αναθέρμανση

Το απλούστερο μοντέλο ενός ατμοστρόβιλου **χωρίς αναθέρμανση** μπορεί να χαρακτηριστεί από έναν απλό συντελεστή κέρδους K_T και από μια απλή χρονική σταθερά T_T . Περιγράφεται ικανοποιητικά ως ένα γραμμικό χρονικά αμετάβλητο πρωτοτάξιο σύστημα.

Μπορούμε να το περιγράψουμε με την συνάρτηση μεταφοράς ($n_G = 1$)

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_G(s)}{\Delta x_E(s)} = \frac{K_T}{1+T_T s} \quad (2.9)$$



Σχ.2.2 Συναρτήσεις μεταφοράς στρόβιλου **χωρίς αναθέρμανση** και του ρυθμιστή ταχύτητάς του

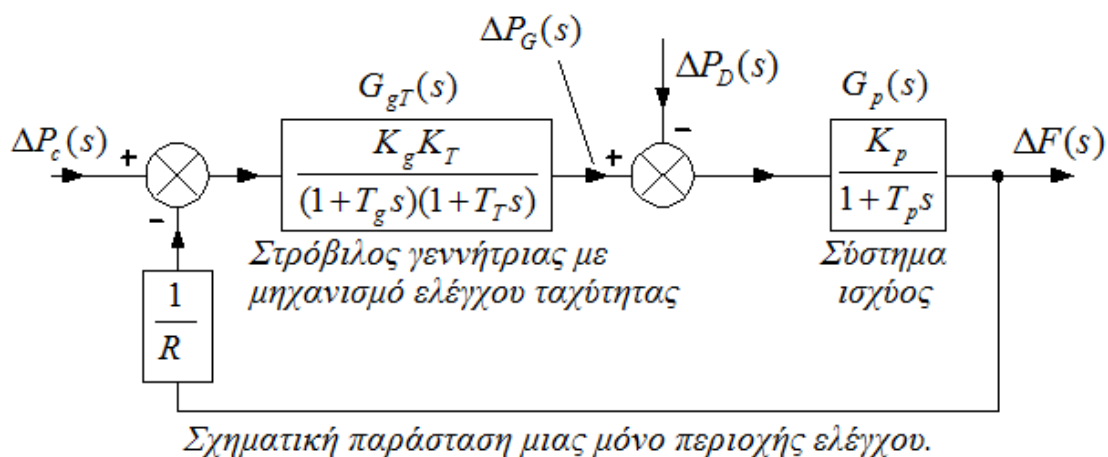
2.3.2. Στρόβιλος Με Αναθέρμανση

Το μοντέλο ενός ατμοστρόβιλου **με αναθέρμανση** χαρακτηρίζεται ως ένα γραμμικό χρονικά αμετάβλητο δευτεροτάξιο σύστημα διότι η συνάρτηση μεταφοράς περιλαμβάνει δύο χρονικές σταθερές. Η τιμή της χρονικής σταθεράς T_r είναι περίπου 10 δευτερόλεπτα και προσεγγίζει τη χρονική καθυστέρηση για τροφοδότηση της αναθερμαινόμενης περιοχής του λέβητα και ο συντελεστής αναθέρμανσης K_r .
Συνάρτηση Μεταφοράς ($n_G = 1$)

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_G(s)}{\Delta x_E(s)} = \frac{K_T(1+K_r T_r s)}{(1+T_T s)(1+T_r s)} \quad (2.10)$$

2.4 Σύστημα Μίας Περιοχής Ελέγχου

Για να παρακολουθήσουμε τη δυναμική συμπεριφορά του P-f βρόχου ελέγχου συστημάτων, θα αρχίσουμε τη μελέτη με τη περίπτωση μίας περιοχής ελέγχου, δηλαδή μιας περιοχής ελέγχου χωρίς διασυνδέσεις. Η παράσταση μιας απομονωμένης περιοχής ελέγχου φαίνεται στο Σχ. 2.3.



Σχ. 2.3 Σχηματική παράσταση μιας μόνο περιοχής ελέγχου

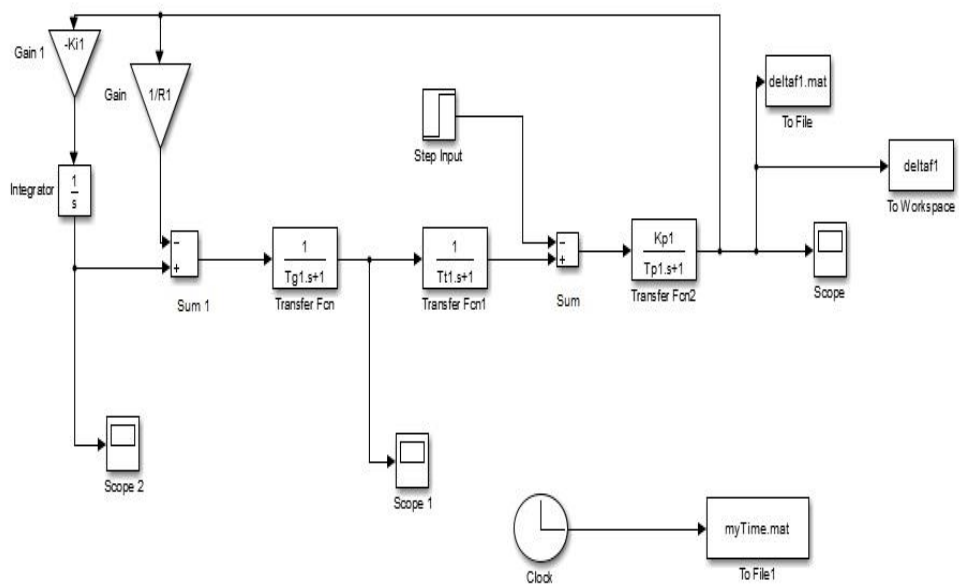
2.5 Εντολή Ελέγχου $\Delta P_c = 0$

Η περιοχή ελέγχου έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

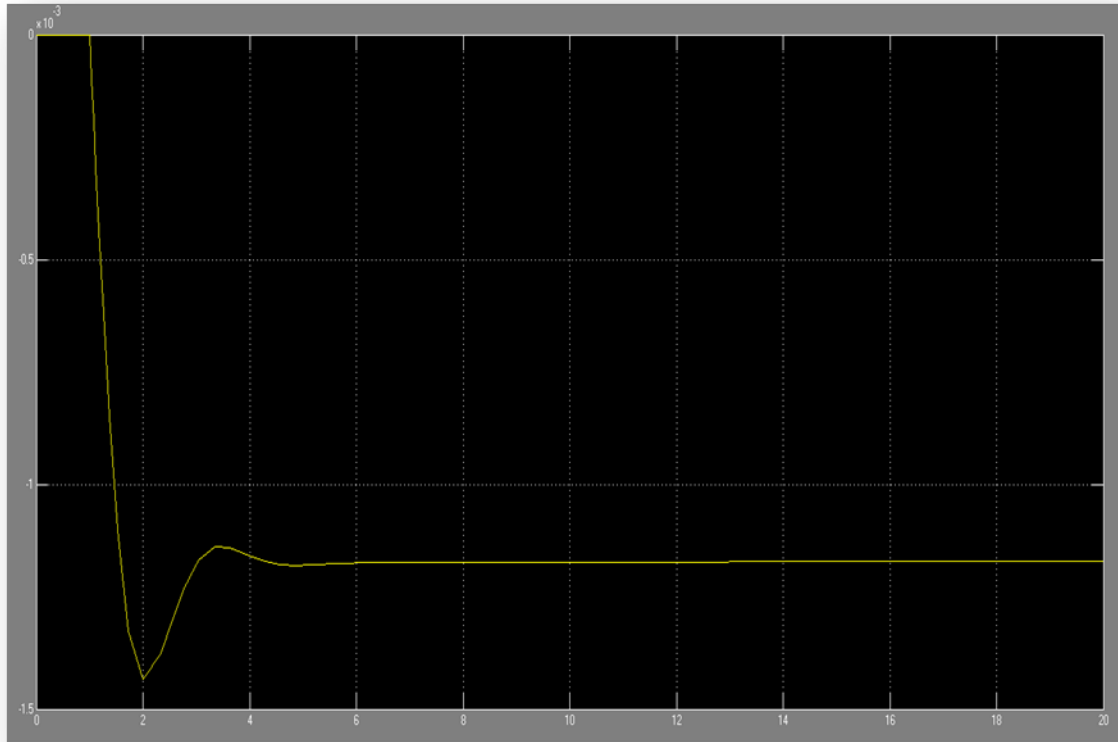
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΣΧΕΣΗ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΑΔΕΣ
Ονομαστική Ισχύς Περιοχής	P_{r1}		2000	MW
Σταθερά αδράνειας	H_1	$H_1 = \frac{W^o_{kin}}{P_{r1}}$	5	s
Συχνότητα	f^o		50	Hz
Ταχύτητα Ρύθμισης	R_1	$R_1 = \frac{2.4}{P_{r1}}$	1.2×10^{-3}	Hz/MW
Συντελεστής Αυτορρύθμισης Φορτίου	D_1	$D_1 = 8.33 \times P_{r1}$	16.66	MW/Hz
Χρονική Σταθερά Ρυθμιστή	T_{g1}		0.08	s

Ταχύτητας				
Χρονική Σταθερά Στροβίλου	T_{t1}		0.3	s
Στατικό Κέρδος Ρυθμιστή Ταχύτητας	K_{g1}		1	
Στατικό Κέρδος Στροβίλου	K_{t1}		1	
Βηματική αύξηση φορτίου	ΔP_{d1}		100	MW
Σταθερά χρόνου γεννήτριας	T_{p1}	$T_{p1} = \frac{2H_1 P_{r1}}{f^o D_1}$	24	s
Στατικό κέρδος γεννήτριας	K_{p1}	$K_{p1} = \frac{1}{D_1}$	0.06	Hz/MW
Συντελεστής Συγχρονισμού	T^o_{12}		175	MW/rad

Πίνακας 1.1 Τιμές Παραμέτρων Περιοχής 1



Σχ. 2.4 Σχηματική παράσταση του συστήματος της 1^{ης} περιοχής



Σχ.2.5 Σχηματική παράσταση απόκρισης του συστήματος της 1^{ης} περιοχής

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΣΧΕΣΗ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΑΔΕΣ
Ονομαστική Ισχύς Περιοχής	P_{r2}		1500	MW
Σταθερά αδράνειας	H_2	$H_2 = \frac{W^o_{kin}}{P_{r2}}$	4	s
Συχνότητα	f^o		50	Hz
Ταχύτητα Ρύθμισης	R_2	$R_2 = \frac{2}{P_{r2}}$	1.33×10^{-3}	Hz/MW
Συντελεστής Αυτορρύθμισης Φορτίου	D_2	$D_2 = 7 \times P_{r2}$	10.5	MW/Hz
Χρονική Σταθερά	T_{g2}		0.07	s

Ρυθμιστή Ταχύτητας				
Χρονική Σταθερά Στροβίλου	T_{t2}		0.25	s
Στατικό Κέρδος Ρυθμιστή Ταχύτητας	K_{g2}		1	
Στατικό Κέρδος Στροβίλου	K_{t2}		1	
Βηματική αύξηση φορτίου	ΔP_{d2}		200	MW
Σταθερά χρόνου γεννήτριας	T_{p2}	$T_{p2} = \frac{2H_2 P_{r2}}{f^0 D_2}$	22.85	s
Στατικό κέρδος γεννήτριας	K_{p2}	$K_{p2} = \frac{1}{D_2}$	0.095	Hz/MW
Συντελεστής Συγχρονισμού	T^0_{12}		175	MW/rad

Πίνακας 1.2 Τιμές Παραμέτρων Περιοχής 2

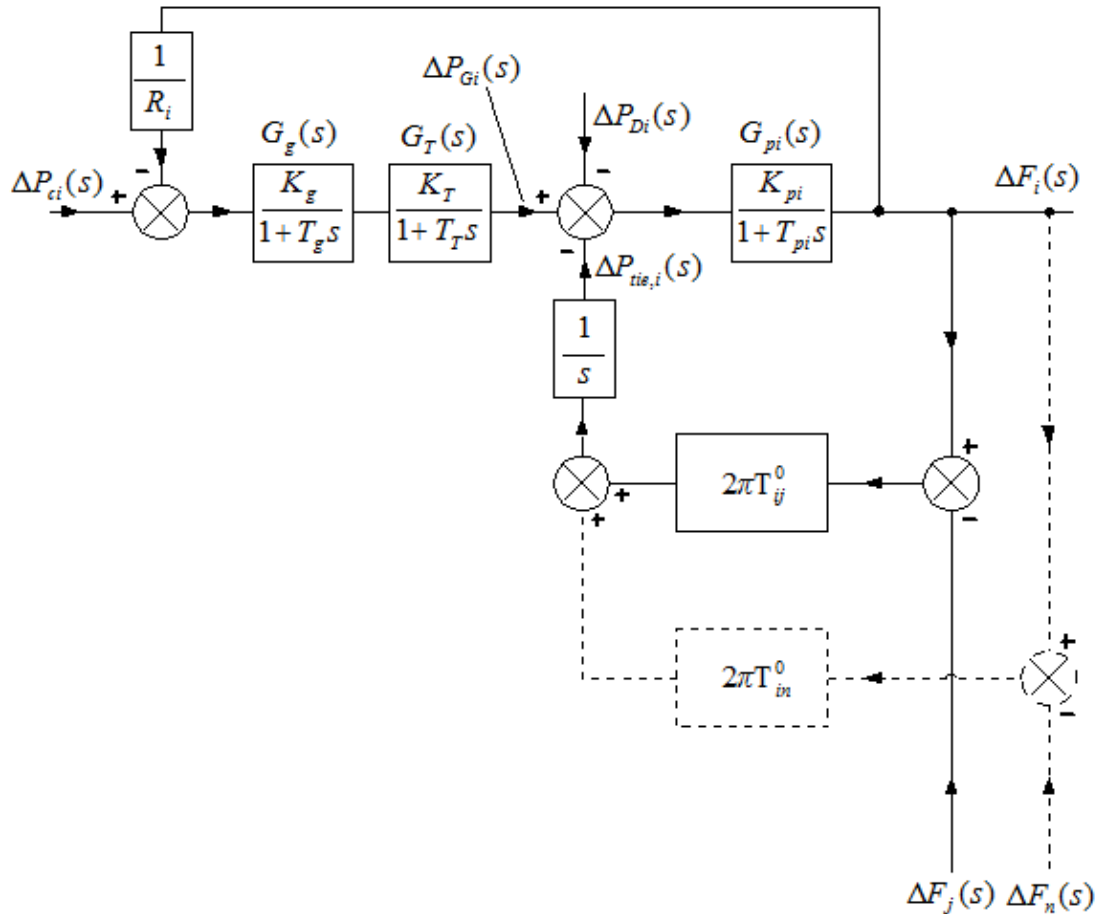
2.6 Εντολή Ελέγχου $\Delta P_c \neq 0$

Η απόκριση του ρυθμιστή ταχύτητας με $\Delta P_c = 0$ δεν είναι ικανοποιητική, γιατί καταλήγει σε ένα απαράδεκτο μόνιμο σφάλμα συχνότητας, Ο έλεγχος του ΔP_c πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να υπάρξει η βελτίωση της απόκρισης της συχνότητας.

2.7 Σύστημα Δύο Περιοχών

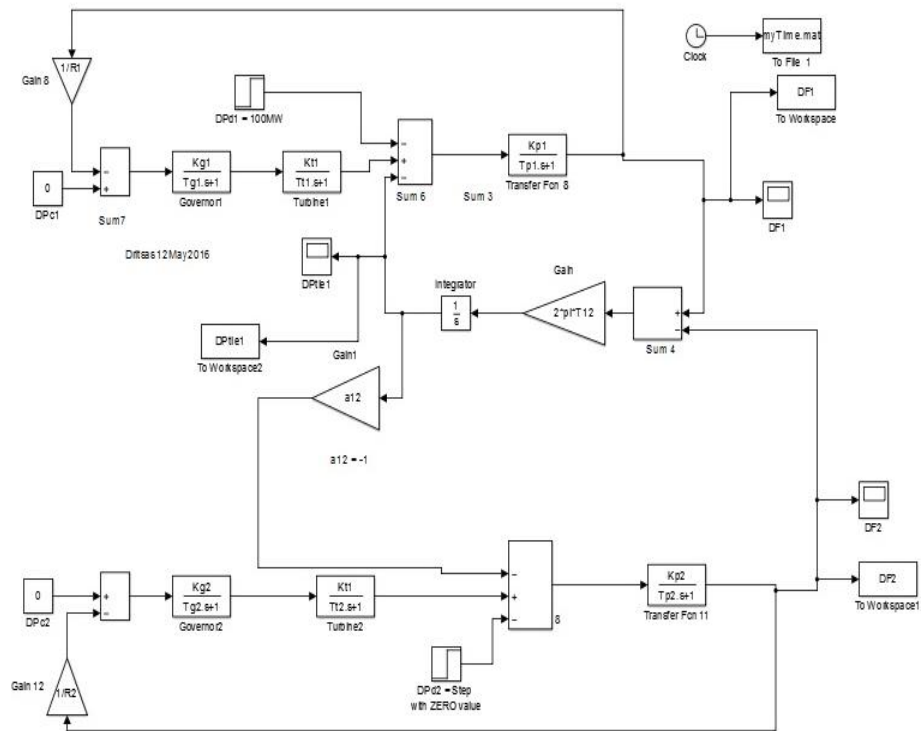
Το σύστημα με δύο περιοχές ελέγχου σε βηματική μεταβολή φορτίου πρέπει να μελετηθεί η δυναμική απόκρισή του. Γι' αυτό υποθέτουμε ότι οι δύο περιοχές ελέγχου είναι διαφορετικού μεγέθους και χαρακτηριστικών και η

διασύνδεσή τους με μία διασυνδεδετική γραμμή είναι ασθενής. Άρα αποκλειστικά ο έλεγχος είναι να ρυθμίζει τη συχνότητα σε κάθε περιοχή ελέγχου και ταυτόχρονα να διατηρεί την ισχύ της διασυνδεδετικής γραμμής. Για να επιτευχθούν μηδενικά μόνιμα σφάλματα συχνοτήτων και διακύμανσης ισχύος της διασυνδεδετικής γραμμής από τη συμβατική ισχύ θα χρησιμοποιηθεί αναλογικός και ολοκληρωτικός (PI) έλεγχος. Ουσιαστικά η κάθε περιοχή έχει την παρακάτω σχηματική αναπαράσταση.



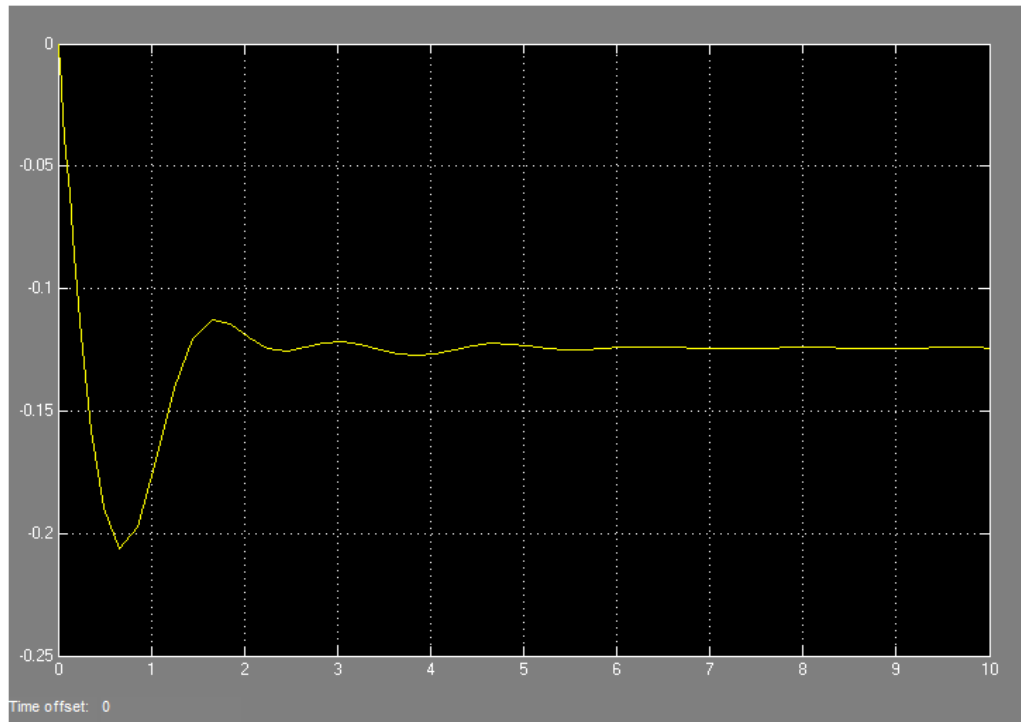
Σχ. 2.6 Πλήρης σχηματική παράσταση της περιοχής ελέγχου i

Για τις δύο περιοχές ελέγχου θεωρώντας $K_g K_T = 1$ έχουμε την παρακάτω διαγραμματική παράσταση,

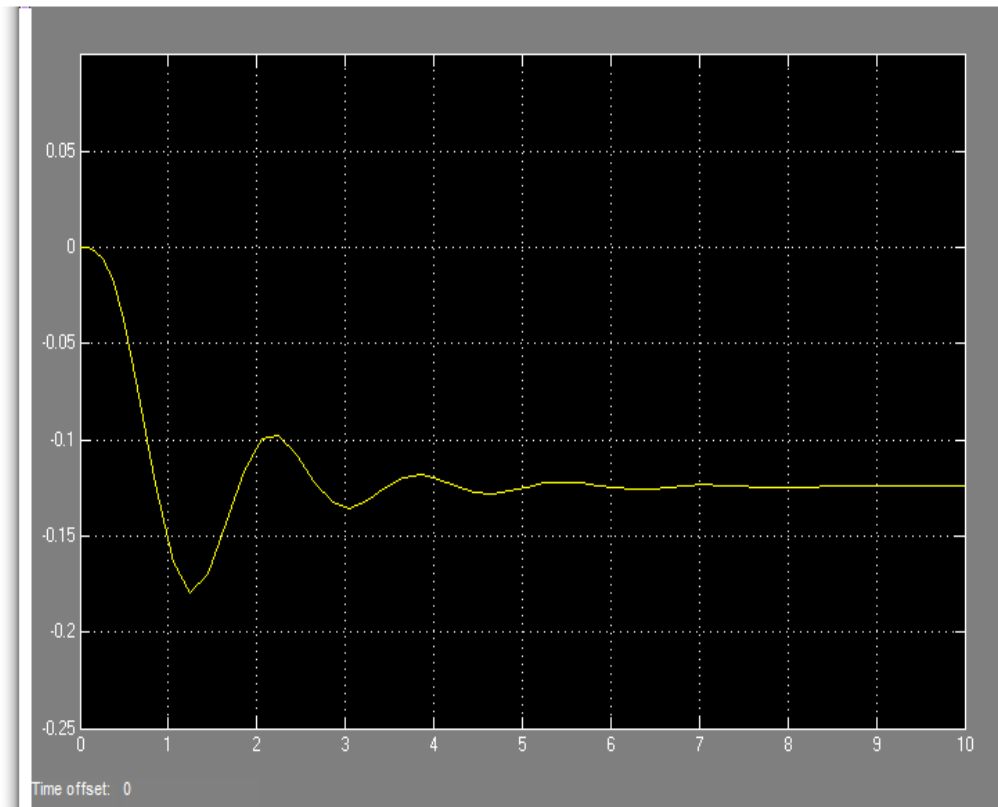


Σ.χ. 2.7 Σχηματικό διάγραμμα δύο περιοχών ελέγχου και διασυνδετικής γραμμής χωρίς έλεγχο βρόχου

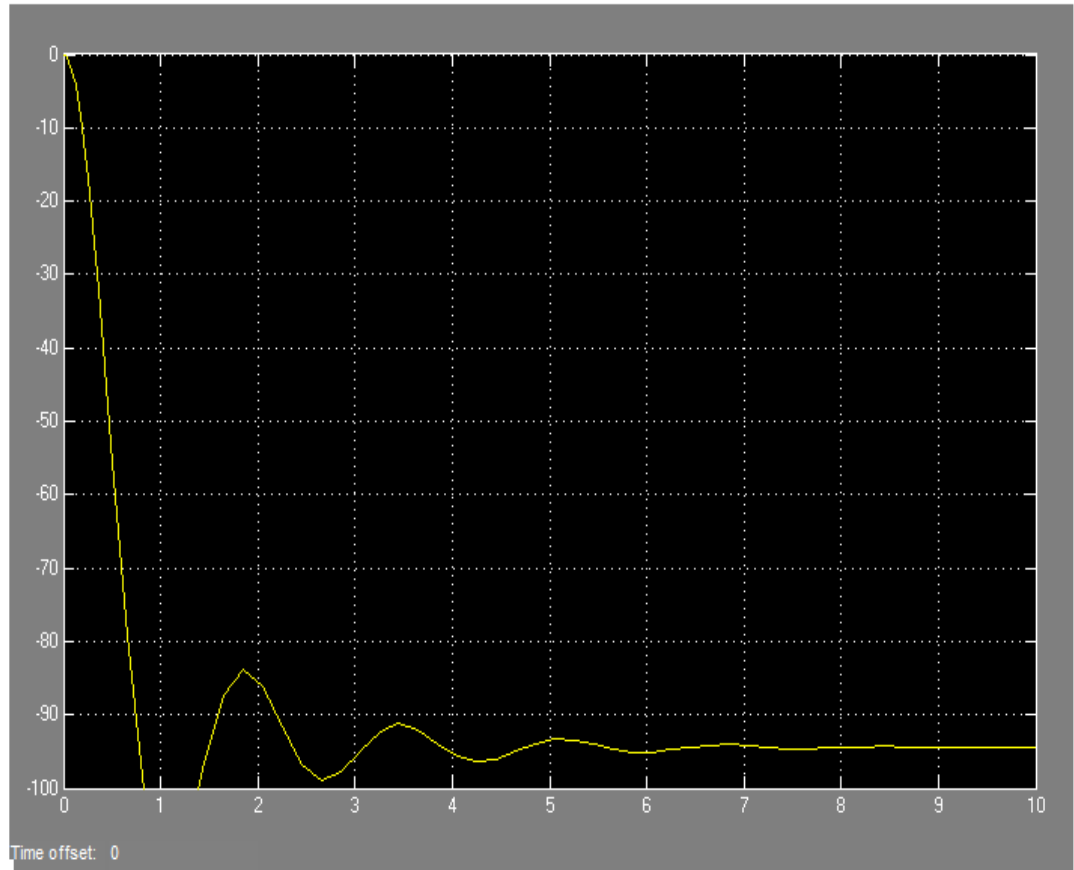
Γι'αυτό λοιπόν έπειτα από προσομοιώσεις που έγιναν με το πρόγραμμα Simulink έχουμε τα παρακάτω διαγράμματα τα οποία μας δείχνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα



Σ.χ.2.8 Σχηματικό διάγραμμα δύο περιοχών και διασυνδετικής γραμμής με ανοιχτό βρόχο (open loop)



Σ.χ. 2.9 Σχηματική προσομοίωση ανοιχτού βρόχου



Σ.χ. 2.10 Απόκριση ισχύος του συστήματος σε ανοιχτό βρόχο

Έπειτα από τις προσομοιώσεις καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το να χρησιμοποιηθεί σύστημα με ανοιχτό βρόχο δημιουργεί πολλά προβλήματα γι' αυτό στο επόμενο κεφάλαιο επεξηγούμε τον σχεδιασμό και γιατί πρέπει να χρησιμοποιούμε σε ένα τέτοιο σύστημα κλειστό βρόχο.

2.8 Μοντέλο Διασυνδετικής Γραμμής

Στο προηγούμενο σχήμα (Σχ.2.7) διακρίνουμε την διασυνδετική γραμμή $\Delta P_{tie,i}$ που ενώνει τις δύο περιοχές ελέγχου. Η συνολική μεταβολή της πραγματικής ισχύος $\Delta P_{tie,i}$ των διασυνδετικών γραμμών της περιοχής i , είναι ίση με το άθροισμα των μεταβολών των ισχύων $\Delta P_{tie,ij}$ κάθε μιας διασυνδετικής γραμμής, που συνδέει την περιοχή i με τη γειτονική της περιοχή v . Αν η περιοχή i συνδέεται με n περιοχές τότε ισχύει:

$$\Delta P_{tie,i} = \sum_{v=1}^n \Delta P_{tie,ij} \quad \text{MW} \quad (2.11)$$

Η μεταφερόμενη ενεργός ισχύς της διασυνδετικής γραμμής και των περιοχών i και j είναι η παρακάτω σχέση :

$$P_{tie,ij}(t) = \frac{|V_i V_j|}{X} \sin[(\delta_i^o + \Delta\delta_i(t)) - (\delta_j^o + \Delta\delta_j(t))] = P_{max,ij} \sin(\delta_i(t) - \delta_j(t)) \quad (2.12)$$

Συντελεστής συγχρονισμού της διασυνδετικής γραμμής προκύπτει εάν γραμμικοποιήσουμε τη συνάρτηση (2.11) τότε έχουμε :

$$\Delta P_{tie,ij} = P_{max,ij} \cos(\delta_i^o - \delta_j^o)(\Delta\delta_i - \Delta\delta_j) = Tij^o(\Delta\delta_i - \Delta\delta_j) [MW] \quad (2.13)$$

$$\text{Όπου } Tij^o = P_{max,ij} \cos(\delta_i^o - \delta_j^o) [MW/rad] \quad (2.14)$$

Είναι ο **συντελεστής συγχρονισμού**.

2.9 Μόνιμη κατάσταση Συστήματος δύο περιοχών με $\Delta P_{c1} = \Delta P_{c2} = 0$

Διακρίνουμε ότι υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα των διασυνδετικών γραμμών όταν επικεντρωνόμαστε στον υπολογισμό των μονίμων σφαλμάτων συχνότητας και ισχύος (P-f) $\Delta f_{\mu\sigma\nu}$ στη διασυνδετική γραμμή. Υποθέτοντας ότι οι δύο περιοχές είναι ίδεις δηλαδή $D = D_1 = D_2$ και $R = R_1 = R_2$, $\alpha_{12} = -1$ τότε

$$\Delta P_{tie,1,\mu\sigma\nu} = -\Delta P_{tie,2,\mu\sigma\nu} [MW] \quad (2.15)$$

Με αποτέλεσμα όταν στο ηλεκτρικό σύστημα έχουμε ένα σύνολο από διασυνδεδεμένα συστήματα ,τότε οι διακυμάνσεις της συχνότητας είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις

2.10 Προδιαγραφές Ελέγχου

Ο έλεγχος αυτόματης παραγωγής προσδιορίζεται από ένα σήμα ελέγχου ΔP_{ci} , $\forall i = 1, 2, \dots, N$ για να:

$$\Delta f_i(t)|_{t \rightarrow \infty} = \Delta f_{i,ss} = 0, \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (2.16)$$

$$\Delta P_{tie,i}(t)|_{t \rightarrow \infty} = \Delta P_{tie,i,ss} = 0 \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (2.17)$$

Γραμμικά μοντέλα με $|\Delta\delta_i - \Delta\delta_j| \ll \delta_i^o - \delta_j^o$ τότε

$$\Delta f_{i,ss} = \Delta f_{ss} \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (2.18)$$

Ως σφάλμα ελέγχου περιοχής ορίζουμε:

$$(\Sigma EP)_i = \Delta P_{tie,i} + B_i \Delta f_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \text{ και } B_i \in \mathbb{R} \quad (2.19)$$

2.11 Μοντέλο μεταβλητών κατάστασης για Σύστημα δύο περιοχών

Το δομικό κομμάτι είναι το σχήμα (Σχ. 2.7) χωρίς όμως τη διασυνδετική γραμμή (δηλαδή τις διακεκομμένες γραμμές)

Οι διαφορικές εξισώσεις που προκύπτουν:

$$\frac{d\Delta f_1}{dt} = \frac{1}{T_{p1}} (-\Delta f_1 + K_{p1} \Delta P_{G1} - K_{p1} \Delta P_{D1} - K_{p1} \Delta P_{tie,1}) \quad (2.20)$$

$$\frac{d\Delta f_2}{dt} = \frac{1}{T_{p2}} (-\Delta f_2 + K_{p2}\Delta P_{G2} - K_{p2}\Delta P_{D2} - K_{p2}\alpha_{12}\Delta P_{tie,1}) \quad (2.21)$$

$$\frac{d\Delta x_{E1}}{dt} = \frac{1}{T_{g1}} \left(-\Delta x_{E1} + K_{g1}\Delta P_{C1} - \frac{K_{g1}}{R_1}\Delta f_1 \right) \quad (2.22)$$

$$\frac{d\Delta x_{E2}}{dt} = \frac{1}{T_{g2}} \left(-\Delta x_{E2} + K_{g2}\Delta P_{C2} - \frac{K_{g2}}{R_2}\Delta f_2 \right) \quad (2.23)$$

$$\frac{d\Delta P_{G1}}{dt} = \frac{1}{T_{t1}} (-\Delta P_{G1} + \Delta x_{E1}) \quad (2.24)$$

$$\frac{d\Delta P_{G2}}{dt} = \frac{1}{T_{t2}} (-\Delta P_{G2} + \Delta x_{E2}) \quad (2.25)$$

$$\frac{d\Delta P_{tie,1}}{dt} = 2\pi T^o_{12}(\Delta f_1 - \Delta f_2) \quad (2.26)$$

$$\text{Με} \quad \alpha_{12} = -1 \quad (2.27)$$

Τα διανύσματα των μεταβλητών κατάστασης \mathbf{x} , μεταβλητών ελέγχου \mathbf{u} , μεταβλητών διαταραχής \mathbf{w} είναι:

Οι δυναμικές εξισώσεις γράφονται σε μητρική μορφή :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_x + \mathbf{B}_u + \mathbf{D}_w$$

$$\text{Όπου : } \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta f_3 \\ \Delta f_4 \\ \Delta f_5 \\ \Delta f_6 \\ \Delta f_7 \end{bmatrix} = \mathbf{x} \quad \begin{bmatrix} \Delta P_{c1} \\ \Delta P_{c2} \end{bmatrix} = \mathbf{u} \quad \begin{bmatrix} \Delta P_{D1} \\ \Delta P_{D2} \end{bmatrix} = \mathbf{w} \quad (2.28)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{p1}} & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{p1}}{T_{p1}} & 0 & -\frac{K_{p1}}{T_{p1}} \\ 0 & -\frac{1}{T_{p2}} & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{p2}}{T_{p2}} & -a_{12}\frac{K_{p2}}{T_{p2}} \\ -\frac{K_{g1}}{R_1 T_{g1}} & 0 & -\frac{1}{T_{g2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_{g2}}{R_2 T_{g2}} & 0 & -\frac{1}{T_{g2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{t1}} & 0 & -\frac{1}{T_{t1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{t2}} & 0 & -\frac{1}{T_{t2}} & 0 \\ 2\pi T^o_{12} & -2\pi T^o_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{Kg1}{Tg1} & 0 \\ 0 & \frac{Kg2}{Tg2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -\frac{Kp1}{Tp1} & 0 \\ 0 & -\frac{Kp2}{Tp2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Οι πίνακες A,B,D αποτελούν το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων το οποίο παριστά το δυναμικό μοντέλο μεταβλητών κατάστασης, διότι οι διαφορικές εξισώσεις είναι γραμμικές. Δηλαδή οι μεταβλητές αυτές είναι μετρούμενες ποσότητες, ωστόσο υπάρχει ο όρος Dw ο οποίος λόγω της σταθερής διαταραχής w, μπορεί να προκαλέσει τιμές διαφορετικές του μηδενός, για να αποφύγουμε όλο αυτό απλά χρησιμοποιούμε το βέλτιστο έλεγχο ο οποίος πρέπει στη μόνιμη κατάσταση να έχει όλες τις μεταβλητές ελέγχου και κατάσταση με μηδέν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΟΛΥΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΕΛΕΓΚΤΗ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΥΟ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

3.1 Εισαγωγή-Στόχοι Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου και στη συνέχεια παρουσιάζεται η προσομοίωση και οι αποκρίσεις των μεταβλητών του συστήματός μας.

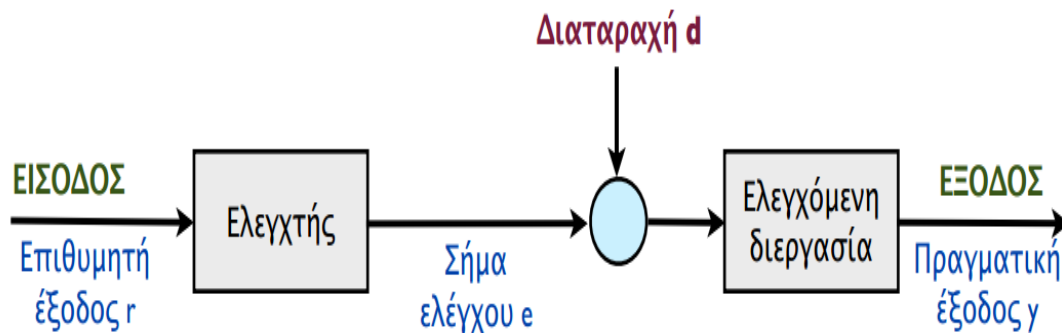
3.2 Εισαγωγή στα ΣΑΕ

Με τον όρο "Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου" (ΣΑΕ) εννοούμε γενικά ένα πλήθος συσκευών που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ενός συστήματος. Τα ΣΑΕ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με δεκάδες τρόπους. Η σημαντικότερη ίσως κατηγοριοποίηση αφορά την ύπαρξη ή όχι κάποιου σήματος ανατροφοδότησης, το οποίο χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της απόκρισής του. Τα συστήματα που διαθέτουν ανατροφοδότηση

καλούνται συστήματα κλειστού βρόχου, ενώ στην αντίθετη περίπτωση αποκαλούνται συστήματα ανοικτού βρόχου.

3.2.1. Συστήματα ανοικτού βρόχου

Συστήματα ανοικτού βρόχου είναι αυτά στα οποία η διορθωτική δράση προσδιορίζεται από την επιθυμητή έξοδο και δεν επηρεάζεται από την πραγματική έξοδο.



Σχ. 3.1 Σχηματική παράσταση του συστήματος ανοικτού βρόχου

Η επιθυμητή έξοδος είναι η είσοδος στο σύστημα ελέγχου και τον ελεγκτή, η διαταραχή είναι η εξωγενής είσοδος που επηρεάζει δυσμενώς την συμπεριφορά της πραγματικής εξόδου. Τα συστήματα ανοικτού βρόχου είναι απλά, χαμηλού κόστους, χωρίς προβλήματα αστάθειας, κατάλληλα όταν δε μπορεί να γίνει μέτρηση. Ωστόσο είναι ευαίσθητα σε διαταραχές και μεταβολές των στοιχείων τους και απαιτούν επαναρρύθμιση αν επέλθει κάποια μεταβολή.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των Σ.Α.Ε ανοικτού βρόχου είναι τα ακόλουθα:

Πλεονεκτήματα:

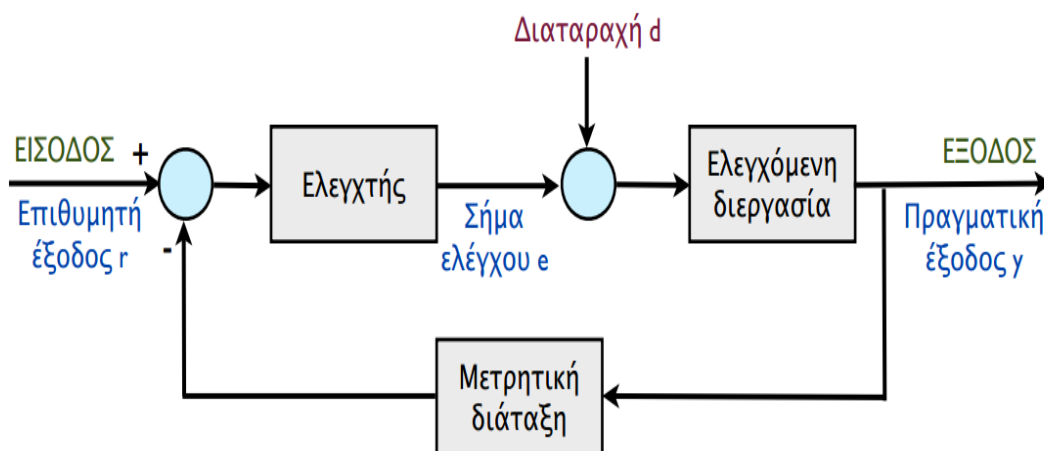
- Απλή κατασκευή και ευκολία συντήρησης
- Μικρό κόστος
- Δεν παρουσιάζουν προβλήματα αστάθειας

Μειονεκτήματα:

- Τυχόν διαταραχές (εσωτερικές, εξωτερικές), προκαλούν σφάλματα της εξόδου τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα την εκτροπή της εξόδου από την επιθυμητή τιμή
- Για τη διατήρηση των επιδιωκόμενων χαρακτηριστικών της εξόδου, απαιτείται περιοδική επαναρρύθμιση των επιμέρους συνιστωσών.

3.2.2. Συστήματα Κλειστού Βρόχου

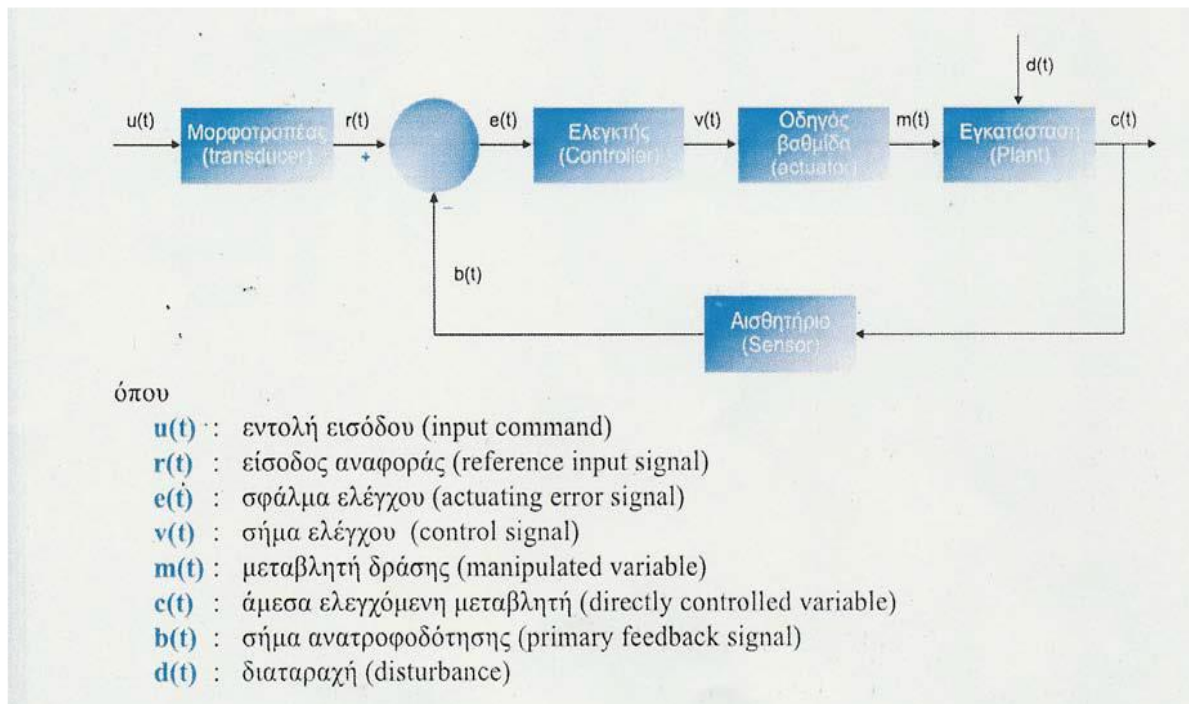
Συστήματα κλειστού βρόγχου είναι αυτά τα οποία χρησιμοποιούν ένα σήμα που προέρχεται από την μέτρηση της πραγματικής εξόδου, μέσω μετρητικών διατάξεων, και το οποίο επιστρέφει στην είσοδο του συστήματος, ως ανάδραση, όπου συγκρίνεται με ένα σήμα αναφοράς που αντιστοιχεί στην επιθυμητή έξοδο. Τα Σ.Α.Ε. κλειστού βρόγχου περιέχουν την έννοια της ανάδρασης ή ανατροφοδότησης (feedback). Ο όρος ανάδραση, προέρχεται από τη διεύθυνση στην οποία ταξιδεύει το μετρούμενο σήμα της ελεγχόμενης μεταβλητής, δηλαδή από την πραγματική έξοδο προς την επιθυμητή είσοδο. Στόχος ενός συστήματος ελέγχου κλειστού βρόγχου, είναι η συνεχής αναπροσαρμογή της εισόδου (λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβολές της εξόδου), ώστε να αντισταθμίζει τις επιδράσεις των διαφόρων τύπων διαταραχών που επιδρούν αρνητικά στο σύστημα. Αυτό επιτυγχάνεται με τον κλάδο της ανάδρασης, δηλαδή τη μέτρηση της ελεγχόμενης μεταβλητής και τη σύγκριση της με την είσοδο αναφοράς (η οποία αντιπροσωπεύει την επιθυμητή τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής). Ανάλογα λοιπόν με το μέγεθος του σφάλματος εισόδου ο ελεγκτής της εγκατάστασης ρυθμίζει ανάλογα τη μεταβλητή, ώστε το σύστημα να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση πριν τη διαταραχή. Συνοψίζοντας με τον όρο κλειστό σύστημα ή σύστημα ελέγχου με ανάδραση, εννοούμε το σύστημα εκείνο το οποίο από μόνο του (χωρίς την παρουσία του ανθρώπινου παράγοντα), τείνει να διατηρήσει προκαθορισμένη σχέση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου.



Σχ. 3.2 Σχηματική παράσταση του συστήματος κλειστού βρόχου

Με r συμβολίζεται η εντολή αναφοράς, ενώ e είναι το σφάλμα, ή αλλιώς, η διαφορά μεταξύ επιθυμητής και πραγματικής τιμής εξόδου, το οποίο αποτελεί και την είσοδο του ελεγκτή.

Η δομή ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου θα έχει τη μορφή :



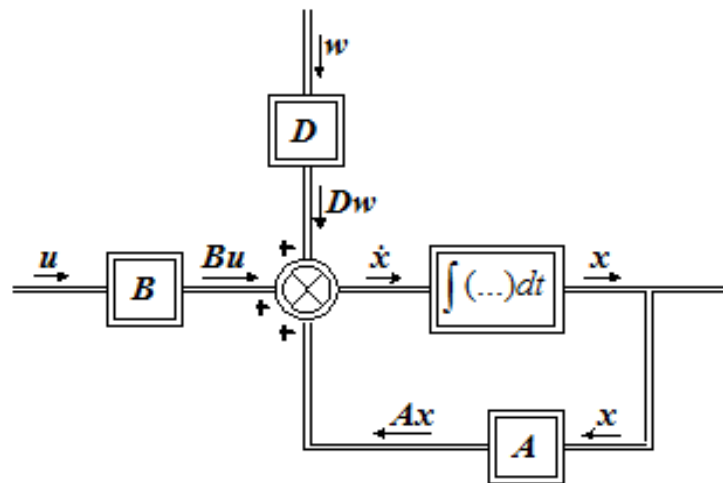
Σχ. 3.3 Δομή ΣΑΕ κλειστού βρόχου

Επομένως ένα σύστημα ΣΑΕ κλειστού βρόχου αποτελείται από τον μορφομετατροπέα εισόδου, τον ελεγκτή, την οδηγό βαθμίδα και το αισθητήριο (sensor) του βρόχου ανάδρασης. Ο ελεγκτής παράγει μια έξοδο που οδηγεί την ελεγχόμενη διεργασία με σκοπό τον περιορισμό ή και τον μηδενισμό του σφάλματος μεταξύ της πραγματικής τιμής και της επιθυμητής τιμής. Η διαφορά αυτών των τιμών λέγεται σφάλμα. Το αισθητήριο εξασφαλίζει ότι από την διαδικασία μέτρησης προκύπτει μια καλή προσέγγιση της πραγματικής εξόδου. Το σήμα σφάλματος τροποποιείται έτσι ώστε να ρυθμίζεται η απόδοση του συστήματος.

3.3. Γιατί χρειάζεται ΣΑΕ κλειστού βρόχου

Το σύστημα χρειάζεται ΣΑΕ κλειστού βρόχου ώστε να γίνεται με επιτυχία ο έλεγχος της ευστάθειας, να διακρίνουμε πόσο γρήγορα υπακούει σε εντολές το σύστημα και κατά πόσο δυνατή επίδραση έχει από εξωτερικούς παράγοντες.

Επομένως σε ένα ΣΑΕ κλειστού βρόχου επιτελούνται τρεις συγκεκριμένες και θεμελιώδεις λειτουργίες. Η μέτρηση, η απόφαση και η δράση ή χειρισμός. Η λειτουργία της μέτρησης αφορά τη μέτρηση της τιμής της μεταβλητής ελέγχου. Η λειτουργία της απόφασης οφείλεται στις βαθμίδες σύγκρισης και ελέγχου. Δηλαδή το σφάλμα ελέγχου που αποτελεί την έξοδο του συγκριτή, τροφοδοτεί τη μονάδα του ελέγχου μέσω της οποίας καθορίζεται και επιλέγεται το είδος και το μέγεθος της διορθωτικής δράσης, για την πλήρη αποκατάσταση του. Είναι προφανές ο καθοριστικός ρόλος του σήματος ανατροφοδότησης στην όλη διαδικασία ελέγχου και αυτό προϋποθέτει την όσο το δυνατόν ακριβέστερη μέτρηση της ελεγχόμενης μεταβλητής ώστε να αντικατοπτρίζεται όσο είναι δυνατόν ακριβέστερα στο σύστημα ελέγχου η πραγματική εικόνα της διαταραχής. Στη συνέχεια με τον όρο χειρισμό, εννοούμε την χρήση της πράξης ελέγχου ώστε να χειραγωγηθούν κάποιες μεταβλητές στην διαδικασία με τέτοιο τρόπο ώστε θα τείνουν να μειώσουν το σφάλμα. Από τα μέχρι τώρα είναι επίσης προφανές ότι ο ρόλος της ανάδρασης συντελεί στην ελαχιστοποίηση του σφάλματος, δηλαδή της διαφοράς μεταξύ της εξόδου του συστήματος και της εισόδου αναφοράς. Ο περιορισμός (ακόμη και μηδενισμός) του σφάλματος, είναι μεν ένα σπουδαίο λειτουργικό χαρακτηριστικό που η ανάδραση προσδίδει στο σύστημα, αλλά δεν είναι και το μοναδικό. Η ανάδραση επιδρά επίσης θετικά και σε διάφορα άλλα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως στην ευστάθεια (stability), στο εύρος λειτουργίας (bandwidth), στο συνολικό κέρδος (overall gain), στη μείωση της ευαισθησίας (sensitivity) έναντι των διαφόρων τύπων διαταραχών. Διακρίνουμε στο σχήμα (Σχ.3.4) το δυναμικό μοντέλο μεταβλητών κατάστασης.

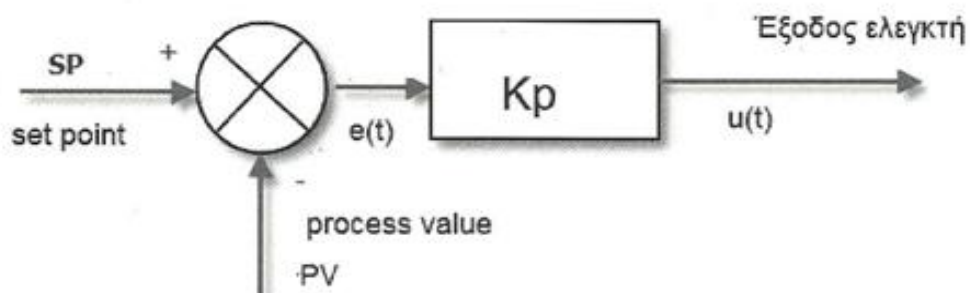


Σχ. 3.4 Σχηματική παράσταση του μοντέλου κατάστασης

3.4 Θεωρητικό υπόβαθρο σχεδιασμού ελεγκτών με ολοκληρωτική δράση (PI) στο χώρο κατάστασης

3.4.1 Αναλογικός Ελεγκτής (P)

Ο ελεγκτής (P) έχει απλή κατασκευή και επομένως μικρό κόστος. Με την κατάλληλη επιλογή του αναλογικού όρου (K_p) του ελεγκτή τύπου P (σχήμα Σχ. 3.5) εξαλείφονται οι ταλαντώσεις στη μόνιμη κατάσταση και σταθεροποιείται το σήμα εξόδου του κλειστού συστήματος.



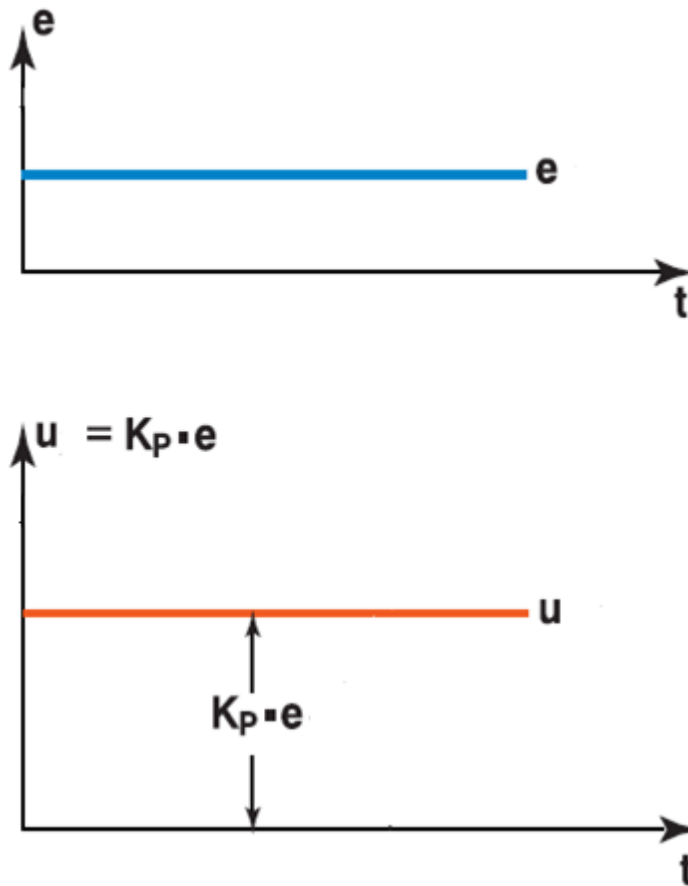
Σχ. 3.5 Αναλογικός Ελεγκτής P

Από την παρατήρηση της χρονικής απόκρισης (σχήμα Σχ. 3.6) προκύπτει ότι το σήμα εξόδου του ελεγκτή $u(t)$ είναι ανάλογο του σήματος εισόδου $e(t)$. Επομένως, ισχύει η σχέση που περιγράφει την συμπεριφορά του ελεγκτή μεταξύ εισόδου και εξόδου:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (3.1)$$

ή αν πάρουμε το μετασχηματισμό Laplace, έχουμε τη σχέση μεταφοράς:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (3.2)$$



Σχ. 3.6 Βηματική χρονική απόκριση αναλογικού ελεγκτή P

Καταλαβαίνει κανείς ότι, ο αναλογικός ελεγκτής P είναι ένας γρήγορος ελεγκτής και αντιδρά στις διαταραχές χωρίς χρονική καθυστέρηση. Επιπλέον χρειάζεται πάντα ένα σήμα (σφάλμα) στην είσοδο του, για να λειτουργήσει και γι' αυτό χρησιμοποιείται εκεί που δεν απαιτείται ακριβής έλεγχος. Το σοβαρό μειονέκτημα του αναλογικού ελεγκτή είναι το ότι αδυνατεί να εξαλείψει πλήρως το σφάλμα ελέγχου, με αποτέλεσμα την ύπαρξη μόνιμου σφάλματος. Στις περιπτώσεις που απαιτείται πλήρης μηδενισμός του σφάλματος το σύστημα θα πρέπει να είναι εφοδιασμένο με χειροκίνητη δευτερεύουσα ρύθμιση.

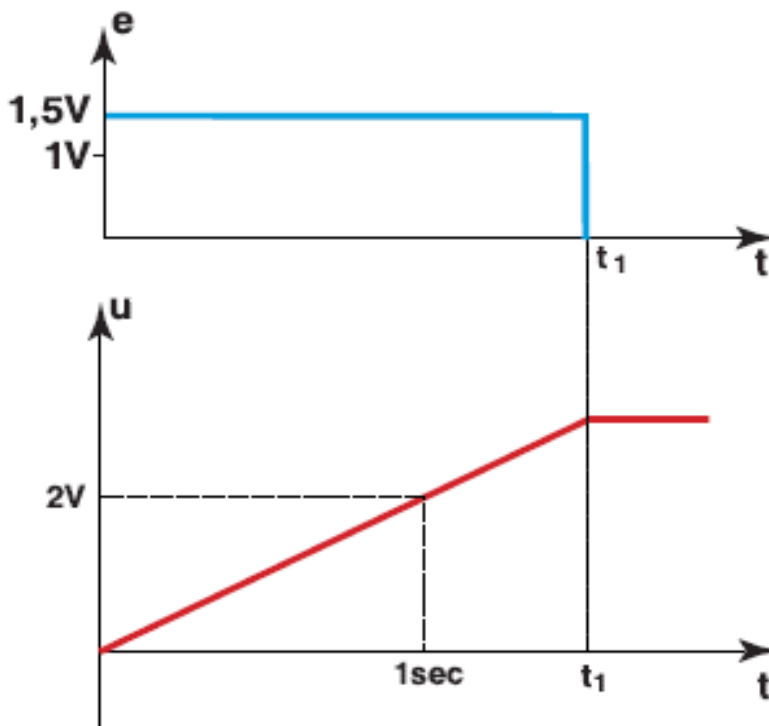
3.4.2. Ολοκληρωτικός Ελεγκτής (I)

Ο αναλογικός έλεγχος καταλήγει σε μόνιμο σφάλμα μεταξύ της επιθυμητής και πραγματικής εξόδου του συστήματος γεγονός που είναι γενικώς ανεπιθύμητο. Ένας αποτελεσματικός τρόπος εξάλειψης του μόνιμου σφάλματος είναι η προσθήκη ενός ολοκληρωτικού όρου στη συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή. Αυτό επιτυγχάνεται με την αριθμητική ολοκλήρωση. Η εξίσωση που περιγράφει τη συμπεριφορά του ελεγκτή μεταξύ εισόδου και εξόδου είναι:

$$u(t) = K_i \int e(t) dt = \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt \quad (3.3)$$

ή από τη συνάρτηση μεταφοράς:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (3.4)$$



Σχ. 3.7 Βηματική χρονική απόκριση του ολοκληρωτικού ελεγκτή I

Παρατηρώντας τη βηματική χρονική απόκριση του ολοκληρωτικού ελεγκτή I, σχήμα **Σχ. 3.7** διακρίνουμε ότι ενώ το σήμα στην είσοδο μεταβάλλεται απότομα, το ρυθμιστικό σήμα U μεταβάλλεται αργά. Ο ελεγκτής I είναι αργός. Όσο χρονικό διάστημα υπάρχει σφάλμα στην είσοδο του ελεγκτή, η έξοδος του (U) συνεχώς ανεβαίνει.

Επομένως και το τελικό στοιχείο ελέγχου αυξάνει αντίστοιχα τη ροή της ενέργειας προς το ελεγχόμενο σύστημα. Το σύστημα εξόδου U του ελεγκτή διατηρεί την τελευταία του τιμή, ακόμη και όταν το σήμα εισόδου (το σφάλμα) έχει μηδενιστεί.

Αυτό σημαίνει ότι σε ένα κλειστό σύστημα αυτομάτου ελέγχου το ρυθμιστικό σήμα θα αυξάνει συνεχώς, μέχρις ότου μηδενιστεί το σφάλμα.

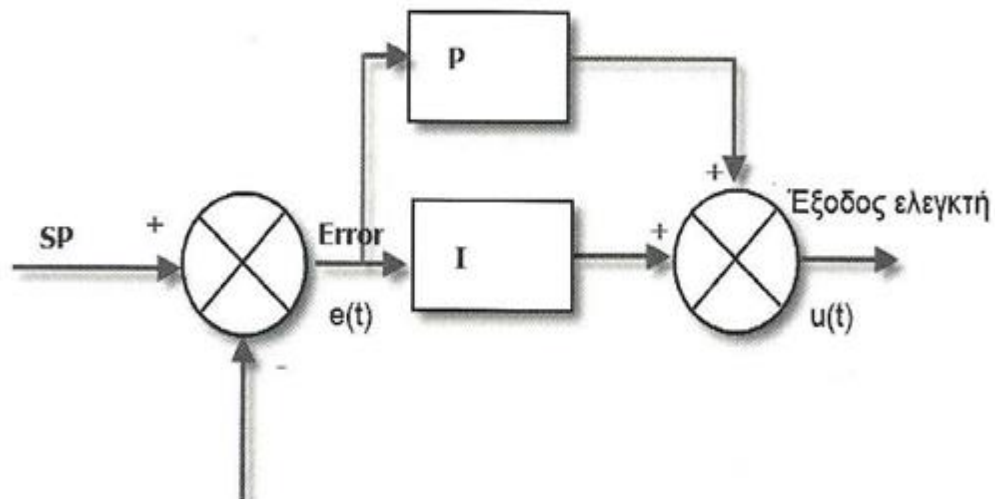
Το μειονέκτημα στον ολοκληρωτικό ελεγκτή είναι ότι αυξάνεται ο χρόνος αποκατάστασης t_s του συστήματος δηλαδή πόσο γρήγορα θα φθάσει το σύστημα στην

έξοδο κάνοντας τον αργό. Αυτό οφείλεται στην προσθήκη ενός επιπλέον πόλου στο μιγαδικό επίπεδο. Η προσθήκη αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του τύπου του συστήματος κατά ένα και ως εκ τούτου εάν το αρχικό σύστημα ήταν τύπου '0' γίνεται τύπου '1'.

Ο μηδενισμός του σφάλματος γίνεται σε βάρος της ταχύτητας απόκρισης και της ευστάθειας του συστήματος.

3.4.3. Αναλογικός-Ολοκληρωτικός Ελεγκτής (PI)

Ο συνδυασμός δύο ελεγκτών (P) και (I) μας δίνει ένα νέο ελεγκτή (σχήμα Σχ. 3.8), ο οποίος εμφανίζει τα πλεονεκτήματα των απλών ελεγκτών χωρίς τα μειονεκτήματά τους και γι' αυτό χρησιμοποιείται όπου απαιτείται ταχεία, ακριβής ρύθμιση. Αρχικά ο ελεγκτής (P), μειονεκτεί, διότι δεν μπορεί να μηδενίσει το σφάλμα. Αυτό το μειονέκτημα έρχεται να εξουδετερώσει ο ελεγκτής (I). Ο ελεγκτής (I) είναι αργός. Το μειονέκτημα αυτό έρχεται να εξουδετερώσει ο ελεγκτής (P).



Σχ. 3.8 Αναλογικός-Ολοκληρωτικός Ελεγκτής (PI)

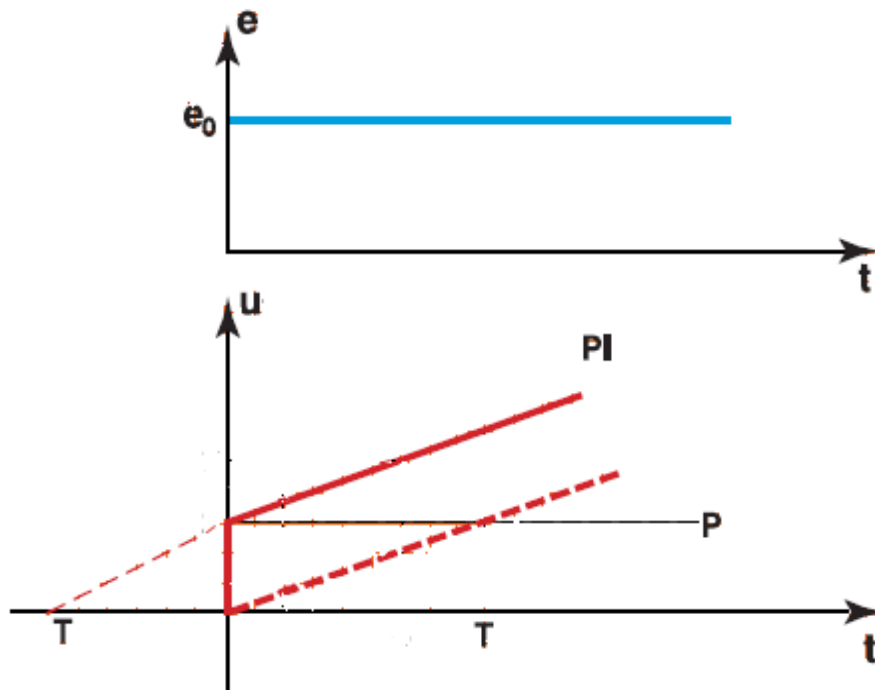
Η εξίσωση που περιγράφει τη συμπεριφορά του ελεγκτή μεταξύ εισόδου και

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt \quad (3.5)$$

ή από τη συνάρτηση μεταφοράς:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{sK_p + K_i}{s} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (3.6)$$

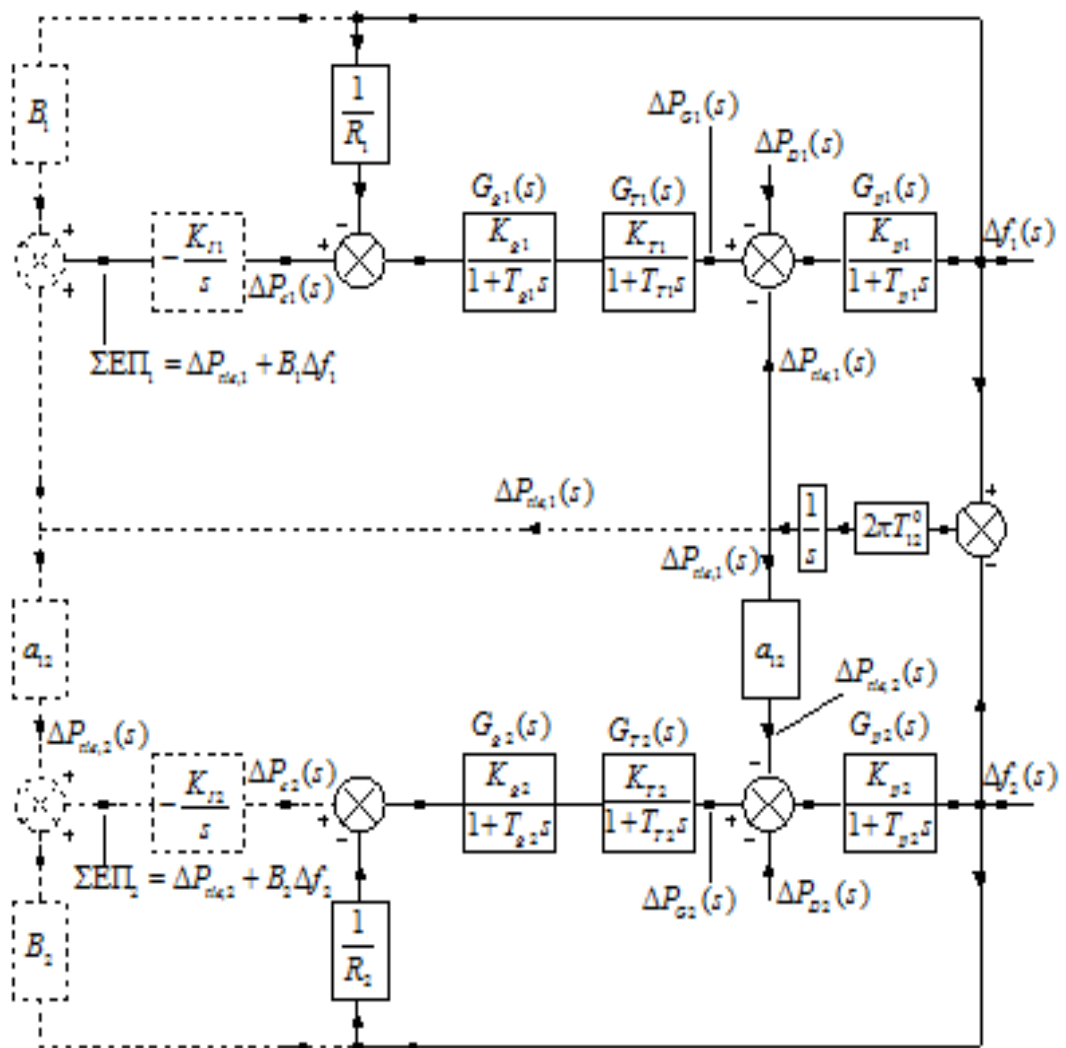
Ο (PI) ελεγκτής προσθέτει στο γεωμετρικό τόπο ριζών του συστήματος ένα πόλο στην αρχή των αξόνων καθώς επίσης και ένα επιπλέον μηδενικό $s = -\frac{K_i}{K_p}$. Η προσθήκη του ελεύθερου ολοκληρωτή, αυξάνει τον τύπο του συστήματος κατά ένα, με αποτέλεσμα το μηδενισμό του μόνιμου σφάλματος για βηματικές διαταραχές τουλάχιστον. Η δυναμική συμπεριφορά του ελεγκτή-PI εξετάζεται συνήθως με τη βηματική διέγερση (σχήμα Σχ. 3.9).



Σχ. 3.9 Βηματική χρονική απόκριση του αναλογικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή (PI)

Το T_i είναι ο χρόνος που χρειάζεται η έξοδος του ελεγκτή (I), για να φθάσει στην ίδια τιμή με την έξοδο του ελεγκτή (P). Όσο μικρότερος είναι ο χρόνος T_i τόσο γρηγορότερος είναι ο ελεγκτής. Οι μεταβολές του χρόνου T_i έχουν ενισχυτική δράση στην συμπεριφορά του ελεγκτή. Δηλαδή ένας μικρός χρόνος T_i δημιουργεί μεγάλη ενίσχυση.

3.5 Σύστημα κλειστού βρόχου με ολοκληρωτική δράση



Σχ. 3.10 Σχηματική παράσταση συστήματος με δύο περιοχές ελέγχου και διασυνδετικής γραμμής με κλειστό βρόχο και ολοκληρωτικό ελεγκτή

3.6 Ρύθμιση παραμέτρων ελεγκτή-Τελικός Σχεδιασμός

Ο σχεδιασμός του ελεγκτή PI

$$\Delta P_{ci,v}(t) = K_{pi}(\Delta P_{tie,i} + B_i \Delta f_i) - K_{li} \int (\Delta P_{tie,i} + B_i \Delta f_i) dt \quad (3.7)$$

$\forall_i = 1, 2, \dots, N$ και $B_i, K_{pi}, K_{li} \in \mathbb{R}$

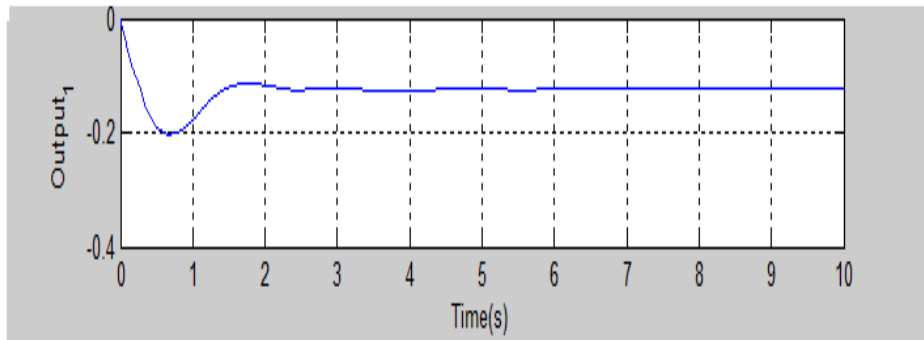
Και δομή $u(t) = \begin{bmatrix} \Delta P_{c1}(t) \\ \Delta P_{c2}(t) \end{bmatrix} = \Delta P_{ci}(t) = C_{pi}[\Sigma \epsilon \Pi_i] - C_{li} \int_0^t [\Sigma \epsilon \Pi_i] dt \quad (3.8)$

Η ρύθμιση των παραμέτρων του ελεγκτή έγινε εμπειρικά μέσω προσομοίωσης και έπειτα από πολλές επαναλήψεις καταλήξαμε στο επιθυμητό αποτέλεσμα για παραμέτρους το οποίο απεικονίζεται στον Πίνακα 3.1

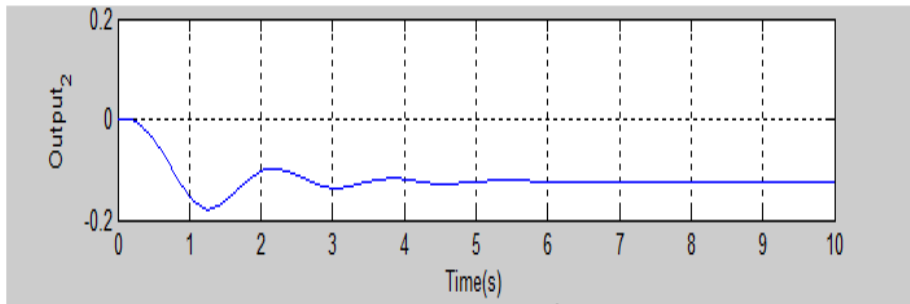
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΣΧΕΣΗ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΑΔΕΣ
Κέρδος Αναλογικού Όρου	K_{pi}		-0.1	-
Κέρδος Ολοκληρωτικού Όρου	K_{Ii}		-0.033	-
Συντελεστής Βαρύτητας	B_i	$B_i = \frac{1}{R_1}$	833.33	MW/Hz
Περιορισμοί Κορεσμού Ρυθμιστή Περιοχής 1	$\overline{\Delta P_{f1}}$	$ \Delta P_{f1}(t) \leq \overline{\Delta P_{f1}}$	15	MW
Περιορισμοί Κορεσμού Ρυθμιστή Περιοχής 2	$\overline{\Delta P_{f2}}$	$ \Delta P_{f2}(t) \leq \overline{\Delta P_{f2}}$	12	MW

Πίνακας 3.1 Τιμές παραμέτρων ελεγκτή PI

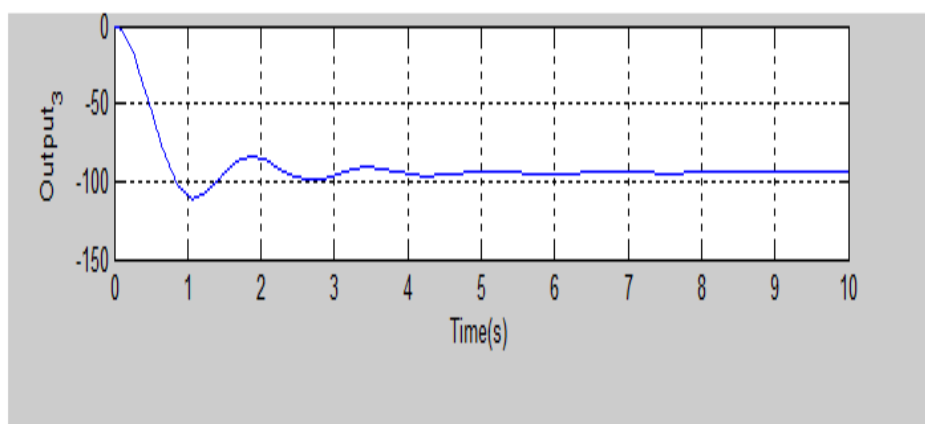
Μέσω προσομοίωσης ώστε να καταλήξουμε στον Πίνακα 3.1 δημιουργήθηκαν και τα εξής διαγράμματα:



Σχ. 3.11 Απόκριση συχνότητας Δf_1



Σχ. 3.12 Απόκριση συχνότητας Δf_2



Σχ. 3.13 Απόκριση διασυνδεδετικής γραμμής

3.7 Προτεινόμενοι (αποκεντρωμένοι) PI ελεγκτές

Στην παράγραφο 3.6 αναφερθήκαμε στην προτεινόμενη δομή του σχεδιασμού ελεγκτή PI, ωστόσο στην 3.7 θα δείξουμε την δομή του σχεδιασμού ελεγκτή PI σε κλειστό βρόχο (close loop) με Σφάλμα Ελέγχου Περιοχής (ΣΕΠ) ως:

$$\Sigma \text{EP}_i(t) = \Delta P_{tie,i}(t) + B_i \Delta F_i(t) \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (3.9)$$

Ξεκινώντας από τον ανοιχτό βρόχο στην παράγραφο (2.11) έχουμε τους πίνακες x, u, w στην σχέση (2.28) οπότε από αυτή τη σχέση εάν πολλαπλασιάσουμε τους πίνακες Bu από τις σχέσεις (2.28) και (2.30) προκύπτει ο πίνακας :

$$Bu = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{Kg1}{Tg1} \Delta P_{C1} \\ \frac{Kg2}{Tg2} \Delta P_{C2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$u_1 = \Delta P_{C1} = C_{P1} \{ \Delta P_{tie,1} + B_1 \Delta F_1 \} + C_{I1} \int_0^t (\Delta P_{tie,1} + B_1 \Delta F_1) dt \quad (3.11)$$

Το ίδιο ακριβώς γίνεται και για το $u_2 = \Delta P_{C2}$.

Οι διαφορικές εξισώσεις που προκύπτουν σε κλειστό βρόχο είναι οι παρακάτω και θα παρατηρήσουμε ότι μόνο οι διαφορικές των \dot{X}_3, \dot{X}_4 επηρεάζονται.

$$\dot{X}_1 = \left(-\frac{1}{T_{P1}} \right) x_1 + \left(\frac{K_{P1}}{T_{P1}} \right) x_5 + \left(-\frac{K_{P1}}{T_{P2}} \right) x_7 + \left[-\frac{K_{P1}}{T_{P1}} \Delta P_{D1} \right] \quad (3.12)$$

$$\dot{X}_2 = \left(-\frac{1}{T_{P2}} \right) x_2 + \left(\frac{K_{P2}}{T_{P2}} \right) x_6 + \left(-d_{12} \frac{K_{P2}}{T_{P2}} \right) x_7 + \left[-\frac{K_{P2}}{T_{P2}} \Delta P_{D2} \right] \quad (3.13)$$

$$\dot{X}_3 = \left(-\frac{Kg1}{R_1 T_{g1}} \right) x_1 + \left(-\frac{1}{T_{g1}} \right) x_3 + \left[\frac{Kg1}{T_{g1}} u_1 \right] \quad (3.14)$$

$$\dot{X}_4 = \left(-\frac{Kg2}{R_2 T_{g2}} \right) x_2 + \left(-\frac{1}{T_{g2}} \right) x_4 + \left[\frac{Kg2}{T_{g2}} u_2 \right] \quad (3.15)$$

...

$$\dot{X}_7 = (2\pi T_{12}) x_1 + (-2\pi T_{12}) x_2 \quad (3.16)$$

με αποτέλεσμα η u_1 και η u_2 να σχηματιστούν ως εξής:

$$u_1 = C_{P1} [X_7 + B_1 X_1] + C_{I1} \int_0^t [X_7 + B_1 X_1] dt \quad (3.17)$$

$$u_2 = C_{P2} [-X_7 + B_2 X_2] + C_{I2} \int_0^t [-X_7 + B_2 X_2] dt \quad (3.18)$$

Μετονομάζω για τον κλειστό βρόχο την $\mathbf{u}_1 = \mathbf{X}_8$ και την $\mathbf{u}_2 = \mathbf{X}_9$ άρα η (3.17) και (3.18) γίνονται:

$$\begin{aligned} \dot{X}_8 = \dot{u}_1 = & C_{P1}\{\dot{X}_7 + B_1\dot{X}_1\} + C_{I1}\{X_7 + B_1X_1\} = C_{P1}\{[2\pi T_{12}X_1 - 2\pi T_{12}X_1] + \\ & \left[-\frac{B_1}{T_{P1}}X_1 + \frac{B_1K_{P1}}{T_{P1}}X_5 - \frac{B_1K_{P1}}{T_{P1}}X_7 - \frac{B_1K_{P1}}{T_{P1}}\Delta P_{D1}\right]\} + C_{I1}\{X_7 + B_1X_1\} = \left[2\pi T_{12}C_{P1} - \right. \\ & \left.\frac{B_1C_{P1}}{T_{P1}} + C_{I1}B_1\right]X_1 + [-2\pi T_{12}C_{P1}]X_2 + \left[\frac{C_{P1}B_1K_{P1}}{T_{P1}}\right]X_5 + \left[-\frac{C_{P1}B_1K_{P1}}{T_{P1}} + C_{I1}\right]X_7 + \\ & \left[-\frac{C_{P1}B_1K_{P1}}{T_{P1}}\Delta P_{D1}\right] \quad (3.19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_9 = \dot{u}_2 = & C_{P2}\{-\dot{X}_7 + B_2\dot{X}_2\} + C_{I2}\{X_7 + B_2X_2\} = C_{P2}\{[-2\pi T_{12}X_1 - 2\pi T_{12}X_2] + \\ & \left[-\frac{B_2}{T_{P2}}X_2 + \frac{B_2K_{P2}}{T_{P2}}X_6 - a_{12}\frac{B_2K_{P2}}{T_{P2}}X_7 - \frac{B_2K_{P2}}{T_{P2}}\Delta P_{D2}\right]\} + C_{I2}\{-X_7 + B_2X_2\} = \left[2\pi T_{12}C_{P2} - \right. \\ & \left.\frac{B_2C_{P2}}{T_{P2}} + C_{I2}B_2\right]X_2 + [-2\pi T_{12}C_{P2}]X_1 + \left[\frac{C_{P2}B_2K_{P2}}{T_{P2}}\right]X_6 + \left[-a_{12}\frac{C_{P2}B_2K_{P2}}{T_{P2}} + C_{I2}\right]X_7 + \\ & \left[-\frac{C_{P2}B_2K_{P2}}{T_{P2}}\Delta P_{D2}\right] \quad (3.20) \end{aligned}$$

Επομένως οι καταστατικές εξισώσεις του κλειστού βρόχου PI είναι:

$$\dot{X}_a = A_a X_a + B_a \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + D_a w \quad (3.21)$$

Και προκύπτουν οι πίνακες

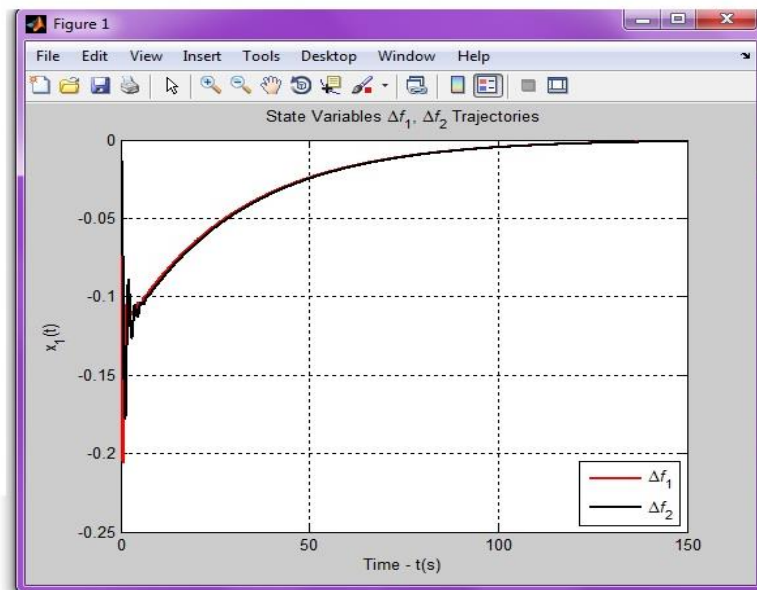
$$\mathbf{Aa} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{p1}} & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{p1}}{T_{p1}} & 0 & -\frac{K_{p1}}{T_{p1}} \\ 0 & -\frac{1}{T_{p2}} & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{p2}}{T_{p2}} & -a_{12}\frac{K_{p2}}{T_{p2}} \\ -\frac{K_{g1}}{R1T_{g1}} & 0 & -\frac{1}{T_{g2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_{g2}}{R2T_{g2}} & 0 & -\frac{1}{T_{g2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{f1}} & 0 & -\frac{1}{T_{f1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{f2}} & 0 & -\frac{1}{T_{f2}} & 0 \\ 2\pi T^{\circ}12 & -2\pi T^{\circ}12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Ba} = [\emptyset]$$

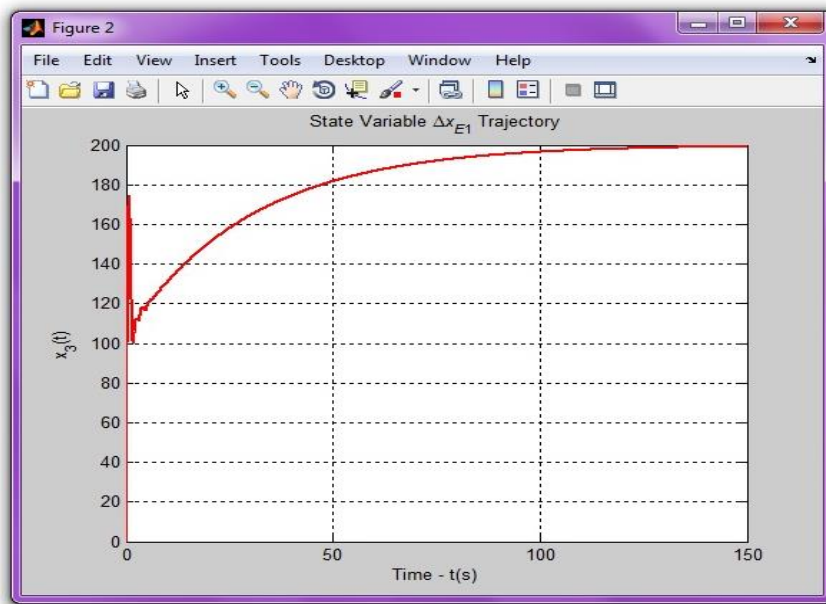
$$\mathbf{D}a = \begin{bmatrix} -\frac{Kp1}{Tp1} & 0 \\ 0 & -\frac{Kp2}{Tp2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{Cp1B1Kp1}{Tp1} & 0 \\ 0 & -\frac{Cp2B2Kp2}{Tp2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta PD1 \\ \Delta PD2 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

3.8 Σχεδιασμός Ελεγκτή Κλειστού Βρόχου

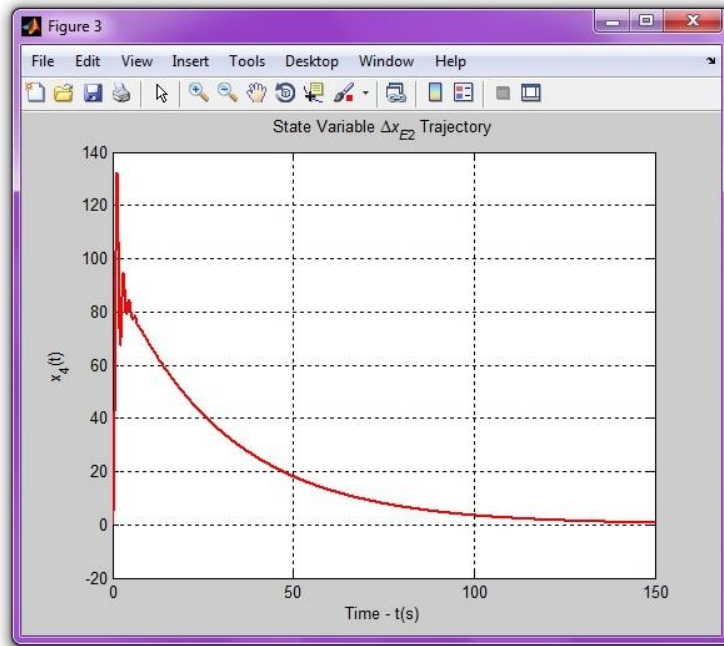
Παραθέτω τα διαγράμματα που προέκυψαν από την close loop για τον ελεγκτή PI. Τα παρακάτω διαγράμματα έγιναν με βάση την προηγούμενη ενότητα (3.7) και προέκυψαν από τις εξισώσεις (3.11-3.21)



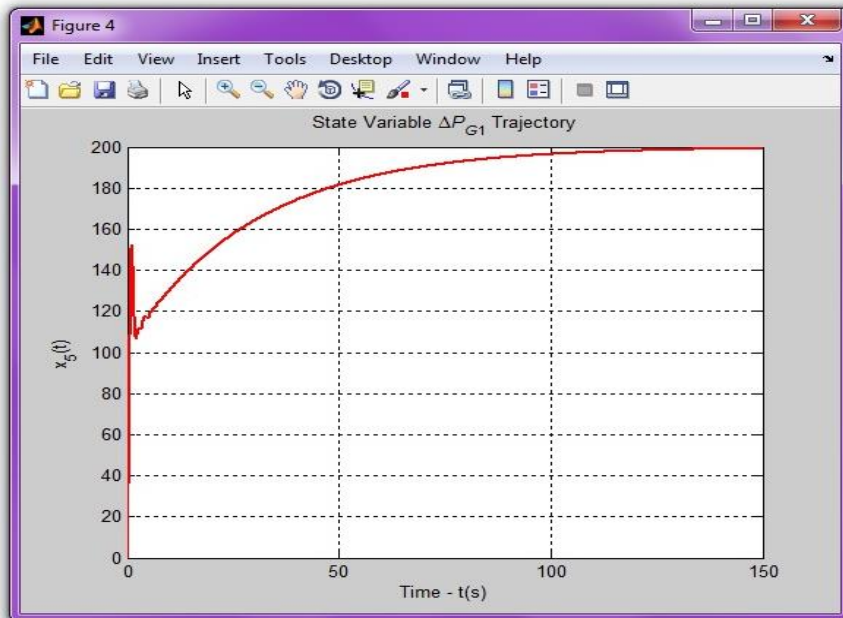
Σχ. 3.14 Κλειστός βρόχος (close loop) για Δf1, Δf2



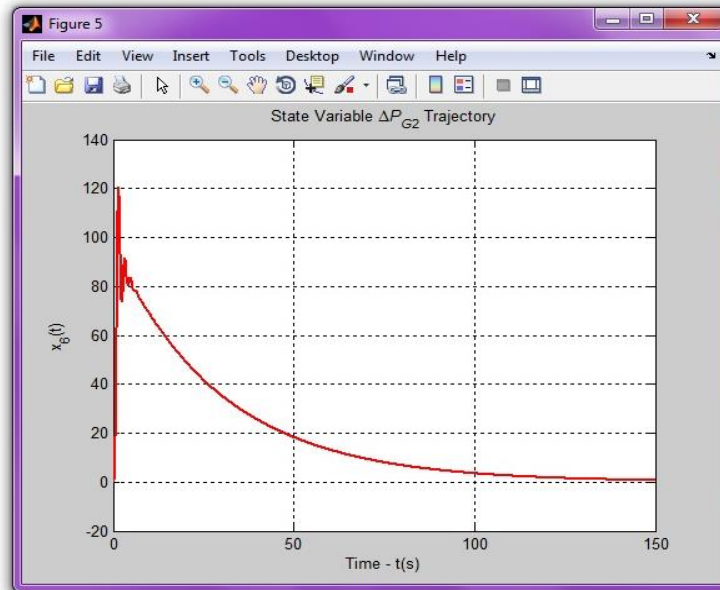
Σχ. 3.15 Κλειστός βρόχος για το Δx_E



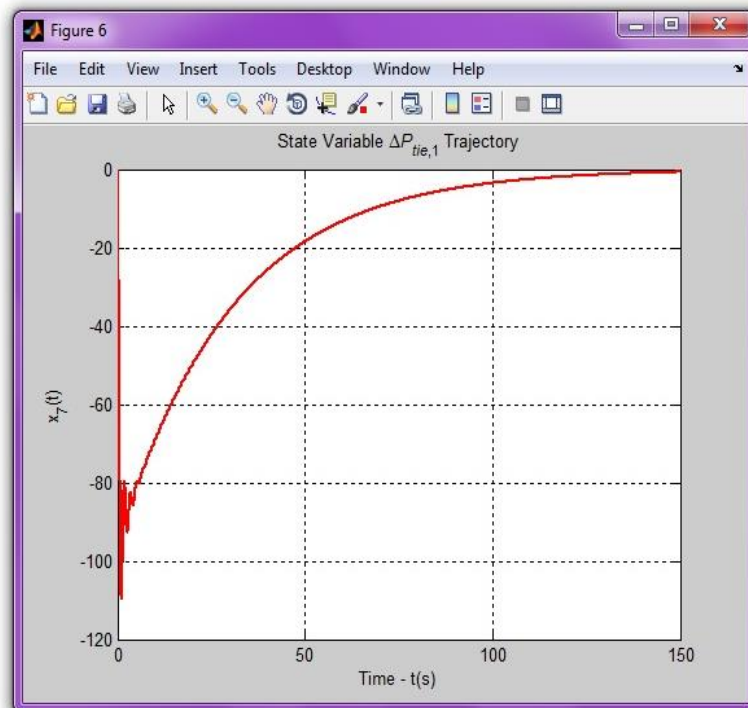
Σχ. 3.16 Κλειστός βρόχος για το Δx_{E2}



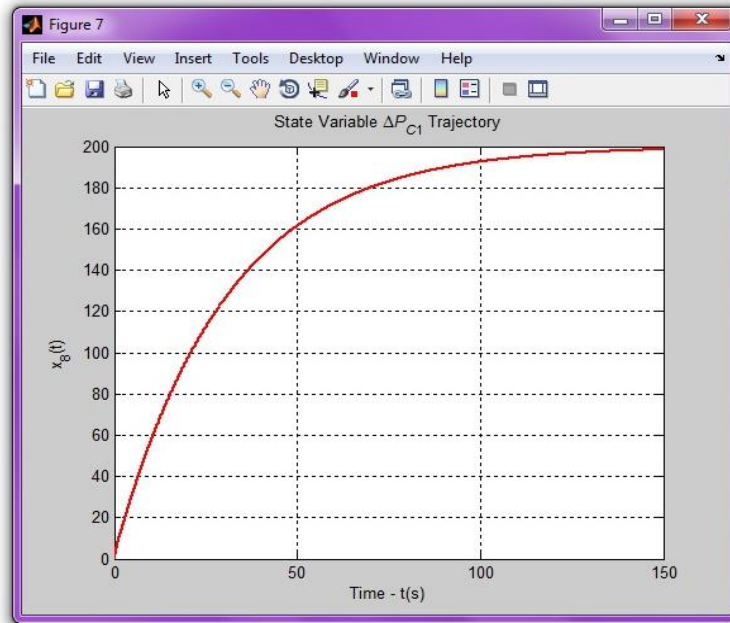
Σχ. 3.17 Κλειστός βρόχος για το ΔPG1



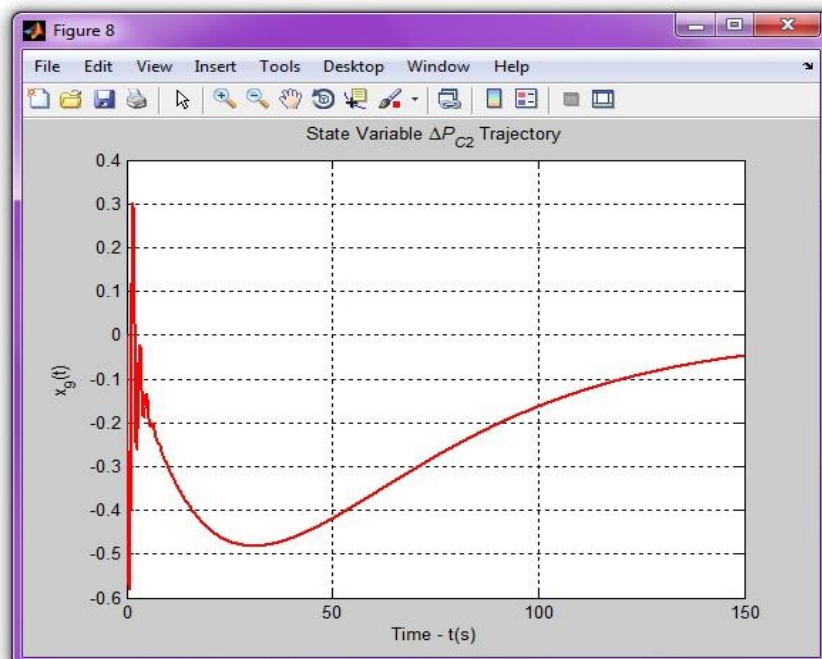
Σχ. 3.18 Κλειστός βρόχος για ΔPG2



Σχ. 3.19 Κλειστός βρόχος της διασυνδετικής γραμμής ΔΡtie,1



Σχ. 3.20 Κλειστός βρόχος για ΔP_{C1}



Σχ. 3.21 Κλειστός βρόχος για ΔP_{C2}

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

4.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας οδηγηθήκαμε σε κάποια συμπεράσματα όσον αφορά τη μελέτη στις δύο περιοχές ,την διασυνδετική γραμμή, τον αποκεντρωμένο ολοκληρωτικό ελεγκτή «I» καθώς στον σχεδιασμό και τη μελέτη του αποκεντρωμένου πολυμεταβλητού ελεγκτή «PI».Οι καταστατικές εξισώσεις σε Σ.Η.Ε. με δύο περιοχές ελέγχου για το υποσύστημα “P-f” βασίζονται σε *απλοποιημένο και γραμμικοποιημένο* μοντέλο.

- Η σπουδαιότερη απλοποίηση είναι η απουσία μοντέλου για την Σύγχρονη Γεννήτρια (θεωρούμε ευσταθές *γραμμικό σύστημα* με συνάρτηση μεταφοράς «1»)
- Λόγω των πολύ αυστηρών προδιαγραφών της συχνότητας η *γραμμικοποίηση* γίνεται σε ένα ή περισσότερα σημεία λειτουργίας.

Η ανάλυση ευστάθειας βασίζεται στο *απλοποιημένο και γραμμικοποιημένο* μοντέλο σε ένα ή περισσότερα σημεία λειτουργίας.

- Θεώρημα κατά ευστάθειας Lyapunov ,ύπαρξη ευστάθειας του αρχικού Μη Γραμμικού Σ.Η.Ε. σε μια φραγμένη περιοχή γύρω από το σημείο γραμμικοποίησης, «τοπικό» αποτέλεσμα.

Όσον αφορά την ανάλυση ευστάθειας στα σημεία λειτουργίας το σύστημα είναι «τοπικά» ευσταθές δηλαδή οι πόλοι του συστήματος είναι όλοι στο αριστερό ημιεπίπεδο που δείχνει ότι το σύστημα ευσταθεί εκτός από ένα σημείο με αποτέλεσμα να υπάρχει σημαντικό πρόβλημα επιδόσεων όπως:

- i. Λόγω διαταραχών στα φορτία δημιουργούνται συχνές αποκλίσεις συχνοτήτων.
- ii. Η χρήση του κλειστού βρόχου (close loop) δημιουργεί μία ζεύξη μεταξύ των δύο συστημάτων, δηλαδή προκαλείται διαταραχή στο φορτίο της Περιοχής 1 (area 1) η οποία με τη σειρά της επιφέρει διαταραχή στη συχνότητα της Περιοχής 2 (area 2) και αντιστρόφως.

Αναγκαίο λοιπόν να σχεδιαστεί-υλοποιηθεί ένα Σ.Α.Ε. (feedback control system) το οποίο θα βελτιώνει τις επιδόσεις δηλαδή θα συμμορφώνει το Σύστημα μας με τις προδιαγραφές (έλεγχος ευστάθειας, πόσο γρήγορα υπακούει το σύστημα σε εντολές και πόσο δυνατό είναι στην επίδραση εξωτερικών διαταραχών)

Η υπάρχουσα βιβλιογραφία χρησιμοποιεί τους αποκεντρωμένους ολοκληρωτικούς ελεγκτές «I» ενώ εμείς διερευνήσαμε αποκεντρωμένο πολυμεταβλητό ελεγκτή «PI» , ουσιαστικά κάνουμε έλεγχο των δύο περιοχών και της διασυνδετικής γραμμής με τη χρήση ελεγκτή PI. Χρησιμοποιούμε αναλογικό και ολοκληρωτικό ελεγκτή «PI» για την επίτευξη μηδενικών μόνιμων σφαλμάτων της συχνότητας και την διακύμανση ισχύος της διασυνδετικής γραμμής από τη συμβατική ισχύ.

Το σήμα ανατροφοδότησης είναι το Σφάλμα Ελέγχου Περιοχής (Σ.Ε.Π.) κάθε μιας περιοχής και η ρύθμιση-επιλογή των κερδών K_p, K_i των ελεγκτών έγινε εμπειρικά (μέσω προσομοίωσης).

4.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Περαιτέρω της παρούσας πτυχιακής εργασίας καθώς είναι αδύνατον να καλυφθεί ευρέως όλο το φάσμα και όλοι οι κλάδοι του θέματος που αναλύσαμε προτείνεται ως μελλοντική έρευνα

- Πιο λεπτομερής μοντελοποίηση
- Να επεκταθεί η μεθοδολογία της γραμμικοποίησης και ο έλεγχος ευστάθειας σε περισσότερα σημεία λειτουργίας
- Να διερευνηθούν πέραν του ελεγκτή «PI» ακόμη πιο προηγμένες γραμμικές μεθοδολογίες ελέγχου (PID, LQR, LQG, Hinfinitiy ,Mixed Sensitivity)
- Να γίνει διερεύνηση μη γραμμικών μεθοδολογιών ελέγχου.
- Ακόμη επανασχεδιασμός των ελεγκτών μας ώστε να χειρίζονται ταυτόχρονα το πρόβλημα της επίδοσης και της σθεναρότητας καθώς και διερεύνηση προβλημάτων σθεναρότητας (Robustness)

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζεται ένα σύστημα δύο περιοχών ελέγχου και συνδετικής γραμμής σε Σ.Η.Ε. Αρχικά παρουσιάζεται η κάθε περιοχή ελέγχου ξεχωριστά με ανοιχτό βρόχο (open loop) και καθώς αναπαράγεται διαπιστώνουμε τι πλεονεκτήματα και τι μειονεκτήματα υπάρχουν..Γι αυτό το λόγο συνδέουμε το σύστημα των δύο περιοχών ελέγχου με μία διασυνδετική γραμμή για να δούμε πως το σύστημα θα λειτουργήσει με κλειστό βρόχο (close loop) και αναπαράγουμε το σύστημα..Διαπιστώνουμε πως υπάρχουν σημαντικά προβλήματα επιδόσεων σε αποκλίσεις συχνοτήτων και στη δημιουργία ζεύξης των δύο συστημάτων με την αλληλεπίδραση των περιοχών ένα και δύο. Ωστόσο η χρήση του αποκεντρωμένου ολοκληρωτικού ελεγκτή δεν επαρκεί. Με αποτέλεσμα τη μελέτη και το σχεδιασμό του αποκεντρωμένου πολυμεταβλητού ελεγκτή «PI» και βάσει προσομοιώσεων καταλήγουμε στα συμπεράσματά μας. Υπάρχει και η δυνατότητα μελλοντικής έρευνας όσον αφορά την εξέλιξη του «PI» ελεγκτή.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

$P_{tie,i}$	διασυνδετική γραμμή	(MW)
T_{mech}, T_{electr}	σταθερά χρόνου	
$n_{Gi} = 1$	βαθμός απόδοσης	
K_B, K_A	γεωμετρική σταθερά	
P_{r1}, P_{r2}	ονομαστική ισχύς περιοχής	(MW)
H_1, H_2	σταθερά αδράνειας	(s)
f^0	συχνότητα	(Hz)
R_1, R_2	ταχύτητα ρύθμισης	(Hz/MW)
D_1, D_2	συντελεστής αυτορρύθμισης φορτίου	(MW/Hz)
T_{g1}, T_{g2}	χρονική σταθερά ρυθμιστή ταχύτητας	(s)
T_{t1}, T_{t2}	χρονική σταθερά στροβίλου	(s)
K_{g1}, K_{g2}	στατικό κέρδος ρυθμιστή ταχύτητας	
K_{t1}, K_{t2}	στατικό κέρδος στροβίλου	
$\Delta P_{d1}, \Delta P_{d2}$	βηματική αύξηση φορτίου	(MW)
T_{p1}, T_{p2}	σταθερά χρόνου γεννήτριας	(s)
K_{p1}, K_{p2}	στατικό κέρδος γεννήτριας	(Hz/MW)
T^0_{12}	συντελεστής συγχρονισμού	(MW/rad)
	Ισχύει : $T_{ij}^0 = P_{max,ij} \cos(\delta_i^0 - \delta_j^0)$	
$\alpha_{12} = -1$	σταθερά	

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1. Διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά συστήματα

Σχήμα 1.2. Ροή Ισχύος (a) Μοντέλο δύο ζυγών (b) Καμπύλη ενεργού ισχύος-γωνίας

Σχήμα 2.1 Σχηματική παράσταση του ρυθμιστή ταχύτητας

Σχήμα 2.2 Συναρτήσεις μεταφοράς στροβίλου *χωρίς αναθέρμανση* και του ρυθμιστή ταχύτητάς του

Σχήμα 2.3 Σχηματική παράσταση μιας μόνο περιοχής ελέγχου

Σχήμα 2.4 Σχηματική παράσταση του συστήματος της 1^{ης} περιοχής

Σχήμα 2.5 Σχηματική παράσταση απόκρισης του συστήματος της 1^{ης} περιοχής

Σχήμα 2.6 Πλήρης σχηματική παράσταση της περιοχής ελέγχου i

Σχήμα 2.7 Σχηματικό διάγραμμα δύο περιοχών ελέγχου και διασυνδετικής γραμμής χωρίς έλεγχο βρόχου

Σχήμα 2.8 Σχηματικό διάγραμμα δύο περιοχών και διασυνδετικής γραμμής με ανοιχτό βρόχο (open loop)

Σχήμα 2.9 Σχηματική προσομοίωση ανοιχτού βρόχου

Σχήμα 2.10 Απόκριση ισχύος του συστήματος σε ανοιχτό βρόχο

Σχήμα 3.1 Σχηματική παράσταση του συστήματος ανοιχτού βρόχου

Σχήμα 3.2 Σχηματική παράσταση του συστήματος κλειστού βρόχου

Σχήμα 3.3 Δομή ΣΑΕ κλειστού βρόχου

Σχήμα 3.4 Σχηματική παράσταση του μοντέλου κατάστασης

Σχήμα 3.5 Αναλογικός Ελεγκτής P

Σχήμα. 3.6 Βηματική χρονική απόκριση αναλογικού ελεγκτή P

Σχήμα 3.7 Βηματική χρονική απόκριση του ολοκληρωτικού ελεγκτή I

Σχήμα 3.8 Αναλογικός-Ολοκληρωτικός Ελεγκτής (PI)

Σχήμα 3.9 Βηματική χρονική απόκριση του αναλογικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή (PI)

Σχήμα.3.10 Σχηματική παράσταση συστήματος με δύο περιοχές ελέγχου και διασυνδετικής γραμμής με κλειστό βρόχο και ολοκληρωτικό ελεγκτή

Σχήμα 3.11 Απόκριση συχνότητας Δf_1

Σχήμα 3.12 Απόκριση συχνότητας Δf_2

Σχήμα 3.13 Απόκριση διασυνδετικής γραμμής

Σχήμα 3.14 Κλειστός βρόχος (close loop) για Δf_1 , Δf_2

Σχήμα 3.15 Κλειστός βρόχος για το Δx_{E1}

Σχήμα 3.16 Κλειστός βρόχος για το Δx_{E2}

Σχήμα 3.17 Κλειστός βρόχος για το ΔP_{G1}

Σχήμα 3.18 Κλειστός βρόχος για ΔP_{G2}

Σχήμα 3.19 Κλειστός βρόχος της διασυνδετικής γραμμής $\Delta P_{tie,1}$

Σχήμα 3.20 Κλειστός βρόχος για ΔP_{C1}

Σχήμα 3.21 Κλειστός βρόχος για ΔP_{C2}

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Κώδικες σε περιβάλλον Matlab

Σε αυτό το παράρτημα αποδίδονται οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν σε όλη την έκταση της διπλωματικής εργασίας, για την εξαγωγή διαγραμμάτων και λοιπών αποτελεσμάτων.

A1. Κώδικας Κεφαλαίου 2

Ενότητα 2.5

```
clear all
fig=5; % initial figure number - normally equals 1 but it can be any
number !!!

% control area 1          units
Pr1 = 2000;                %MW
H1  = 5;                   %s
f0  = 50;                  %Hz
R1  = 2.4/Pr1;              %Hz/MW
D1  = 8.33e-3*Pr1;         %MW/Hz
Tg1 = 0.08;                %s
Tt1 = 0.3;                 %s
Kg1 = 1;
Kt1 = 1;
DPd1 = 100;                %MW
Tp1 = (2*H1*Pr1)/(f0*D1); %s
Kp1 = 1/D1;                %Hz/MW
Ki1 = 0.25 ;

disp(' use a "Workspace" sink in SIMULINK to store output vector
"deltaf1" !! Moreover... if you select... ')
disp(' ... "structure with time" in this "Workspace" block... you can
then plot versus time (and do not need the extra "clock" block ')

%-----
% RUN the simulink file "simul_control_area1_22Mar16"
%-----
T_area1 = sim('simul_control_area1_22Mar16', 5);
% simul_control_area1_22Mar16

%-----
% PLOT
%-----
figure(fig); fig=fig+1;
plot(deltaf1.time, deltaf1.signals.values); %plot(T_area1 , deltaf1); %%
CT output
xlabel('t(s)', 'Interpreter','latex','FontName', 'Times New
Roman','fontsize',16 , 'Fontweight', 'Bold') %xlabel('\omega_{m}
[rad/s]', 'Fontweight', 'Bold')
ylabel('$\Delta f_{1}$ (Hz)', 'Interpreter','latex','FontName', 'Times
New Roman','fontsize', 16, 'Fontweight', 'Bold') %ylabel('\tau_{ind}
[Nm]', 'Fontweight', 'Bold')
```

```
%ylabel('$y(t)$', 'Interpreter','latex','FontName', 'Times New Roman','fontsize',16);
```

```
title('$\Delta f_{1}$ vs Time', 'Interpreter','latex','FontName', 'Times New Roman','fontsize',12)
```

```
hh=legend('$\Delta f_{1}$ [Hz] ', 12)
% hh=legend('$\omega_{m1}(t)\sim$Original R_{2}$' , '$\omega_{m2}(t)\sim$Doubled R_{2}$ ', 12)
set(hh, 'Interpreter', 'latex', 'FontName', 'Times New Roman', 'fontsize',12)
grid on
```

```
%-----
% PRINT AS POSTSCRIPT FILE = print -depsc
%-----
print -depsc Kelly1_22Mar16 % creates Extended Postscript file Kelly1_22Mar16.eps
```

```
print -djpeg Kelly1_22Mar16
```

break

```
subplot(2,1,2);
plot(Tstep_disturb, Umixsyn);
ylabel('$u(t)$', 'Interpreter','latex','FontName', 'Times New Roman','fontsize',16);
title('$u(t)$ (Control Action)',...
      'Interpreter','latex','FontName', 'Times New Roman','fontsize',12)
```

break

```
%control area 2      units
Pr2 = 1500;          %MW
H2  = 4;             %s
f0  = 50;            %Hz
R2  = 2/Pr2;         %Hz/MW
D2  = 7e-3*Pr2;     %MW/Hz
Tg2 = 0.07;         %s
Tt2 = 0.25;         %s
Kg2 = 1;
Kt2 = 1;
DPd2 = 0;           %MW
Tp2 = (2*H2*Pr2)/(f0*D2); %s
Kp2 = 1/D2;        %Hz/MW
```

```

%factor
T12 = 175;           %MW/rad
a12 = -1;

```

A2. Κώδικας Κεφαλαίου 3

Ενότητα 3.6

```

% Interconnected Areas (MW values) - Unconstrained Case
clear all; close all ; clc

% State Variables
VariableNames = {'\Delta\itf\rm_1', '\Delta\itf\rm_2',
'\Delta\itx\rm_{\itE\rm1}', '\Delta\itx\rm_{\itE\rm2}',
'\Delta\itP\rm_{\itG\rm1}', '\Delta\itP\rm_{\itG\rm2}',
'\Delta\itP\rm_{\ittie\rm,1}'};

% Parameters of Area 1      Units
f0 = 50;                    % Hz
Pr1 = 2000;                 % MW
H1 = 5;                     % s
R1 = 2.4/Pr1;               % Hz/MW
D1 = 8.33*1e-3*Pr1;        % MW/Hz

Kg1 = 1;
Tg1 = 0.08;                 % s
Kt1 = 1;
Tt1 = 0.3;                  % s

Kp1 = 1/D1;                 % Hz/Mw
Tp1 = (2*H1*Pr1)/(f0*D1);  % s
DPd1 = 200;                 % MW

```

```

% Parameters of Area 2      Units
Pr2 = 1500;                % MW
H2  = 4;                   % s
R2  = 2/Pr2;               % Hz/MW
D2  = 7*1e-3*Pr2;         % MW/Hz

Kg2 = 1;
Tg2 = 0.07;               % s
Kt2 = 1;
Tt2 = 0.25;               % s

Kp2 = 1/D2;                % Hz/Mw
Tp2 = (2*H2*Pr2)/(f0*D2); % s
DPd2 = 0;                  % MW

% General Parameters      Units
T12 = 175;                 % MW/rad
a12 = -1;

% Matrix A
SysC.Ac = ...
[
    -1/Tp1          0          0          0          Kp1/Tp1    0
    -Kp1/Tp1
    0               -1/Tp2      0          0          0          Kp2/Tp2
    -a12*Kp2/Tp2
    -Kg1/(R1*Tg1)   0          -1/Tg1   0          0          0
    0
    0               -Kg2/(R2*Tg2)  0          -1/Tg2   0          0
    0
    0               0          1/Tt1    0          -1/Tt1   0
    0
    0               0          0          1/Tt2    0          -1/Tt2
    0
    2*pi*T12        -2*pi*T12   0          0          0          0
    0
];

% Matrix B
SysC.Bc = ...
[
    0          0
    0          0
    Kg1/Tg1    0
    0          Kg2/Tg2
    0          0
    0          0
    0          0
];

% Matrix D

```

```

SysC.Dc = ...
[
    -Kp1/Tp1    0
     0          -Kp2/Tp2
     0          0
     0          0
     0          0
     0          0
     0          0
];

% Power Demand
w = ...
[
    DPd1
    DPd2
];

% Automatic Generation Control (AGC)
u = zeros(2, 1);

% Continuous-Time Domain
time_instances = 20;
n = size(SysC.Ac, 1);
x0 = zeros(n, 1);

[t, xc] = ode45(@(t,xc) SysC.Ac*xc + SysC.Bc*u + SysC.Dc*w, [0
time_instances], x0);

% Discretization
disp('LDRI = Ts = 0.2 ')
Ts = 0.2;
N = (time_instances - 0)/Ts + 1;

SysC1 = ss(SysC.Ac, SysC.Bc, [], []);
SysD1 = c2d(SysC1, Ts, 'zoh');
SysD.Ad = SysD1.A;
SysD.Bd = SysD1.B;

SysC2 = ss(SysC.Ac, SysC.Dc, [], []);
SysD2 = c2d(SysC2, Ts, 'zoh');
SysD.Dd = SysD2.B;

% Discrete-Time Domain
xd = zeros(n, time_instances);
xd(:, 1) = x0;
td = linspace(0, time_instances, N);

for i = 2:1:N
    xd(:, i) = SysD.Ad*xd(:, i - 1) + SysD.Bd*u + SysD.Dd*w;
end

```

```

%Plot State-Space Response
for i = 1:1:n

    figure()
    hold on
    plot(t, xc(:, i), 'r', 'linewidth', 2)
    stairs(td, xd(i, :), 'k', 'linewidth', 2)
    title(['State Variable ', VariableNames{i}, ' Trajectory']);
    legend('Continuous-Time Response', 'Discrete-Time Response',
'Location', 'SouthEast')
    xlabel('Time - t(s)');
    ylabel(['x_', num2str(i), '(t)']);
    grid on
    box on

end

%break

%== Plot State-Space Response (For Lecture Purposes)
for i = 1:1:n

    if i == 1

        figure()

        plot(t, xc(:, i), 'r', 'linewidth', 2)
        hold on
        plot(t, xc(:, i + 1), 'k', 'linewidth', 2)

        title(['State Variables ', VariableNames{i}, ', ', VariableNames{i
+ 1}, ' Trajectories']);
        legend(VariableNames{i}, VariableNames{i + 1}, 'Location',
'SouthEast')
        xlabel('Time - t(s)');
        ylabel(['x_', num2str(i), '(t)']);
        grid on
        box on

    elseif i ~= 2

        figure()

        plot(t, xc(:, i), 'r', 'linewidth', 2)

        title(['State Variable ', VariableNames{i}, ' Trajectory']);
        xlabel('Time - t(s)');
        ylabel(['x_', num2str(i), '(t)']);
        grid on
    end
end

```

```

        box on

    end

end

```

A3. Κώδικας Κεφαλαίου 3

Ενότητα 3.7

```

% Interconnected Control Areas (MW values) - Unconstrained Case
clear all; close all ; clc
disp(' LAST LDRI TOUCH = 07-June-2016 = Created by Stathis Kontouras
"Unconstrained_Case_With_Unconstrained_Control.m" .... ')
disp(' Closed_Loop State Equations with PI Control on ACE
Unconstrained/Unsaturated Governor ')

%=== State Variables
VariableNames = {'\Delta\itf\rm_1', '\Delta\itf\rm_2',
'\Delta\itx\rm_{\itE\rm1}', '\Delta\itx\rm_{\itE\rm2}',
'\Delta\itP\rm_{\itG\rm1}', '\Delta\itP\rm_{\itG\rm2}',
'\Delta\itP\rm_{\itC\rm1}', '\Delta\itP\rm_{\itC\rm2}'};

% %===== Area 1 =====
% % Parameters of Area 1 Units
% f0 = 50; % Hz
% SB1 = 2000; % MW
% H1 = 5; % s
% R1 = 2.4/SB1; % Hz/MW
% D1 = 8.33*1e-3*SB1; % MW/Hz
% Kg1 = 1;
% Tg1 = 0.08; % s
% Kt1 = 1;
% Tt1 = 0.3; % s
% Kp1 = 1/D1; % Hz/Mw
% Tp1 = (2*H1*SB1)/(f0*D1); % s
% DPd1 = 200; % MW
% %===== Area 2 =====
% % Parameters of Area 2 Units
% SB2 = 1500; % MW
% H2 = 4; % s

```

```

% R2 = 2/SB2; % Hz/MW
% D2 = 7*1e-3*SB2; % MW/Hz
% Kg2 = 1;
% Tg2 = 0.07; % s
% Kt2 = 1;
% Tt2 = 0.25; % s
% Kp2 = 1/D2; % Hz/Mw
% Tp2 = (2*H2*SB2)/(f0*D2); % s
% DPd2 = 0; % MW
% %==== General Parameters Units
% T12 = 175; % MW/rad
% a12 = -1;

```

```

disp(' file "Parameters_Areal_Area2" reads the Parameters of Areal &
Area 2 ')
Parameters_Areal_Area2

```

```

% Controller Parameters

```

```

% Cp1 = -1;
% Ci1 = -1;
% Cp2 = -1;
% Ci2 = -1;
Cp1 = -0.01;
Ci1 = -0.033;
Cp2 = -0.01;
Ci2 = -0.033;
B1 = 1/R1;
B2 = 1/R2;

```

```

% Matrix A

```

```

SysC.Ac = ...

```

```

[
-1/Tp1 0 0 0 0
0 0 Kp1/Tp1 0 -Kp1/Tp1
0 0 0 0 0
0 0 0 Kp2/Tp2 -1/Tp2
0 0 0 -a12*Kp2/Tp2 -a12*Kp2/Tp2
-Kg1/(R1*Tg1) 0 0 0 0
-1/Tg1 0 0 0 0
Kg1/Tg1 0 0 0 0
0 0 0 0 -Kg2/(R2*Tg2)
0 -1/Tg2 0 0 0
0 Kg2/Tg2 0 0 0
0 0 0 0 0
1/Tt1 0 -1/Tt1 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 1/Tt2 0 -1/Tt2 0
0 0 0 0 0

```



```

    2*pi*T12                                -2*pi*T12
0      0      0      0      0      0
0      0
    2*pi*T12*Cp1    -    Cp1*B1/Tp1    +    Ci1*B1    -2*pi*T12*Cp1
0      0      Cp1*B1*Kp1/Tp1    0      -Cp1*B1*Kp1/Tp1
+ Ci1      0      0
    -2*pi*T12*Cp2                                2*pi*T12*Cp2 - Cp2*B2/Tp2 +
Ci2*B2      0      0      0      Cp2*B2*Kp2/Tp2
a12*(-Cp2*B2*Kp2/Tp2 + Ci2)    0      0
];

```

```
% Matrix B
```

```
n = size(SysC.Ac, 1);
SysC.Bc = zeros(n, 2);
```

```
% Matrix D
```

```
SysC.Dc = ...
```

```
[
    -Kp1/Tp1      0
     0      -Kp2/Tp2
     0      0
     0      0
     0      0
     0      0
     0      0
    -Cp1*B1*Kp1/Tp1    0
     0      -Cp2*B2*Kp2/Tp2
];
```

```
% Power Demand
```

```
w = ...
```

```
[
    DPd1
    DPd2
];
```

```
% Continuous-Time Domain
```

```
time_instances = 150;
```

```
x0 = zeros(n, 1);
```

```
[t, xc] = ode45(@(t,xc) SysC.Ac*xc + SysC.Dc*w, [0 time_instances], x0);
```

```
% Discrete-Time Domain
```

```
Ts = 1;
```

```
N = (time_instances - 0)/Ts + 1;
```

```
% Discetization
```

```
SysC1 = ss(SysC.Ac, SysC.Dc, [], []);
```

```
SysD1 = c2d(SysC1, Ts);
```

```
SysD.Ad = SysD1.A;
```

```
SysD.Dd = SysD1.B;
```

```

xd = zeros(n, time_instances);
xd(:, 1) = x0;
td = linspace(0, time_instances, N);

for i = 2:1:N
    xd(:, i) = SysD.Ad*xd(:, i - 1) + SysD.Dd*w;
end

% Plot State-Space Response
% for i = 1:1:n
%
%     figure()
%     hold on
%     plot(t, xc(:, i), 'r')
%     stairs(td, xd(i, :), 'k')
%     title(['State Variable ', VariableNames{i}, ' Trajectory']);
%     legend('Continuous-Time Response', 'Discrete-Time Response',
'Location', 'SouthEast')
%     xlabel('Time - t(s)');
%     ylabel(['x_', num2str(i), '(t)']);
%     grid on
%     box on
%
% end

% Plot State-Space Response (For Lecture Purposes)
for i = 1:1:n

    if i == 1

        figure()

        plot(t, xc(:, i), 'r', 'linewidth', 2)
        hold on
        plot(t, xc(:, i + 1), 'k', 'linewidth', 2)

        title(['State Variables ', VariableNames{i}, ', ', VariableNames{i
+ 1}, ' Trajectories']);
        legend(VariableNames{i}, VariableNames{i + 1}, 'Location',
'SouthEast')
        xlabel('Time - t(s)');
        ylabel(['x_', num2str(i), '(t)']);
        grid on
        box on

    elseif i ~= 2

        figure()

        plot(t, xc(:, i), 'r', 'linewidth', 2)

```

```
title(['State Variable ', VariableNames{i}, ' Trajectory']);  
xlabel('Time - t(s)');  
ylabel(['x_', num2str(i), '(t)']);  
grid on  
box on
```

```
end
```

```
end
```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος, Βοβός Α. Νικόλαος ,Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Εκδόσεις Ζήτη
- [2] Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος, Βοβός Α. Νικόλαος, Έλεγχος και Ευστάθεια στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Εκδόσεις Ζήτη
- [3] Κοντουράς Ευστάθιος, Τζες Αντώνιος, Μοντελοποίηση Δικτύων Ηλεκτρικής Ενέργειας Ρύθμιση Ενεργού Ισχύος Συχνότητας, Πανεπιστήμιο Πατρών
- [4] Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, Σύγχρονα Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου, 11^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα
- [5] Κοντουράς Ευστάθιος, Τζες Αντώνιος, Δρ. Δρίτσας Λεωνίδα, Adversarial Control Scheme for a Single-Area Power Plant
- [6] Δρ. Γεώργιος Φ Φραγκούλης, Εισαγωγή στο Matlab-Simulink, Διάλεξη 6
- [7] Kundur P. ,Power System Stability and Control
- [8] <http://free-ebooks.gr/el>
- [9] <http://www.electrical4u.com/control-system-closed-loop-open-loop-control-system/>
- [10] http://www.lme.ntua.gr:8080/academic-info-1/prospheromena-mathemata/eisagoge-ston-automato-elegkho/cs15_book_gr_xe_p3.pdf