

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ - ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ: ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΑΣ

Διπλωματική εργασία
του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του
Πανεπιστημίου Πατρών

Σεντούκα Νικόλαου του Άγγελου
Αριθμός Μητρώου : 226844

Θέμα:
Αναγνώριση Σφαλμάτων σε Συστήματα
Ηλεκτρικής Ενέργειας

Επιβλέπων Καθηγητής:
Κούσουλας Νικόλαος

Πάτρα, Φεβρουάριος 2022

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
Πιστοποιείται ότι η Διπλωματική Εργασία
με θέμα
Αναγνώριση Σφαλμάτων σε Συστήματα
Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σεντούκα Νικόλαου του Άγγελου
Αριθμός Μητρώου : 226844

Παρουσιάστηκε δημόσια και εξετάστηκε στο Τμήμα
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών στις
__ / __ / __

Ο επιβλέπων

Ο διευθυντής του τομέα

Κούσουλας Νικόλαος, Καθηγητής

Κούσουλας Νικόλαος, Καθηγητής

Αριθμός Διπλωματικής Εργασίας: 226844/2022

Θέμα: Αναγνώριση Σφαλμάτων σε Συστήματα
Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ο Φοιτητής
Σεντούκας Νικόλαος

Ο Επιβλέπων
Κούσουλας Νικόλαος, Καθηγητής

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την αναγνώριση σφαλμάτων σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται το γραμμικοποιημένο μοντέλο ενός διασυνδεδεμένου δικτύου δύο περιοχών στο οποίο γίνεται προσπάθεια εντοπισμού απότομων προσθετικών σφαλμάτων με την χρήση παρατηρητών κατάστασης ενώ στη συνέχεια επιχειρείται απομόνωση των σφαλμάτων αυτών.

Abstract

This thesis addresses the problem of fault detection in electric power systems. The system being considered is a linearized model of a two-area power system. The fault detection method which is being developed in order to detect and isolate abrupt additive faults is based on state observers.

Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κύριους Αντώνιο Τζε και Νικόλαο Κούσουλα που μου έδωσαν την ευκαιρία να συνεργαστώ μαζί τους και με καθοδήγησαν με την εμπειρία και τις γνώσεις τους. Τους καθηγητές του τμήματος που μου παρείχαν τα απαραίτητα εφόδια ώστε να διεκπεραιώσω την παρούσα εργασία. Τον κύριο Ιωάννη Αρβανιτάκη που με βοήθησε με τις πολύτιμες συμβουλές του.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την πνευματική στήριξη καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Ευρετήριο Εικόνων	iii
Ευρετήριο Πινάκων	vi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Ανασκόπηση των Μεθόδων Ανίχνευσης και Διάγνωσης Σφαλμάτων .	1
1.2 Σφάλματα στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας	3
1.3 Αντικείμενο και δομή της διπλωματικής εργασίας	4
2 Σύστημα Δύο Περιοχών	5
2.1 Εισαγωγή	5
2.2 Διασυνδεδεμένα Δίκτυα	5
2.3 Έλεγχος Αυτόματης Παραγωγής σε Ηλεκτρικά Συστήματα	6
2.4 Λειτουργία χωρίς Κεντρικό Έλεγχο	6
2.5 Αλληλεπίδραση Μεταξύ Βρόχων P - f και Q - V	7
2.6 Δυναμικές Μεταβλητές Κατάστασης Διαφορών	8
2.7 Αυτόματος Έλεγχος Φορτίου-Συχνότητας Γεννητριών	9
2.8 Μαθηματικό Μοντέλο Ρυθμιστή Ταχύτητας	10
2.9 Μαθηματικό Μοντέλο του Στροβίλου	11
2.10 Ισορροπία Μεταβολών Ισχύος σε Περιοχή Ελέγχου	12
2.11 Σχηματική παράσταση της περιοχής ελέγχου	14
2.12 Σύστημα Δύο Περιοχών Ελέγχου	17
2.12.1 Τιμές Παραμέτρων των Δύο Περιοχών	18
2.12.2 Σύστημα Δύο Περιοχών με $\Delta P_{c1} = \Delta P_{c2} = 0$	19
2.12.3 Σύστημα Δύο Περιοχών με $\Delta P_c \neq 0$	22
2.13 Επίλογος	27
3 Ανίχνευση Σφαλμάτων με χρήση Παρατηρητών Κατάστασης	28
3.1 Εισαγωγή	28
3.2 Μαθηματική Περιγραφή του Παρατηρητή	29
3.3 Μαθηματική Περιγραφή Συστήματος με Προσθετικό Σφάλμα	31
3.4 Εφαρμογή Παρατηρητή στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα Δύο Περιοχών .	33
3.5 Ανίχνευση Σφαλμάτων σε Διασυνδεδεμένο Δίκτυο Δύο Περιοχών . . .	34
3.5.1 Ορισμός Υπολοίπων	34
3.5.2 Σφάλμα 1 ^{ου} αισθητήρα	35
3.5.3 Σφάλμα 2 ^{ου} αισθητήρα	37
3.5.4 Σφάλμα 3 ^{ου} αισθητήρα	37
3.5.5 Σφάλμα 1 ^{ου} Ενεργοποιητή	39
3.5.6 Σφάλμα 2 ^{ου} Ενεργοποιητή	39
3.5.7 Μορφές Υπολοίπων	41
3.5.8 Ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων	41
3.6 Ανίχνευση Σφαλμάτων με Χρήση Ταχύτερου Παρατηρητή	43
3.6.1 Σφάλμα 1 ^{ου} αισθητήρα	43
3.6.2 Σφάλμα 2 ^{ου} αισθητήρα	45
3.6.3 Σφάλμα 3 ^{ου} αισθητήρα	45
3.6.4 Σφάλμα 1 ^{ου} Ενεργοποιητή	47

3.6.5	Σφάλμα 2 ^{ov} Ενεργοποιητή	47
3.6.6	Ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων	48
3.7	Συγκριτικά Αποτελέσματα	49
3.8	Επίλογος	50
4	Απομόνωση Σφαλμάτων	51
4.1	Εισαγωγή	51
4.2	Προσθετικά Σφάλματα Αισθητήρα	51
4.3	Απομόνωση Σφαλμάτων σε Διασυνδεδεμένο Δίκτυο Δύο Περιοχών . .	53
4.3.1	Σφάλμα 1 ^{ov} αισθητήρα	53
4.3.2	Σφάλμα 2 ^{ov} αισθητήρα	55
4.3.3	Σφάλμα 3 ^{ov} αισθητήρα	56
4.3.4	Σφάλματα Ενεργοποιητών	58
4.3.5	Ελάχιστες τιμές απομόνωσης σφαλμάτων	61
4.4	Απομόνωση Σφαλμάτων με Χρήση Ταχύτερου Παρατηρητή	62
4.4.1	Σφάλμα 1 ^{ov} αισθητήρα	62
4.4.2	Σφάλμα 2 ^{ov} αισθητήρα	64
4.4.3	Σφάλμα 3 ^{ov} αισθητήρα	65
4.4.4	Σφάλματα Ενεργοποιητών	67
4.4.5	Ελάχιστες τιμές απομόνωσης σφαλμάτων	71
4.5	Συμπεράσματα και συγκριτικά αποτελέσματα	71
4.6	Επίλογος	72
5	Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	73
	Βιβλιογραφία	74
	Α' Κώδικας Προσομοίωσης	76
	Β' Προσομοίωση Simulink	91

Ευρετήριο Εικόνων

1.1	Θέση σφαλμάτων	2
1.2	Είδη σφαλμάτων	2
1.3	Χρονική εξέλιξη σφαλμάτων	3
2.1	Διασυνδεδεμένες Περιοχές Ελέγχου	6
2.2	Βρόχοι ελέγχου στροβιλογεννήτριας	7
2.3	Σχηματική παράσταση του ρυθμιστή ταχύτητας	9
2.4	Συναρτήσεις μεταφοράς στροβίλου χωρίς αναθέρμανση και του ρυθμιστή ταχύτητας του	11
2.5	Σχηματική παράσταση της εξ. 2.24	15
2.6	Σχηματική παράσταση της εξ. 2.25	15
2.7	Πλήρης σχηματική παράσταση της περιοχής ελέγχου i	16
2.8	Σχηματική παράσταση συστήματος με δύο περιοχές ελέγχου	17
2.9	Απόκριση συχνοτήτων και ισχύος της διασυνδετικής γραμμής για βηματική μεταβολή φορτίου, χωρίς σήμα ελέγχου.	22
2.10	Απόκριση συχνοτήτων και ισχύος της διασυνδετικής γραμμής για βηματική μεταβολή φορτίου με χρήση ελεγκτή PI.	27
3.1	Δομικό διάγραμμα παρατηρητή	30
3.2	Γενική δομή παραγωγής υπολοίπων με βάση παρατηρητές	31
3.3	Εκτίμηση καταστάσεων Δf_1 , Δf_2 και $\Delta P_{tie,1}$	33
3.4	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων για βηματική μεταβολή $\Delta D_1 = 200$ MW	34
3.5	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 1 ^{ου} αισθητήρα	35
3.6	Μεγεθυμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 1 ^{ου} αισθητήρα	36
3.7	Αποτυχία ανίχνευσης σφάλματος	36
3.8	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 2 ^{ου} αισθητήρα	37
3.9	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 3 ^{ου} αισθητήρα	38
3.10	Μεγεθυμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 3 ^{ου} αισθητήρα	38
3.11	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 1 ^{ου} ενεργοποιητή	39
3.12	Μεγεθυμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 1 ^{ου} ενεργοποιητή	39
3.13	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 2 ^{ου} ενεργοποιητή	40
3.14	Μορφές Υπολοίπων	41
3.15	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 0.2% του 1 ^{ου} αισθητήρα	42
3.16	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 1 ^{ου} αισθητήρα με ταχύτερο παρατηρητή	43

3.17	Μεγεθυμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 1 ^{ου} αισθητήρα με ταχύτερο παρατηρητή .	44
3.18	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 2 ^{ου} αισθητήρα με ταχύτερο παρατηρητή	45
3.19	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 3 ^{ου} αισθητήρα με ταχύτερο παρατηρητή	46
3.20	Μεγεθυμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 3 ^{ου} αισθητήρα με ταχύτερο παρατηρητή .	46
3.21	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 1 ^{ου} ενεργοποιητή με ταχύτερο παρατηρητή	47
3.22	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 2 ^{ου} ενεργοποιητή με ταχύτερο παρατηρητή	48
4.1	Τράπεζα παρατηρητών: όλες οι εισοδοί, μία έξοδος	52
4.2	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 1 ^{ου} αισθητήρα	53
4.3	Μεγεθυμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 1 ^{ου} αισθητήρα	54
4.4	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 0.2% του 1 ^{ου} αισθητήρα	54
4.5	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 2 ^{ου} αισθητήρα	55
4.6	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 0.3% του 2 ^{ου} αισθητήρα	56
4.7	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 3 ^{ου} αισθητήρα	57
4.8	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 0.22% του 3 ^{ου} αισθητήρα	57
4.9	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 1 ^{ου} ενεργοποιητή	58
4.10	Μεγεθυμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 1 ^{ου} ενεργοποιητή	59
4.11	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 0.35% του 1 ^{ου} ενεργοποιητή	59
4.12	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων για τυχαία βηματική μεταβολή και σφάλμα στον δεύτερο αισθητήρα	60

4.13	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμημένων τιμών και υπολοίπων για τυχαία βηματική μεταβολή και σφάλμα στον δεύτερο αισθητήρα	61
4.14	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 1 ^{ου} αισθητήρα για ταχύτερο παρατηρητή	62
4.15	Μεγεθυμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 1 ^{ου} αισθητήρα για ταχύτερο παρατηρητή	63
4.16	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 0.25% του 1 ^{ου} αισθητήρα για ταχύτερο παρατηρητή	63
4.17	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 2 ^{ου} αισθητήρα για ταχύτερο παρατηρητή	64
4.18	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 0.28% του 2 ^{ου} αισθητήρα για ταχύτερο παρατηρητή	65
4.19	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 3 ^{ου} αισθητήρα για ταχύτερο παρατηρητή	66
4.20	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 0.28% του 3 ^{ου} αισθητήρα για ταχύτερο παρατηρητή	66
4.21	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 1 ^{ου} ενεργοποιητή για ταχύτερο παρατηρητή	67
4.22	Μεγεθυμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 1 ^{ου} ενεργοποιητή για ταχύτερο παρατηρητή	68
4.23	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 5% του 1 ^{ου} ενεργοποιητή για ταχύτερο παρατηρητή	68
4.24	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 2 ^{ου} ενεργοποιητή για ταχύτερο παρατηρητή	69
4.25	Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 5% του 1 ^{ου} ενεργοποιητή για ταχύτερο παρατηρητή	70
2.1	Προσομοίωση Συστήματος Δύο Περιοχών Ελέγχου, Παρατηρητή Κατάστασης και Υπολογισμού Υπολοίπων για την εύρεση σφαλμάτων με χρήση Simulink	92
2.2	Προσομοίωση Συστήματος Δύο Περιοχών Ελέγχου, Παρατηρητών Κατάστασης και Υπολογισμού Υπολοίπων για την απομόνωση σφαλμάτων με χρήση Simulink	95

Ευρετήριο Πινάκων

1	Τιμές παραμέτρων περιοχής 1	18
2	Τιμές παραμέτρων περιοχής 2	19
3	Τιμές παραμέτρων των ελεγκτών	23
4	Ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων	41
5	Ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων για ταχύτερο παρατηρητή . .	48
6	Ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων	49
7	Χρόνοι εντοπισμού σφαλμάτων για τα ελάχιστα σφάλματα	49
8	Χρόνοι εντοπισμού σφαλμάτων για το ίδιο σφάλμα	50
9	Υπόλοιπα εντοπισμού ελαχίστων σφαλμάτων	50
10	Ελάχιστες τιμές απομόνωσης σφαλμάτων	61
11	Ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων ενεργοποιητών	61
12	Ελάχιστες τιμές απομόνωσης σφαλμάτων	71
13	Ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων ενεργοποιητών	71
14	Ελάχιστες τιμές απομόνωσης σφαλμάτων	71
15	Χρόνοι απομόνωσης σφαλμάτων για τα ελάχιστα σφάλματα	71
16	Ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων ενεργοποιητών	72

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

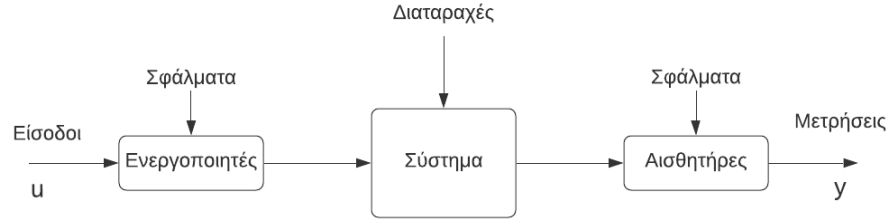
1.1 Ανασκόπηση των Μεθόδων Ανίχνευσης και Διάγνωσης Σφαλμάτων

Τα πολύπλοκα συστήματα αυτοματισμού που χρησιμοποιούνται τόσο ευρέως στη σύγχρονη τεχνολογία αποτελούνται από εκατοντάδες αλληλοεξαρτώμενα τμήματα, τα οποία ενδέχεται να υπόκεινται μεμονωμένα σε κάποια δυσλειτουργία ή βλάβη. Μια συνολική βλάβη στα συστήματα αυτά μπορεί να παρουσιάσει μεγάλες οικονομικές απώλειες ή κινδύνους για το προσωπικό. Είναι συνεπώς απαραίτητο να παρέχεται στην απαιτούμενη λειτουργία ολόκληρου του συστήματος, ένα σχέδιο συντήρησης που θα αντικαθιστά τα φθαρμένα εξαρτήματα πριν δυσλειτουργήσουν και ένα σύστημα παρακολούθησης που ανιχνεύει ένα σφάλμα τη στιγμή κατά την οποία συμβαίνει. Το σύστημα αυτό προσδιορίζει τη δυσλειτουργία του ελαττωματικού εξαρτήματος και αντισταθμίζει το σφάλμα του στοιχείου με τη χρήση άλλων πλεονάζοντων στοιχείων έτσι ώστε το συνολικό σύστημα να συνεχίσει να λειτουργεί ικανοποιητικά. [1].

Με τον όρο σφάλμα εννοούμε μια μη επιτρεπόμενη απόκλιση τουλάχιστον μιας χαρακτηριστικής ιδιότητας ή παραμέτρου του συστήματος από την αποδεκτή, συνήθη, τυπική του κατάσταση [2]. Η αιτία εμφάνισης ενός σφάλματος μπορεί να προέρχεται από: α) τη λανθασμένη σχεδίαση ή/και συναρμολόγηση του συστήματος, β) την ακατάλληλη λειτουργία ή την έλλειψη συντήρησης του συστήματος, και γ) τη γήρανση, διάβρωση ή φθορά των υλικών υπό κανονική λειτουργία του συστήματος. Ενώ η πρώτη αιτία μπορεί να αντιμετωπιστεί στα πρώτα στάδια σχεδίασης και κατασκευής του συστήματος, μειώνοντας το κόστος και τον χρόνο καθυστέρησης μέχρι τη στιγμή που το σύστημα να είναι διαθέσιμο για χρήση, οι άλλες αιτίες μπορούν να διαπιστωθούν και να θεραπευτούν με τη χρήση εργαλείων Ανίχνευσης και Διάγνωσης Σφαλμάτων [3].

Ανίχνευση Σφαλμάτων είναι η διαδικασία εντοπισμού ύπαρξης σφαλμάτων στο σύστημα και της χρονικής στιγμής την οποία αυτά συνέβησαν. Η Διάγνωση Σφαλμάτων μπορεί να χωριστεί σε δύο επιμέρους διαδικασίες, την Απομόνωση και την Αναγνώριση του σφάλματος. Η Απομόνωση Σφαλμάτων αποσκοπεί στον εντοπισμό του είδους, της θέσης και του χρόνου ανίχνευσης ενός σφάλματος αξιολογώντας τα συμπτώματα και έπεται της ανίχνευσης. Η Αναγνώριση Σφαλμάτων, η οποία πραγματοποιείται μετά την απομόνωση, έχει ως στόχο την εκτίμηση του μεγέθους του εντοπισμένου σφάλματος [4].

Τα σφάλματα μπορούν να διαχωριστούν με βάση τη θέση τους και με βάση τη μοντελοποίησή τους. Με βάση τη θέση τους διακρίνονται σε σφάλματα στους αισθητήρες, τα οποία προκαλούν απόκλιση μεταξύ της μετρούμενης και της πραγματικής τιμής κάποιας μεταβλητής του συστήματος, και σε σφάλματα στους ενεργοποιητές, τα οποία προκαλούν απόκλιση μεταξύ μιας εντολής εισόδου και της πραγματικής εντολής του ενεργοποιητή.



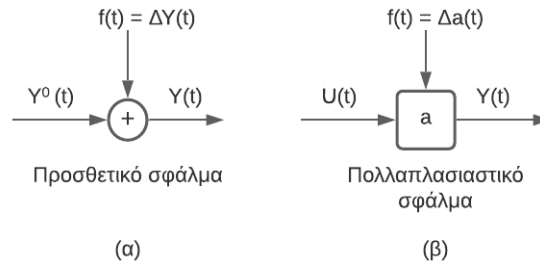
Σχήμα 1.1: Θέση σφαλμάτων

Με βάση τη μοντελοποίηση διακρίνονται σε αθροιστικά σφάλματα όταν αντιστοιχούν σε άγνωστες εισόδους που δρουν στο σύστημα και οι οποίες επηρεάζουν τις εξόδους του συστήματος και είναι ανεξάρτητες από τις γνωστές εισόδους [5]. Στο Σχήμα 1.2α παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αθροιστικού σφάλματος στο οποίο ισχύει:

$$Y(t) = Y^o(t) + \Delta Y(t) = Y^o(t) + f(t) \quad (1.1)$$

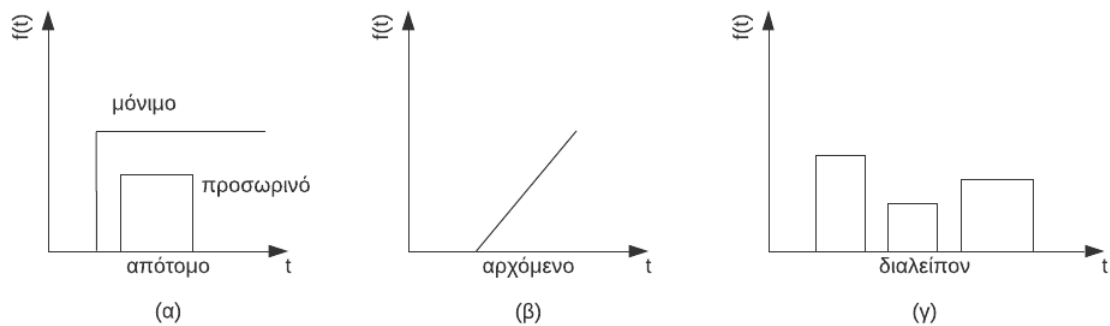
Από την άλλη, τα σφάλματα ονομάζονται πολλαπλασιαστικά όταν αντιστοιχούν σε μεταβολές στις παραμέτρους της διεργασίας, οι οποίες προκαλούν μεταβολές στις εξόδους του συστήματος και εξαρτώνται επίσης από το πλάτος των γνωστών εισόδων [5]. Ένα παράδειγμα πολλαπλασιαστικού σφάλματος φαίνεται στο Σχήμα 1.2β όπου ισχύει:

$$Y(t) = (a + \Delta a(t))U(t) = aU(t) + \Delta a(t)U(t) = Y^o(t) + f(t)U(t) \quad (1.2)$$



Σχήμα 1.2: Είδη σφαλμάτων

Μία ακόμα διάκριση που μπορεί να γίνει με βάση τη μοντελοποίηση τους, είναι ανάλογα με τη χρονική τους εξέλιξη. Μπορούν να χαρακτηριστούν ως α) απότομα, όταν συμβαίνουν ξαφνικά και παραμένουν για το υπόλοιπο της λειτουργίας του συστήματος (μόνιμα σφάλματα) ή παραμένουν για ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα (προσωρινά σφάλματα) (Σχήμα 1.3α) [6], β) αρχόμενα, όταν εξελίσσονται βαθμιαία [7] (Σχήμα 1.3β), και γ) διαλείποντα, όταν εμφανίζονται και εξαλείφονται απότομα για έναν αριθμό μη-περιοδικών χρονικών διαστημάτων (Σχήμα 1.3γ) [8].



Σχήμα 1.3: Χρονική εξέλιξη σφαλμάτων

Αφού μοντελοποιηθούν τα σφάλματα, πρέπει να επιλεχθεί η κατάλληλη μέθοδος Ανίχνευσης και Διάγνωσης Σφαλμάτων έχοντας ως γνώμονα τις διαθέσιμες μετρήσεις και τα μαθηματικά μοντέλα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η πιο απλή μέθοδος Ανίχνευσης Σφαλμάτων στηρίζεται στον έλεγχο μόνο της εξόδου της διεργασίας, θεωρώντας ότι η εμφάνιση ενός σφάλματος θα αντικατοπτριστεί ως αλλαγή στο παρατηρούμενο σήμα εξόδου. Πιο σύνθετες μέθοδοι Ανίχνευσης Σφαλμάτων είναι αυτές που χρησιμοποιούν μοντέλα σημάτων και διεργασιών. Για την υλοποίηση των μεθόδων που βασίζονται σε μοντέλα σημάτων χρησιμοποιείται ανάλυση Fourier, φασματική εκτίμηση παραμέτρων, ανάλυση συσχέτισης ή φάσματος. εκτίμηση ARMA παραμέτρων και ανάλυση μικρού σήματος οποίες εφαρμόζονται σε περιοδικά, στοχαστικά ή μη στάσιμα σήματα. Οι μέθοδοι που βασίζονται σε μοντέλα διεργασιών χρησιμοποιούν πολλαπλά σήματα, ενώ τα μοντέλα που περιγράφουν τη διεργασία υπό εξέταση μπορεί να είναι είτε θεωρητικά είτε πειραματικά. Για την υλοποίηση τους χρησιμοποιείται εκτίμηση παραμέτρων, εκτίμηση καταστάσεων, παρατηρητές κατάστασης/εξόδου, εξισώσεις ισοτιμίας, νευρωνικά δίκτυα [3].

Μετά τη διαδικασία της Ανίχνευσης, ακολουθεί αυτή της Διάγνωσης Σφαλμάτων. Στόχος της είναι ο καθορισμός της σχέσης μεταξύ των συμπτωμάτων και των φυσικών σφαλμάτων. Οι μέθοδοι Διάγνωσης Σφαλμάτων κατηγοριοποιούνται με βάση τη διαθέσιμη γνώση σχετικά με τα σφάλματα. Εάν δεν υπάρχει καμία πληροφορία σχετικά με την αιτιότητα σφάλματος-συμπτώματος, εφαρμόζονται οι μέθοδοι ταξινόμησης, οι οποίες βασίζονται σε πρότυπα συμπτωμάτων. Οι μέθοδοι ταξινόμησης διακρίνονται σε: α) μεθόδους αναγνώρισης προτύπων, β) στατιστικές μεθόδους χρησιμοποιώντας Bayesian ταξινομητές ή δέντρα αποφάσεων, γ) προσεγγιστικές μεθόδους χρησιμοποιώντας πολυωνυμικούς ταξινομητές, δ) συναρτήσεις πυκνότητας χρησιμοποιώντας γεωμετρικούς ταξινομητές και ε) μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης, χρησιμοποιώντας ασαφείς και νευρωνικούς ταξινομητές [3].

1.2 Σφάλματα στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι επιρρεπή σε συχνές βλάβες που μπορούν να προκύψουν σε οποιοδήποτε από τα στοιχεία τους, όπως οι μονάδες παραγωγής, οι μετασχηματιστές, οι γραμμές μεταφοράς κτλ. Τέτοιες βλάβες μπορεί να προκαλέσουν σημαντική διατάραξη στην παροχή ενέργειας, να αποσταθεροποιήσουν

ολόκληρο το σύστημα ακόμα και να προκαλέσουν τραυματισμούς στο προσωπικό. Η ανίχνευση σφαλμάτων επομένως είναι μια ύψιστης σημασίας λειτουργία από οικονομική και επιχειρησιακή άποψη [9].

Σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα ισχύος, το οποίο αποτελείται από δύο ή περισσότερες περιοχές, γίνεται έλεγχος της συχνότητας και της ισχύς σε αποκεντρωμένη βάση, δηλαδή κάθε περιοχή προσπαθεί να διατηρεί την ανταλλασσόμενη ισχύ στην προδιαγεγραμμένη τιμή. Ένα σφάλμα στην εφαρμογή του ελέγχου ισχύος συχνότητας, όπως ένα σφάλμα στις μετρήσεις των απαιτούμενων μεταβλητών του συστήματος, π.χ. της συχνότητας, της ροής των γραμμών, βλάβη στην τηλεμέτρηση αυτών των σημάτων ή ένα σφάλμα στους ενεργοποιητές ή τους ελεγκτές του συστήματος, ενδέχεται να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητη απόδοση, συμπεριλαμβανομένων των μεγάλων αποκλίσεων στη συχνότητα του συστήματος, στις εναλλαγές ισχύος ή στα φορτία των μονάδων παραγωγής. Ως εκ τούτου, τα σφάλματα θα πρέπει να ανιχνεύονται και να απομονώνονται το συντομότερο δυνατόν, σε πραγματικό χρόνο εφόσον αυτό είναι εφικτό, έτσι ώστε να λαμβάνονται τα απαραίτητα διορθωτικά μέτρα πριν παρουσιαστούν σημαντικές επιπλοκές στην παροχή ενέργειας [10].

1.3 Αντικείμενο και δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στην Ανίχνευση και Διάγνωση Σφαλμάτων σε ένα διασυνδεδεμένο Ηλεκτρικό Δίκτυο δύο Περιοχών. Τα σφάλματα που εντοπίζονται είναι απότομα, προσωρινά και προσθετικά και οι μέθοδοι εντοπισμού που χρησιμοποιούνται βασίζονται σε παρατηρητές κατάστασης. Η διάρθρωση της παρούσας εργασίας είναι η εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται η ανάλυση του ηλεκτρικού συστήματος το οποίο υπόκειται στα σφάλματα. Πιο συγκεκριμένα αναλύεται ο τρόπος ελέγχου της πραγματικής ισχύος ΣΗΕ, με σκοπό την εξισορρόπηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό φορτίο. Περιγράφεται το σύστημα ελέγχου πραγματικής ισχύος-συχνότητας ($P-f$) γεννητριών και το μαθηματικό μοντέλο ενός Συστήματος δύο Περιοχών Ελέγχου. Τέλος αναλύεται ο τρόπος ελέγχου διασυνδεδεμένων ΣΗΕ, για ικανοποιητική απόκριση σε βηματικές μεταβολές φορτίου.

Στο Κεφάλαιο 3 αρχικά γίνεται η μαθηματική περιγραφή ενός παρατηρητή καταστάσεως και ενός συστήματος στο οποίο επενεργούν προσθετικά σφάλματα στους αισθητήρες και στους ενεργοποιητές. Στην συνέχεια σχεδιάζονται δύο παρατηρητές κατάστασης με διαφορετικές ιδιοτιμές σε μια προσπάθεια να εντοπιστούν τα σφάλματα στο διασυνδεδεμένο δίκτυο δύο περιοχών, καταγράφονται οι ελάχιστες τιμές εντοπισμού και γίνεται μία σύγκριση μεταξύ των δύο.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η διαδικασία απομόνωσης σφαλμάτων αισθητήρων με την χρήση μιας τράπεζας παρατηρητών. Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο σχεδιάζονται δύο συστάδες παρατηρητών με διαφορετικές ιδιοτιμές και αφού καταγραφούν οι ελάχιστες τιμές απομόνωσης σφαλμάτων, στο τέλος πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργασίας και πα-
ρατίθενται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2

Σύστημα Δύο Περιοχών

2.1 Εισαγωγή

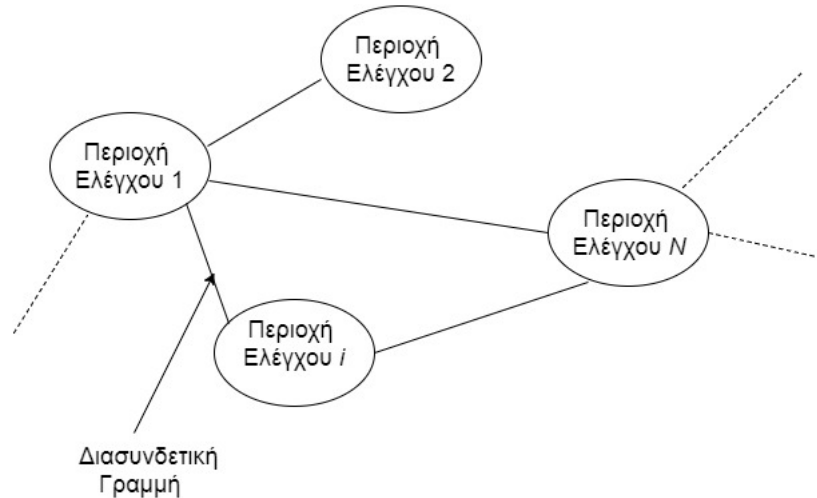
Ο έλεγχος των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι απαραίτητος για να διατηρεί μια συνεχή ισορροπία μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και του μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού φορτίου, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να διατηρούν τις ονομαστικές τους τιμές η συχνότητα και οι τάσεις των ζυγών με εξασφαλισμένη την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Επί πλέον επιδιώκεται το κόστος παραγωγής να είναι ελάχιστο. Όταν για την κάλυψη μεταβολής του φορτίου δεν είναι αρκετή η διαθέσιμη ισχύς μιας μονάδας παραγωγής, η κατανομή του φορτίου μεταξύ των σταθμών είναι μια σημαντική λειτουργία, η οποία ταυτόχρονα πρέπει να εξασφαλίζει ελάχιστο κόστος και να επιλύεται συνέχεια. Οι μεταβολές της συχνότητας του συστήματος είναι μια ένδειξη των ανισορροπιών μεταξύ φορτίου και παραγωγής και χρησιμοποιούνται για το γρήγορο έλεγχο της παραγωγής [11].

2.2 Διασυνδεδεμένα Δίκτυα

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. Κάθε περιοχή ελέγχου έχει το δικό της φορτίο και προσπαθεί να ικανοποιήσει τις αυξομειώσεις του.

Ελεγχόμενο διασυνδεδεμένο σύστημα είναι το ΣΗΕ που περιλαμβάνει περισσότερες από μία περιοχές ελέγχου διασυνδεδεμένες μεταξύ τους με ασθενείς διασυνδετικές γραμμές όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Οι διασυνδετικές γραμμές χαρακτηρίζονται ως ασθενείς επειδή η ισχύς που μεταφέρουν είναι πολύ μικρό ποσοστό της ισχύος των περιοχών που συνδέουν. Οι ροές ισχύος των διασυνδετικών γραμμών καθορίζονται από προγράμματα, που διασφαλίζουν την οικονομική και ασφαλή λειτουργία του ελεγχόμενου διασυνδεδεμένου συστήματος. Οι ηλεκτρικές περιοχές που δείχνονται στο Σχήμα 2.1 είναι ανεξάρτητα ηλεκτρικά συστήματα.

Η λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας σε μορφή διασυνδεδεμένων δικτύων προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Η ανταλλαγή ισχύων μεταξύ ηλεκτρικών περιοχών βελτιώνει την αντιστάθμιση των διαταραχών φορτίου με ταυτόχρονη μείωση της απαιτούμενης θερμής εφεδρείας. Επίσης μια μείωση της εφεδρικής ισχύος κάθε διασυνδεδεμένου συστήματος είναι δυνατή, σαν αποτέλεσμα της αμοιβαίας βοήθειας σε περίπτωση σοβαρών σφαλμάτων.



Σχήμα 2.1: Διασυνδεδεμένες Περιοχές Ελέγχου

2.3 Έλεγχος Αυτόματης Παραγωγής σε Ηλεκτρικά Συστήματα

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 ρόλος και ο σκοπός τους είναι πολύ διαφορετικός, αλλά και οι δύο δρουν στη γεννήτρια ελέγχοντας τη μηχανική ισχύ και μεταβάλλοντας την παραγωγή σχετικά αργά.

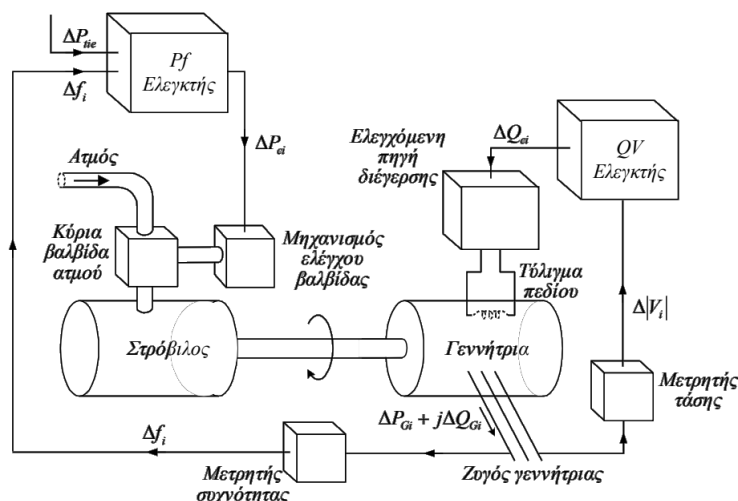
Ο έλεγχος αυτόματης παραγωγής είναι ένας έλεγχος σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση υπολογιστή, που σκοπός του είναι να διατηρεί την ονομαστική συχνότητα σε ολόκληρο το σύστημα και να κρατάει την ισχύ στις διασυνδετικές γραμμές ίση με την προδιαγεγραμμένη τιμή. Στην πράξη, ο έλεγχος παραγωγής γίνεται σε αποκεντρωμένη βάση, δηλαδή κάθε ηλεκτρική περιοχή προσπαθεί να διατηρεί την ανταλλασόμενη ισχύ στην 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.

2.4 Λειτουργία χωρίς Κεντρικό Έλεγχο

Η λειτουργία χωρίς κεντρικό έλεγχο επιτυγχάνεται με τα δύο συστήματα ελέγχου που διαθέτει κάθε στροβιλογεννήτρια, δηλαδή τον έλεγχο πραγματικής ισχύος-συχνότητας $P-f$ και τον έλεγχο αέργου ισχύος-τάσης $Q-V$. Οι δύο αυτοί έλεγχοι μαζί με τη φυσική ρύθμιση του φορτίου εξαναγκάζουν τις γεννήτριες μιας περιοχής να μοιράζονται το φορτίο. Στο Σχήμα 2.2 φαίνονται παραστατικά οι δύο βρόχοι ελέγχου.

Σκοπός του ελέγχου πραγματικής ισχύος-συχνότητας $P-f$ είναι να ελέγχει τη συχνότητα και την ισχύ στις διασυνδετικές γραμμές. Η μεταβολή της συχνότητας Δf_i και της ισχύος στις διασυνδετικές γραμμές ΔP_{tie} , που δίνει έμμεση πληροφορία για τη μεταβολή της διαφοράς των γωνιών των τάσεων στα άκρα τους, $\Delta \delta$, αφού ενισχυθούν μετατρέπονται σε ένα σήμα ρύθμισης της μηχανικής ισχύος, που τροφοδοτεί-



Σχήμα 2.2: Βρόχοι ελέγχου στροβιλογεννήτριας. Ν. Βοβός, Γ. Γιαννακόπουλος, «Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Θεσσαλονίκη 2008, Εκδόσεις Ζήτη.

ται στη γεννήτρια, ΔP_{ci} . Αποτέλεσμα αυτής της ρύθμισης είναι μια μεταβολή στην πραγματική ισχύ εξόδου της γεννήτριας ΔP_{Gi} που σκοπό έχει να μεταβάλλει την αρχική κατάσταση του συστήματος.

Σκοπός του ελέγχου αέργου ισχύος-τάσης $Q-V$ είναι να ελέγχει το μέτρο της τάσης $|V_i|$. Αρχικά εκτιμάται το σφάλμα τάσης $\Delta|V_i|$ και αυτό το σφάλμα μετατρέπεται σε ένα σήμα μεταβολής της αέργου ισχύος ΔQ_{ci} , που τροφοδοτείται στην πηγή διέγερσης. Το αποτέλεσμα είναι μια μεταβολή στο ρεύμα πεδίου του δρομέα, που μεταβάλλει την παραγωγή αέργου ισχύος ΔQ_{Gi} και την τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας.

2.5 Αλληλεπίδραση Μεταξύ Βρόχων $P-f$ και $Q-V$

Η διαίρεση στους παραπάνω βρόχους ελέγχου στηρίζεται στις ιδιότητες ευαισθησίας των ΣΗΕ που βρίσκονται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Οι ιδιότητες αυτές προέκυψαν από μελέτες ροής φορτίου και τη στατική μελέτη ευαισθησίας συστημάτων και είναι οι εξής:

1. Στατικές μεταβολές ΔP_i στην πραγματική ισχύ του ζυγού επηρεάζουν, κύρια, μόνο τη φασική γωνία της τάσης ζυγού και άρα τις ροές πραγματικής ισχύος των γραμμών, που συνδέονται στο ζυγό και αφήνουν σχεδόν ανεπηρέαστο το μέτρο της τάσης ζυγού και άρα και την αέργο ισχύ των γραμμών, που συνδέονται στο ζυγό.
2. Αντίθετα, στατικές μεταβολές ΔQ_i στην αέργο ισχύ του ζυγού επηρεάζουν κύρια, μόνο το μέτρο της τάσης του ζυγού και άρα και την αέργο 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 αέργο ισχύ ενός ζυγού επηρεάζουν, κύρια, το μέτρο της τάσης του ίδιου ζυγού και πολύ λίγο το μέτρο της τάσης των άλλων ζυγών

Οι πιο πάνω ιδιότητες ισχύουν μόνο για στατικές μεταβολές ισχύος ζυγού και εφ' όσον οι ισχείς γραμμών είναι πολύ μικρότερες από τα στατικά όρια ευστάθειας των γραμμών. Επίσης οι μεταβολές πρέπει να είναι μικρές, δηλαδή από μαθηματική άποψη να είναι δυνατή η μελέτη με τη χρήση προσέγγισης πρώτης τάξης. Κατά τη διάρκεια 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 εξάρτησης του από την τάση, δηλαδή $\partial P_D / \partial |V| \neq 0$.
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.

Μια δυναμική μεταβολή στο βρόχο $Q-V$ επομένως επηρεάζει την ισορροπία πραγματικής ισχύος στο σύστημα, ενώ μια μεταβολή στο βρόχο $P-f$ επηρεάζει πολύ λίγο την ισορροπία αέργου 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 $P-f$. Έτσι, μπορούμε να υποθέσουμε 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. Αυτή η λογική υπόθεση οδηγεί σε σημαντική απλοποίηση της ανάλυσης που ακολουθεί.

2.6 Δυναμικές Μεταβλητές Κατάστασης Διαφορών

Στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η ονομαστική γωνιακή ταχύτητα $\omega^0 = 2\pi f^0$ είναι σταθερή σε ολόκληρο το σύστημα και οι τάσεις ζυγών έχουν τη μορφή:

$$u_i = \sqrt{2}|V_i^0| \sin(\omega^0 t + \delta_i^0) \quad (2.1)$$

Στην μόνιμη κατάσταση έχουν οριστεί σαν στατικές μεταβλητές κατάστασης οι $|V_i^0|$ και δ_i^0 . Όταν στο σύστημα υπάρχουν μικρές μεταβολές ΔP_i και ΔQ_i οι στατικές μεταβλητές κατάστασης υφίστανται μικρές μεταβολές δηλαδή:

$$\delta_i = \delta_i^0 + \Delta \delta_i$$

$$|V_i| = |V_i^0| + \Delta |V_i| \quad (2.2)$$

και οι τάσεις των ζυγών θα έχουν τη μορφή:

$$u_i = \sqrt{2}(|V_i^0| + \Delta |V_i|(t)) \sin(\omega^0 t + \delta_i^0 + \Delta \delta_i) \quad (2.3)$$

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

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

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

$$\Delta f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Delta \delta_i(t)}{dt} \quad (2.4)$$

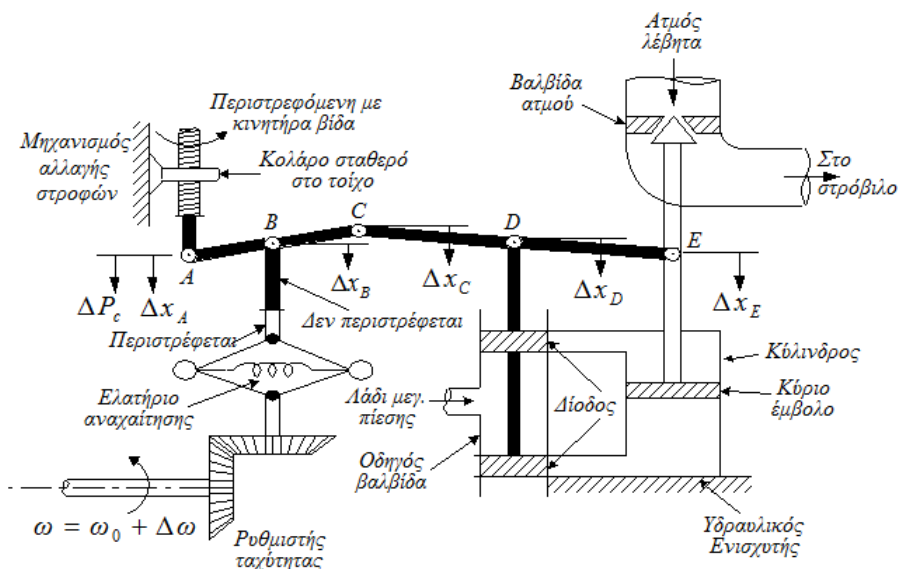
Λόγω της μεγάλης σταθεράς αδράνειας των σύγχρονων γεννητριών, γενικά ισχύει ότι:

$$|\Delta f_i| \ll f^0 = 50 \text{ Hz} \quad (2.5)$$

2.7 Αυτόματος Έλεγχος Φορτίου-Συχνότητας Γεννητριών

Επειδή υπάρχει συνεχής μεταβολή του φορτίου ενός συστήματος, τουλάχιστον η ισχύς εξόδου μιας γεννήτριας στο σύστημα πρέπει να ακολουθεί αυτές τις μεταβολές για να υπάρχει ισορροπία ισχύων. Ο έλεγχος στην ισχύ εξόδου των γεννητριών γίνεται με έλεγχο της μηχανικής ισχύος στην είσοδο τους. 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. Αυτές οι διακυμάνσεις από την ονομαστική ταχύτητα ή συχνότητα χρησιμοποιούνται σαν σήματα ελέγχου για να προκαλέσουν την αυτόματη κατάλληλη ρύθμιση της παροχής της μηχανικής ισχύος. Ο ελεγκτής ρυθμίζεται για μια συγκεκριμένη συνθήκη λειτουργίας και φροντίζει για την κάλυψη μικρών μεταβολών του φορτίου. Όταν με την πάροδο του χρόνου οι μεταβολές του φορτίου γίνονται μεγάλες, απαιτείται επαναρύθμιση του ελεγκτή.

Η συσκευή που ελέγχει τη ροή ατμού ενός ατμοστροβίλου ονομάζεται ρυθμιστής ταχύτητας. Ο ρυθμιστής ταχύτητας ανακαλύπτει τις μεταβολές της γωνιακής ταχύτητας του στροβίλου και τις χρησιμοποιεί για να ρυθμίσει τη βαλβίδα τροφοδοσίας ατμού στον ατμοστροβίλο. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η σχηματική παράσταση του ρυθμιστή ταχύτητας που χρησιμοποιεί το φυγοκεντρικό ρυθμιστή του Watt. Επειδή ο ρυθμιστής του Watt δεν έχει αρκετή δύναμη για να ελέγχει τη βαλβίδα ατμού ή νερού, χρησιμοποιούνται μερικές βαθμίδες υδραυλικών ενισχυτών ώστε να αποκτηθεί η απαραίτητη δύναμη.



Σχήμα 2.3: Σχηματική παράσταση του ρυθμιστή ταχύτητας. Ν. Βοβός, Γ. Γιαννακόπουλος, «Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Θεσσαλονίκη 2008, Εκδόσεις Ζήτη.

2.8 Μαθηματικό Μοντέλο Ρυθμιστή Ταχύτητας

Στην ενότητα αυτή αναπτύσσεται το γραμμικό μοντέλο του ρυθμιστή ταχύτητας κοντά σε ένα ονομαστικό σημείο λειτουργίας. Γίνεται η υπόθεση πως όλες οι μεταβολές $\Delta\omega$, Δx_A , ..., Δx_E , είναι θετικές στις διευθύνσεις που δείχνονται. Επειδή τα σημεία A , B , C βρίσκονται σε ευθεία γραμμή, η θέση του C καθορίζεται από τις θέσεις των A και B . Έτσι για τις μικρές μεταβολές υπάρχουν θετικές σταθερές ώστε να ισχύουν οι γραμμικές σχέσεις:

$$\Delta x_C = K_B \Delta x_B - K_A \Delta x_A = K_1 \Delta f - K_2 \Delta P_c \quad (2.6)$$

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

Με παρόμοια λογική:

$$\Delta x_D = K_3 \Delta x_C + K_4 \Delta x_E \quad (2.7)$$

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

Η θέση του κυρίου εμβόλου Δx_E σχετίζεται με το Δx_D με τη σχέση:

$$\frac{d\Delta x_E}{dt} = -K_5 \Delta x_D \quad (2.8)$$

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

Υποθέτουμε ότι η μεταβατική περίοδος αρχίζει σε χρόνο $t = 0$ και το σύστημα αρχικά βρισκόταν στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση $\Delta x_E(0^-) = 0$. Παίρνοντας τους μετασχηματισμούς Laplace των εξισώσεων 2.6, 2.7 και 2.8 και απαλείφοντας τις μεταβλητές Δx_C και Δx_D προκύπτει η εξίσωση:

$$\begin{aligned} \Delta x_E(s) &= \frac{K_2 K_3 / K_4}{1 + s / K_4 K_5} (\Delta P_c(s) - \frac{K_1}{K_2} \Delta F(s)) = \frac{K_g}{1 + T_g s} \left(\Delta P_c(s) - \frac{1}{R} \Delta F(s) \right) = \\ &= G_g(s) \left(\Delta P_c(s) - \frac{1}{R} \Delta F(s) \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

όπου:

$$R = \frac{K_2}{K_1} = \text{ρύθμιση ταχύτητας που οφείλεται στη δράση του ρυθμιστή ταχύτητας}$$

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

$$T_g = \frac{1}{K_4 K_5} [s] = \text{χρονική σταθερά του ρυθμιστή ταχύτητας}$$

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

2.9 Μαθηματικό Μοντέλο του Στροβίλου

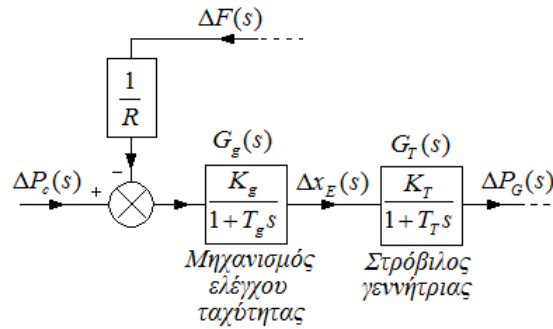
Μια μεταβολή στη θέση της βαλβίδας, Δx_E , προκαλεί μια μεταβολή στην ισχύ του στροβίλου, ΔP_T , που μέσω της ηλεκτρομηχανικής αλληλεπίδρασης στη γεννήτρια, προκαλεί μια μεταβολή στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ ΔP_G . Θεωρώντας αμελητέες τις απώλειες τις γεννήτριες ισχύει ότι:

$$\Delta P_T = \Delta P_G$$

Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη σχέση μεταξύ της θέσης της βαλβίδας και της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος είναι σχετικά πολύπλοκο, ιδιαίτερα για τις μεγάλες διαταραχές στο δίκτυο, που προκαλούν και ταλαντώσεις στις τάσεις. Θεωρώντας όμως μικρές μεταβολές στη ροπή και ότι η τάση είναι σταθερή παίρνουμε μια απλή δυναμική σχέση μεταξύ του Δx_E και ΔP_G . Το απλούστερο μοντέλο ενός ατμοστροβίλου χωρίς αναθέρμανση μπορεί να χαρακτηριστεί από έναν απλό συντελεστή κέρδους K_T και από μια απλή χρονική σταθερά T_T και να περιγραφεί με την παρακάτω συνάρτηση μεταφοράς:

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

Οι εξισώσεις 2.9 και 2.10 μπορούν να παρασταθούν με σχηματική διαγράμματα όπως δείχνεται στο Σχήμα 2.4, που παριστάνει το γραμμικό μοντέλο ενός στροβίλου χωρίς αναθέρμανση και το ρυθμιστή ταχύτητας του.



Σχήμα 2.4: Συναρτήσεις μεταφοράς στροβίλου χωρίς αναθέρμανση και του ρυθμιστή ταχύτητας του. Ν. Βοβός, Γ. Γιαννακόπουλος, «Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Θεσσαλονίκη 2008, Εκδόσεις Ζήτη.

2.10 Ισορροπία Μεταβολών Ισχύος σε Περιοχή Ελέγχου

Παρακάτω θα γίνει η ανάπτυξη του δυναμικού μοντέλου, που περιγράφει τη μεταβολή της συχνότητας για μια μεταβολή ισχύος σε μια περιοχή ελέγχου i , που ανήκει σε ένα ελεγχόμενο διασυνδεδεμένο σύστημα. Υποθέτουμε ότι στην περιοχή γίνεται μια μεταβολή πραγματικού φορτίου ΔP_{Di} MW. Λόγω της δράσης του ρυθμιστή ταχύτητας του στροβίλου, η περιοχή μεταβάλλει την παραγωγή της κατά ΔP_{Gi} MW. Συνεπώς η καθαρή μεταβολή ισχύος στην περιοχή είναι $\Delta P_{Gi} - \Delta P_{Di}$ MW και αυτή η μεταβολή καλύπτεται από το σύστημα με τρεις τρόπους:

1. Με μεταβολή της κινητικής ενέργειας $W_{\text{κιν},i}$ της περιοχής με ρυθμό $dW_{\text{κιν},i}/dt$, που οδηγεί σε μεταβολή της συχνότητας κατά Δf_i .
2. Με μεταβολή του φορτίου. Όλα τα τυπικά φορτία υφίστανται μια μεταβολή με την ταχύτητα ή τη συχνότητα, που εκφράζεται από τη χαρακτηριστική παράμετρο του φορτίου $D = \partial P_D / \partial f$ MW/Hz. Η σταθερά D υπολογίζεται μόνο εμπειρικά και ονομάζεται συντελεστής αυτορύθμισης του φορτίου.
3. 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.

Η εξίσωση των μεταβολών ισχύων μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά με τη σχέση:

$$\Delta P_{Gi} - \Delta P_{Di} = \frac{dW_{\text{κιν},i}}{dt} + D_i \Delta f_i + \Delta P_{tie,i} \quad (2.11)$$

Μεταβολή της κινητικής ενέργειας $W_{\text{κιν},i}$: Η συνολική κινητική ενέργεια $W_{\text{κιν},i}$ της περιοχής ελέγχου i είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας ή της συχνότητας της και μπορεί να γραφεί:

$$W_{\text{κιν},i} = \left(\frac{f_i(t)}{f^0} \right)^2 W_{\text{κιν},i}^o \quad (2.12)$$

όπου $W_{\text{κιν},i}^o$ είναι η κινητική ενέργεια της περιοχής σε MWs ή MJ, μετρούμενη στην ονομαστική συχνότητα f^0 . Αν f_i είναι η στιγμιαία συχνότητα της περιοχής ελέγχου, τότε ισχύει η σχέση:

$$f_i = f^0 + \Delta f_i \quad (2.13)$$

όπου Δf_i είναι μικρό και η εξίσωση 2.12 μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$W_{\text{κιν},i} = \left(\frac{f^0 + \Delta f_i}{f^0} \right)^2 W_{\text{κιν},i}^o = \left[1 + 2 \frac{\Delta f_i}{f^0} + \left(\frac{\Delta f_i}{f^0} \right)^2 \right] W_{\text{κιν},i}^o \simeq \left(1 + 2 \frac{\Delta f_i}{f^0} \right) W_{\text{κιν},i}^o \quad (2.14)$$

Με παραγωγή της εξίσωσης 2.14, ο πρώτος όρος στο δεξί μέρος της 2.11 γράφεται:

$$\frac{dW_{\text{κιν},i}}{dt} = \frac{2W_{\text{κιν},i}}{f^0} \frac{d\Delta f_i}{dt} \text{ MW} \quad (2.15)$$

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

$$\Delta P_{tie,i} = \sum_{v=1}^N \Delta P_{tie,iv} \text{ MW} \quad (2.16)$$

Αν οι απώλειες θεωρηθούν αμελητέες, η πραγματική ισχύς που μεταφέρει μια γραμμή από την περιοχή i στην περιοχή v , δίνεται από τη σχέση:

$$P_{tie,iv} = \frac{|V_i||V_v|}{X} \sin(\delta_i - \delta_v) = P_{max,iv} \sin(\delta_i - \delta_v) \quad (2.17)$$

Με παραγωγή της εξίσωσης 2.17 στο σημείο λειτουργίας δ_i^0 και δ_v^0 , παίρνουμε:

$$\left. \frac{dP_{tie,iv}}{dt} \right|_{\delta_i^0, \delta_v^0} = P_{max,iv} \cos(\delta_i^0 - \delta_v^0) \left(\left. \frac{d\delta_i}{dt} \right|_{\delta_i^0} - \left. \frac{d\delta_v}{dt} \right|_{\delta_v^0} \right) \quad (2.18)$$

Αν πολλαπλασιάσουμε και τα δύο μέλη της εξίσωσης 2.18 με dt και μετατρέψουμε τη διαφορική εξίσωση σε εξίσωση διαφορών, έχουμε:

$$\Delta P_{tie,iv} = P_{max,iv} \cos(\delta_i^0 - \delta_v^0) (\Delta \delta_i - \Delta \delta_v) = T_{iv}^0 (\Delta \delta_i - \Delta \delta_v) \text{ MW} \quad (2.19)$$

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

$$\Delta \delta_i = \delta_i - \delta_i^0$$

$$\Delta \delta_v = \delta_v - \delta_v^0$$

$P_{max,iv}$ είναι το στατικό όριο μεταφοράς ισχύος της συγκεκριμένης διασυνδετικής γραμμής και δ_i^0 και δ_v^0 είναι οι αρχικές φασικές γωνίες των τάσεων στα δύο άκρα της γραμμής.

Αν με τη βοήθεια της εξ. 2.5 αντικαταστήσουμε στην εξίσωση 2.19 τις μεταβολές των φασικών γωνιών με τις μεταβολές των συχνοτήτων, καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$\Delta P_{tie,iv} = 2\pi T_{iv}^0 \int (\Delta f_i - \Delta f_v) dt \quad (2.20)$$

Με τη βοήθεια της εξ. 2.20 η συνολική μεταβολή ισχύος των διασυνδετικών γραμμών που συνδέονται στην περιοχή i , γράφεται:

$$\Delta P_{tie,i} = 2\pi \sum_v^n = 1T_{ivj}^0 \int (\Delta f_i - \Delta f_v) dt \quad (2.21)$$

που είναι η τελική μορφή του τρίτου όρου στο δεξί μέρος της εξ. 2.11.

2.11 Σχηματική παράσταση της περιοχής ελέγχου

Αντικαθιστώντας την εξ. 2.15 στην εξ. 2.11 παίρνουμε την εξίσωση :

$$\Delta P_{Gi} - \Delta P_{Di} = \frac{2H_i}{f^0} \frac{d(\Delta f_i)}{dt} + D_i \Delta f_i + \Delta P_{tie,i} \quad (2.22)$$

όπου

$$H_i = \frac{W_{r,i}^0}{P_{r,i}} \quad (2.23)$$

και $P_{r,i}$ συνολική ονομαστική ισχύς της περιοχής i .

Παίρνοντας το μετασχηματισμό Laplace των εξισώσεων 2.21 και 2.22, καταλήγουμε στις εξισώσεις:

$$\Delta P_{tie,i}(s) = \frac{2\pi}{s} \sum_v^n = 1T_{iv}^0 [\Delta F_i(s) - \Delta F_v(s)] \quad (2.24)$$

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

ή

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

και

$$[\Delta P_{Gi}(s) - \Delta P_{Di}(s) - \Delta P_{tie,i}(s)] G_{pi}(s) = \Delta F_i(s) \quad (2.25)$$

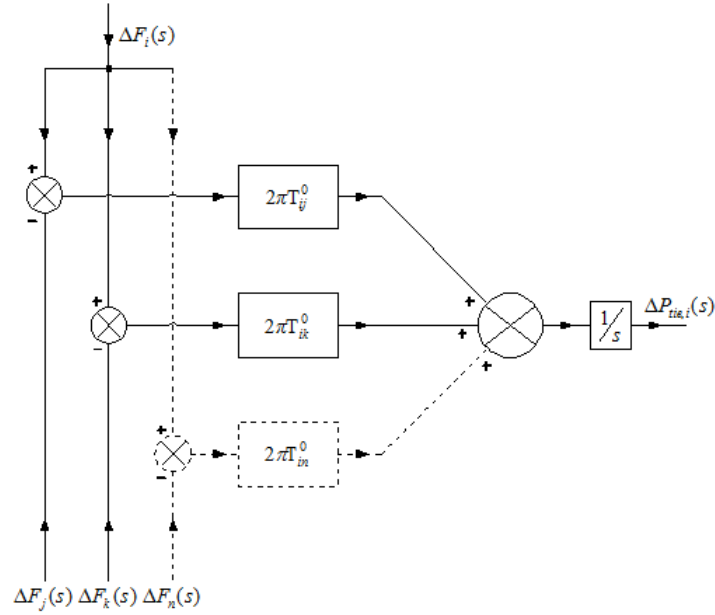
όπου:

$$G_{pi}(s) = \frac{K_{pi}}{1 + T_{pi}s} \quad (2.26)$$

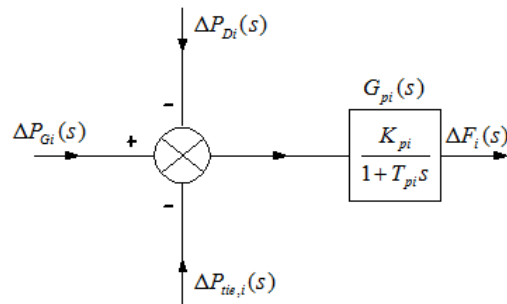
$$T_{pi} = \frac{2H_i}{f^0 D_i} \text{sec} \quad (2.27)$$

$$K_{pi} = \frac{1}{D_i} \text{Hz/MW} \quad (2.28)$$

Οι εξισώσεις 2.24 και 2.25 παριστάνονται στα λειτουργικά διαγράμματα των Σχημάτων 2.5 και 2.6 αντίστοιχα.

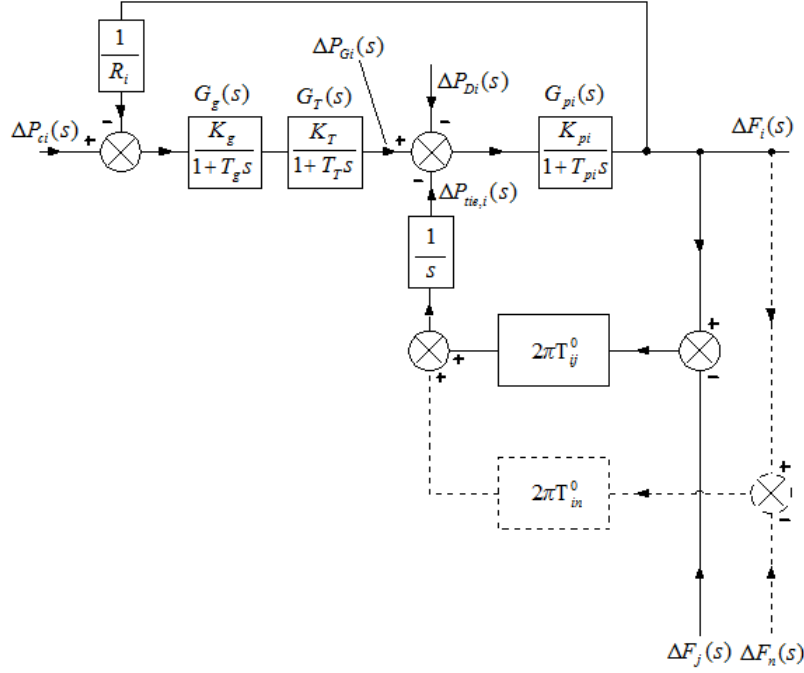


Σχήμα 2.5: Σχηματική παράσταση της εξ. 2.24. Ν. Βοβός, Γ. Γιαννακόπουλος, «Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Θεσσαλονίκη 2008, Εκδόσεις Ζήτη.



Σχήμα 2.6: Σχηματική παράσταση της εξ. 2.25. Ν. Βοβός, Γ. Γιαννακόπουλος, «Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Θεσσαλονίκη 2008, Εκδόσεις Ζήτη.

Με συνδυασμό των διαγραμμάτων των Σχημάτων 2.4, 2.5 και 2.6 προκύπτει το λειτουργικό διάγραμμα του Σχήματος 2.7 που παριστάνει ολόκληρη την περιοχή ελέγχου.

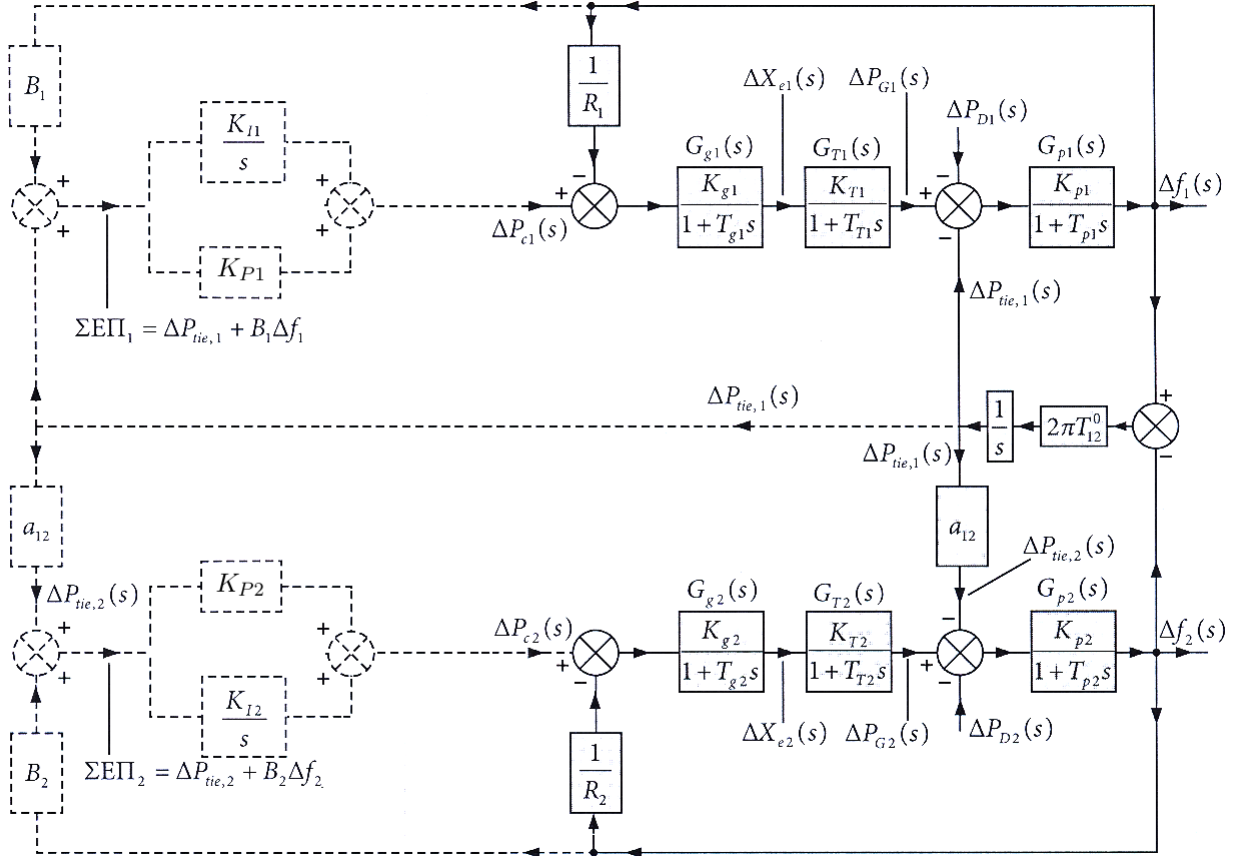


Σχήμα 2.7: Πλήρης σχηματική παράσταση της περιοχής ελέγχου i . Ν. Βοβός, Γ. Γιαννακόπουλος, «Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Θεσσαλονίκη 2008, Εκδόσεις Ζήτη.

2.12 Σύστημα Δύο Περιοχών Ελέγχου

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει η περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου ενός συστήματος δύο περιοχών ελέγχου καθώς και η μελέτη της δυναμικής απόκρισης του συστήματος σε βηματική μεταβολή φορτίου. Το σύστημα αυτό θα είναι και το υπό μελέτη σύστημα για την ανίχνευση σφαλμάτων. Οι δύο περιοχές ελέγχου είναι διαφορετικού μεγέθους και χαρακτηριστικών και διασυνδέονται με μια σχετικά ασθενή διασυνδετική γραμμή. Το αντικείμενο του ελέγχου είναι να ρυθμίζει τη συχνότητα σε κάθε περιοχή ελέγχου και ταυτόχρονα να διατηρεί την ισχύ της διασυνδετικής γραμμής στα επίπεδα που ορίζουν πιθανές συμβάσεις. Ο έλεγχος που χρησιμοποιείται είναι αναλογικός και ολοκληρωτικός έλεγχος ώστε να επιτευχθούν μηδενικά σφάλματα συχνότητων και διακύμανσης ισχύος της διασυνδετικής γραμμής από τη συμβατική ισχύ.

Κάθε περιοχή περιγράφεται από ένα διάγραμμα όμοιο με αυτό του Σχήματος 2.7. Με σύνδεση δύο τέτοιων διαγραμμάτων προκύπτει η διαγραμματική παράσταση δύο περιοχών ελέγχου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Σχηματική παράσταση συστήματος με δύο περιοχές ελέγχου.

Ο όρος $\Delta P_{tie,i}$ στην εξίσωση 2.22 παριστάνει τη συνολική μεταβολή ισχύος των διασυνδετικών γραμμών, που φεύγουν από την περιοχή i . Για ένα σύστημα με δύο περιοχές ελέγχου η ισχύς της διασυνδετικής γραμμής $\Delta P_{tie,1}$ πρέπει να ισούται με το αρνητικό του $\Delta P_{tie,2}$, αφού έχουν αμεληθεί οι απώλειες της γραμμής. Εκφράζοντας

αυτό το συμπέρασμα μαθηματικά, παίρνουμε:

$$P_{r1}\Delta P_{tie,1} = -P_{r2}\Delta P_{tie,2} \text{ ή } \Delta P_{tie,2} = \alpha_{12}\Delta P_{tie,1} \quad (2.29)$$

όπου:

$$\alpha_{12} = -\frac{P_{r1}}{P_{r2}} \quad (2.30)$$

2.12.1 Τιμές Παραμέτρων των Δύο Περιοχών

Οι τιμές των παραμέτρων των δύο περιοχών που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι οι ακόλουθες:

Πίνακας 1: Τιμές παραμέτρων περιοχής 1

Περιγραφή	Σύμβολο	Μαθηματική Σχέση	Τιμή	Μονάδες
Συχνότητα	f^o		50	Hz
Βάση Ισχύος	P_{B1}		2000	MW
Συντελεστής Αυτορύθμισης Φορτίου	D_1		16.66	MW/HZ
Ταχύτητα Ρύθμισης	P_1		1.2×10^{-3}	Hz/MW
Σταθερά Αδράνειας Γεννήτριας	H_1	$H_1 = \frac{W_{kin}^o}{P_{B1}}$	5	s
Συντελεστής Συγχρονισμού	T_{12}^o		175	MW/rad
Στατικό Κέρδος Ρυθμιστή Ταχύτητας	K_{g1}		1	-
Σταθερά Χρόνου Ρυθμιστή Ταχύτητας	T_{g1}		0.08	s
Στατικό Κέρδος Στροβίλου	K_{T1}		1	-
Σταθερά Χρόνου Στροβίλου	T_{T1}		0.3	s
Στατικό Κέρδος Γεννήτριας	K_{p1}	$K_{p1} = \frac{1}{D_1}$	0.06	Hz/Mw
Σταθερά Χρόνου Γεννήτριας	T_{p1}	$T_{p1} = \frac{2H_1P_{B1}}{f^oD_1}$	24	s

Πίνακας 2: Τιμές παραμέτρων περιοχής 2

Περιγραφή	Σύμβολο	Μαθηματική σχέση	Τιμή	Μονάδες
Συχνότητα	f^o		50	Hz
Βάση Ισχύος	P_{B2}		1500	MW
Συντελεστής Αυτορύθμισης Φορτίου	D_2		10.5	MW/HZ
Ταχύτητα Ρύθμισης	P_2		1.33×10^{-3}	Hz/MW
Σταθερά Αδράνειας Γεννήτριας	H_2	$H_2 = \frac{W_{kin}^o}{P_{B2}}$	4	s
Συντελεστής Συγχρονισμού	T_{12}^o		175	MW/rad
Στατικό Κέρδος Ρυθμιστή Ταχύτητας	K_{g2}		1	-
Σταθερά Χρόνου Ρυθμιστή Ταχύτητας	T_{g2}		0.07	s
Στατικό Κέρδος Στροβίλου	K_{T2}		1	-
Σταθερά Χρόνου Στροβίλου	T_{T2}		0.25	s
Στατικό Κέρδος Γεννήτριας	K_{p2}	$K_{p2} = \frac{1}{D_2}$	0.095	Hz/Mw
Σταθερά Χρόνου Γεννήτριας	T_{p1}	$T_{p2} = \frac{2H_1 P_{B2}}{f^o D_2}$	24	s

Οι τιμές έχουν ληφθεί από το βιβλίο «Ανάλυση, Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Ν. Α. Βοβός, Θεσσαλονίκη, 2004, σελ. 268, άσκηση 5.11.

2.12.2 Σύστημα Δύο Περιοχών με $\Delta P_{c1} = \Delta P_{c2} = 0$

Αρχικά θα εξεταστεί η περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει σήμα ελέγχου, δηλαδή $\Delta P_{c1} = \Delta P_{c2} = 0$, γι' αυτό θα αμελήσουμε το κομμάτι με τις διακεκομμένες γραμμές του Σχήματος 2.8.

Οι μεταβλητές κατάστασης είναι το ελάχιστο σύνολο μεταβλητών που μπορούν να περιγράψουν τη μελλοντική κατάσταση του συστήματος, με προϋπόθεση τη γνώση των αρχικών τιμών τους, όλες τις μελλοντικές εισόδους ελέγχου και τις διαφορικές εξισώσεις, που συναρτήσει των μεταβλητών κατάστασης περιγράφουν το σύστημα. Οι εξισώσεις (εκφρασμένες στο πεδίο Laplace) οι οποίες περιγράφουν το σύστημα των δύο περιοχών του Σχήματος 2.8 χωρίς το τμήμα των διακεκομμένων γραμμών είναι οι παρακάτω:

$$\begin{aligned}
\Delta F_1 &= \frac{K_{p1}}{1 + T_{p1}s} (\Delta P_{G1} - \Delta P_{D1} - \Delta P_{tie,1}) \\
\Delta F_2 &= \frac{K_{p2}}{1 + T_{p2}s} (\Delta P_{G2} - \Delta P_{D2} - \alpha_{12} \Delta P_{tie,1}) \\
\Delta X_{e1} &= \frac{K_{g1}}{1 + T_{g1}s} (\Delta P_{c1} - \frac{1}{R_1} \Delta F_1) \\
\Delta X_{e2} &= \frac{K_{g2}}{1 + T_{g2}s} (\Delta P_{c2} - \frac{1}{R_2} \Delta F_2) \\
\Delta P_{G1} &= \frac{K_{T1}}{1 + T_{T1}s} \Delta X_{e1} \\
\Delta P_{G2} &= \frac{K_{T2}}{1 + T_{T2}s} \Delta X_{e2} \\
\Delta P_{tie,1} &= \frac{2\pi T_{12}^0}{s} (\Delta F_1 - \Delta F_2)
\end{aligned} \tag{2.31}$$

Με αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace των εξ. 2.31 προκύπτουν οι παρακάτω διαφορικές εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
\frac{d\Delta f_1}{dt} &= \frac{1}{T_{p1}} (-\Delta f_1 + K_{p1} \Delta P_{G1} - K_{p1} \Delta P_{D1} - K_{p1} \Delta P_{tie,1}) \\
\frac{d\Delta f_2}{dt} &= \frac{1}{T_{p1}} (-\Delta f_2 + K_{p2} \Delta P_{G2} - K_{p2} \Delta P_{D2} - K_{p2} \alpha_{12} \Delta P_{tie,1}) \\
\frac{d\Delta x_{E1}}{dt} &= \frac{1}{T_{g1}} (-\Delta x_{E1} + K_{g1} \Delta P_{C1} - K_{g1} \Delta P_{f1}) \\
\frac{d\Delta x_{E2}}{dt} &= \frac{1}{T_{g2}} (-\Delta x_{E2} + K_{g2} \Delta P_{C2} - K_{g2} \Delta P_{f2}) \\
\frac{d\Delta P_{G1}}{dt} &= \frac{1}{T_{T1}} (-\Delta P_{G1} + \Delta x_{E1}) \\
\frac{d\Delta P_{G2}}{dt} &= \frac{1}{T_{T2}} (-\Delta P_{G2} + \Delta x_{E2}) \\
\frac{d\Delta P_{tie,1}}{dt} &= 2\pi T_{12}^0 (\Delta f_1 - \Delta f_2), \quad \text{όπου } \Delta P_{fi} = \frac{1}{R_i} \Delta F_i
\end{aligned} \tag{2.32}$$

Οι δυναμικές εξισώσεις 2.32 γράφονται σε μητρική μορφή ως:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \quad (2.33)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2.34)$$

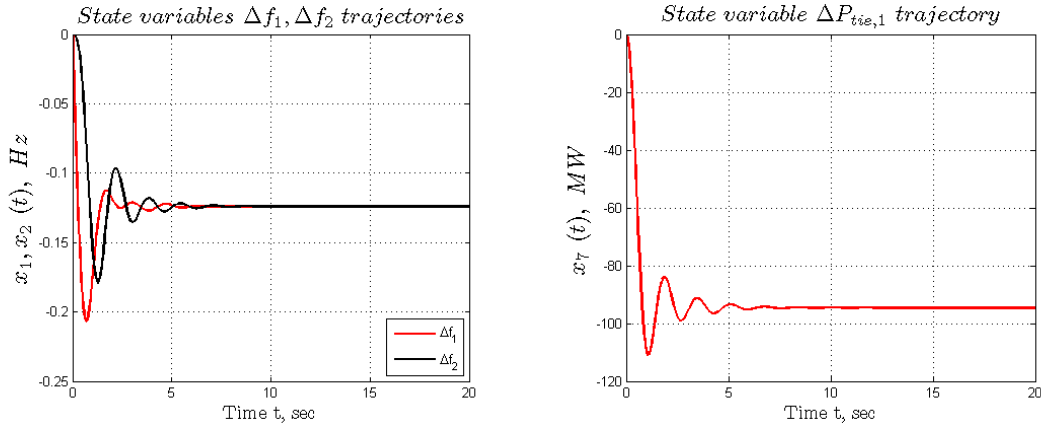
όπου:

$$x = [\Delta f_1 \ \Delta f_2 \ \Delta x_{E1} \ \Delta x_{E2} \ \Delta P_{G1} \ \Delta P_{G2} \ \Delta P_{tie,1}]^T, u = [\Delta P_{C1} \ \Delta P_{C2}]^T, d = [\Delta P_{D1} \ \Delta P_{D2}]^T$$

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

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{K_{g1}}{T_{g1}} & 0 \\ 0 & \frac{K_{g2}}{T_{g2}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} -\frac{K_{p1}}{T_{p1}} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{p2}}{T_{p2}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Για βηματική μεταβολή φορτίου $\Delta P_{D,1} = 200$ MW στο σύστημα 1 και χωρίς σήμα ελέγχου, $\Delta P_{c1} = \Delta P_{c2} = 0$, προκύπτουν οι αποκρίσεις συχνотήτων και ισχύος της διασυνδετικής γραμμής που φαίνονται στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9: Απόκριση συχνотήτων και ισχύος της διασυνδετικής γραμμής για βηματική μεταβολή φορτίου, χωρίς σήμα ελέγχου.

Η απόκριση του συστήματος δεν είναι ικανοποιητική, καθώς υπάρχει μόνιμο σφάλμα συχνότητας και ισχύος στην διασυνδετική γραμμή. Προκειμένου η απόκριση του συστήματος να είναι αποδεκτή, θα πρέπει να καταστρωθεί μια στρατηγική ελέγχου του ΔP_c , η οποία περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

2.12.3 Σύστημα Δύο Περιοχών με $\Delta P_c \neq 0$

Η στρατηγική ελέγχου του ΔP_c θα πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω 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 δεν πρέπει να ξεπερνά μια μέγιστη τιμή.
4. Η ισχύς της διασυνδετικής γραμμής θα πρέπει να επανακτά την αρχική της τιμή μετά από μια βηματική μεταβολή φορτίου. Έτσι εξασφαλίζεται ότι κάθε περιοχή, στη μόνιμη κατάσταση, τροφοδοτεί το δικό της φορτίο, μια βασική αρχή στη λειτουργία των διασυνδεδεμένων συστημάτων.

Για την ικανοποίηση των προδιαγραφών θα χρησιμοποιηθεί αναλογικός και ολοκληρωτικός έλεγχος PI. Ο αναλογικός έλεγχος ενισχύει τα σφάλματα συχνότητας και ισχύος της διασυνδετικής γραμμής, και βελτιώνει τη μεταβατική απόκριση του

συστήματος κάνοντας την παράλληλα πιο γρήγορη. Ο ολοκληρωτικός έλεγχος ενισχύει και κατόπιν ολοκληρώνει τα σφάλματα συχνότητας και ισχύος της διασυνδετικής γραμμής με αποτέλεσμα τον μηδενισμό του μόνιμου σφάλματος συχνότητων και ισχύος της διασυνδετικής γραμμής, μετά από μια βηματική μεταβολή φορτίου, γιατί όσο υπάρχει σφάλμα η έξοδος του αυξάνει, προκαλώντας μεταβολή της ισχύος εξόδου. Η εντολή ελέγχου ΔP_c αποκτά μόνιμη τιμή μόνο όταν υπάρξει μηδενικό σφάλμα.

Σε ένα κεντρικό έλεγχο φορτίου-συχνότητας μιας περιοχής ελέγχου, το σήμα που τροφοδοτείται στον ελεγκτή, ονομάζεται σφάλμα ελέγχου περιοχής (ΣΕΠ). Βάση των προηγούμενων, τα σήματα ελέγχου κάθε περιοχής ορίζονται από τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned}\Sigma \text{EP}_1 &= \Delta P_{tie,1} + B_1 \Delta f_1 \\ \Sigma \text{EP}_2 &= \Delta P_{tie,2} + B_2 \Delta f_2\end{aligned}\tag{2.35}$$

και οι εντολές ελέγχου θα έχουν τη μορφή:

$$\begin{aligned}\Delta P_{c1}(t) &= K_{P1}(\Delta P_{tie,1} + B_1 \Delta f_1) + K_{I1} \int (\Delta P_{tie,1} + B_1 \Delta f_1) dt \\ \Delta P_{c2}(t) &= K_{P2}(\Delta P_{tie,2} + B_2 \Delta f_2) + K_{I2} \int (\Delta P_{tie,2} + B_2 \Delta f_2) dt\end{aligned}\tag{2.36}$$

Οι σταθερές K_{P1} και K_{P2} είναι τα κέρδη των αναλογικών όρων, 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.

Πίνακας 3: Τιμές παραμέτρων των ελεγκτών

Περιγραφή	Σύμβολο	Μαθηματική σχέση	Τιμή	Μονάδες
Κέρδος Αναλογικού Όρου	K_{Pi}		-0.1	-
Κέρδος ολοκληρωτικού Όρου	K_{Ii}		-0.033	-
Συντελεστής Βαρύτητας	B_1	$B_1 = 1/R_1$	833.33	MW/HZ
Συντελεστής Βαρύτητας	B_2	$B_2 = 1/R_2$	751.87	MW/HZ

Οι τιμές έχουν προκύψει με κατάλληλο μετασχηματισμό των αντίστοιχων παραμέτρων του άρθρου «Cyber Attack in a Two-Area Power System: Impact Identification using Reachability», P. M. Esfahani, M. Vrakopoulou, K. Margellos, J. Lygeros and G. Andersson, American Control Conference, Baltimore, 2010, pp 962-967 [12].

Οι εξισώσεις, εκφρασμένες στο πεδίο Laplace, οι οποίες περιγράφουν το σύστημα των δύο περιοχών του Σχήματος 2.8, συμπεριλαμβανομένων των διακεκομμένων γραμμών είναι οι παρακάτω:

$$\begin{aligned}\Delta F_1 &= \frac{K_{p1}}{1 + T_{p1}s} (\Delta P_{G1} - \Delta P_{D1} - \Delta P_{tie,1}) \\ \Delta F_2 &= \frac{K_{p2}}{1 + T_{p2}s} (\Delta P_{G2} - \Delta P_{D2} - \alpha_{12} \Delta P_{tie,1}) \\ \Delta X_{e1} &= \frac{K_{g1}}{1 + T_{g1}s} (\Delta P_{c1} - \frac{1}{R_1} \Delta F_1) \\ \Delta X_{e2} &= \frac{K_{g2}}{1 + T_{g2}s} (\Delta P_{c2} - \frac{1}{R_2} \Delta F_2) \\ \Delta P_{G1} &= \frac{K_{T1}}{1 + T_{T1}s} \Delta X_{e1} \\ \Delta P_{G2} &= \frac{K_{T2}}{1 + T_{T2}s} \Delta X_{e2} \\ \Delta P_{tie,1} &= \frac{2\pi T_{12}^0}{s} (\Delta F_1 - \Delta F_2) \\ \Delta P_{c1} &= \frac{K_{I1}}{s} (\Delta P_{tie,1} + B_1 \Delta f_1) + K_{P1} (\Delta P_{tie,1} + B_1 \Delta f_1) \\ \Delta P_{c2} &= \frac{K_{I2}}{s} (\alpha_{12} \Delta P_{tie,1} + B_2 \Delta f_2) + K_{P2} (\alpha_{12} \Delta P_{tie,1} + B_1 \Delta f_1)\end{aligned}\tag{2.37}$$

Λόγω του ολοκληρωτικού ελεγκτή έχουν προστεθεί δύο καινούριες μεταβλητές κατάστασης, οι ΔP_{c1} και ΔP_{c2} . Με αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace των εξ. 2.37 προκύπτουν οι παρακάτω διαφορικές εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Delta f_1}{dt} &= \frac{1}{T_{p1}}(-\Delta f_1 + K_{p1}\Delta P_{G1} - K_{p1}\Delta P_{D1} - K_{p1}\Delta P_{tie,1}) \\
 \frac{d\Delta f_2}{dt} &= \frac{1}{T_{p1}}(-\Delta f_2 + K_{p2}\Delta P_{G2} - K_{p2}\Delta P_{D2} - K_{p2}\alpha_{12}\Delta P_{tie,1}) \\
 \frac{d\Delta x_{E1}}{dt} &= \frac{1}{T_{g1}}(-\Delta x_{E1} + K_{g1}\Delta P_{C1} - K_{g1}\Delta P_{f1}) \\
 \frac{d\Delta x_{E2}}{dt} &= \frac{1}{T_{g2}}(-\Delta x_{E2} + K_{g2}\Delta P_{C2} - K_{g2}\Delta P_{f2}) \\
 \frac{d\Delta P_{G1}}{dt} &= \frac{1}{T_{T1}}(-\Delta P_{G1} + \Delta x_{E1}) \\
 \frac{d\Delta P_{G2}}{dt} &= \frac{1}{T_{T2}}(-\Delta P_{G2} + \Delta x_{E2}) \\
 \frac{d\Delta P_{tie,1}}{dt} &= 2\pi T_{12}^0(\Delta f_1 - \Delta f_2) \\
 \frac{d\Delta P_{c1}}{dt} &= (2\pi T_{12}^0 K_{P1} - K_{P1} \frac{B_1}{T_{p1}} + K_{I1} B_1) \Delta F_1 - 2\pi T_{12} K_{P1} \Delta F_2 + \frac{K_{P1} B_1 K_{p1}}{T_{p1}} \Delta P_{G1} \\
 &\quad + \left(\frac{-K_{P1} B_1 K_{p1}}{T_{p1}} + K_{I1} \right) \Delta P_{tie,1} - \frac{K_{P1} B_1 K_{p1}}{T_{p1}} \Delta P_{D1} \\
 \frac{d\Delta P_{c2}}{dt} &= -2\pi T_{12} K_{P2} \Delta F_1 + (2\pi T_{12}^0 K_{P2} - K_{P2} \frac{B_2}{T_{p2}} + K_{I2} B_2) \Delta F_2 + \frac{K_{P2} B_2 K_{p2}}{T_{p2}} \Delta P_{G2} \\
 &\quad + \alpha_{12} \left(\frac{-K_{P2} B_2 K_{p2}}{T_{p2}} + K_{I2} \right) \Delta P_{tie,1} - \frac{K_{P2} B_1 K_{p2}}{T_{p2}} \Delta P_{D2}
 \end{aligned} \tag{2.38}$$

$$\text{όπου } \Delta P_{fi} = \frac{1}{R_i} \Delta F_i.$$

Οι δυναμικές εξισώσεις 2.38 γράφονται σε μητρική μορφή ως:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Ed(t) \quad (2.39)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2.40)$$

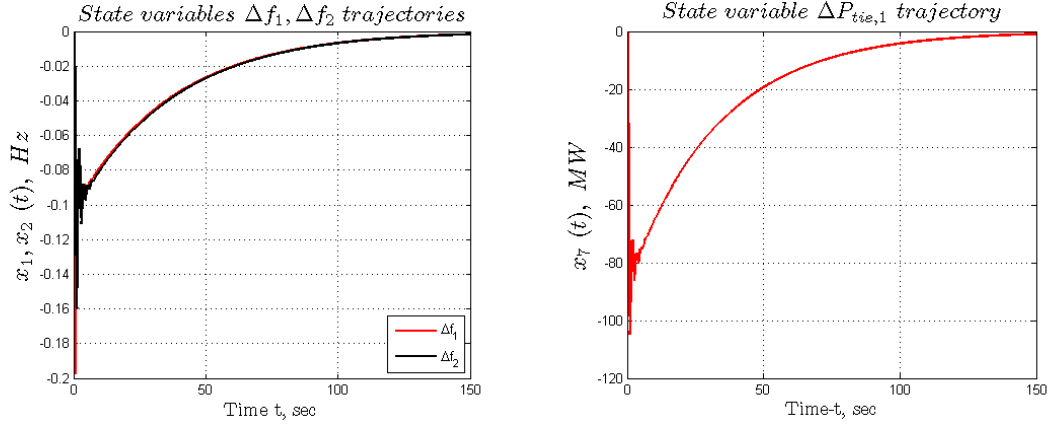
όπου:

$$x = [\Delta f_1 \ \Delta f_2 \ \Delta x_{E1} \ \Delta x_{E2} \ \Delta P_{G1} \ \Delta P_{G2} \ \Delta P_{tie,1} \ \Delta P_{c1} \ \Delta P_{c2}]^T, d = [\Delta P_{D1} \ \Delta P_{D2}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{p1}} & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{p1}}{T_{p1}} & 0 & -\frac{K_{p1}}{T_{p1}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{p2}} & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{p2}}{T_{p2}} & -a_{12}\frac{K_{p2}}{T_{p2}} & 0 & 0 \\ -\frac{K_{g1}}{R_1 T_{g1}} & 0 & -\frac{1}{T_{g1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{g1}}{T_{g1}} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{g2}}{R_2 T_{g2}} + & 0 & -\frac{1}{T_{g2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{g2}}{T_{g2}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{T1}} & 0 & -\frac{1}{T_{T1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{T2}} & 0 & -\frac{1}{T_{T2}} & 0 & 0 & 0 \\ 2\pi T_{12}^o & -2\pi T_{12}^o & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2\pi T_{12}^0 K_{P1} & -2\pi T_{12} K_{P1} & 0 & 0 & \frac{K_{P1} B_1 K_{p1}}{T_{p1}} & 0 & \frac{-K_{P1} B_1 K_{p1}}{T_{p1}} & 0 & 0 \\ -K_{P1} \frac{B_1}{T_{p1}} + K_{I1} B_1 & & & & & & + K_{I1} & & \\ -2\pi T_{12} K_{P2} & 2\pi T_{12}^0 K_{P2} & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{P2} B_2 K_{p2}}{T_{p2}} & \frac{-\alpha_{12} K_{P2} B_2 K_{p2}}{T_{p2}} & 0 & 0 \\ & -K_{P2} \frac{B_2}{T_{p2}} + K_{I2} B_2 & & & & & + \alpha_{12} K_{I2} & & \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} -\frac{K_{p1}}{T_{p1}} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{p2}}{T_{p2}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{K_{P1} B_1 K_{p1}}{T_{p1}} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{P2} B_2 K_{p2}}{T_{p2}} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Για βηματική μεταβολή φορτίου $\Delta P_{D,1} = 200$ MW στο σύστημα 1 και με χρήση ελεγκτή PI $\Delta P_{ci} \neq 0 \forall i \in \{1, 2\}$, προκύπτουν οι αποκρίσεις συχνотήτων και ισχύος της διασυνδετικής γραμμής που φαίνονται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10: Απόκριση συχνотήτων και ισχύος της διασυνδετικής γραμμής για βηματική μεταβολή φορτίου με χρήση ελεγκτή PI.

Οι προδιαγραφές ελέγχου εκπληρώνονται καθώς τα σφάλματα συχνότητας και ισχύος της διασυνδετικής γραμμής, μετά την εφαρμογή βηματικής μεταβολής στην περιοχή 1 μηδενίζονται.

2.13 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκε ο τρόπος ελέγχου της πραγματικής ισχύος ΣΗΕ, με σκοπό την εξισορρόπηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό φορτίο. Περιγράφηκε το σύστημα ελέγχου πραγματικής ισχύος-συχνότητας (P - f) γεννητριών και το μαθηματικό μοντέλο ενός Συστήματος δύο Περιοχών Ελέγχου. Τέλος αναλύθηκε ο τρόπος ελέγχου διασυνδεδεμένων ΣΗΕ, για ικανοποιητική απόκριση σε βηματικές μεταβολές φορτίου. Το σύστημα Δύο Περιοχών Ελέγχου που περιγράφηκε σε αυτό το κεφάλαιο θα είναι το υπό εξέταση σύστημα για την Ανίχνευση Σφαλμάτων.

Κεφάλαιο 3

Ανίχνευση Σφαλμάτων με χρήση Παρατηρητών Κατάστασης

3.1 Εισαγωγή

Η Ανίχνευση και Διάγνωση σφαλμάτων αποτελεί ουσιαστικά έναν πλεονασμό, είτε υλικό (hardware), είτε θεωρητικό. Ο υλικός πλεονασμός υποδηλώνει την χρήση επαναλαμβανόμενων υλικών στοιχείων (ενεργοποιητές, αισθητήρες, εξαρτήματα του συστήματος), τα οποία είναι διανεμημένα χωροταξικά στο σύστημα και παρέχουν προστασία απέναντι σε τοπικές βλάβες. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν συνήθως με τριπλό ή τετραπλό πλεονασμό, και τα σήματα που λαμβάνονται συγκρίνονται ως προς την συνέπειά τους. Μπορούν δηλαδή να χρησιμοποιηθούν τρεις ή περισσότεροι αισθητήρες (ή κάποιο άλλο στοιχείο του συστήματος) που υπολογίζουν την ίδια μεταβλητή, ενώ ένας θα ήταν αρκετός, αν ήταν απολύτως αξιόπιστος [1].

Αντίθετα, οι μέθοδοι θεωρητικού πλεονασμού χρησιμοποιούν τα μαθηματικά μοντέλα των συστημάτων ελέγχου που υπόκεινται στην διαδικασία της Ανίχνευσης και Διάγνωσης Σφαλμάτων. Χρησιμοποιείται ένα σύστημα εκτίμησης το οποίο παρέχει μια εκτίμηση των σημάτων ενδιαφέροντος, τα οποία στη συνέχεια συγκρίνονται ώστε να ξεχωριστούν τα σφάλματα της διαδικασίας ελέγχου. Η διαδικασία αυτή δεν χρειάζεται επιπλέον υλικά και επομένως μειώνει το κόστος και το μέγεθος του συστήματος ελέγχου. Ωστόσο η τεχνική αυτή είναι εμφανώς πιο απαιτητική και περίπλοκη, καθώς βασίζεται σε αλγόριθμους οι οποίοι μπορεί να μην είναι τόσο αποτελεσματικοί και σθεναροί στην παρουσία άγνωστων διαταραχών. αβεβαιοτήτων του μοντέλου και θορύβου [13].

Ένα χαρακτηριστικό το οποίο μπορεί να ελεγχθεί για αλλαγές στις θεωρητικές μεθόδους είναι το υπόλοιπο (residual), το οποίο ισοδυναμεί με τις διαφορές που υπάρχουν μεταξύ του πειραματικού μοντέλου και της διεργασίας. Η παραγωγή τέτοιων υπολοίπων μπορεί να γίνει με τη χρήση παρατηρητών κατάστασης. Δεδομένου πως η δομή και οι παράμετροι της διεργασίας είναι ακριβώς γνωστές, μια σειρά από μετρούμενες μεταβλητές του πραγματικού συστήματος συγκρίνεται με τα αντίστοιχα σήματα του ονομαστικού μοντέλου και ύστερα από κάποια λογική επεξεργασία, η διαδικασία Ανίχνευσης Σφαλμάτων αποφαίνεται για την ύπαρξη ή όχι σφάλματος στο σύστημα.

3.2 Μαθηματική Περιγραφή του Παρατηρητή

Η σχεδίαση συστημάτων ελέγχου απαιτεί πολλές φορές τη γνώση του πλήρους διανύσματος καταστάσεων. Συχνά όμως υπάρχουν καταστάσεις οι οποίες δεν δύναται να μετρηθούν. Έτσι πρέπει να σχεδιαστεί ένα σύστημα το οποίο θα παράγει μια κατάλληλη προσέγγιση του διανύσματος κατάστασης. Το σύστημα αυτό ονομάζεται παρατηρητής, είναι δυναμικό και τα χαρακτηριστικά του είναι, ανάλογα με την περίπτωση, ελεύθερα να αποφασιστούν από τον σχεδιαστή. Το δομικό διάγραμμα ενός παρατηρητή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Ως εισόδους έχει τις εισόδους και τις διαθέσιμες εξόδους του συστήματος του οποίου η κατάσταση πρέπει να εκτιμηθεί και το διάνυσμα κατάστασης του είναι γραμμικά συσχετισμένο με την επιθυμητή εκτίμηση [14].

Ένα γραμμικό χρονικά αμετάβλητο σύστημα μπορεί να περιγραφεί στο πεδίο του χρόνου μέσω του καταστατικού προτύπου:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.1)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (3.2)$$

όπου:

$x(t) \in \mathbb{R}^n$ το διάνυσμα κατάστασης

$y(t) \in \mathbb{R}^m$ το διάνυσμα εξόδου

$u(t) \in \mathbb{R}^p$ το διάνυσμα εισόδου

$A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ο πίνακας του συστήματος

$B \in \mathbb{R}^{n \times p}$ ο πίνακας εισόδου

$C \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ο πίνακας εξόδου

Με την προϋπόθεση ότι η δομή και οι παράμετροι του μοντέλου είναι γνωστές, ο πλήρης παρατηρητής κατάστασης του παραπάνω συστήματος περιγράφεται από τη σχέση[15]:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (3.3)$$

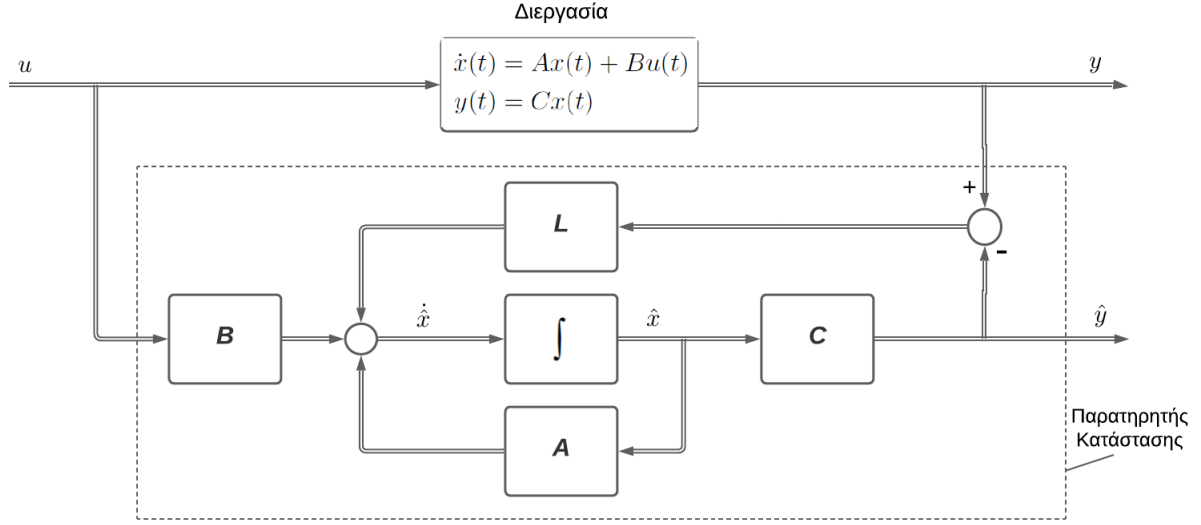
ή

$$\dot{\hat{x}}(t) = (A - LC)\hat{x}(t) + Bu(t) + Ly(t) \quad (3.4)$$

όπου:

$\hat{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ το εκτιμώμενο διάνυσμα της κατάστασης x

$L \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ο πίνακας κερδών του παρατηρητή



Σχήμα 3.1: Δομικό διάγραμμα παρατηρητή

Ο παρατηρητής έχει δύο εισόδους, την $u(t)$ και την $y(t)$. Στόχος του είναι να παράγει μία εκτίμηση $\hat{x}$, τέτοια ώστε $\hat{x} \rightarrow x$ καθώς $t \rightarrow \infty$. Ο πίνακας L (στην γενική περίπτωση) είναι αυτός που ουσιαστικά μας επιτρέπει να επεμβούμε στο ρυθμό σύγκλισης της εκτιμώμενης κατάστασης στην πραγματική κατάσταση. Ορίζουμε το σφάλμα εκτίμησης του παρατηρητή ως:

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (3.5)$$

Η διαδικασία σχεδίασης οφείλει να παράγει έναν παρατηρητή τέτοιο ώστε $e(t) \rightarrow 0$ καθώς $t \rightarrow \infty$. Αν το σύστημα είναι πλήρως παρατηρήσιμο, τότε μπορεί να προσδιοριστεί ένας πίνακας L τέτοιος ώστε το σφάλμα παρατήρησης να είναι ασυμπτωτικά ευσταθές. Έχουμε ότι:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ax + Bu - (A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y})) = A(x - \hat{x}) - LC(x - \hat{x}) \\ &\Rightarrow \dot{e}(t) = (A - LC)e(t) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Συνεπώς, η σύγκλιση της εκτίμησης του παρατηρητή στην πραγματική κατάσταση, μπορεί να εξασφαλιστεί εφόσον οι ιδιοτιμές του πίνακα $A - LC$ έχουν αρνητικά πραγματικά μέρη [16]. Για να ισχύουν τα παραπάνω το σύστημα θα πρέπει να είναι παρατηρήσιμο. Ένα σύστημα είναι πλήρως παρατηρήσιμο εάν μπορούν να προσδιορισθούν οι τιμές των μεταβλητών κατάστασης ανά πάσα χρονική στιγμή, σε πεπερασμένο χρόνο, με χρήση των μετρήσεων της εισόδου και της εξόδου [17][18].

Ένα γραμμικό χρονικά αμετάβλητο που περιγράφεται από τις εξισώσεις 3.1 είναι πλήρως παρατηρήσιμο αν και μόνο αν:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} = n \quad (3.7)$$

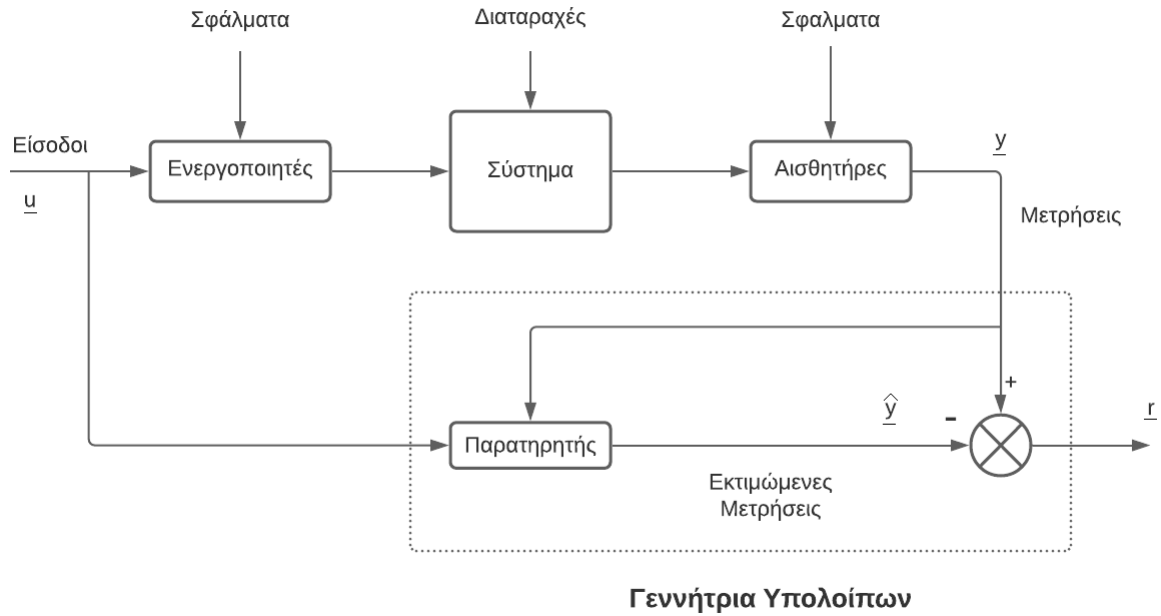
3.3 Μαθηματική Περιγραφή Συστήματος με Προσθετικό Σφάλμα

Ένα γραμμικό χρονικά αμετάβλητο σύστημα που επηρεάζεται από μη μετρήσιμες διαταραχές και προσθετικά σφάλματα μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά ως εξής:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) + Qf_a(t) \quad (3.8)$$

$$y(t) = Cx(t) + f_s(t) \quad (3.9)$$

όπου τα x, y, u, A, B, C , έχουν περιγραφεί στην προηγούμενη ενότητα. Ο όρος $Ed(t)$ χαρακτηρίζει το διάνυσμα άγνωστων εισόδων (διαταραχών) $d(t) \in \mathbb{R}^q$ με γνωστό τον πίνακα διανομής E να δρα απευθείας στη δυναμική του συστήματος. Τα σφάλματα στους αισθητήρες περιγράφονται από το διάνυσμα $f_s(t)$, ενώ ο όρος $Qf_a(t)$ αντιπροσωπεύει τα σφάλματα που επενεργούν στη δυναμική του συστήματος, όπως σφάλματα σε εξαρτήματα ή ενεργοποιητές.



Σχήμα 3.2: Γενική δομή παραγωγής υπολοίπων με βάση παρατηρητές

Η γενική δομή παραγωγής υπολοίπων βασισμένη σε παρατηρητές απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2. Η γεννήτρια υπολοίπων χρησιμοποιεί έναν παρατηρητή που δημιουργεί εκτιμήσεις των καταστάσεων και των μετρήσεων του συστήματος και παρέχει σήματα υπολοίπων. Η δυναμική του παρατηρητή περιγράφεται κατά τα γνωστά:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (3.10)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \quad (3.11)$$

ενώ η δυναμική του σφάλματος εκτίμησης ($e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$) περιγράφεται ως:

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) + Ed(t) + Qf_a(t) - Lf_s(t) \quad (3.12)$$

Το διάνυσμα που προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ των πραγματικών και των εκτιμώμενων μετρήσεων ονομάζεται υπόλοιπο (residual) και έχει την εξής μορφή:

$$\epsilon(t) = y(t) - C\hat{x}(t) = Ce(t) + f_s(t) \quad (3.13)$$

Αφού οι αρχικές αποκλίσεις κατάστασης $[x(0) - \hat{x}(0)]$ εξαφανιστούν ασυμπτωτικά, το σφάλμα εκτίμησης $\dot{\epsilon}(t)$ και το σφάλμα εξόδου $\epsilon(t)$ εξαρτώνται από τις διαταραχές $d(t)$ και τα σφάλματα $f_s(t)$ και $f_a(t)$. Το $\dot{\epsilon}(t)$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υπόλοιπο εάν τα πρωταρχικά σφάλματα $f_a(t)$ στις καταστάσεις (όπως για την ανίχνευση διαρροών) είναι αυτά που μας ενδιαφέρουν. Γενικά, ωστόσο, το σφάλμα εξόδου $\epsilon(t) = r(t)$ θα χρησιμοποιηθεί ως υπόλοιπο. Το υπόλοιπο είναι μηδέν, εάν δεν υπάρχουν διαταραχές και σφάλματα και αποκλίνει από το μηδέν, εάν εμφανιστούν σφάλματα $f_s(t)$ ή $f_a(t)$ (και επίσης εάν $d(t) \neq 0$). Είναι ενδιαφέρον να δούμε ότι τα υπόλοιπα δεν εξαρτώνται από το σήμα εισόδου $u(t)$.

Η σχέση εισόδου-εξόδου του παρατηρητή κατάστασης προκύπτει έπειτα από μετασχηματισμό της Laplace 3.4:

$$[sI - A + LC]\hat{x}(s) = Bu(s) + Ly(s) \quad (3.14)$$

η οποία οδηγεί στην:

$$\hat{x}(s) = [sI - A + LC]^{-1}[Bu(s) + Ly(s)] \quad (3.15)$$

Εισάγοντας την στο σφάλμα εξόδου προκύπτει:

$$r(s) = \epsilon(s) = -C[sI - A + LC]^{-1}Bu(s) + \left[I - C[sI - A + LC]^{-1}L \right] y(s) \quad (3.16)$$

Αυτή είναι η υπολογιστική μορφή των υπολοίπων, μετασχηματισμένη κατά Laplace. Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό Laplace στις εξισώσεις του παρατηρητή κατάστασης με προσθετικά σφάλματα 3.12 και 3.13 και παραλείποντας τους όρους διαταραχών προκύπτει:

$$r(s) = \epsilon(s) = C[sI - (A - LC)]^{-1}[Qf_a(s) - Lf_s(s)] + f_s(s) \quad (3.17)$$

Τα προσθετικά σφάλματα f_a και f_s επενεργούν στο σφάλμα εξόδου ϵ σύμφωνα με τη δυναμική του παρατηρητή $[sI - (A - LC)]^{-1}$, ενώ τα σφάλματα αισθητήρων f_s ενεργούν επιπρόσθετα απευθείας στο ϵ . Η στατική απόκλιση για μια βηματική αλλαγή f_{a0} και f_{m0} γίνεται:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \epsilon(t) = \epsilon(s=0) = C[LC - A]^{-1}[Qf_{a0} - Lf_{m0}] + f_{m0} \quad (3.18)$$

Επομένως, το σφάλμα εξόδου δείχνει μια σταθερή εναπομένουσα μετατόπιση για βηματικά σφάλματα f_a και f_s κατά την είσοδο και την έξοδο της διαδικασίας.

Τα υπόλοιπα, μαζί με την παράλληλη χρήση κατάλληλων κατωφλίων, χρησιμοποιούνται προκειμένου να αποφανθούμε για την ύπαρξη σφαλμάτων στο σύστημα. Εάν ένα υπόλοιπο ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο κατώφλι, τότε ενεργοποιείται η διαδικασία Ανίχνευσης Σφαλμάτων η οποία υποδεικνύει το σφάλμα [19].

3.4 Εφαρμογή Παρατηρητή στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα Δύο Περιοχών

Στο εδάφιο αυτό σχεδιάζεται ένας παρατηρητής για την εκτίμηση των καταστάσεων του Συστήματος Δύο Περιοχών Ελέγχου που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2.12.

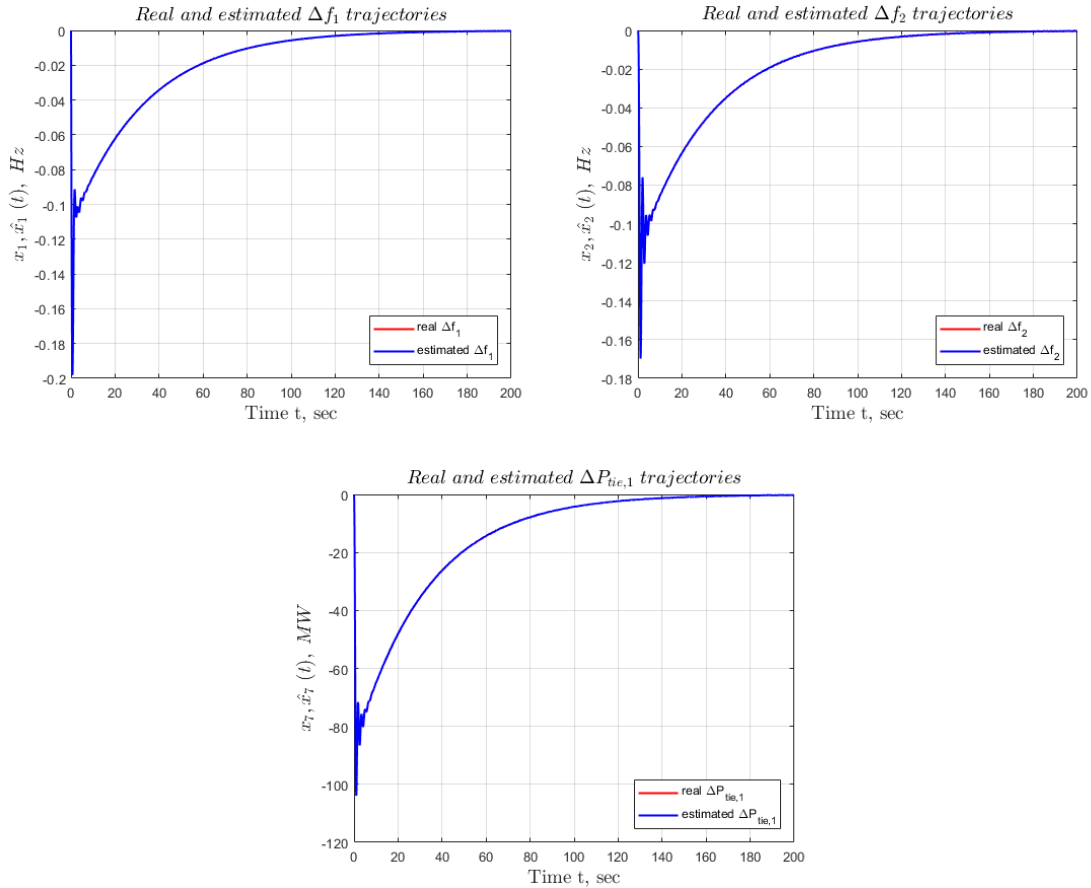
Οι πραγματικοί πόλοι του συστήματος είναι οι εξής:

$[-13.2086, -15.3873, -0.6470 + 3.9339i, -0.6470 - 3.9339i, -1.2158 + 2.7016i, -1.2158 - 2.7016i, -1.8227, -0.0298, -0.0305]$

Το σύστημα είναι ευσταθές και πλήρως παρατηρήσιμο. Ο πίνακας L επιλέχθηκε έτσι ώστε οι πραγματικές τιμές των πόλων του παρατηρητή να βρίσκονται λίγο πιο αριστερά από τους πόλους του πραγματικού συστήματος:

$[-14, -16, -0.7 + 3.9339i, -0.7 - 3.9339i, -1.3 + 2.7016i, -1.3 - 2.7016i, -1.9, -0.0380, -0.04]$

Οι διαταραχές d θεωρούνται μετρήσιμες και χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στο σύστημα του παρατηρητή. Θεωρούμε ομοιόμορφο θόρυβο (uniform noise) επιπέδου 60dB SNR και μέσης τιμής 0 ο οποίος παρεμβάλλεται τόσο εντός του συστήματος όσο και στα μετρούμενα σήματα. Για βηματική μεταβολή $\Delta D_1 = 200$ MW η απόκριση πραγματικών και εκτιμώμενων καταστάσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Εκτίμηση καταστάσεων Δf_1 , Δf_2 και $\Delta P_{tie,1}$

Πραγματικές και εκτιμώμενες καταστάσεις ταυτίζονται, επομένως ο παρατηρητής που σχεδιάστηκε πραγματοποιεί την επιθυμητή λειτουργία.

3.5 Ανίχνευση Σφαλμάτων σε Διασυνδεδεμένο Δίκτυο Δύο Περιοχών

3.5.1 Ορισμός Υπολοίπων

Ύστερα από τον σχεδιασμό του παρατηρητή πρέπει να υπολογιστούν τα υπολοίπα τα οποία δίνονται από τις σχέσεις:

$$r_1(t) = |y_1(t) - \hat{y}_1(t)| \quad (3.19)$$

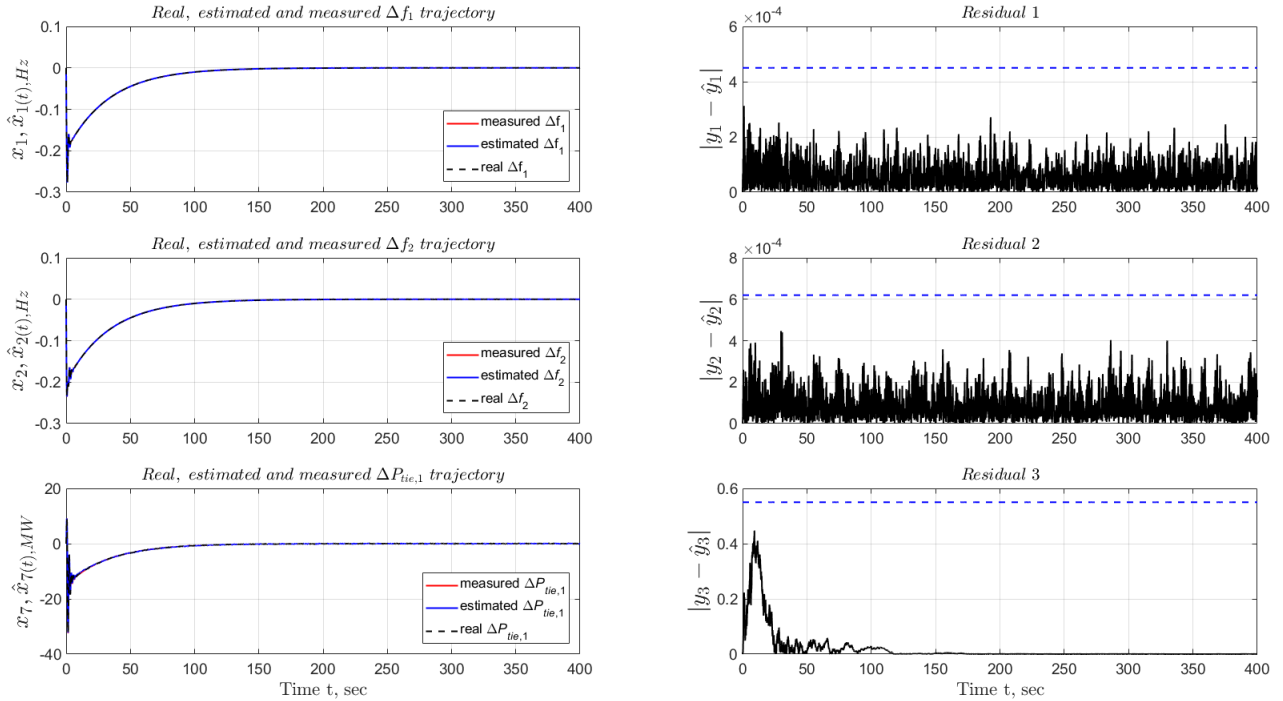
$$r_2(t) = |y_2(t) - \hat{y}_2(t)| \quad (3.20)$$

$$r_3(t) = |y_7(t) - \hat{y}_7(t)| \quad (3.21)$$

όπου y_1 και $\hat{y}_1$ η μετρούμενη και η αντίστοιχη εκτιμώμενη τιμή της κατάστασης Δf_1 , y_2 και $\hat{y}_2$ η μετρούμενη και η αντίστοιχη εκτιμώμενη τιμή της κατάστασης Δf_2 , y_7 και $\hat{y}_7$ η μετρούμενη και η αντίστοιχη εκτιμώμενη τιμή της κατάστασης $\Delta P_{tie,1}$.

Αρχικά θα πρέπει να καθοριστεί η τιμή για το κατώφλι (threshold) καθενός υπολοίπου. Αν η τιμή του υπολοίπου ξεπεράσει αυτή του αντίστοιχου κατωφλίου τότε θεωρείται ότι υπάρχει σφάλμα στο σύστημα. Για να οριστεί αυτή η τιμή θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν τη μεταβολή των υπολοίπων για τις επιτρεπόμενες διαταραχές του συστήματος και του θορύβου ώστε να μην εμφανιστεί ψευδές σήμα ανίχνευσης σφάλματος.

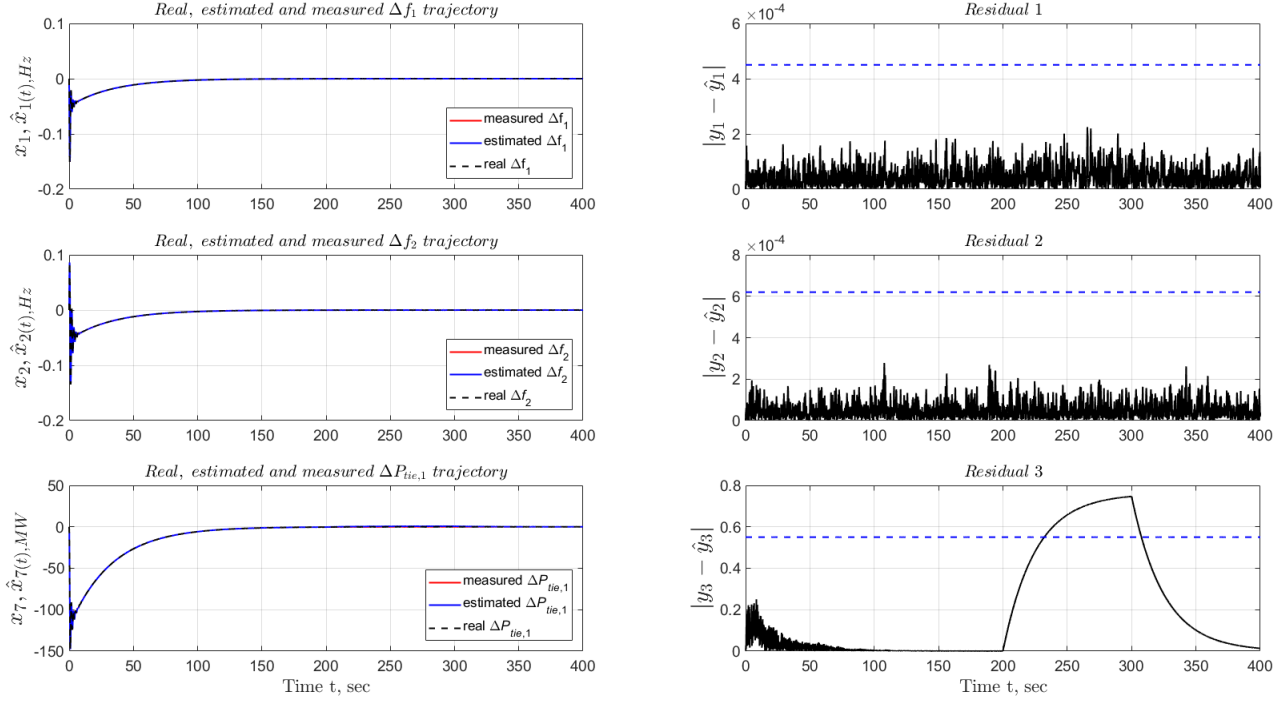
Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται οι πραγματικές, οι μετρούμενες και οι αντίστοιχες εκτιμώμενες τιμές των καταστάσεων Δf_1 , Δf_2 , $\Delta P_{tie,1}$ και τα υπολοίπα όπως ορίζονται από τις εξισώσεις 3.19, 3.20 και 3.21 όταν υπάρχει διαταραχή $\Delta D_1 = 200$ MW.



Σχήμα 3.4: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων για βηματική μεταβολή $\Delta D_1 = 200$ MW

3.5.2 Σφάλμα 1^{ov} αισθητήρα

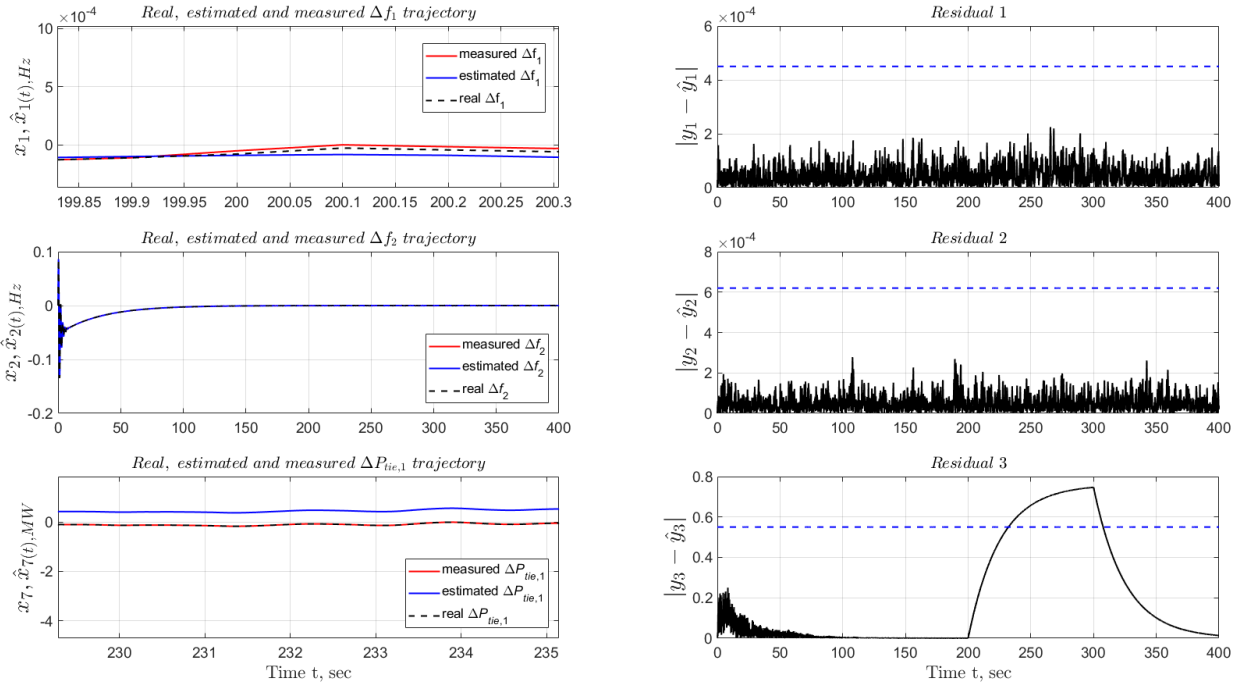
Εφαρμόζουμε στον 1^ο αισθητήρα απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 0.01% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής Δf_1 και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec.



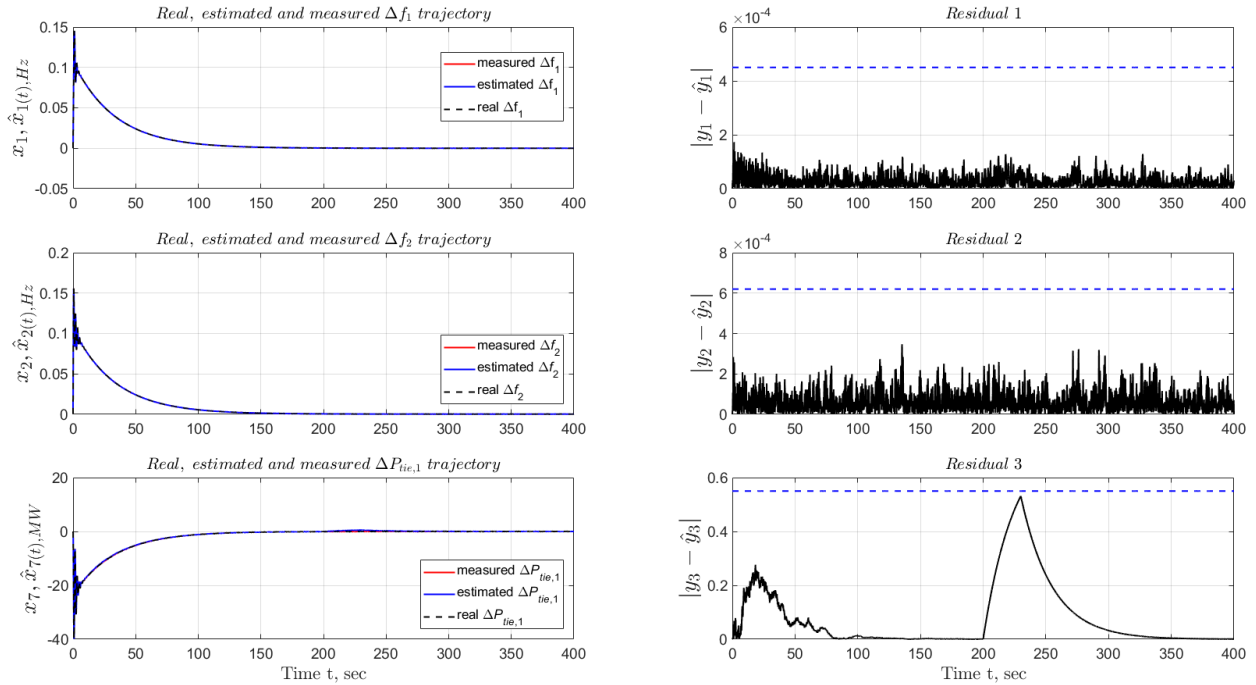
Σχήμα 3.5: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 1^{ov} αισθητήρα

Το σφάλμα του 1^{ov} αισθητήρα εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_3 τη χρονική στιγμή $t = 232.2$ sec.

Στο Σχήμα 3.6 μπορούμε να εξετάσουμε πιο λεπτομερώς τι συμβαίνει. Τη χρονική στιγμή $t = 200$ sec ξεκινάει να επενεργεί το σφάλμα στον αισθητήρα της μεταβλητής Δf_1 και έτσι παρατηρούμε απόκλιση τόσο μεταξύ της μετρούμενης και της πραγματικής τιμής όσο και της μετρούμενης και της εκτιμώμενης. Παρόλα αυτά, το μέγεθος της απόκλισης αυτής δεν είναι τέτοιο που να επιτρέπει τον εντοπισμό του σφάλματος από το υπόλοιπο r_1 . Ο εντοπισμός πραγματοποιείται από το υπόλοιπο r_3 τη χρονική στιγμή $t = 232.2$ sec όταν έχει δημιουργηθεί η απαραίτητη διαφορά μεταξύ μετρούμενης και εκτιμώμενης τιμής. Είναι σαφές, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.7, ότι αν το σφάλμα είχε το ίδιο μέγεθος αλλά διαρκούσε μικρότερο χρονικό διάστημα τότε δεν θα ήταν δυνατός ο εντοπισμός του.



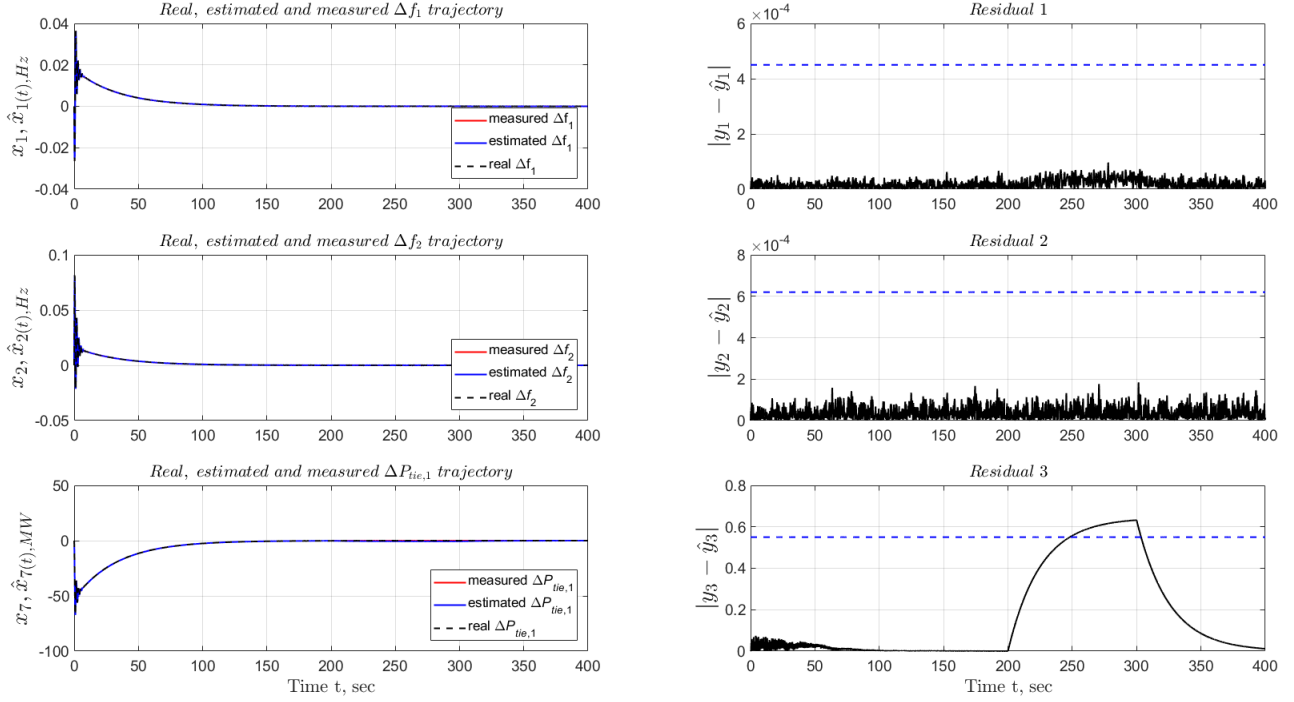
Σχήμα 3.6: Μεγεθυμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια αντί-χνευσης σφάλματος του 1^{ου} αισθητήρα



Σχήμα 3.7: Αποτυχία ανίχνευσης σφάλματος

3.5.3 Σφάλμα 2^{ου} αισθητήρα

Εφαρμόζουμε στον 2^ο αισθητήρα απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 0.01% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής Δf_2 και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec.



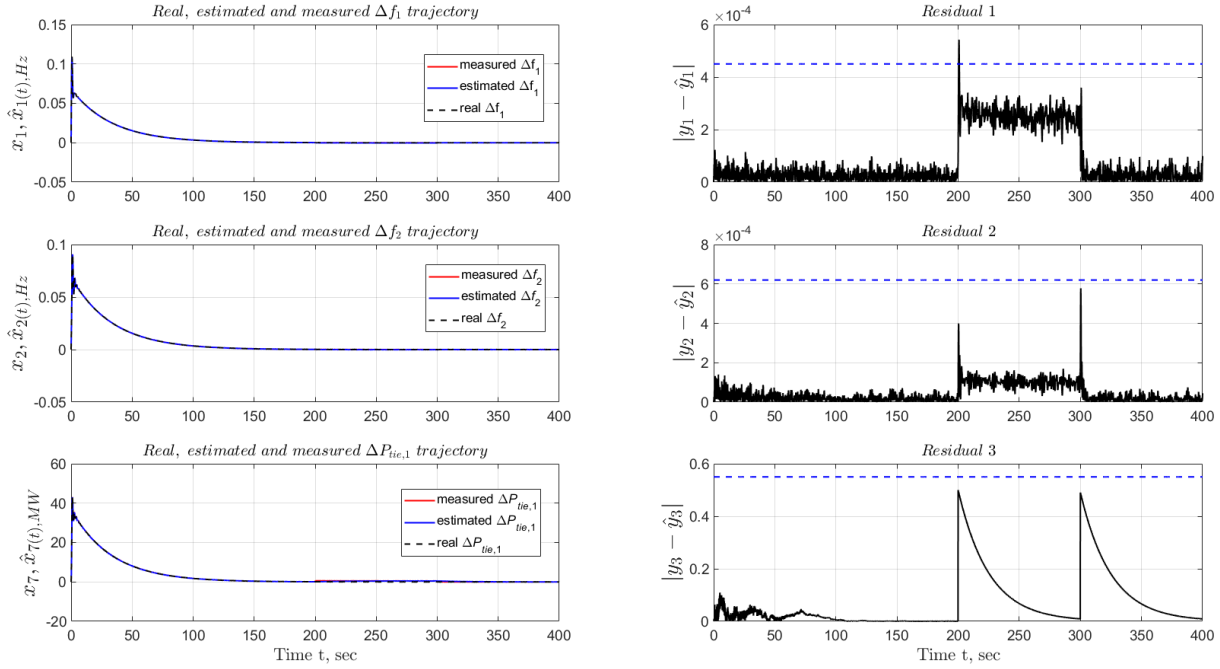
Σχήμα 3.8: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 2^{ου} αισθητήρα

Το σφάλμα του 2^{ου} αισθητήρα εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_3 τη χρονική στιγμή $t = 248$ sec. Σε αυτή την περίπτωση ισχύουν όσα ειπώθηκαν και στην προηγούμενη παράγραφο.

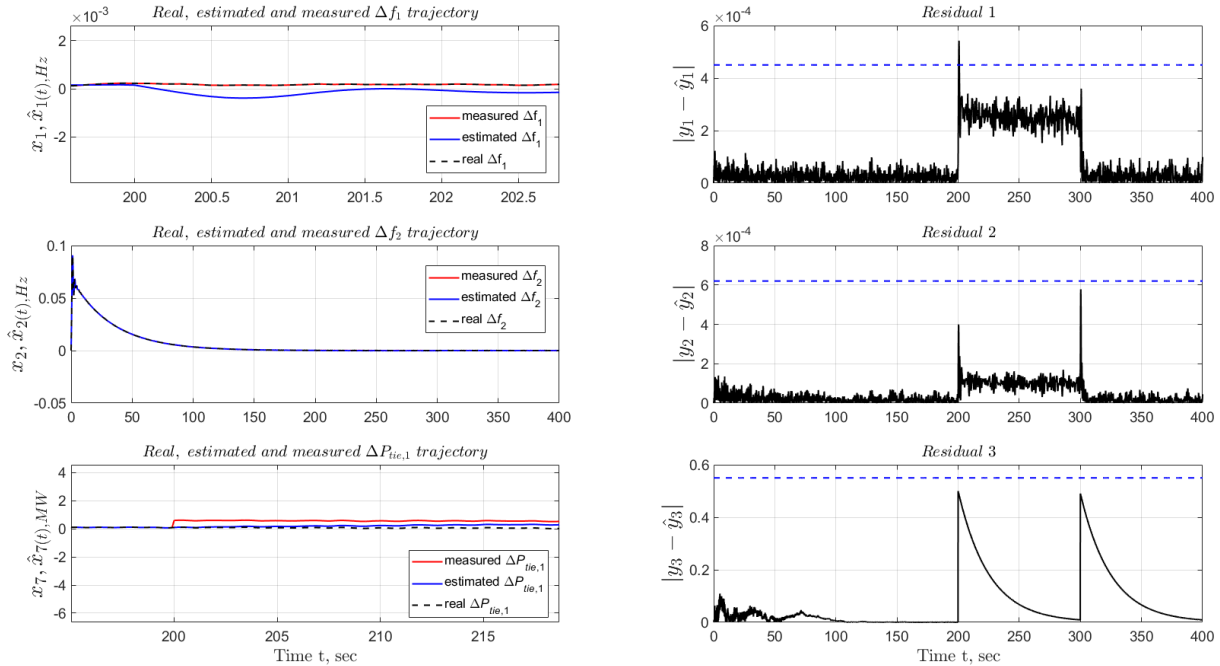
3.5.4 Σφάλμα 3^{ου} αισθητήρα

Εφαρμόζουμε στον 3^ο αισθητήρα απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 0.25% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής $\Delta P_{tie,1}$ και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec.

Το σφάλμα του 3^{ου} αισθητήρα εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_1 τη χρονική στιγμή $t = 200.5$ sec. Εδώ ο εντοπισμός είναι πολύ πιο άμεσος σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Σε αυτό παίζει ρόλο το μέγεθος του σφάλματος.



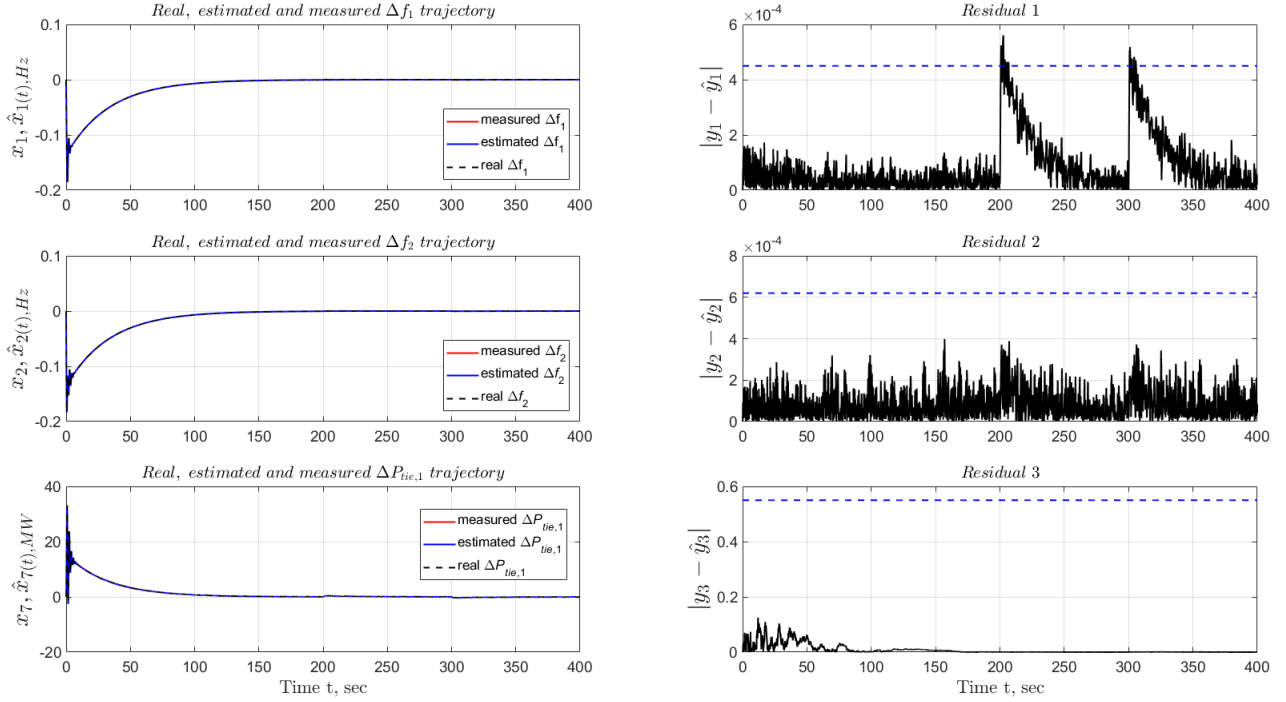
Σχήμα 3.9: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 3^{ου} αισθητήρα



Σχήμα 3.10: Μεγεθυμμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 3^{ου} αισθητήρα

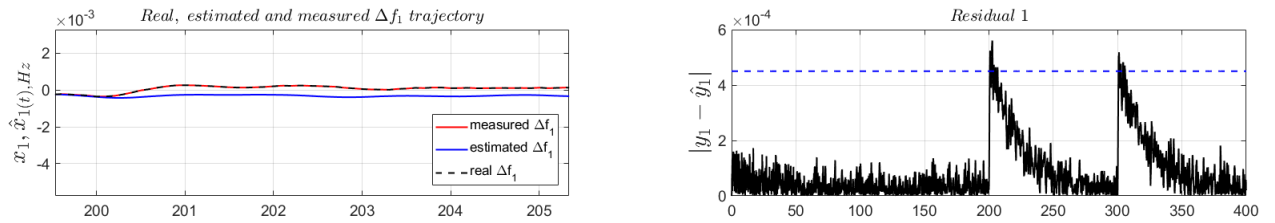
3.5.5 Σφάλμα 1^{ου} Ενεργοποιητή

Εφαρμόζουμε στον 1^ο ενεργοποιητή απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 0.4% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής ΔP_{c1} και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec.



Σχήμα 3.11: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 1^{ου} ενεργοποιητή

Το σφάλμα του 1^{ου} ενεργοποιητή εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_1 τη χρονική στιγμή $t = 200.7$ sec.

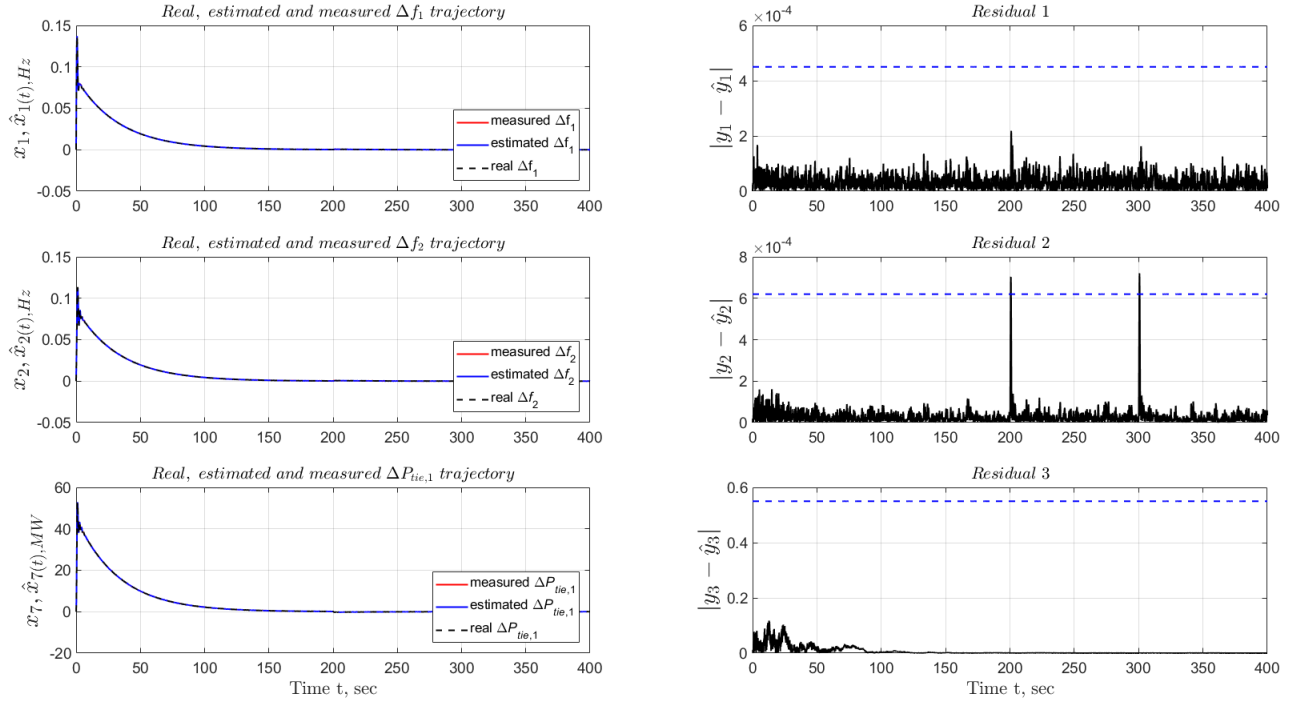


Σχήμα 3.12: Μεγεθυμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 1^{ου} ενεργοποιητή

3.5.6 Σφάλμα 2^{ου} Ενεργοποιητή

Εφαρμόζουμε στον 2^ο ενεργοποιητή απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 0.4% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής ΔP_{c2} και διάρκειας 100 sec το οποίο

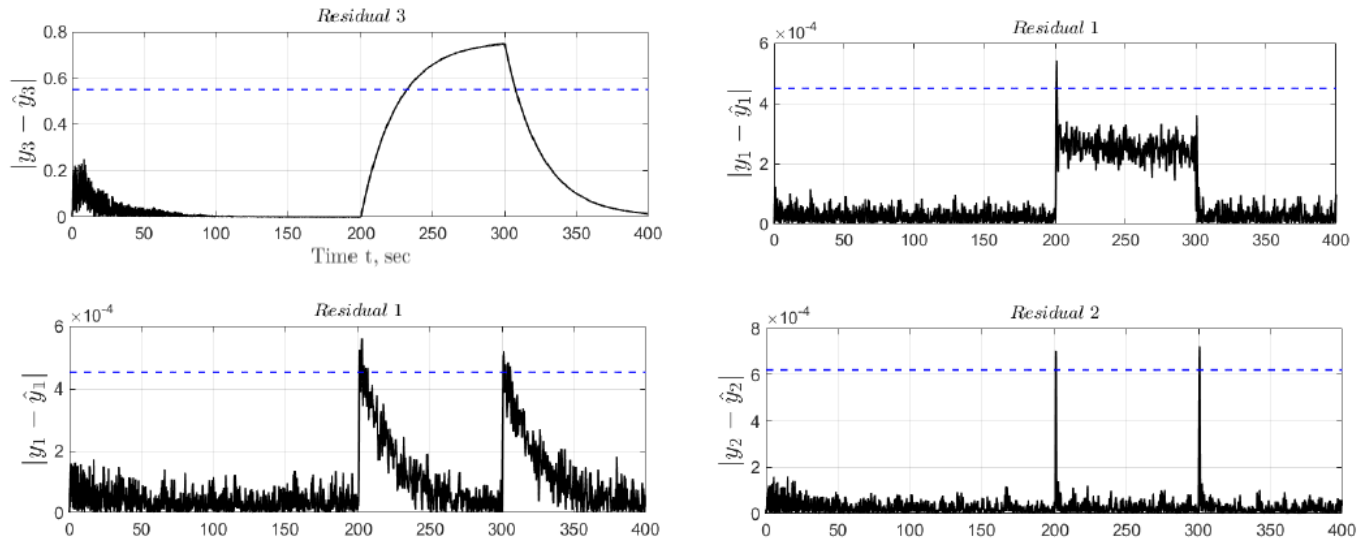
ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200 \text{ sec}$.



Σχήμα 3.13: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 2^{ου} ενεργοποιητή

Το σφάλμα του 2^{ου} ενεργοποιητή εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_2 τη χρονική στιγμή $t = 200.6 \text{ sec}$.

3.5.7 Μορφές Υπολοίπων



Σχήμα 3.14: Μορφές Υπολοίπων

Παρατηρούμε ότι η χρονική εξέλιξη ενός υπολοίπου που εντοπίζει ένα σφάλμα μπορεί να διαφέρει ανά περίπτωση. Για αυτό το λόγο, αυτό που μας ενδιαφέρει πρωτίστως είναι η πρώτη χρονική στιγμή κατά την οποία ένα υπόλοιπο ξεπερνάει το προκαθορισμένο κατώφλι.

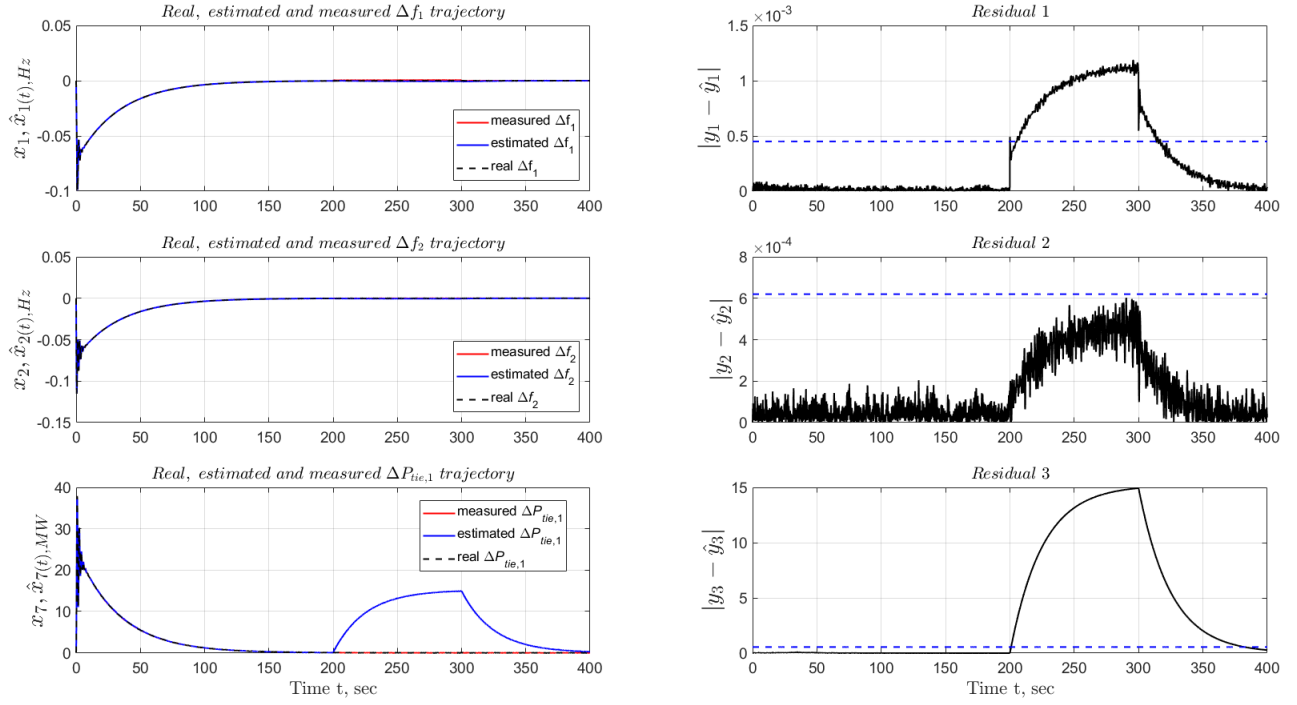
3.5.8 Ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι ελάχιστες τιμές εντοπισμού κάθε σφάλματος, ο χρόνος που παρήλθε από την έναρξη του κάθε σφάλματος ως τον εντοπισμό του και το υπόλοιπο από το οποίο εντοπίστηκε.

Πίνακας 4: Ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων

	Ελάχιστη τιμή εντοπισμού	Χρόνος Εντοπισμού	Υπόλοιπο εντοπισμού
Σφάλμα 1 ^{ου} Αισθητήρα	0.0074%	94.5	r3
Σφάλμα 2 ^{ου} Αισθητήρα	0.0087%	98.6	r3
Σφάλμα 3 ^{ου} Αισθητήρα	0.21%	0.9	r1
Σφάλμα 1 ^{ου} Ενεργοποιητή	0.32%	0.8	r1
Σφάλμα 2 ^{ου} Ενεργοποιητή	0.47%	0.6	r2

Παρατηρούμε ότι οι ελάχιστες τιμές εντοπισμού των σφαλμάτων του 1^{ου} και 2^{ου} αισθητήρα είναι πολύ μικρότερες συγκριτικά σε με τα σφάλματα του 3^{ου} αισθητήρα καθώς και των ενεργοποιητών. Αντίστοιχα, οι χρόνοι εντοπισμού είναι πολύ μεγαλύτεροι. Όπως είδαμε και στο 3.5.2, αν τα σφάλματα είχαν μικρότερη διάρκεια δεν θα εντοπιζόνταν. Αν το σφάλμα στον 1^ο αισθητήρα ήταν της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτό του 3^{ου} αισθητήρα (π.χ. 0.2%), τότε το σφάλμα θα εντοπιζόταν άμεσα, όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε και από το Σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 0.2% του 1^{ου} αισθητήρα

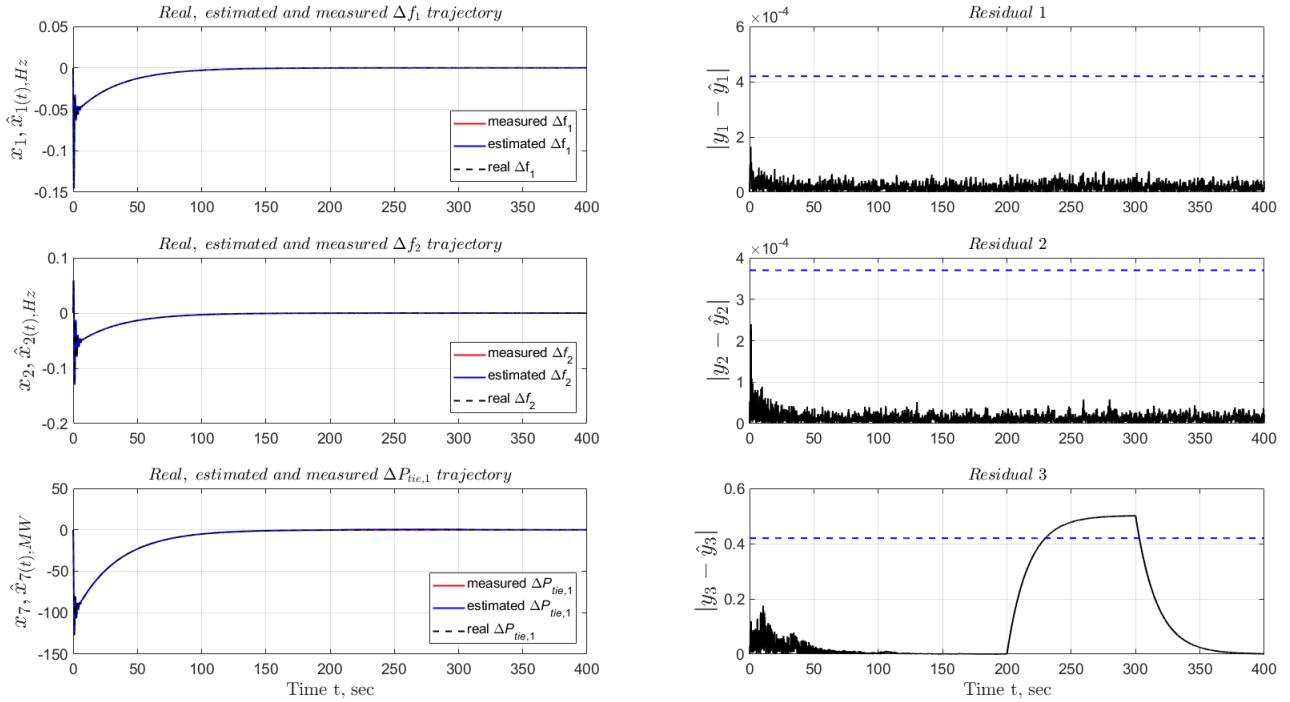
3.6 Ανίχνευση Σφαλμάτων με Χρήση Ταχύτερου Παρατηρητή

Θα επαναλάβουμε την διαδικασία του προηγούμενου κεφαλαίου για διαφορετικές τιμές ιδιοτιμών του παρατηρητή. Το πραγματικό μέρος των ιδιοτιμών του παρατηρητή θα είναι διπλάσιο σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιοτιμές του πραγματικού συστήματος. Αποτέλεσμα αυτού είναι η εκτιμώμενες καταστάσεις να συγκλίνουν ταχύτερα στις πραγματικές. Οι ιδιοτιμές που επιλέχθηκαν είναι οι εξής:

$$[-26.4285, -30.7585, -1.2096 + 3.9339i, -1.2096 - 3.9339i, -2.5163 + 2.7016i, -2.5163 - 2.7016i, -3.6499, -0.0597, -0.0606]$$

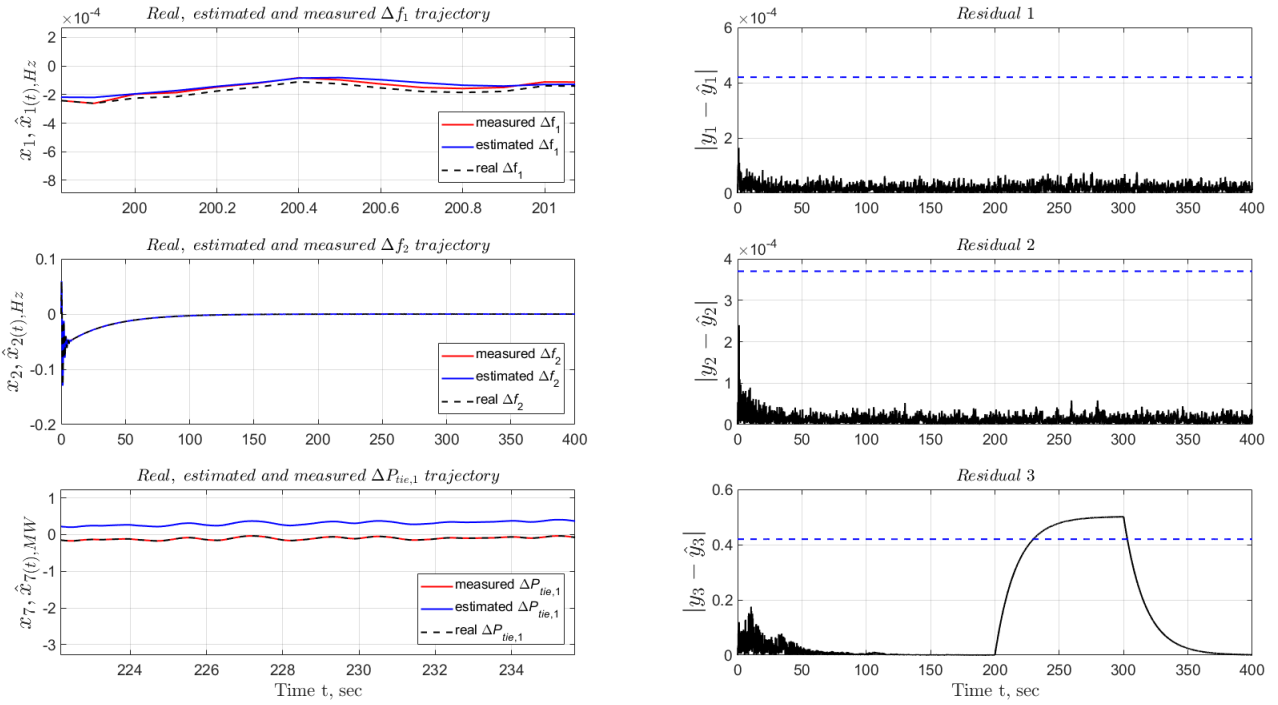
3.6.1 Σφάλμα 1^{ov} αισθητήρα

Εφαρμόζουμε στον 1^o αισθητήρα απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 0.01% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής Δf_1 και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec.



Σχήμα 3.16: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 1^{ov} αισθητήρα με ταχύτερο παρατηρητή

Το σφάλμα του 1^{ov} αισθητήρα εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_3 τη χρονική στιγμή $t = 229.9$ sec.

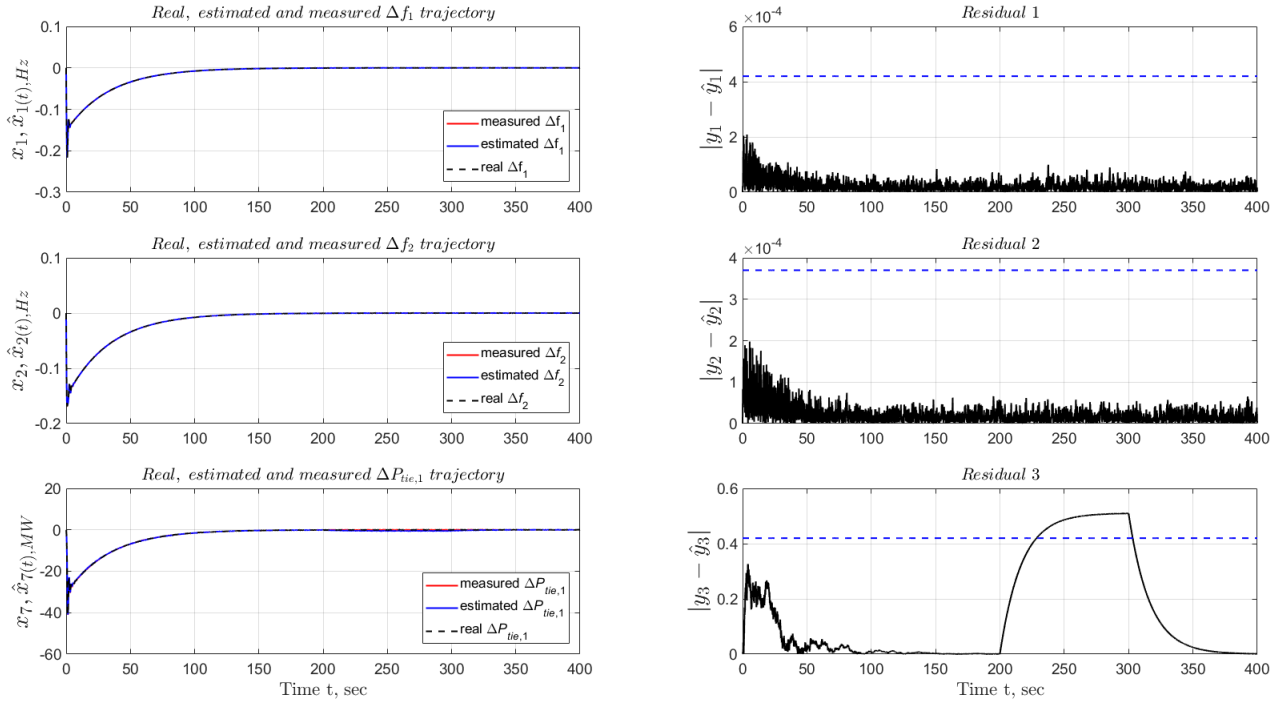


Σχήμα 3.17: Μεγεθυμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 1^{ου} αισθητήρα με ταχύτερο παρατηρητή

Στο Σχήμα 3.17 παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά είναι παρόμοια με αυτή στην παράγραφο 3.5.2. Τη χρονική στιγμή $t = 200 \text{ sec}$ ξεκινάει να επενεργεί το σφάλμα στον αισθητήρα της μεταβλητής Δf_1 και έτσι παρατηρούμε απόκλιση τόσο μεταξύ της μετρούμενης και της πραγματικής τιμής όσο και της μετρούμενης και της εκτιμώμενης. Παρόλα αυτά, το μέγεθος της απόκλισης αυτής δεν είναι τέτοιο που να επιτρέπει τον εντοπισμό του σφάλματος από το υπόλοιπο r_1 . Ο εντοπισμός πραγματοποιείται από το υπόλοιπο r_3 τη χρονική στιγμή $t = 229.9 \text{ sec}$ όταν έχει δημιουργηθεί η απαραίτητη διαφορά μεταξύ μετρούμενης και εκτιμώμενης τιμής.

3.6.2 Σφάλμα 2^{ου} αισθητήρα

Εφαρμόζουμε στον 2^ο αισθητήρα απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 0.012% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής Δf_2 και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec.

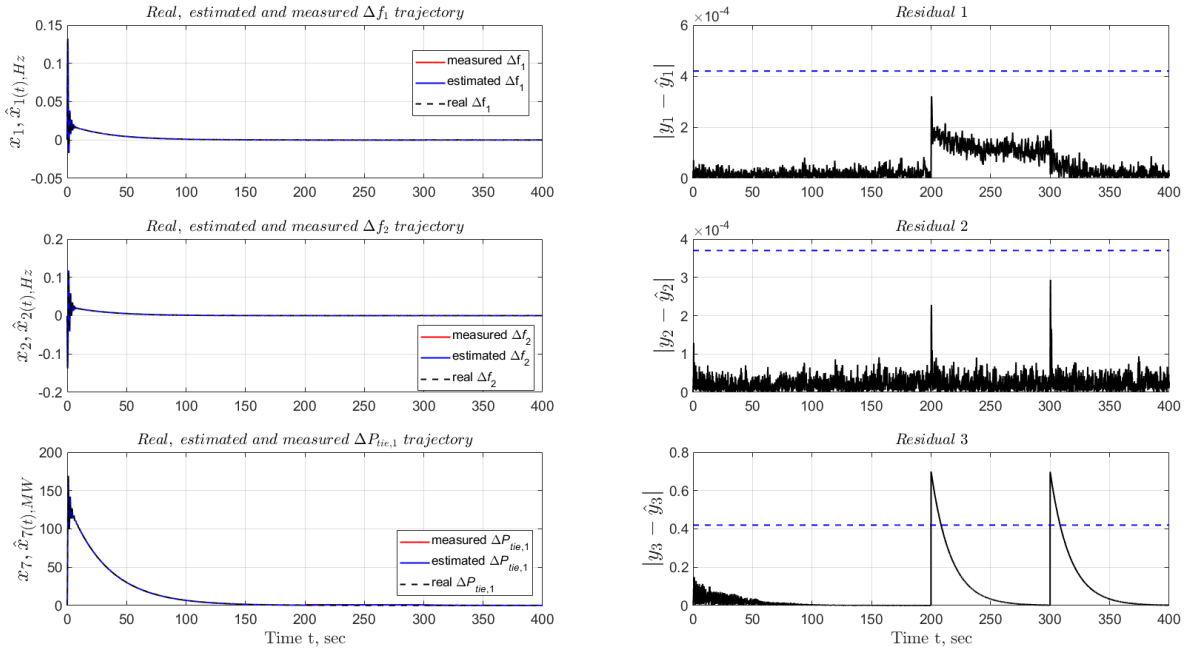


Σχήμα 3.18: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 2^{ου} αισθητήρα με ταχύτερο παρατηρητή

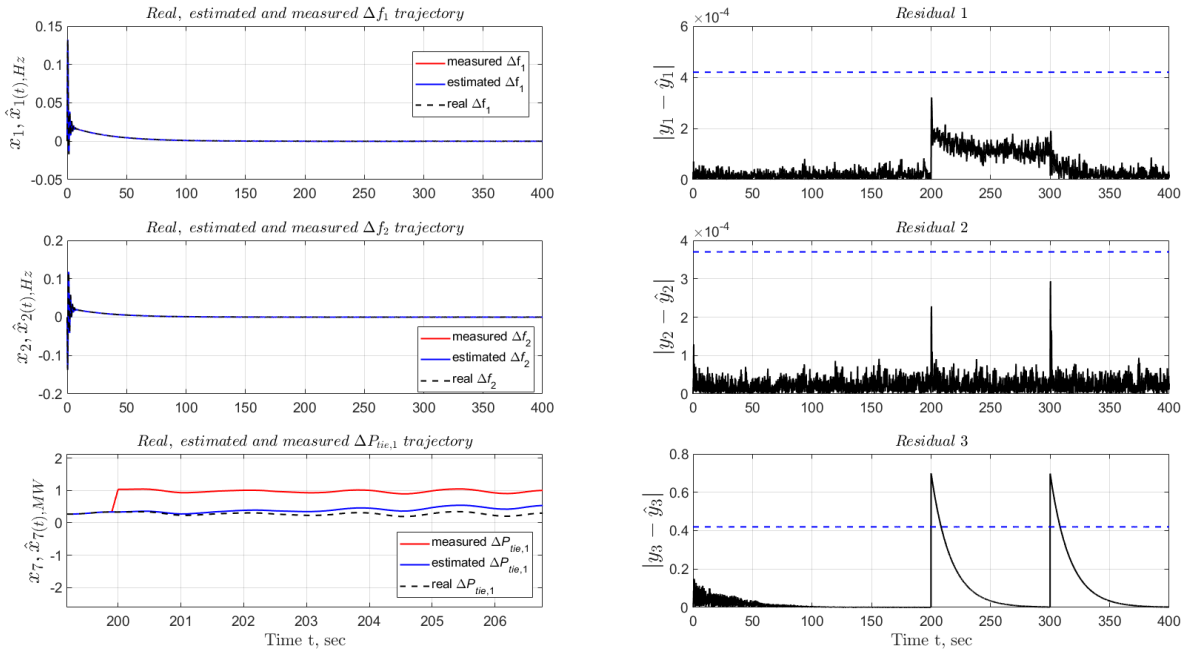
Το σφάλμα του 1^{ου} αισθητήρα εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_3 τη χρονική στιγμή $t = 228.5$ sec .

3.6.3 Σφάλμα 3^{ου} αισθητήρα

Εφαρμόζουμε στον 3^ο αισθητήρα απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 0.35% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής $\Delta P_{tie,1}$ και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec. Το σφάλμα του 3^{ου} αισθητήρα εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_3 τη χρονική στιγμή $t = 200$ sec .



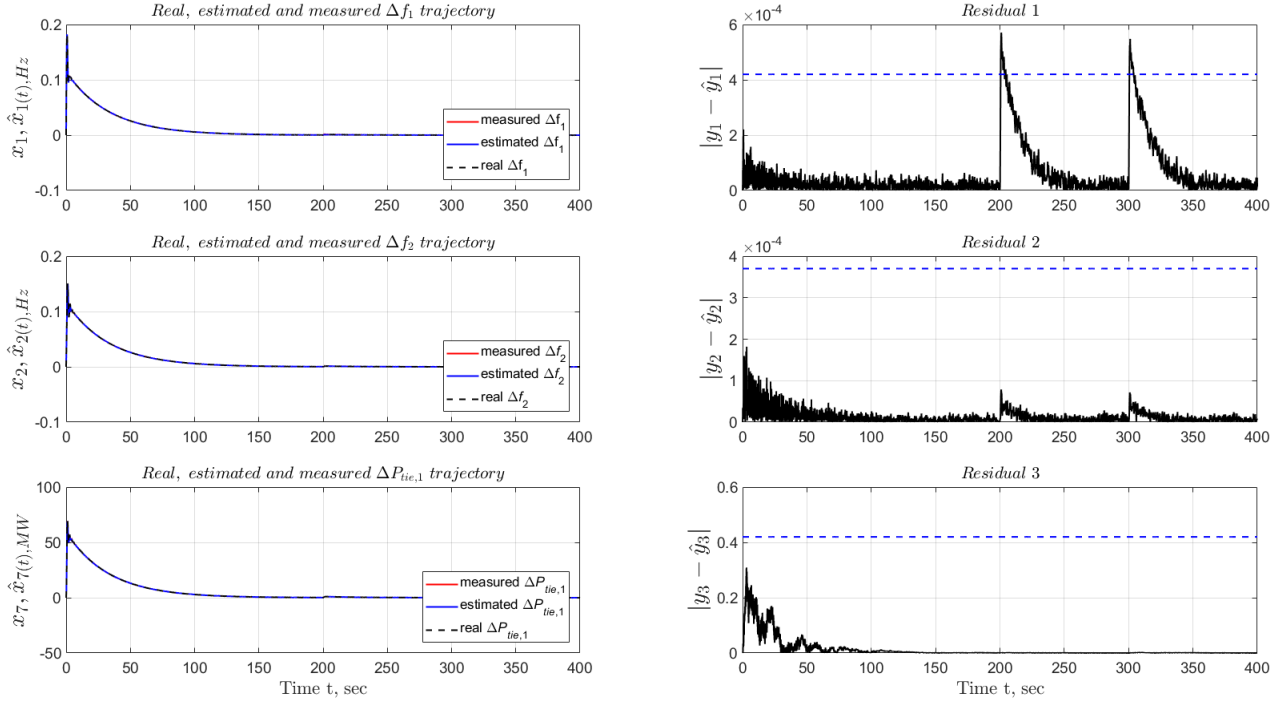
Σχήμα 3.19: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 3^{ου} αισθητήρα με ταχύτερο παρατηρητή



Σχήμα 3.20: Μεγεθυμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 3^{ου} αισθητήρα με ταχύτερο παρατηρητή

3.6.4 Σφάλμα 1^{ου} Ενεργοποιητή

Εφαρμόζουμε στον 1^ο ενεργοποιητή απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 1% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής ΔP_{c1} και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec.

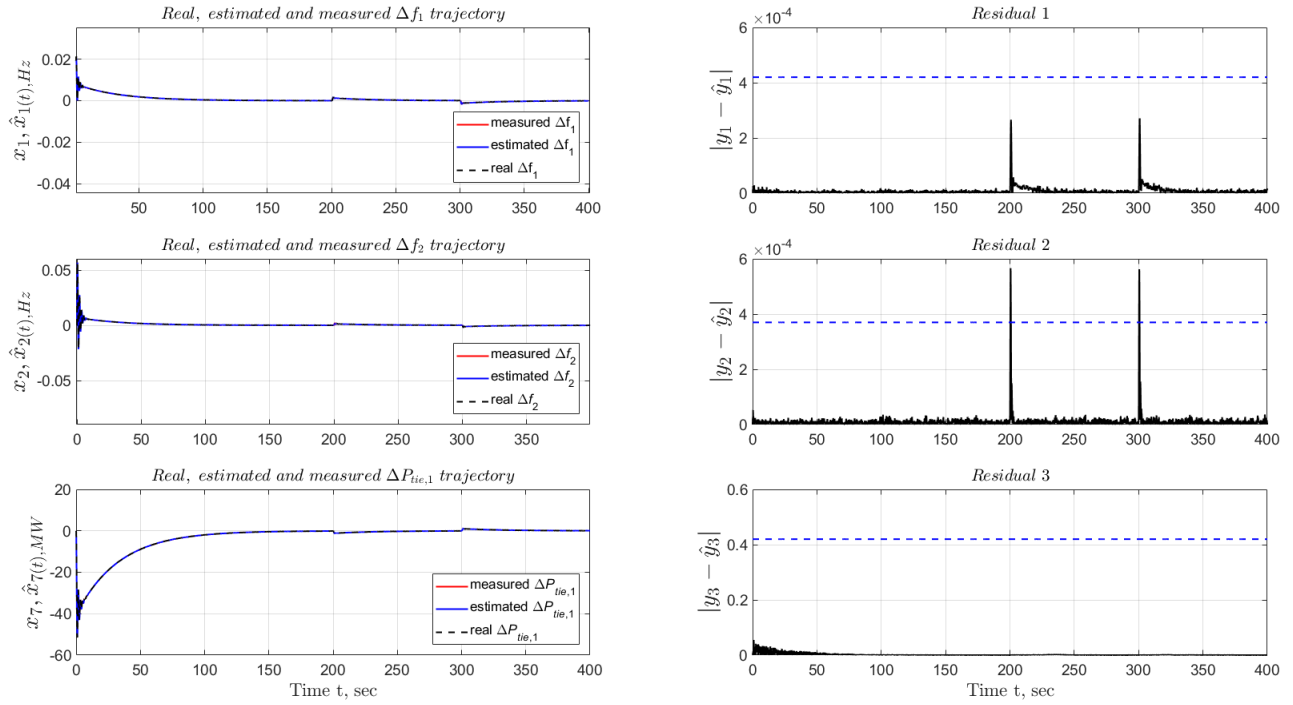


Σχήμα 3.21: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 1^{ου} ενεργοποιητή με ταχύτερο παρατηρητή

Το σφάλμα του 1^{ου} ενεργοποιητή εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_1 τη χρονική στιγμή $t = 200.6$ sec.

3.6.5 Σφάλμα 2^{ου} Ενεργοποιητή

Εφαρμόζουμε στον 2^ο ενεργοποιητή απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 1.5% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής ΔP_{c2} και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec.



Σχήμα 3.22: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος του 2^{ου} ενεργοποιητή με ταχύτερο παρατηρητή

Το σφάλμα του 2^{ου} ενεργοποιητή εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_2 τη χρονική στιγμή $t = 200.4 \text{ sec}$.

3.6.6 Ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων

Πίνακας 5: Ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων για ταχύτερο παρατηρητή

	Ελάχιστη τιμή εντοπισμού	Χρόνος Εντοπισμού	Υπόλοιπο εντοπισμού
Σφάλμα 1 ^{ου} Αισθητήρα	0.0084%	90.5	r_3
Σφάλμα 2 ^{ου} Αισθητήρα	0.01%	71.7	r_3
Σφάλμα 3 ^{ου} Αισθητήρα	0.211%	0	r_3
Σφάλμα 1 ^{ου} Ενεργοποιητή	0.786%	1	r_1
Σφάλμα 2 ^{ου} Ενεργοποιητή	1.05%	0.4	r_2

Παρατηρούμε, όπως και στο κεφάλαιο 3.5.8, ότι οι ελάχιστες τιμές εντοπισμού των σφαλμάτων του 1^{ου} και 2^{ου} αισθητήρα είναι πολύ μικρότερες συγκριτικά σε με τα σφάλματα του 3^{ου} αισθητήρα καθώς και των ενεργοποιητών. Αντίστοιχα, οι χρόνοι εντοπισμού είναι πολύ μεγαλύτεροι.

3.7 Συγκριτικά Αποτελέσματα

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα για τον εντοπισμό των σφαλμάτων με την χρήση των δύο παρατηρητών που αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.

Πίνακας 6: Ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων

	Ελάχιστη τιμή εντοπισμού	Ελάχιστη τιμή εντοπισμού για ταχύτερο παρατηρητή	Αύξηση ελάχιστης τιμής εντοπισμού
Σφάλμα 1 ^{ου} Αισθητήρα	0.0074%	0.0084%	13.51%
Σφάλμα 2 ^{ου} Αισθητήρα	0.0087%	0.01%	14.94%
Σφάλμα 3 ^{ου} Αισθητήρα	0.21%	0.211%	0.48%
Σφάλμα 1 ^{ου} Ενεργοποιητή	0.32%	0.786%	145.63%
Σφάλμα 2 ^{ου} Ενεργοποιητή	0.47%	1.05%	123.4%

Η χρήση ταχύτερου παρατηρητή επέφερε αύξηση της ελάχιστης τιμής εντοπισμού για όλα τα σφάλματα. Για τον 1^ο και τον 2^ο αισθητήρα η αύξηση αυτή είναι της τάξεως του 14%. Για τον 3^ο αισθητήρα η αύξηση είναι ελάχιστη και είναι της τάξεως του 0.5% ενώ για τους δύο ενεργοποιητές η αύξηση που παρατηρείται είναι πολύ μεγαλύτερη. Πιο συγκεκριμένα η αύξηση αυτή για τον 1^ο ενεργοποιητή είναι 145.63% ενώ για τον 2^ο ενεργοποιητή είναι 123.4% .

Πίνακας 7: Χρόνοι εντοπισμού σφαλμάτων για τα ελάχιστα σφάλματα

	Χρόνος εντοπισμού	Χρόνος εντοπισμού για ταχύτερο παρατηρητή
Σφάλμα 1 ^{ου} Αισθητήρα	94.5	90.5
Σφάλμα 2 ^{ου} Αισθητήρα	98.6	71.8
Σφάλμα 3 ^{ου} Αισθητήρα	0.5	0
Σφάλμα 1 ^{ου} Ενεργοποιητή	0.8	1
Σφάλμα 2 ^{ου} Ενεργοποιητή	0.6	0.4

Ο εντοπισμός των σφαλμάτων που έχουν την μικρότερη τιμή εντοπισμού είναι ταχύτερος για τον παρατηρητή με τις μεγαλύτερες κατά απόλυτη τιμή ιδιοτιμές. Όμως το μέγεθος του σφάλματος που εντοπίζει είναι μεγαλύτερος και όπως είδαμε και στην παράγραφο 3.5.2 ο χρόνος εντοπισμού ενός σφάλματος είναι ανάλογος του μεγέθους του. Έτσι εξετάστηκε και η περίπτωση που εφαρμόζεται το ίδιο μέγεθος σφάλματος και στα δύο συστήματα. Οι χρόνοι εντοπισμού των σφαλμάτων σε αυτή την περίπτωση καταγράφεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 8: Χρόνοι εντοπισμού σφαλμάτων για το ίδιο σφάλμα

	Χρόνος εντοπισμού	Χρόνος εντοπισμού για ταχύτερο παρατηρητή
Σφάλμα 1 ^{ov} Αισθητήρα	40.7	43.8
Σφάλμα 2 ^{ov} Αισθητήρα	21.1	17.7
Σφάλμα 3 ^{ov} Αισθητήρα	0.8	0
Σφάλμα 1 ^{ov} Ενεργοποιητή	0.5	0.9
Σφάλμα 2 ^{ov} Ενεργοποιητή	0.3	0.6

Δεν μπορούμε να βγάλουμε κάποιο ασφαλές συμπέρασμα από τις παραπάνω μετρήσεις. Στην περίπτωση του 1^{ov} αισθητήρα το σφάλμα εντοπίζεται κατά 3.1s ταχύτερα στον πρώτο παρατηρητή ενώ στην περίπτωση του 2^{ov} αισθητήρα το σφάλμα εντοπίζεται κατά 3.4s γρηγορότερα από τον δεύτερο παρατηρητή.

Πίνακας 9: Υπόλοιπα εντοπισμού ελαχίστων σφαλμάτων

	Υπόλοιπο εντοπισμού	Υπόλοιπο εντοπισμού για ταχύτερο παρατηρητή
Σφάλμα 1 ^{ov} Αισθητήρα	r_3	r_3
Σφάλμα 2 ^{ov} Αισθητήρα	r_3	r_3
Σφάλμα 3 ^{ov} Αισθητήρα	r_1	r_3
Σφάλμα 1 ^{ov} Ενεργοποιητή	r_1	r_1
Σφάλμα 2 ^{ov} Ενεργοποιητή	r_2	r_2

Τέλος, γίνεται μια σύγκριση στα υπόλοιπα που εντόπισαν τα σφάλματα. Η μόνη διαφορά παρατηρείται στον εντοπισμό του σφάλματος στον 3^ο αισθητήρα.

3.8 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιήθηκε η ανίχνευση σφαλμάτων για το σύστημα των δύο περιοχών ελέγχου με χρήση δύο διαφορετικών παρατηρητών. Αρχικά έγινε η μαθηματική περιγραφή του παρατηρητή καταστάσεως. Ακολούθησε η ανάλυση ενός συστήματος στο οποίο επενεργεί προσθετικό σφάλμα τόσο σε αισθητήρα όσο και σε ενεργοποιητή. Σχεδιάστηκαν δύο παρατηρητές με διαφορετικές τιμές ιδιοτιμών και αφού καταγράφηκαν οι ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων, στο τέλος πραγματοποιήθηκε μια σύγκριση των αποτελεσμάτων.

4 Απομόνωση Σφαλμάτων

4.1 Εισαγωγή

Η απομόνωση σφαλμάτων στοχεύει στη θέση ενός εντοπισμένου σφάλματος που εμφανίζεται στους ενεργοποιητές, τους αισθητήρες, τα όργανα, τον έλεγχο ή το σύστημα που ελέγχεται καθορίζοντας ποιο όργανο ή εξάρτημα επηρεάζεται από αυτό.

Εάν το σφάλμα εξόδου $e(t) = r(t)$ χρησιμοποιείται ως πρωτεύον υπόλοιπο, τα στοιχεία του θα παραμορφωθούν ανάλογα με τα σφάλματα όπως φαίνεται π.χ. από την 3.17. Προκειμένου να προσδιοριστούν τα μεμονωμένα σφάλματα, πρέπει να δημιουργηθούν ενισχυμένα υπόλοιπα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση εξειδικευμένων παρατηρητών κυρίως σε μορφή μιας τράπεζας παρατηρητών. Οι παρατηρητές αυτοί θα πρέπει να έχουν διαφορετικές εισόδους ή εξόδους. Με αυτόν τον τρόπο ο παρατηρητής με τις εισόδους ή τις εξόδους που λείπουν δεν εμφανίζει αλλαγές για τα αντίστοιχα σφάλματα εισόδου και εξόδου [4].

Η ανίχνευση σφάλματος σε έναν δεδομένο αισθητήρα πραγματοποιείται συγκρίνοντας τις εκτιμώμενες μεταβλητές κατάστασης του παρατηρητή που είναι αφιερωμένος στον συγκεκριμένο αισθητήρα με τις αντίστοιχες εκτιμώμενες μεταβλητές κατάστασης από τους άλλους παρατηρητές, καθεμία από τις οποίες είναι ομοίως αφιερωμένη σε έναν μη-εσφαλμένο αισθητήρα. Εάν υπάρχουν m αισθητήρες πρέπει να υπάρχουν m ξεχωριστοί παρατηρητές σχεδιασμένοι για αυτό το σχήμα και πρέπει επίσης να επινοηθούν κατάλληλα λογικά κυκλώματα [20].

4.2 Προσθετικά Σφάλματα Αισθητήρα

Θα εξεταστεί η περίπτωση όπου υπάρχουν προσθετικά σφάλματα αισθητήρα.

$$y = Cx + f_s \quad (4.1)$$

όπου:

$$f_s^T = [f_{s1} \ f_{s2} \ \dots \ f_{sm}] \quad (4.2)$$

Μια τράπεζα παρατηρητών μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας για όλους τους παρατηρητές όλες τις εισόδους u αλλά μόνο μία έξοδο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1.

$$y_i = c_i^T x + f_{si} \quad (4.3)$$

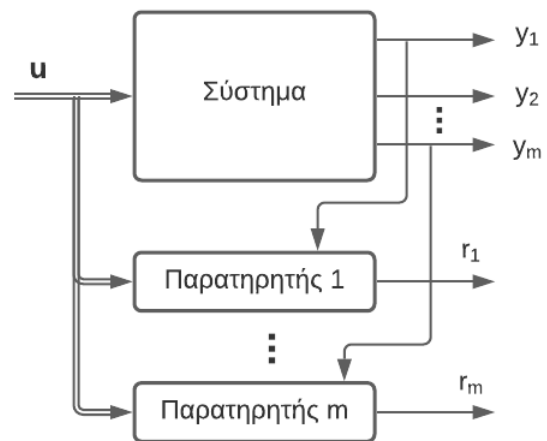
και η εξίσωση παρατηρητή 3.4 καταλήγει στην:

$$\dot{\hat{x}}(t) = (A - l_i c_i^T) \hat{x}(t) + Bu + l_i y_i \quad (4.4)$$

η οποία οδηγεί σε ένα υπόλοιπο ως σφάλμα εξόδου:

$$r_i = y_i - c_i^T \hat{x} \quad (4.5)$$

Επομένως, μόνο το k -οστό υπόλοιπο επηρεάζεται από ένα σφάλμα f_{sk} και όλα τα υπόλοιπα r_i , $i = 1 \dots r$; $i \neq k$. Έτσι, αναλύοντας τα μοτίβα των υπολοίπων μπορεί να απομονωθεί το προσθετικό σφάλμα αισθητήρα.



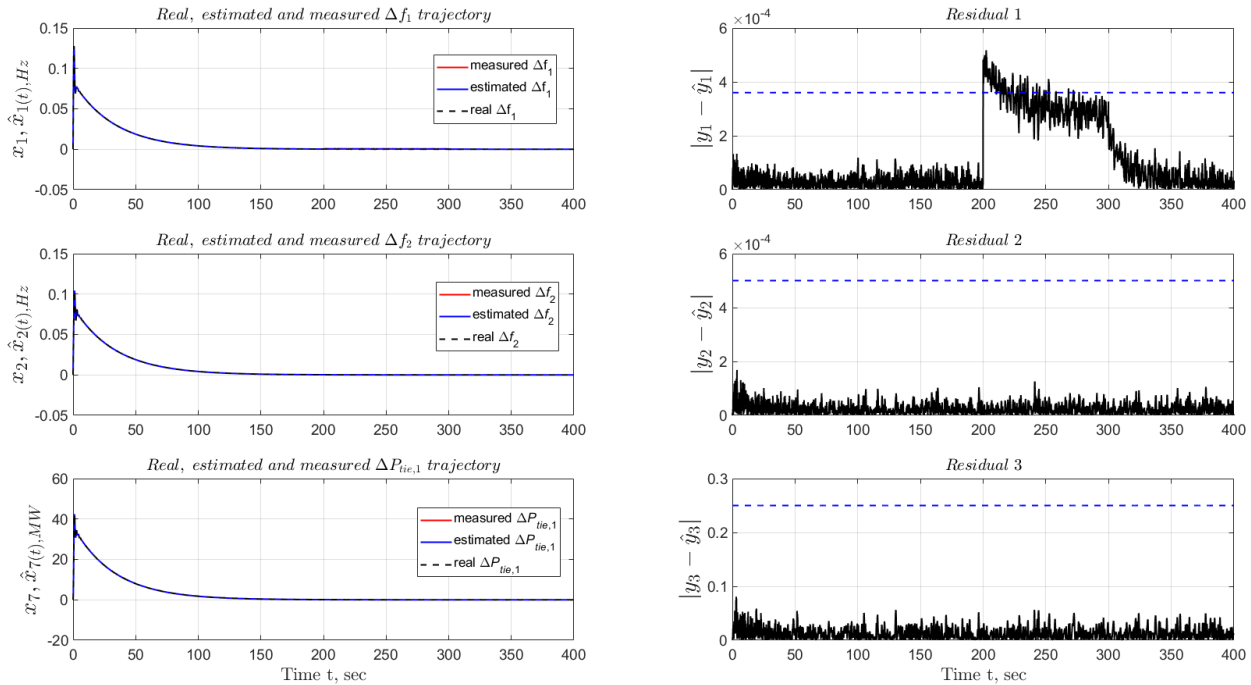
Σχήμα 4.1: Τράπεζα παρατηρητών: όλες οι είσοδοι, μία έξοδος

4.3 Απομόνωση Σφαλμάτων σε Διασυνδεδεμένο Δίκτυο Δύο Περιοχών

Στις παραγράφους που ακολουθούν, θα πραγματοποιηθεί απομόνωση σφαλμάτων των αισθητήρων για το διασυνδεδεμένο δίκτυο δύο περιοχών που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.12. Θα χρησιμοποιηθούν δύο παρατηρητές καταστάσεων με διαφορετικές ιδιοτιμές, όπως συνέβη και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Θα γίνει σύγκριση μεταξύ των ελαχίστων τιμών εντοπισμού σφαλμάτων και θα εξεταστεί τι συμβαίνει στην περίπτωση σφάλματος στους αισθητήρες.

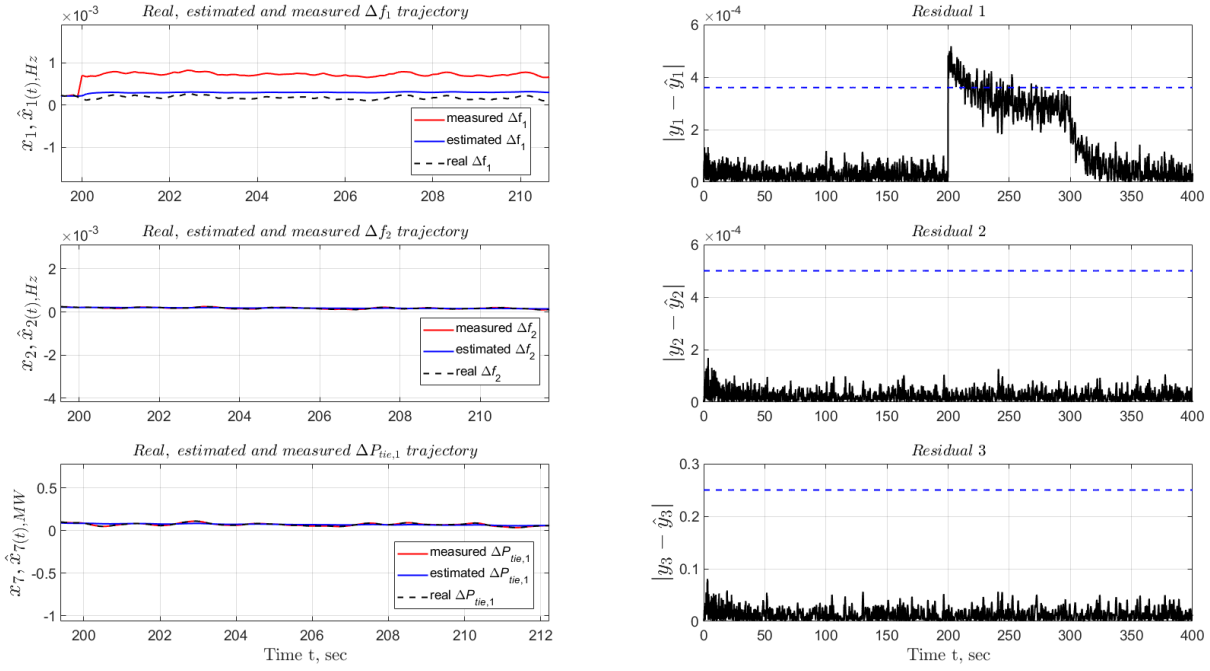
4.3.1 Σφάλμα 1^{ου} αισθητήρα

Εφαρμόζουμε στον 1^ο αισθητήρα απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 0.2% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής Δf_1 και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec. Το σφάλμα εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_1 , όπως αυτό θα ήταν επιθυμητό, τη χρονική στιγμή $t = 200$ sec.

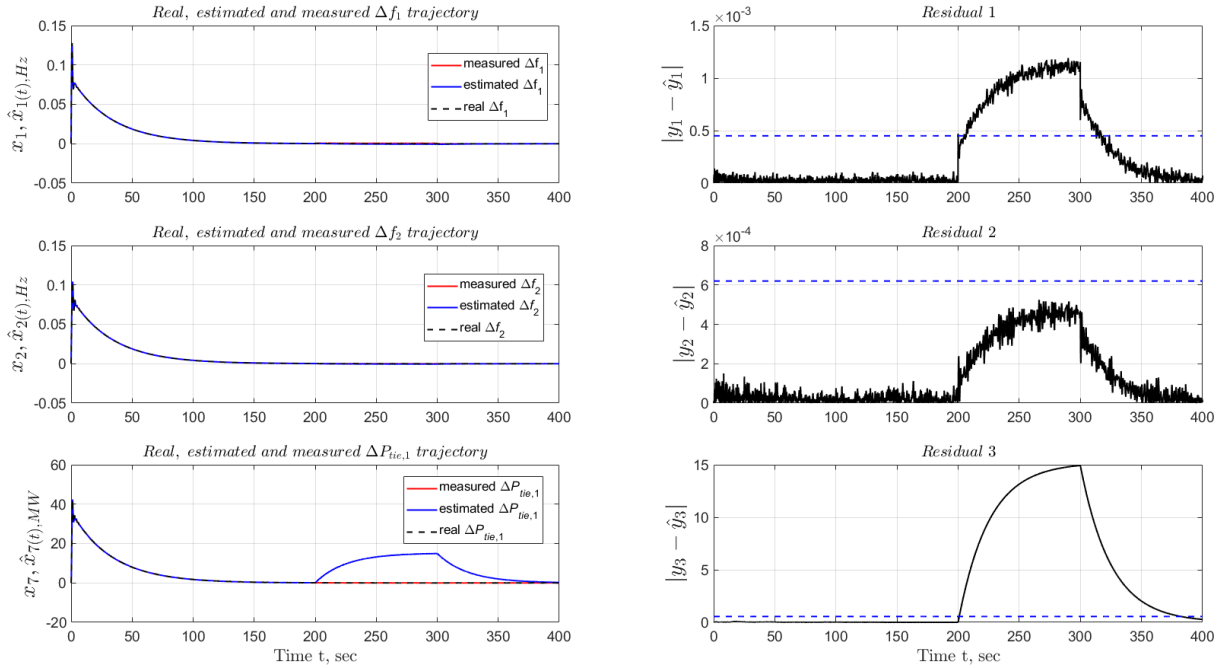


Σχήμα 4.2: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 1^{ου} αισθητήρα

Εξετάζοντας το Σχήμα 4.3, παρατηρούμε πως δεν υπάρχει κάποια μεταβολή στις μετρούμενες ή στις εκτιμώμενες τιμές των μεταβλητών Δf_2 και $\Delta P_{tie,1}$ με αποτέλεσμα να μην επηρεάζονται τα αντίστοιχα υπόλοιπα. Για το ίδιο σφάλμα, στο Σχήμα 4.4, βλέπουμε τα υπόλοιπα που παράγονται σε περίπτωση που είχαμε μόνο έναν παρατηρητή, όπως στο κεφάλαιο 3.5.2. Παρατηρούμε ότι το σφάλμα εντοπίζεται από δύο διαφορετικά υπόλοιπα και πως επηρεάζονται και τα τρία. Επίσης καταλαβαίνουμε ότι η ελάχιστη τιμή ανίχνευσης ενός σφάλματος είναι πολύ μικρότερη όταν έχουμε έναν μόνο παρατηρητή.



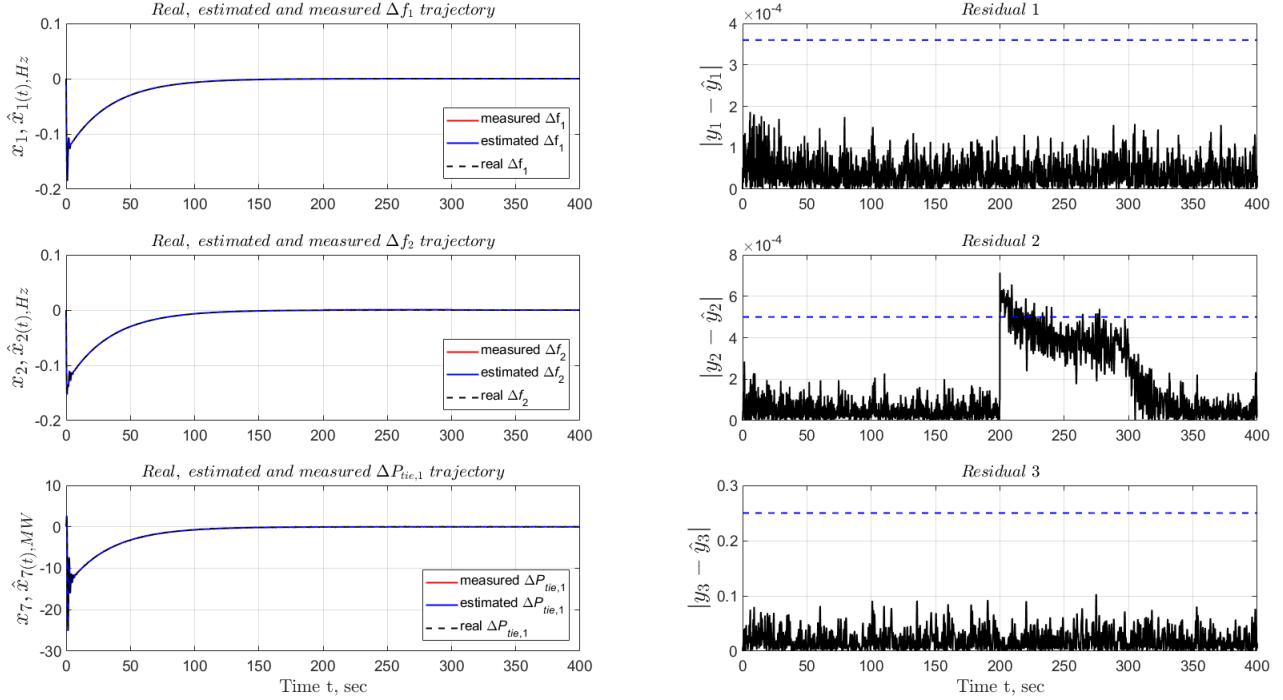
Σχήμα 4.3: Μεγεθυμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 1^{ου} αισθητήρα



Σχήμα 4.4: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 0.2% του 1^{ου} αισθητήρα

4.3.2 Σφάλμα 2^{ου} αισθητήρα

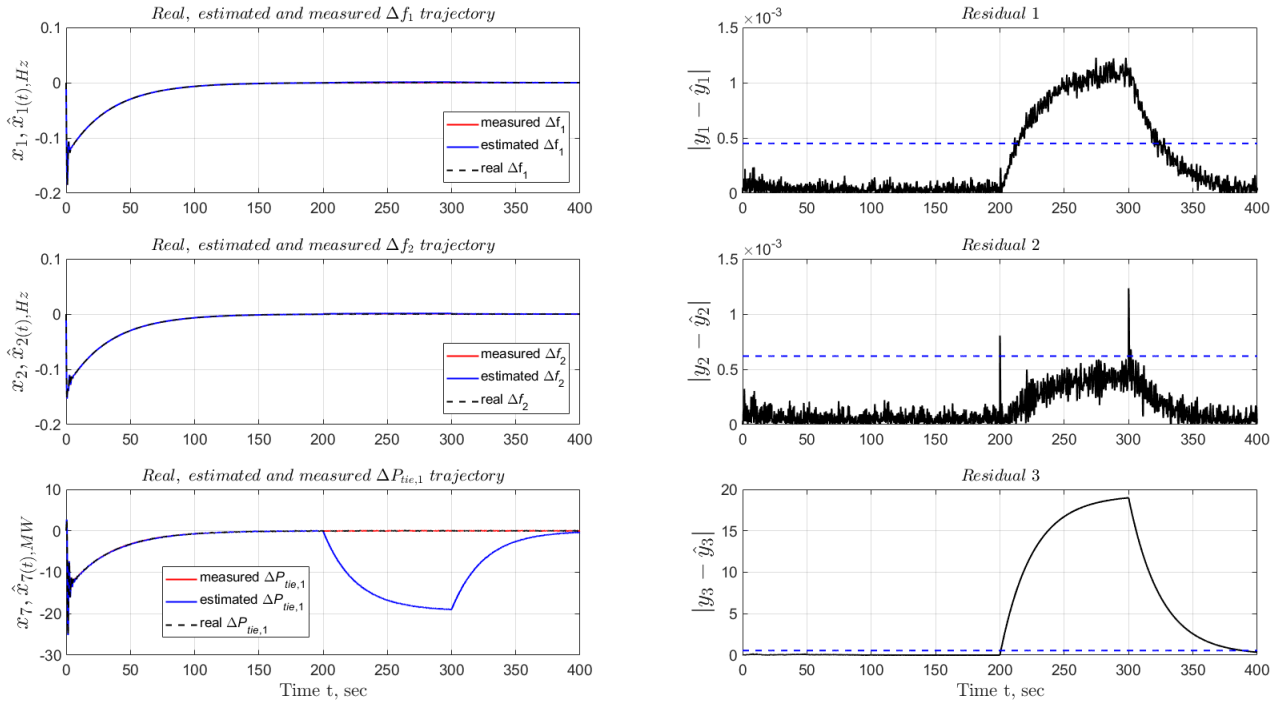
Εφαρμόζουμε στον 2^ο αισθητήρα απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 0.3% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής Δf_2 και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec.



Σχήμα 4.5: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 2^{ου} αισθητήρα

Το σφάλμα του 2^{ου} αισθητήρα εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_2 τη χρονική στιγμή $t = 200$ sec.

Ισχύουν όσα είδαμε και στην περίπτωση της απομόνωσης του σφάλματος του 1^{ου} αισθητήρα. Τα υπόλοιπα r_1 και r_3 δεν επηρεάζονται καθόλου από το σφάλμα. Επίσης, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4.6, το σφάλμα εντοπίζεται και από τα τρία υπόλοιπα στην περίπτωση που έχουμε χρησιμοποιήσει έναν μόνο παρατηρητή για την παραγωγή τους.



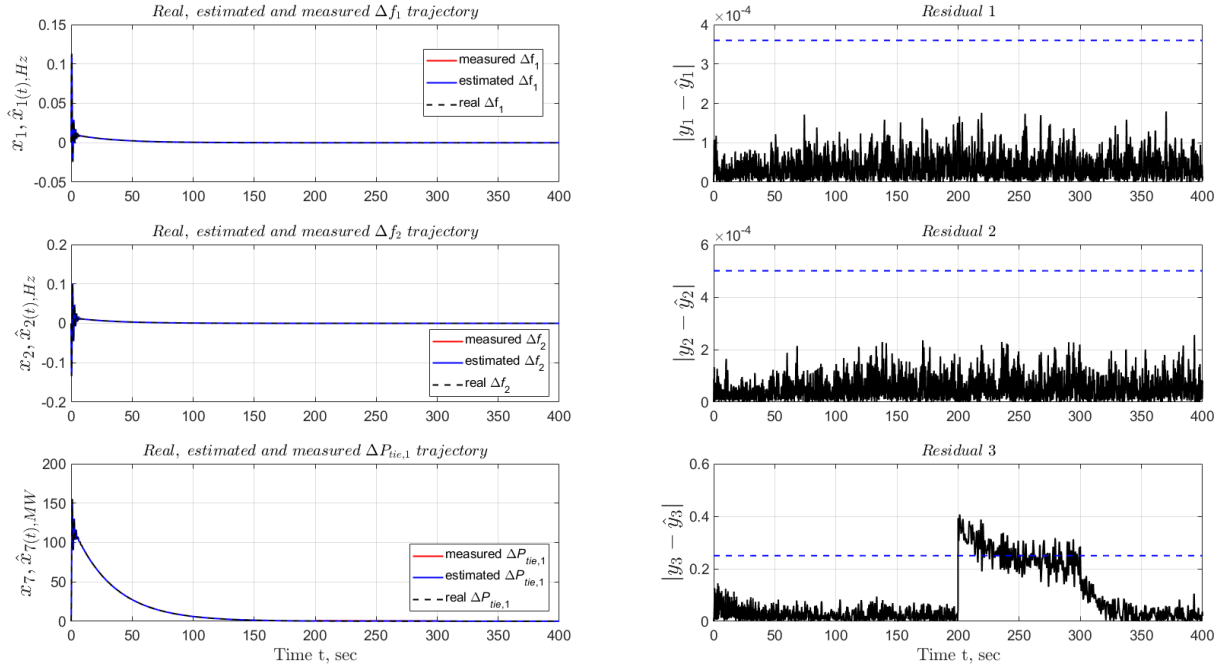
Σχήμα 4.6: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 0.3% του 2^{ου} αισθητήρα

4.3.3 Σφάλμα 3^{ου} αισθητήρα

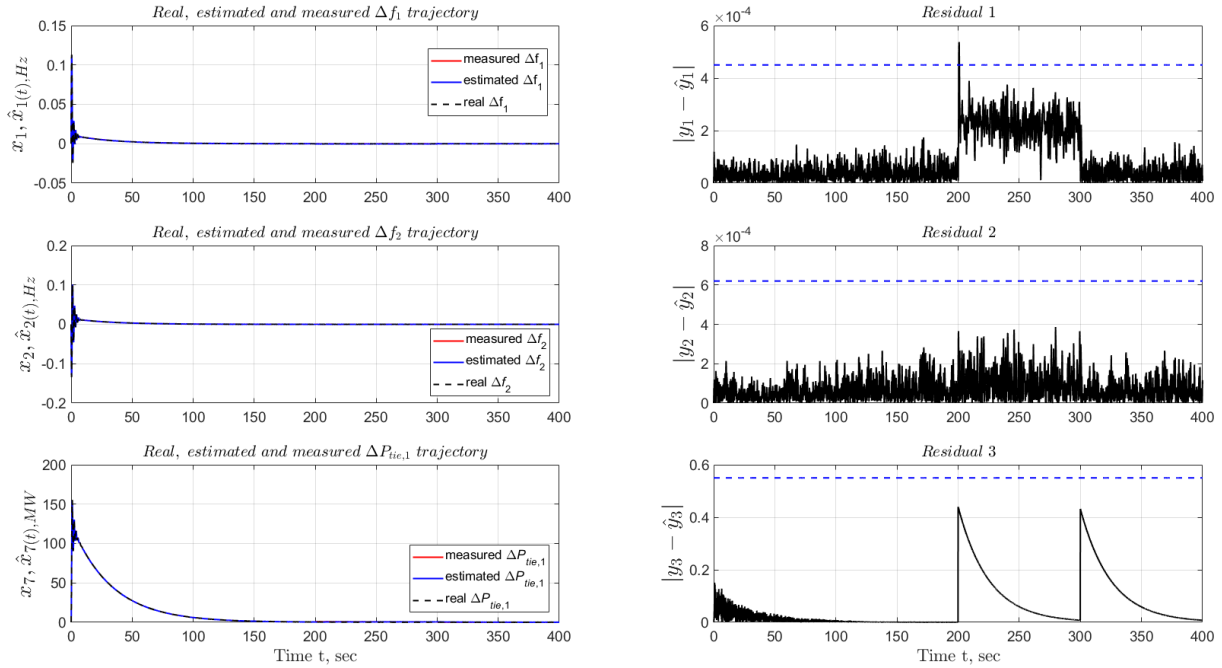
Εφαρμόζουμε στον 3^ο αισθητήρα απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 0.22% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής $\Delta P_{tie,1}$ και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec.

Το σφάλμα του 3^{ου} αισθητήρα εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_3 τη χρονική στιγμή $t = 200$ sec.

Εδώ η τιμή εντοπισμού φαίνεται να είναι συγκρίσιμη.



Σχήμα 4.7: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 3^{ου} αισθητήρα



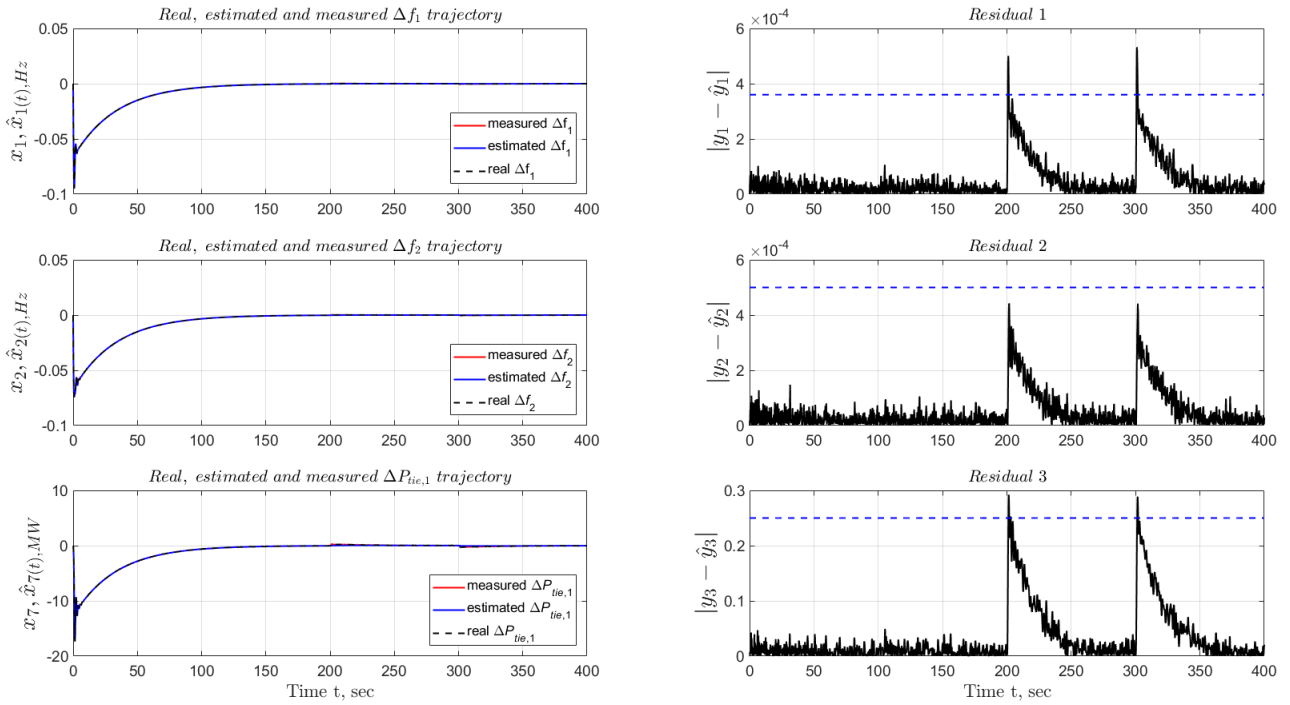
Σχήμα 4.8: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 0.22% του 3^{ου} αισθητήρα

4.3.4 Σφάλματα Ενεργοποιητών

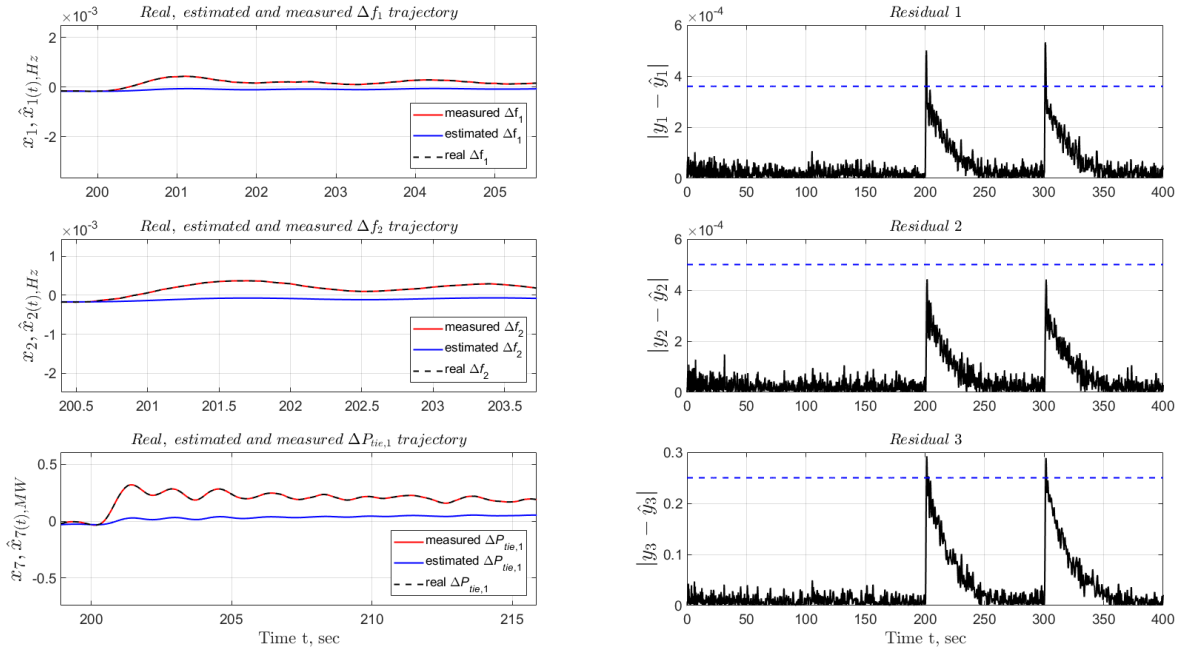
Στις προηγούμενες παραγράφους είδαμε ότι η απομόνωση των σφαλμάτων των αισθητήρων είναι εφικτή. Σε αυτήν την παράγραφο θα εξετάσουμε την συμπεριφορά των υπολοίπων όταν υπάρχει απότομο προσθετικό σφάλμα στους ενεργοποιητές.

Εφαρμόζουμε στον 1^ο ενεργοποιητή απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 0.35% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής ΔP_{c1} και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec. Το σφάλμα αυτό εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπα r_1 και r_3 τη χρονική στιγμή $t = 200.7$ sec. Όπως παρατηρούμε από τα Σχήματα 4.9 και 4.10, το σφάλμα στον 1^ο ενεργοποιητή επηρεάζει τις μετρήσεις και στις τρεις μεταβλητές συνεπώς και τα υπόλοιπα.

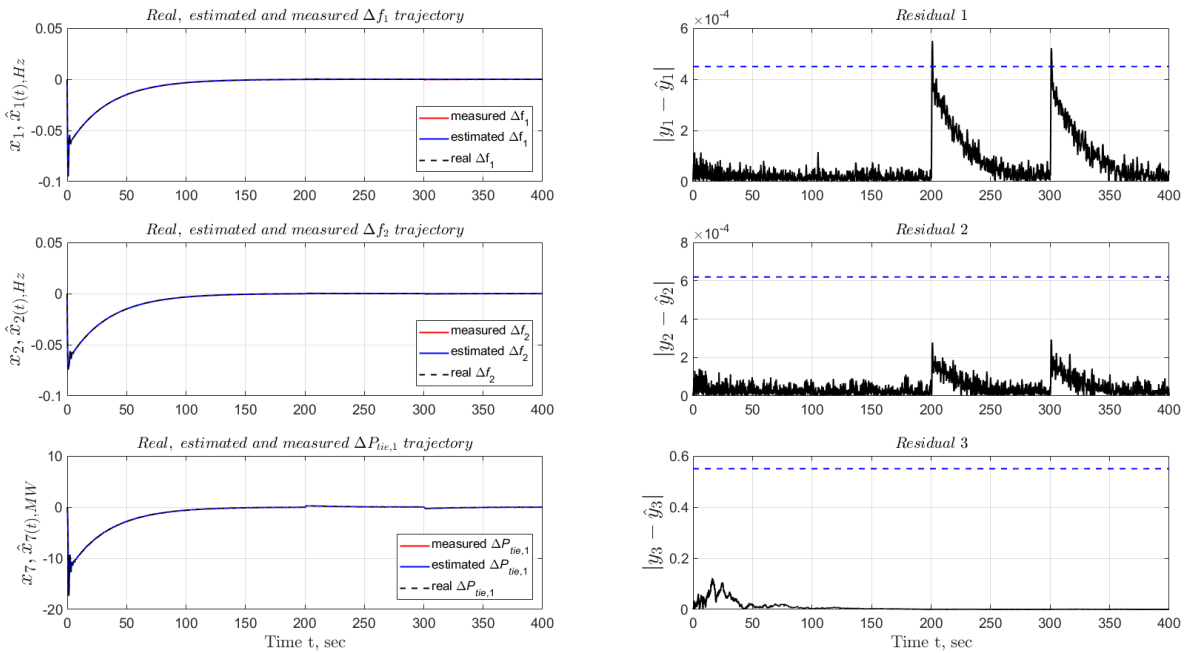
Στο Σχήμα 4.11 βλέπουμε την συμπεριφορά των υπολοίπων όταν αυτά παράγονται από έναν μόνο παρατηρητή. Παρατηρούμε πως το υπόλοιπο r_1 παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία από το r_2 ενώ το r_3 δεν επηρεάζεται καθόλου.



Σχήμα 4.9: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 1^{ου} ενεργοποιητή



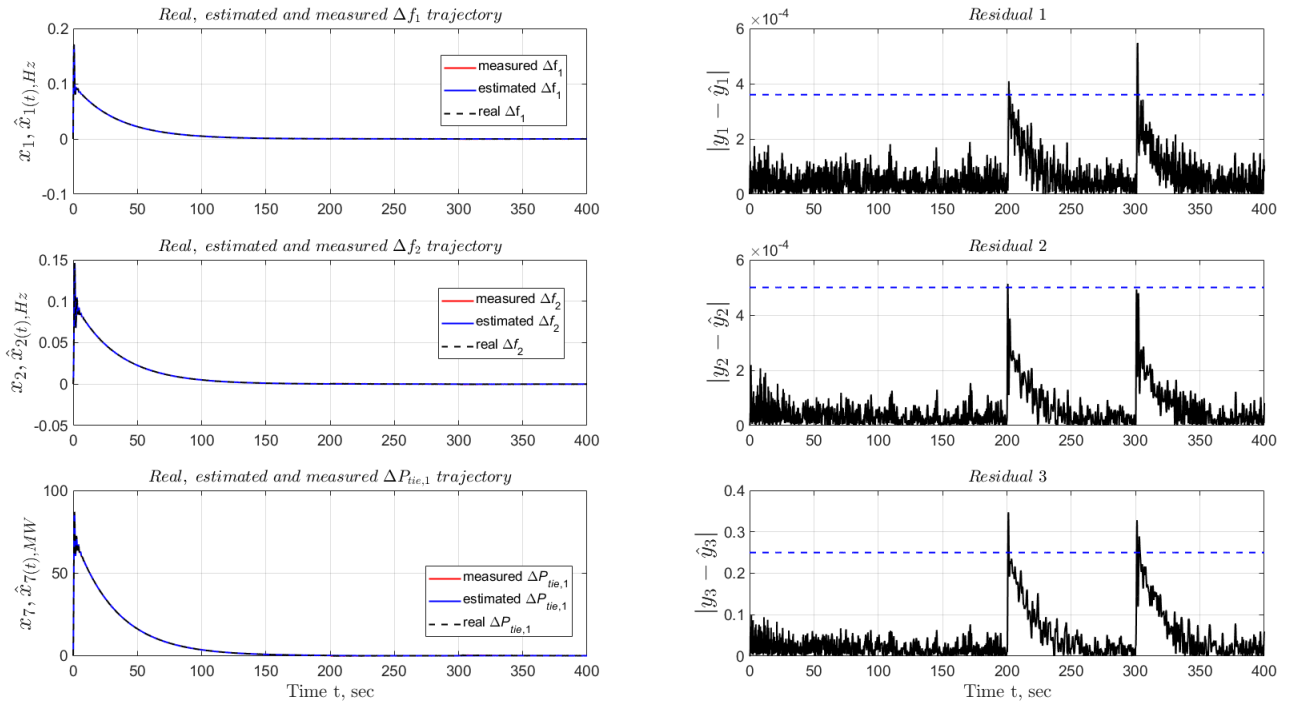
Σχήμα 4.10: Μεγεθυμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 1^{ου} ενεργοποιητή



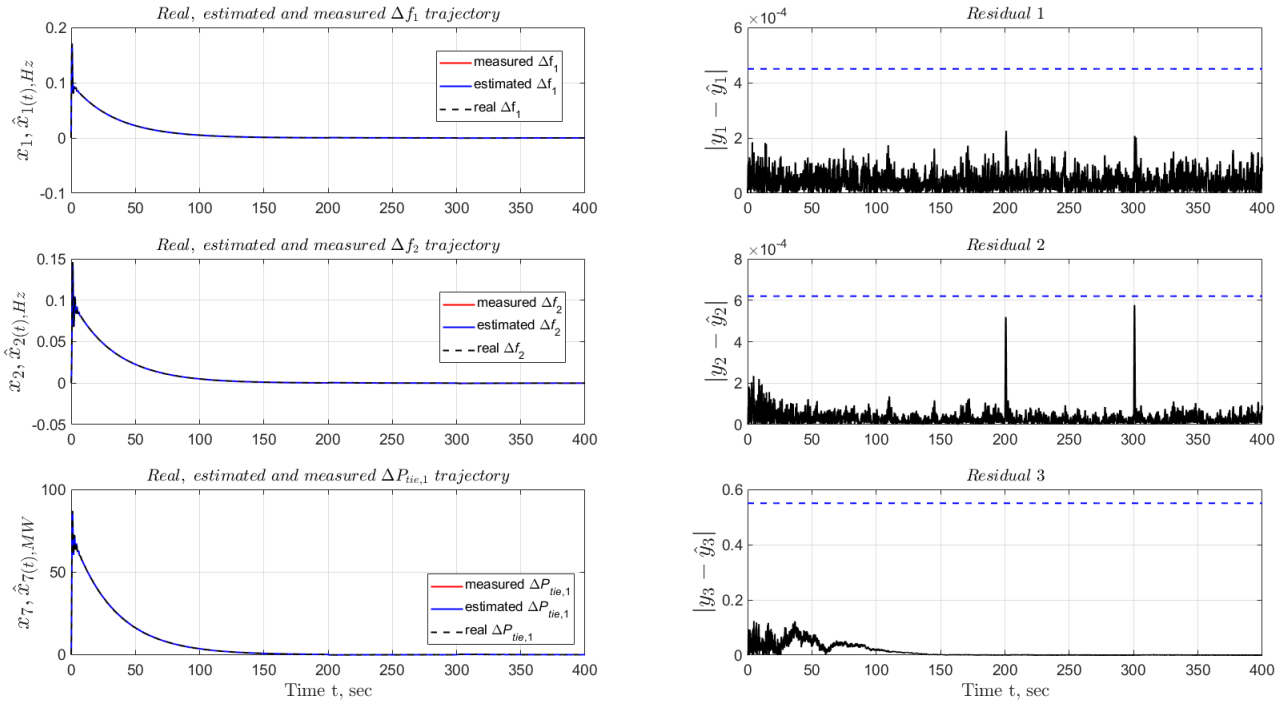
Σχήμα 4.11: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 0.35% του 1^{ου} ενεργοποιητή

Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω ισχύουν και στην περίπτωση σφάλματος στον 2^ο ενεργοποιητή. Εφαρμόζουμε στον 2^ο ενεργοποιητή απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 0.42% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής ΔP_{e2} και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec. Το σφάλμα αυτό εντοπίζεται επιτυχώς από όλα τα υπόλοιπα όταν αυτά παράγονται από τρεις διαφορετικούς παρατηρητές.

Αντιθέτως, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4.13 δεν εντοπίζεται καθόλου αν χρησιμοποιούμε μόνο έναν παρατηρητή. Παρατηρούμε ότι το υπόλοιπο r_2 παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία από ότι το r_1 . Υπενθυμίζουμε ότι στην περίπτωση σφάλματος του 1^{ου} ενεργοποιητή ίσχυε το αντίστροφο, δηλαδή το υπόλοιπο r_1 παρουσίαζε μεγαλύτερη ευαισθησία από ότι το r_2 . Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε αυτήν την παρατήρηση μαζί με το γεγονός ότι επηρεάζονται όλα τα υπόλοιπα όταν αυτά παράγονται από διαφορετικούς παρατηρητές, ώστε να συμπεράνουμε ποιος ενεργοποιητής παρουσιάζει το σφάλμα.



Σχήμα 4.12: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμημένων τιμών και υπολοίπων για τυχαία βηματική μεταβολή και σφάλμα στον δεύτερο αισθητήρα



Σχήμα 4.13: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμημένων τιμών και υπολοίπων για τυχαία βηματική μεταβολή και σφάλμα στον δεύτερο αισθητήρα

4.3.5 Ελάχιστες τιμές απομόνωσης σφαλμάτων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι ελάχιστες τιμές απομόνωσης κάθε σφάλματος και ο χρόνος που παρήλθε από την έναρξη του κάθε σφάλματος ως τον εντοπισμό του.

Όπως βλέπουμε στον Πίνακα 11, οι ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων ενεργοποιητών είναι μικρότερη στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται τρεις παρατηρητές για την παραγωγή των υπολοίπων.

Πίνακας 10: Ελάχιστες τιμές απομόνωσης σφαλμάτων

	Ελάχιστη τιμή απομόνωσης	Χρόνος Εντοπισμού
Σφάλμα 1 ^{ov} Αισθητήρα	0.15%	0.9
Σφάλμα 2 ^{ov} Αισθητήρα	0.24%	0.0
Σφάλμα 3 ^{ov} Αισθητήρα	0.14%	0.5

Πίνακας 11: Ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων ενεργοποιητών

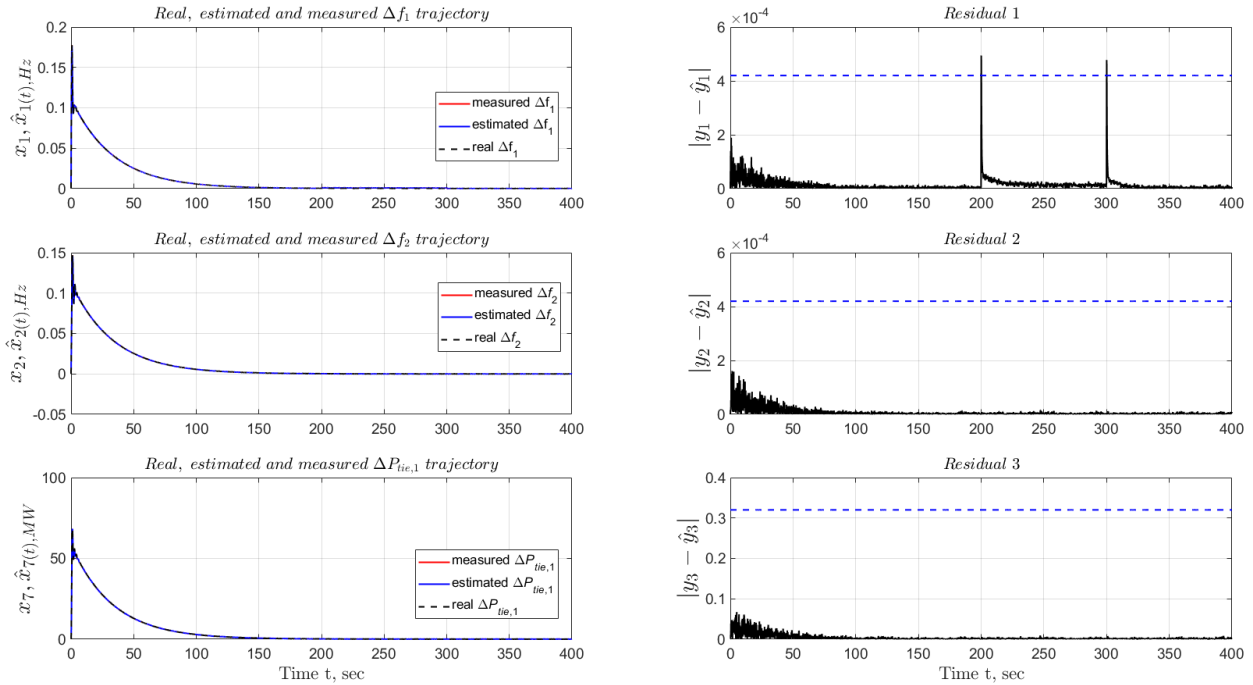
	Ελαχιστη τιμή εντοπισμού -τρεις παρατηρητές	Ελαχιστη τιμή εντοπισμού -έναν παρατηρητή
Σφάλμα 1 ^{ov} Ενεργοποιητή	0.27%	0.32%
Σφάλμα 2 ^{ov} Ενεργοποιητή	0.36%	0.47%

4.4 Απομόνωση Σφαλμάτων με Χρήση Ταχύτερου Παρατηρητή

Όπως και στο Κεφάλαιο 3.6, θα επαναλάβουμε την διαδικασία απομόνωσης σφαλμάτων για διαφορετικές τιμές ιδιοτιμών των παρατηρητών. Το πραγματικό μέρος των ιδιοτιμών των παρατηρητών θα είναι διπλάσιο σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιοτιμές του πραγματικού συστήματος.

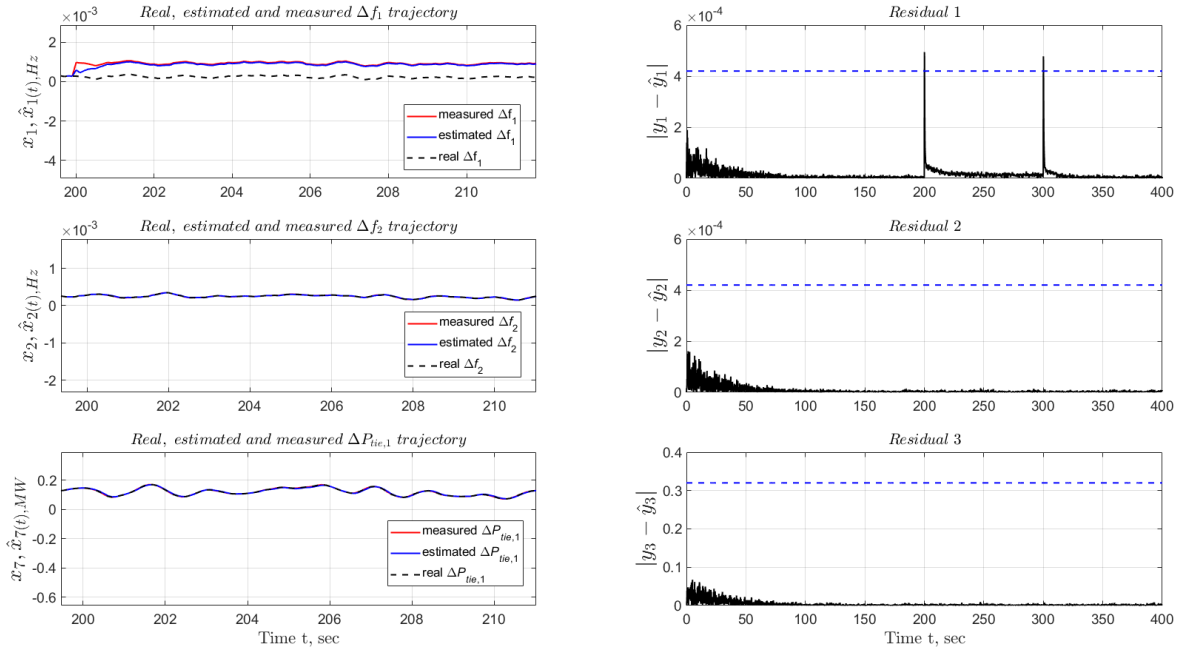
4.4.1 Σφάλμα 1^{ov} αισθητήρα

Εφαρμόζουμε στον 1^ο αισθητήρα απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 0.25% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής Δf_1 και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec. Το σφάλμα εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_1 , όπως αυτό θα ήταν επιθυμητό, τη χρονική στιγμή $t = 200$ sec.

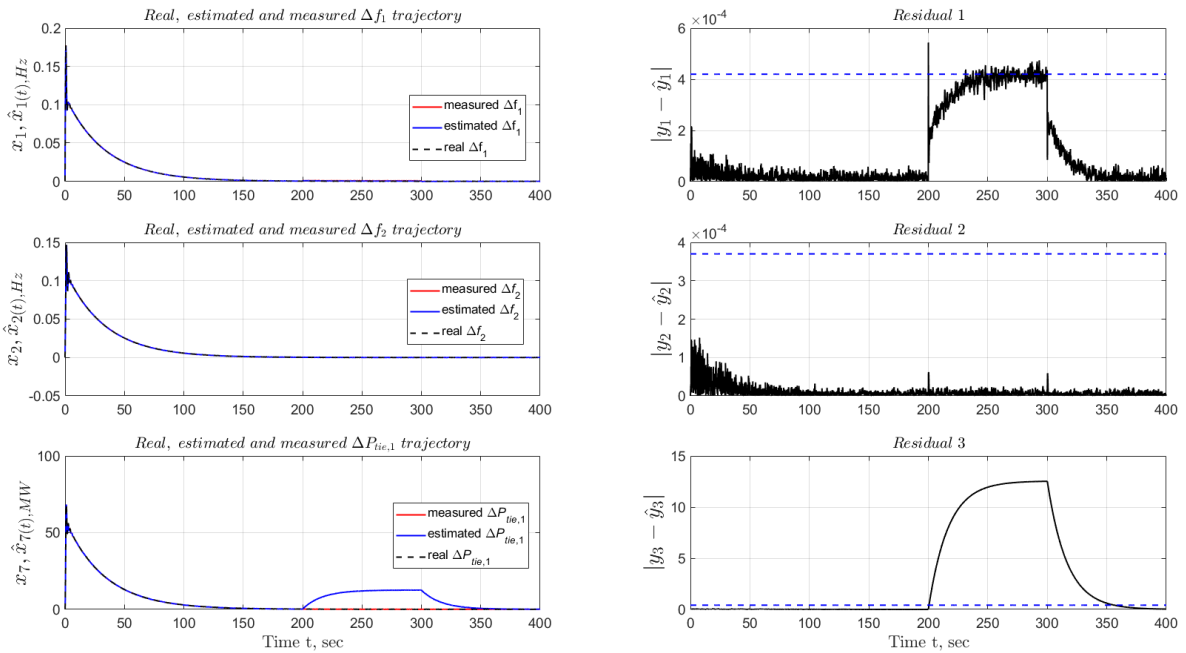


Σχήμα 4.14: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 1^{ov} αισθητήρα για ταχύτερο παρατηρητή

Σε αυτή την περίπτωση ισχύουν όσα εξετάσαμε και στο κεφάλαιο 4.3.1. Δεν υπάρχει κάποια μεταβολή στις μετρούμενες ή στις εκτιμώμενες τιμές των μεταβλητών Δf_2 και $\Delta P_{tie,1}$ με αποτέλεσμα να μην επηρεάζονται τα αντίστοιχα υπόλοιπα. Για το ίδιο σφάλμα, στο Σχήμα 4.16, βλέπουμε τα υπόλοιπα που παράγονται σε περίπτωση που είχαμε μόνο έναν παρατηρητή. Το σφάλμα εντοπίζεται από δύο διαφορετικά υπόλοιπα και επηρεάζονται και τα τρία. Επίσης βλέπουμε ξανά ότι η ελάχιστη τιμή ανίχνευσης ενός σφάλματος είναι πολύ μικρότερη όταν έχουμε έναν μόνο παρατηρητή.



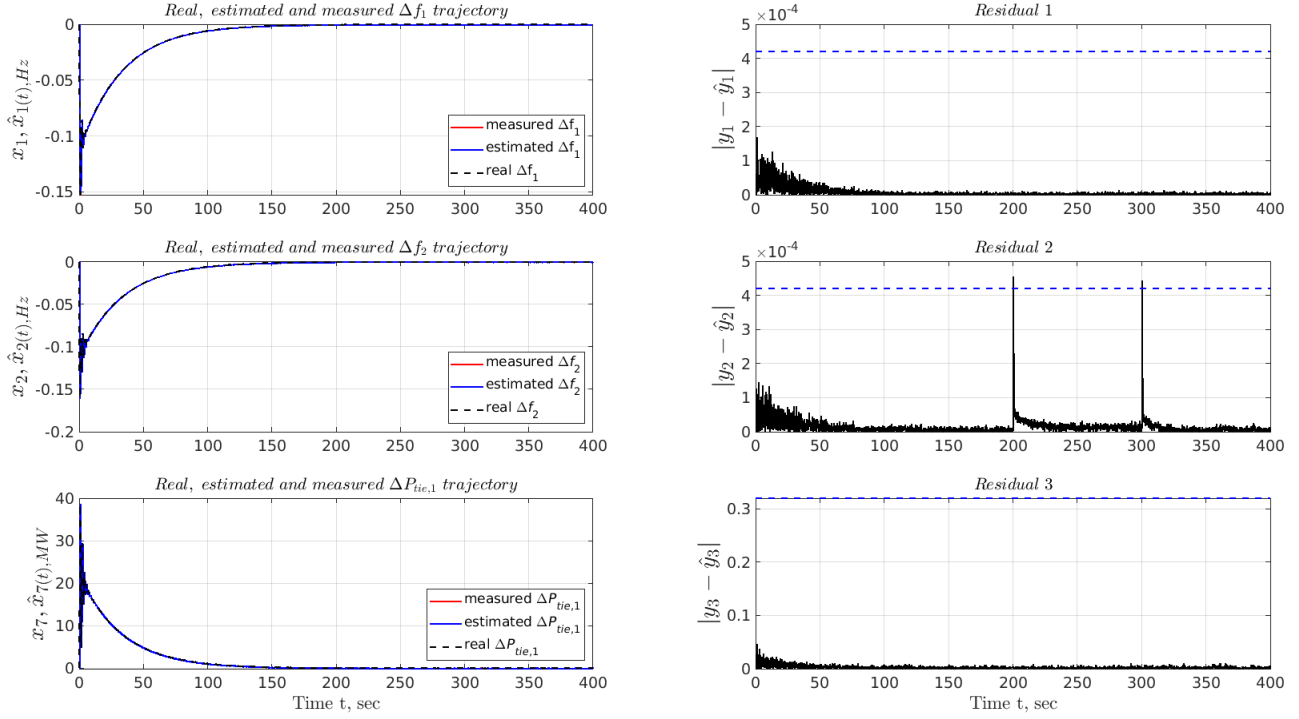
Σχήμα 4.15: Μεγεθυμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 1^{ου} αισθητήρα για ταχύτερο παρατηρητή



Σχήμα 4.16: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 0.25% του 1^{ου} αισθητήρα για ταχύτερο παρατηρητή

4.4.2 Σφάλμα 2^{ου} αισθητήρα

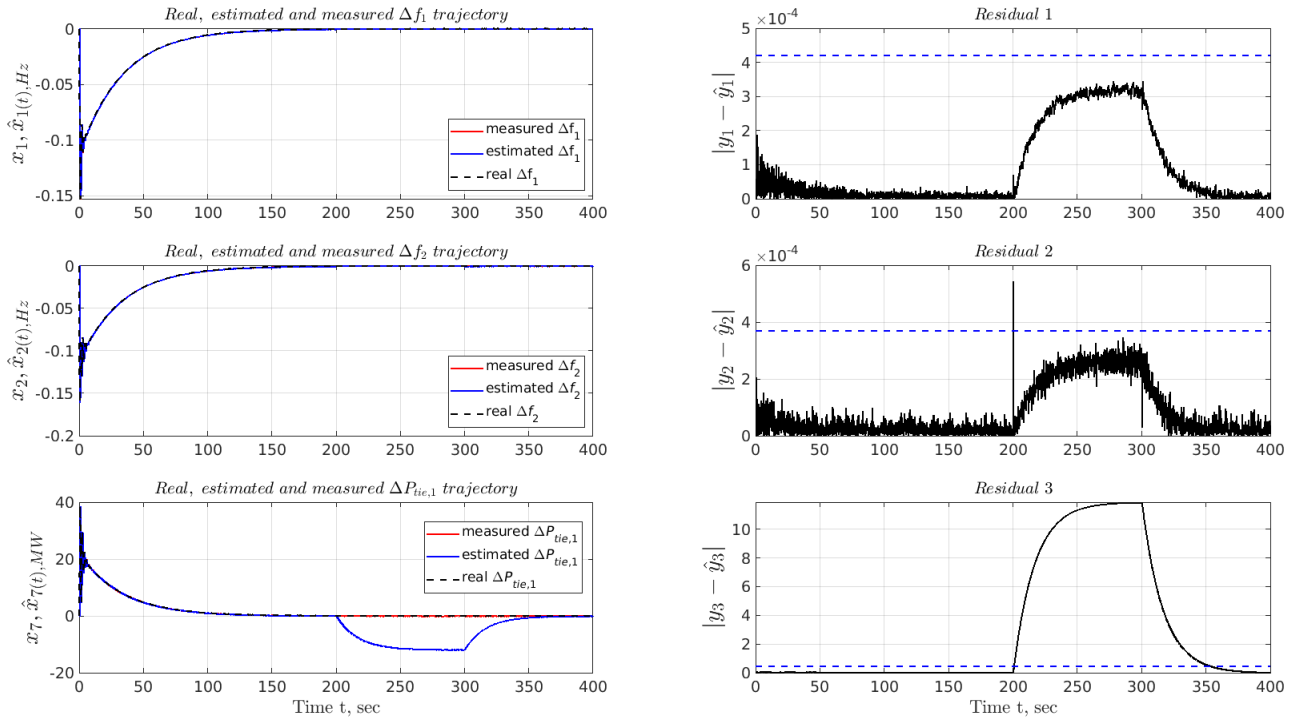
Εφαρμόζουμε στον 2^ο αισθητήρα απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 0.28% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής Δf_2 και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec.



Σχήμα 4.17: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 2^{ου} αισθητήρα για ταχύτερο παρατηρητή

Το σφάλμα του 2^{ου} αισθητήρα εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_2 τη χρονική στιγμή $t = 200.1$ sec.

Ισχύουν όσα είδαμε και στην περίπτωση της απομόνωσης του σφάλματος του 1^{ου} αισθητήρα. Τα υπόλοιπα r_1 και r_3 δεν επηρεάζονται καθόλου από το σφάλμα.



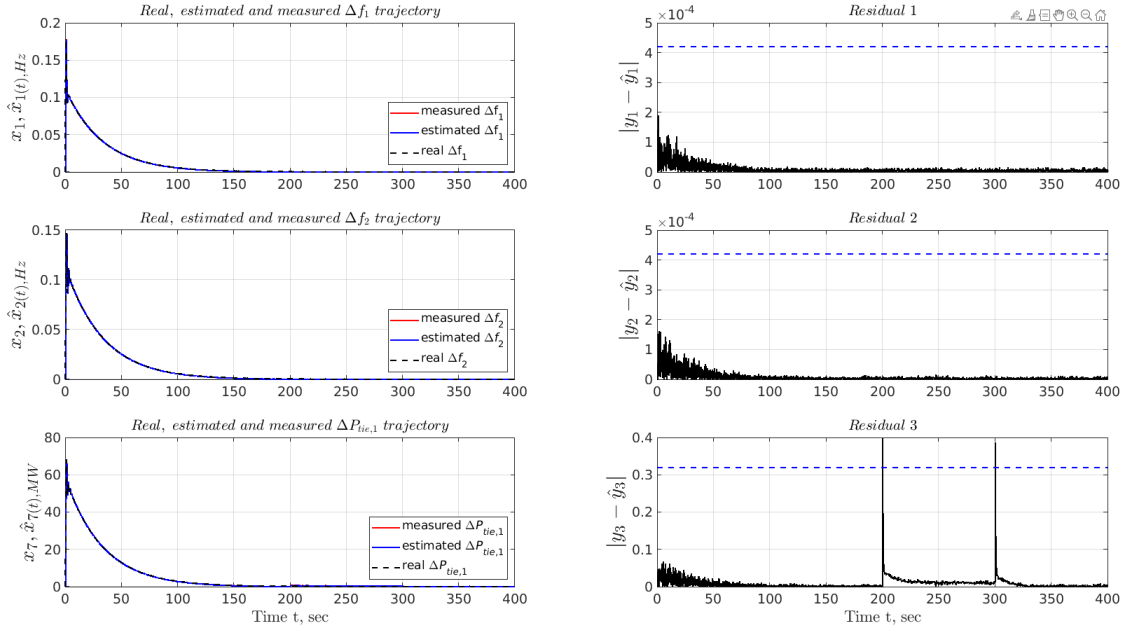
Σχήμα 4.18: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 0.28% του 2^{ου} αισθητήρα για ταχύτερο παρατηρητή

4.4.3 Σφάλμα 3^{ου} αισθητήρα

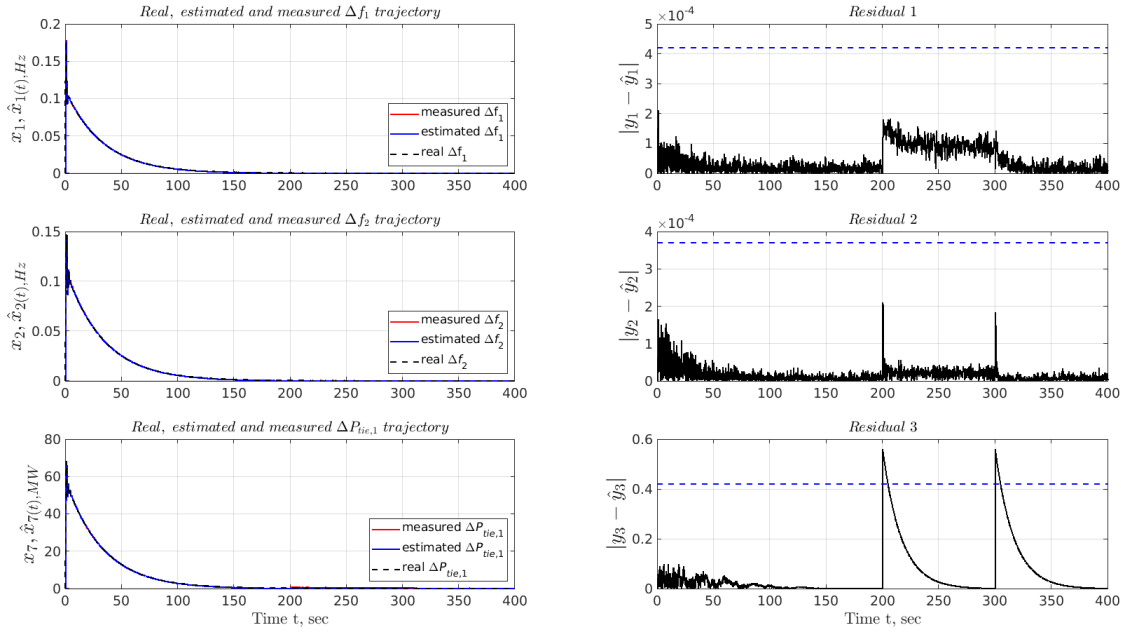
Εφαρμόζουμε στον 3^ο αισθητήρα απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 0.28% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής $\Delta P_{tie,1}$ και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200 \text{ sec}$.

Το σφάλμα του 3^{ου} αισθητήρα εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_3 τη χρονική στιγμή $t = 200.1 \text{ sec}$.

Εδώ η τιμή εντοπισμού φαίνεται να είναι συγκρίσιμη.



Σχήμα 4.19: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 3^{ου} αισθητήρα για ταχύτερο παρατηρητή

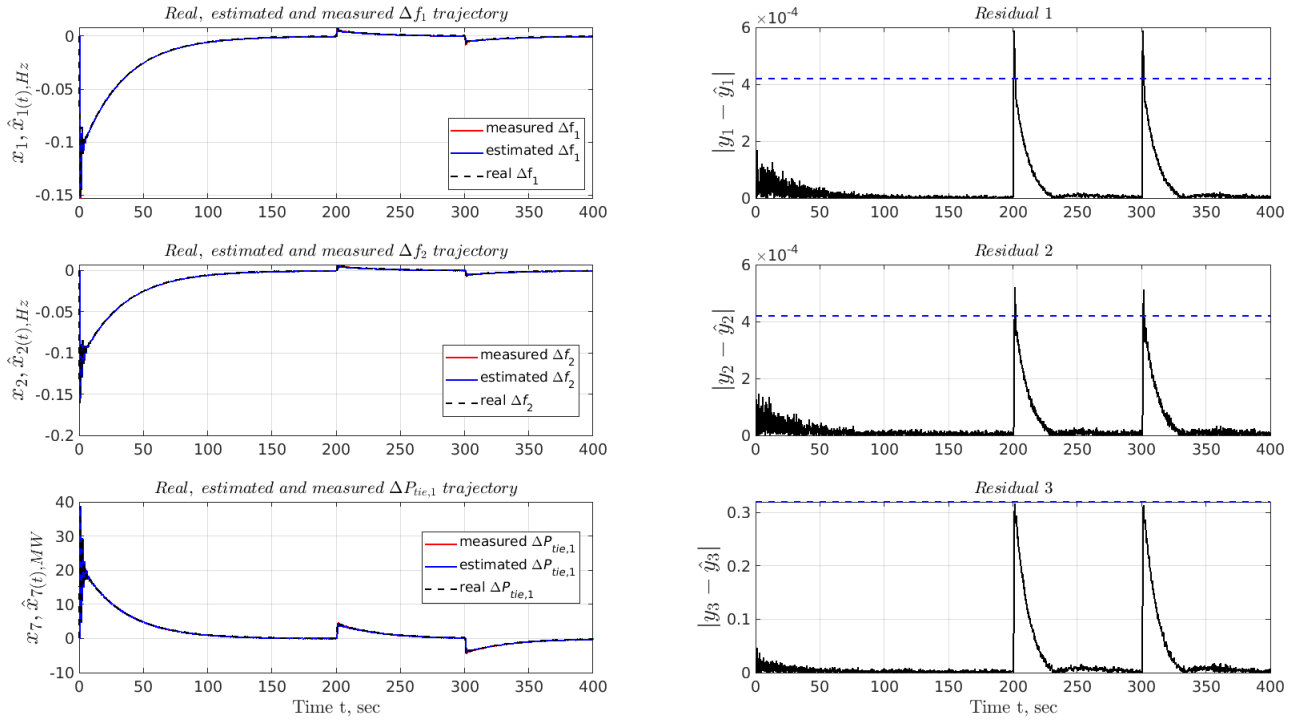


Σχήμα 4.20: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 0.28% του 3^{ου} αισθητήρα για ταχύτερο παρατηρητή

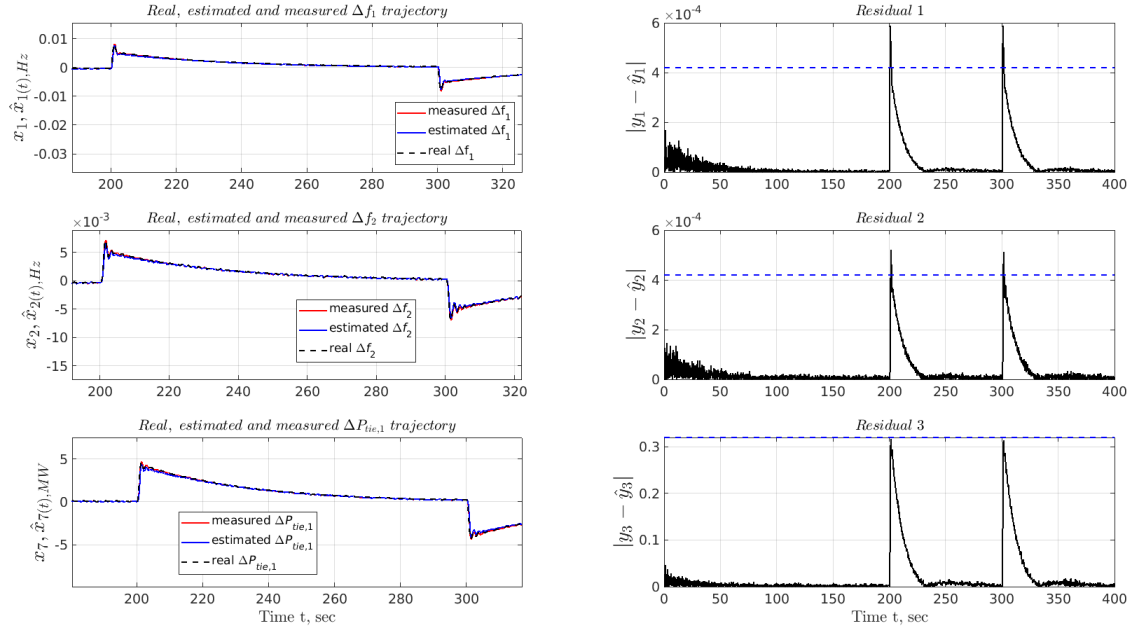
4.4.4 Σφάλματα Ενεργοποιητών

Εφαρμόζουμε στον 1^ο ενεργοποιητή απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 5% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής ΔP_{e1} και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec. Το σφάλμα αυτό εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπα r_1 και r_2 τη χρονική στιγμή $t = 200.4$ sec. Όπως παρατηρούμε από τα Σχήματα 4.21 και 4.22, το σφάλμα στον 1^ο ενεργοποιητή επηρεάζει τις μετρήσεις και στις τρεις μεταβλητές συνεπώς και τα υπόλοιπα.

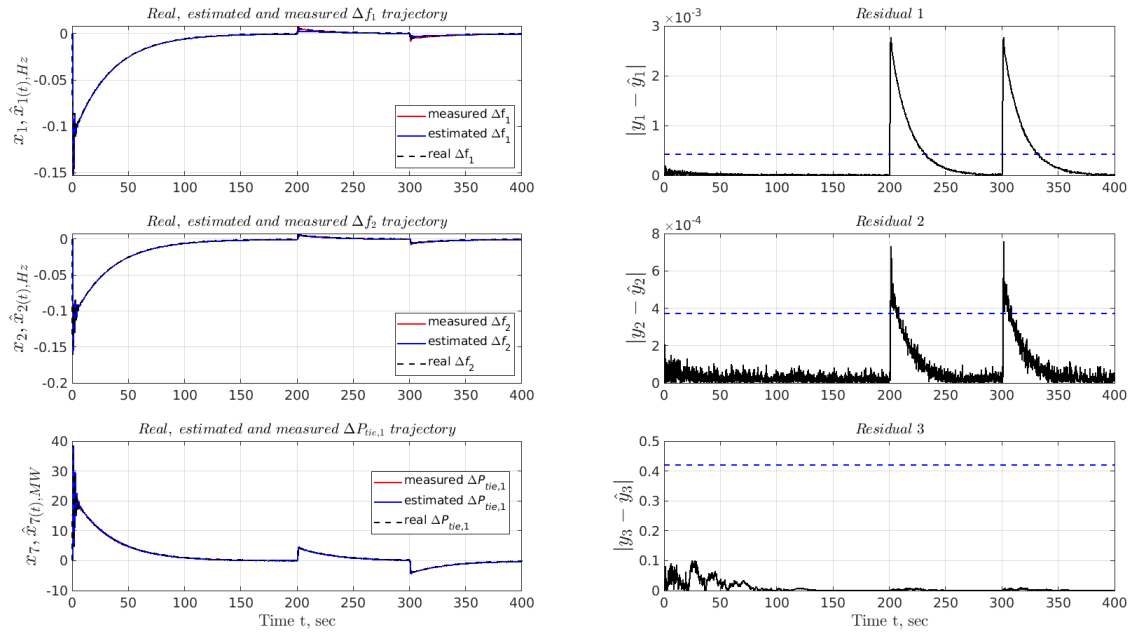
Στο Σχήμα 4.23 βλέπουμε την συμπεριφορά των υπολοίπων όταν αυτά παράγονται από έναν μόνο παρατηρητή. Παρατηρούμε πως το υπόλοιπο r_1 παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία από το r_2 ενώ το r_3 δεν επηρεάζεται καθόλου.



Σχήμα 4.21: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 1^{ου} ενεργοποιητή για ταχύτερο παρατηρητή

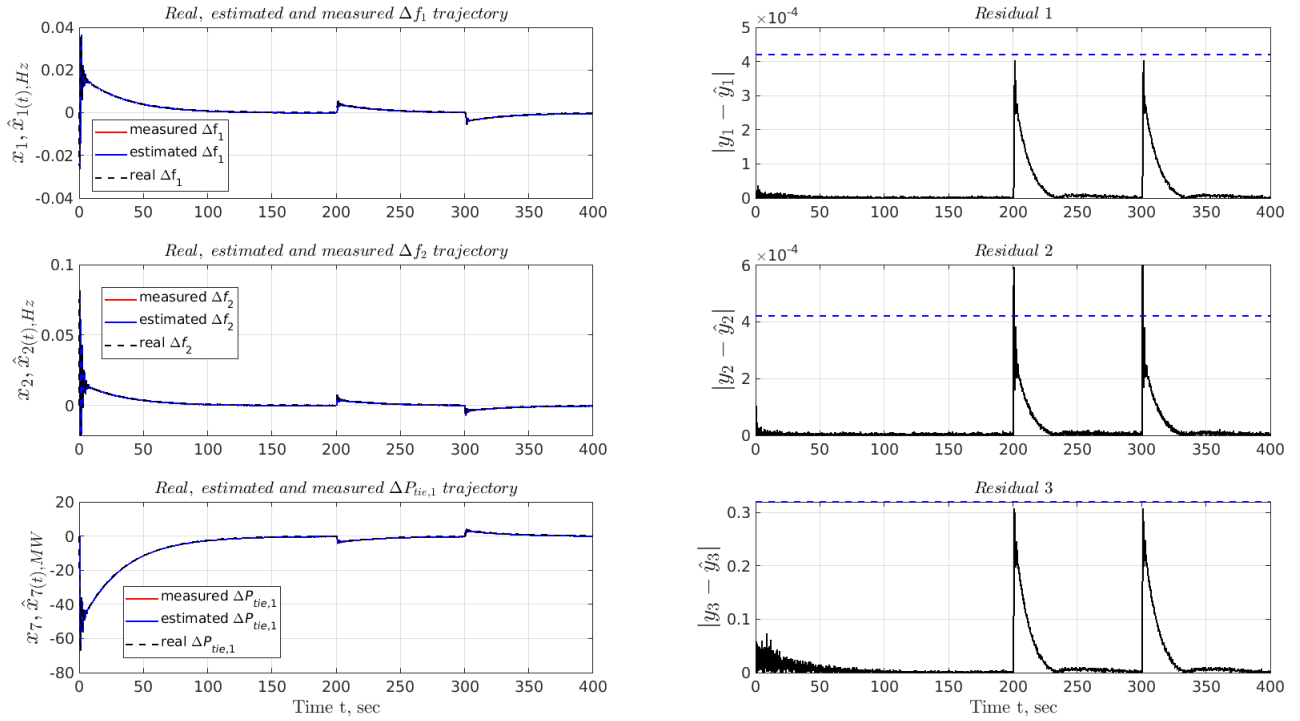


Σχήμα 4.22: Μεγεθυμμένη απεικόνιση μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 1^{ου} ενεργοποιητή για ταχύτερο παρατηρητή

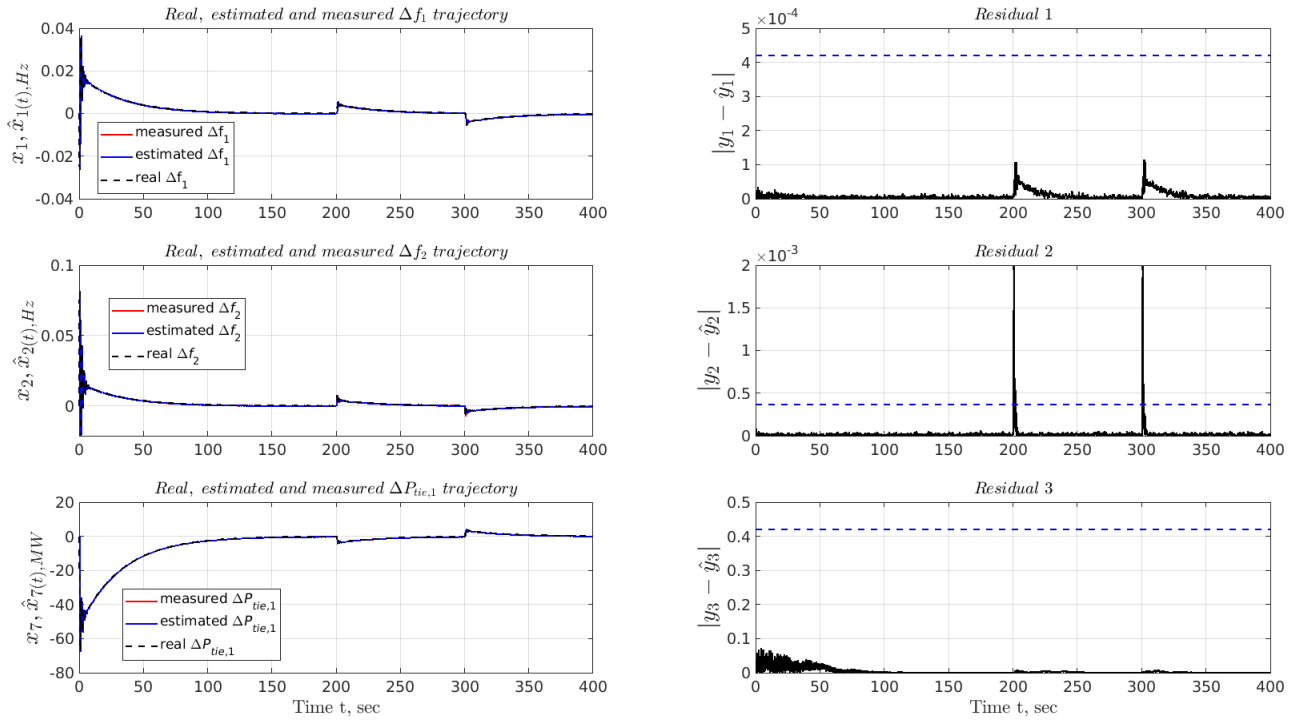


Σχήμα 4.23: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 5% του 1^{ου} ενεργοποιητή για ταχύτερο παρατηρητή

Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω ισχύουν και στην περίπτωση σφάλματος στον 2^ο ενεργοποιητή. Εφαρμόζουμε στον 2^ο ενεργοποιητή απότομο προσθετικό σφάλμα μεγέθους ίσου με το 5% της μέγιστης τιμής της μεταβλητής ΔP_{c2} και διάρκειας 100 sec το οποίο ξεκινάει την χρονική στιγμή $t = 200$ sec. Το σφάλμα αυτό εντοπίζεται επιτυχώς από το υπόλοιπο r_2 τόσο στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε τρεις παρατηρητές, όσο και στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε έναν.



Σχήμα 4.24: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια απομόνωσης σφάλματος του 2^{ου} ενεργοποιητή για ταχύτερο παρατηρητή



Σχήμα 4.25: Απεικόνιση πραγματικών, μετρούμενων, εκτιμώμενων τιμών και υπολοίπων κατά την διάρκεια ανίχνευσης σφάλματος μεγέθους 5% του 1^{ου} ενεργοποιητή για ταχύτερο παρατηρητή

4.4.5 Ελάχιστες τιμές απομόνωσης σφαλμάτων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι ελάχιστες τιμές απομόνωσης κάθε σφάλματος και ο χρόνος που παρήλθε από την έναρξη του κάθε σφάλματος ως τον εντοπισμό του.

Πίνακας 12: Ελάχιστες τιμές απομόνωσης σφαλμάτων

	Ελάχιστη τιμή απομόνωσης	Χρόνος Εντοπισμού
Σφάλμα 1 ^{ου} Αισθητήρα	0.22%	0.1
Σφάλμα 2 ^{ου} Αισθητήρα	0.26%	0.1
Σφάλμα 3 ^{ου} Αισθητήρα	0.23%	0.1

Όπως βλέπουμε στον Πίνακα 13, έχουμε αύξηση των ελάχιστων τιμών εντοπισμού σφαλμάτων ενεργοποιητών κατά 370% και κατά 242% για τον 1ο και τον 2ο ενεργοποιητή αντίστοιχα όταν χρησιμοποιούμε τρεις παρατηρητές αντί ενός.

Πίνακας 13: Ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων ενεργοποιητών

	Ελαχιστη τιμή εντοπισμού -τρεις παρατηρητές	Ελαχιστη τιμή εντοπισμού -έναν παρατηρητή
Σφάλμα 1 ^{ου} Ενεργοποιητή	3.7%	0.786%
Σφάλμα 2 ^{ου} Ενεργοποιητή	3.6%	1.05%

4.5 Συμπεράσματα και συγκριτικά αποτελέσματα

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα για την απομόνωση των σφαλμάτων με την χρήση παρατηρητών με διαφορετικές ιδιοτιμές που αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.

Πίνακας 14: Ελάχιστες τιμές απομόνωσης σφαλμάτων

	Ελάχιστη τιμή απομόνωσης	Ελάχιστη τιμή απομόνωσης για ταχύτερους παρατηρητές	Αύξηση ελάχιστης τιμής εντοπισμού
Σφάλμα 1 ^{ου} Αισθητήρα	0.15%	0.22%	46.6%
Σφάλμα 2 ^{ου} Αισθητήρα	0.24%	0.26%	8, 3%
Σφάλμα 3 ^{ου} Αισθητήρα	0.14%	0.23%	9%

Η χρήση ταχύτερων παρατηρητών επέφερε αύξηση της ελάχιστης τιμής εντοπισμού για όλα τα σφάλματα. Για τον 1^ο αισθητήρα αυτή ήταν της τάξεως του 45%, ενώ για τον 2^ο και τον 3^ο αισθητήρα η αύξηση αυτή είναι της τάξεως του 9%.

Πίνακας 15: Χρόνοι απομόνωσης σφαλμάτων για τα ελάχιστα σφάλματα

	Χρόνος απομόνωσης	Χρόνος απομόνωσης για ταχύτερους παρατηρητές
Σφάλμα 1 ^{ου} Αισθητήρα	0.9	0.1
Σφάλμα 2 ^{ου} Αισθητήρα	0	0.1
Σφάλμα 3 ^{ου} Αισθητήρα	0.5	0.1

Η απομόνωση των σφαλμάτων είναι ταχύτερη για τους παρατηρητές με τις μεγαλύτερες κατά απόλυτη τιμή ιδιοτιμές. Ο χρόνος εντοπισμού ενός σφάλματος είναι ανάλογος του μεγέθους του επομένως το αποτέλεσμα είναι το αναμενόμενο.

Πίνακας 16: Ελάχιστες τιμές εντοπισμού σφαλμάτων ενεργοποιητών

	Ελαχιστη τιμή εντοπισμού -τρεις παρατηρητές	Ελαχιστη τιμή εντοπισμού -ένας παρατηρητή
Σφάλμα 1 ^{ου} Ενεργοποιητή	0.27%	0.32%
Σφάλμα 2 ^{ου} Ενεργοποιητή	0.36%	0.47%
	Ταχύτεροι παρατηρητές	Ταχύτερος παρατηρητής
Σφάλμα 1 ^{ου} Ενεργοποιητή	3.7%	0.786%
Σφάλμα 2 ^{ου} Ενεργοποιητή	3.6%	1.05%

Στην περίπτωση των σφαλμάτων στους ενεργοποιητές αυτό που παρατηρούμε είναι ότι ενώ στην πρώτη περίπτωση η ελάχιστη τιμή εντοπισμού μειώνεται όταν χρησιμοποιούμε τρεις παρατηρητές, όταν έχουμε ταχύτερους παρατηρητές αυτή αυξάνεται κατά 370% και κατά 242% για τον 1ο και τον 2ο ενεργοποιητή αντίστοιχα!

4.6 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιήθηκε η απομόνωση σφαλμάτων για το σύστημα των δύο περιοχών ελέγχου με χρήση δύο διαφορετικών συστάδων παρατηρητών. Αρχικά έγινε η μαθηματική περιγραφή ενός συστήματος στο οποίο επενεργεί προσθετικό σφάλμα σε αισθητήρα και η μέθοδος απομόνωσης του. Σχεδιάστηκαν δύο τράπεζες παρατηρητών με διαφορετικές τιμές ιδιοτιμών και αφού καταγράφηκαν οι ελάχιστες τιμές απομόνωσης σφαλμάτων, στο τέλος πραγματοποιήθηκε μια σύγκριση των αποτελεσμάτων.

5 Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική είδαμε πώς μπορούμε να εντοπίσουμε απότομα, προσθετικά σφάλματα σε ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο δύο περιοχών με την χρήση παρατηρητών κατάστασης. Συγκρίναμε δύο παρατηρητές κατάστασης με διαφορετικές ιδιοτιμές. Η χρήση ταχύτερου παρατηρητή επέφερε αύξηση της ελάχιστης τιμής εντοπισμού για όλα τα σφάλματα ιδιαίτερα στην περίπτωση των σφαλμάτων στους ενεργοποιητές.

Είδαμε επίσης πώς μπορούμε να απομονώσουμε σφάλματα στους αισθητήρες με την χρήση μιας τράπεζας παρατηρητών. Συγκρίναμε δύο συστοιχίες παρατηρητών κατάστασης με διαφορετικές ιδιοτιμές. Όπως και στην περίπτωση του εντοπισμού σφαλμάτων, η χρήση ταχύτερων παρατηρητών επέφερε αύξηση της ελάχιστης τιμής εντοπισμού για όλα τα σφάλματα.

Υπάρχουν πολλοί τομείς της διπλωματικής αυτής που προσφέρονται για παραπάνω έρευνα. Στη συνέχεια αναφερόμαστε σε αυτούς:

Εξέταση του μη γραμμικού μοντέλου του διασυνδεδεμένου δικτύου δύο περιοχών. Εξετάσαμε μόνο το γραμμικοποιημένο μοντέλο επομένως μπορεί να γίνει επέκταση στην μελέτη του μη γραμμικού μοντέλου.

Εξέταση του προβλήματος του συνδυασμού ανίχνευσης/διάγνωσης σφάλματος με σύστημα ελέγχου επαναδιαμόρφωσης. Ένας επαναδιαμορφώσιμος ελεγκτής ορίζεται ως το σύστημα ελέγχου που είναι σε θέση να επαναδιαμορφώσει την δομή και/ή τις παραμέτρους του σε πραγματικό χρόνο όταν υπάρχει παρουσία αστοχιών στο σύστημα έτσι ώστε να επιτυγχάνονται οι ακόλουθοι στόχοι: να διατηρηθεί η σταθερότητα του συνολικού συστήματος παρουσία σφαλμάτων και το σύστημα να ανακτήσει την αρχική απόδοση όσο το δυνατόν περισσότερο μέσω της επαναδιαμόρφωσης του ελεγκτή. Ένα από τα βασικά ζητήματα στον έλεγχο αυτό είναι ο τρόπος σχεδιασμού του συστήματος ανίχνευσης/διάγνωσης σφαλμάτων έτσι ώστε το αντίστοιχο σύστημα ελέγχου να μπορεί να επαναδιαμορφωθεί εύκολα.

Προσπάθεια εντοπισμού άλλων ειδών σφαλμάτων. Εξετάσαμε προσθετικά απότομα και προσωρινά σφάλματα. Μπορούν να εξεταστούν ακόμα προσθετικά, απότομα και μόνιμα, αρχόμενα και διαλείποντα όπως παρουσιάστηκαν στην εισαγωγή της διπλωματικής.

Τέλος ανίχνευση και απομόνωση σφαλμάτων όταν έχουμε άγνωστες διαταραχές στο σύστημα. Στην παρούσα διπλωματική θεωρήθηκαν γνωστές οι βηματικές μεταβολές φορτίου που ζητάει κάθε περιοχή.

Βιβλιογραφία

- [1] Robert Clark Ron Patton, Paul Frank. Fault diagnosis in dynamic systems. Theory and application. Prentice hall international series in systems ana control engineering series editor:M.J.Grimble, 1989.
- [2] Supervision IFAC Technical Committee on Fault Detection and TC 6.4-Terminology. [Online]. Available: Safety for Technical Processes. <http://tc.ifac-control.org/6/4/terminology/terminology-in-the-area-of-fault-management>. Brighton,England, December 1991.
- [3] V.Reppa. Fault detection and diagnosis: Application in microelectromechanical systems. Doctoral Dissertation,Electrical and Computer Engineering Department, University of Patras, Greece, 2010.
- [4] R.Isermann. Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance. Springer verlag, 2006.
- [5] J.Gertler. Fault detection and diagnosis in engineering systems. Marcel Dekker, New York, 1998.
- [6] M. Basseville and I. Nikiforov. Detection of abrupt changes: Theory and application. Prentice Hall Inc, 1993.
- [7] C. Jiang and D. Zhou. Fault detection and identification for uncertain linear time-delay systems. Computers and Chemical Engineering, vol. 30, no. 2, pp. 228-242, 2004.
- [8] C. Furse P. Smith and J. Gunther. Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location. IEEE Sensors Journal, vol. 5, no. 6, pp. 1469-1478, 2005.
- [9] C.P.Tan S. Saha, M. Aldeen. Fault detection in transmission networks of power systems. Scince Direct Electrical Power and Energy Systems 33.
- [10] Fikret Caliskan and Istemihan Genc. A robust fault detection and isolation method in load frequency control loops. IEEE Transactions on power systems, Volume 23, no4, pp 1756–1767.
- [11] Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος Βοβός Α. Νικόλαος. Έλεγχος και ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Εκδόσεις Ζήτη, 2013.
- [12] K. Margellos J. Lygeros P. M. Esfahani, M. Vrakopoulou and G. Andersson. "cyber attack in a two-area power system: Impact identification using reachability". American Control Conference, Baltimore, pages pp 962–967, 2010.
- [13] M. Liaquat Q. Fazal and N. Naz. Robust fault tolerant control of a dc motor in the presence of actuator faults. 16th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control STA'2015-PID3821-DFC and computer engineering - STA'2015, Monastir, Tunisia, , December 21-23, 2015.
- [14] David G. Luenberger. An introduction to observers. IEEE Transactions on automatic control, VOL. ac-16, NO.6, December 1971.

- [15] David G. Luenberger. Observing the state of a linear system. IEEE Transactions on Military Electronicsl, pp. 74-80, 1964.
- [16] R.H. Bishop R.C. Dorf. Σύγχρονα Συστήματα Ελέγχου. Εκδόσεις Τζιόλα, 2009.
- [17] Kalman R. E. On the general theory of control systems. Proc. 1st Int. Cong. of IFAC, Moscow 1960 1481, Butterworth, London 1961.
- [18] Kalman R. E. Mathematical description of linear dynamical systems. SIAM J. Contr. 1963 1 152.
- [19] J.Chen R.J. Patton. Robust fault detection using eigenstructure assignment: a tutorial consideration and some new results. Proceedings of the 30th Conference on Decision and Control. Brighton,England, December 1991.
- [20] R. Clark. A simplified instrument detection scheme. IEEE Trans. Aerospace Electron. Systems, 14(3):558-563.
- [21] Fikret Caliskan and Istemihan Genc. A robust fault detection and isolation method in load frequency control loops. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 23.

Α' Κώδικας Προσομοίωσης

Χωρίς Έλεγχο

```
%%  
clear all  
clc  
  
set(0, 'defaultlinelength', 1.5)  
  
%% orismos parametrwn systhmatos  
  
[ SysC ] = Orismos_systhmatos;  
  
%% unconstrained no control  
  
%arxikes times  
x0=[0;0;0;0;0;0;0;0];  
%eisodos – no control ?Pc=0  
u=[0;0];  
%diataraxes  
w=[200;0];  
  
%prosomoiwsh tou systhmatos  
[t,y]=ode45(@no_control,[0 20],x0,[],SysC,[u],[w]);  
  
%apeikonish twn katastasewn x_1 kai x_2  
figure(1)  
hold on  
grid on  
box on  
title('$State\ variables\ \Delta f_1,\Delta f_2\ trajectories$',  
      'Interpreter','latex','FontSize',17)  
xlabel('Time t,\ sec','Interpreter','latex','FontSize',14)  
ylabel('$x_1,x_2\ (t),\ Hz$', 'Interpreter','latex','FontSize',18)  
plot(t,y(:,1),'red',t,y(:,2),'black')  
legend('\Delta f_1','\Delta f_2','Location','southeast')  
  
%apeikonish ths katastashs x_7  
figure(2)  
hold on  
grid on  
box on  
title('$State\ variable\ \Delta P_{tie,1}\ trajectory$', 'Interpreter',  
      'latex','FontSize',17)  
xlabel('Time t,\ sec','Interpreter','latex','FontSize',14)  
ylabel('$x_7\ (t),\ MW$', 'Interpreter','latex','FontSize',18)  
plot(t,y(:,7),'red')  
  
function [SysC] = Orismos_systhmatos( )  
% Orismos parametrwn tou systhmatos  
% Times perioxhs 1  
f=50;
```

```

Pr1=2000;
H1=5;
R1=1.2*10^(-3);
D1=16.66;

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

Kp1=0.06;
Tp1=24;

Ki1=0;

% Times perioxhs 2
Pr2=1500;
H2=4;
R2=1.33*10^(-3);
D2=10.5;

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

Kp2=0.095;
Tp2=22.85;
Ki2=0;

T12=175;
a12=-1;

Syn=2*pi*T12;
B1=1/R1;
B2=1/R2;

% X_dot(t)=Ax(t)+Bu(t)+Dw(t)
SysC.A=[-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];

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

```

```

SysC.C=[1 0 0 0 0 0 0;
        0 1 0 0 0 0 0;
        0 0 0 0 0 0 1];

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

function x_dot=no_control(t,x,SysC,u,w)
%sythma diaforikwn eksikswsewn tou sythmatos
x_dot=SysC.A*x+SysC.B*u+SysC.D*w;
end
```

Με Έλεγχο

```

%%
clear all
clc

set(0, 'defaultlinelength', 1.5)
%% orismos parametrwn sythmatos

[ SysC ] = Orismos_sythmatos_with_control();

%% 2 area system with control

%arxikes times
x0=[0;0;0;0;0;0;0;0;0];
%eisodos - no control
u=[0;0];
%diataraxes
w=[200;00];

%prosomoiwsh tou sythmatos
[t,y]=ode45(@with_control,[0 150],x0,[],SysC,[u],[w]);

%apeikonish tw'n katastasewn x_1 kai x_2
figure(1)
hold on
grid on
box on
title('$State\ variables\ \Delta f_1,\Delta f_2\ trajectories$', 'Interpreter','latex','FontSize', 17)
xlabel('Time t,\ sec','Interpreter','latex','FontSize', 14)
ylabel('$x_1,x_2\ (t),\ Hz$', 'Interpreter','latex','FontSize', 18)
plot(t,y(:,1),'red',t,y(:,2),'black')
legend('\Delta f_1','\Delta f_2','Location','southeast')
```

```
%apeikonish ths katastashs x_7
figure(2)
hold on
grid on
box on
title('$State\ variable\ \Delta P_{tie,1}\ trajectory$', 'Interpreter', '
    latex', 'FontSize', 17)
xlabel('Time-t,\ sec', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)
ylabel('$x_7(t),\ MW$', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 18)
plot(t,y(:,7), 'red')

function [SysC] = Orismos_systhmatos_with_control()
% Orismos parametrwn tou systhmatos
% Times perioxhs 1
f=50;
Pr1=2000;
H1=5;
R1=1.2*10^(-3);
D1=16.66;

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

Kp1=0.06;
Tp1=24;

Ki1=0;

% Times perioxhs 2
Pr2=1500;
H2=4;
R2=1.33*10^(-3);
D2=10.5;

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

Kp2=0.095;
Tp2=22.85;
Ki2=0;

T12=175;
a12=-1;

Syn=2*pi*T12;
B1=1/R1;
B2=1/R2;

%Parametroi elegkth
```

```

KP1=-0.1;
KP2=-0.1;
KI1=-0.033;
KI2=-0.033;

```

```
% X_dot(t)=Ax(t)+Bu(t)+Dw(t)
```

```

SysC.A=[-1/Tp1 0 0 0 Kp1/Tp1 0 -Kp1/Tp1 0 0;
0 -1/Tp2 0 0 0 Kp2/Tp2 -a12*Kp2/Tp2 0 0;
-Kg1/(R1*Tg1) 0 -1/Tg1 0 0 0 (Kg1/Tg1)*KP1 Kg1/Tg1 0;
0 -Kg2/(R2*Tg2) 0 -1/Tg2 0 0 (Kg2/Tg2)*KP2 0 Kg2/Tg2;
0 0 1/Tt1 0 -1/Tt1 0 0 0 0;
0 0 0 1/Tt2 0 -1/Tt2 0 0 0;
2*pi*T12 -2*pi*T12 0 0 0 0 0 0 0;
2*pi*T12*KP1-KP1*B1/Tp1+KI1*B1 -2*pi*T12*KP1 0 0 KP1*B1*Kp1/
Tp1 0 -KP1*B1*Kp1/Tp1+KI1 0 0;
-2*pi*T12*KP2 2*pi*T12*KP2-KP2*B2/Tp2+KI2*B2 0 0 0 KP2*B2*Kp2/
Tp2 a12*(-KP2*B2*Kp2/Tp2+KI2) 0 0];

```

```

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

```

```

SysC.C=[1 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 1 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 1 0 0];

```

```

SysC.D=[-Kp1/Tp1 0;
0 -Kp2/Tp2;
0 0;
0 0;
0 0;
0 0;
0 0;
-KP1*B1*Kp1/Tp1 0;
0 -KP2*B2*Kp2/Tp2];

```

```

function x_dot=with_control(t,x, SysC,u,w)
%systhma diaforikwn eksikswsewn tou systhmatos
x_dot=SysC.A*x+SysC.B*u+SysC.D*w;
end

```

Με Παρατηρητή Χωρίς Θόρυβο

```

%%
clear all
clc

```

```
set(0, 'defaultlinewidth', 1.5)
%% orismos parametrwn systhmatos

[ SysC ] = Orismos_systhmatos_with_control();

%% check observability

O=obsv(SysC.A, SysC.C);
if (length(SysC.A)==rank(O))
    display('The system is observable')
end

%% orismos parathrhth

[ A_obs, L ] = Orismos_observer(SysC);

%% control and observer

%arxikes times
x0=[0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0];
%eisodos
u=[0;0];
%diataraxes
w=[200;0];

[t,y]=ode45(@control_and_observer,[0 150],x0,[], SysC,[u],[w],[A_obs],[L
]);

%apeikonish ths katastashs x_1 kai ths antistoixhs ektimwmenhs
figure(1)
hold on
grid on
box on
title('$Real\ and\ estimated\ \Delta f_1\ trajectories$', 'Interpreter',
    'latex', 'FontSize', 14)
xlabel('Time t, \ sec', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)
ylabel('$x_1, \hat{x}_1\ (t), \ Hz$', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize',
    14)
plot(t,y(:,1), 'red', t,y(:,10), 'blue')
legend('real \Delta f_1', 'estimated \Delta f_1', 'Location', 'southeast')

%apeikonish ths katastashs x_2 kai ths antistoixhs ektimwmenhs
figure(2)
hold on
grid on
box on
title('$Real\ and\ estimated\ \Delta f_2\ trajectories$', 'Interpreter',
    'latex', 'FontSize', 14)
xlabel('Time t, \ sec', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)
ylabel('$x_2, \hat{x}_2\ (t), \ Hz$', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize',
    14)
plot(t,y(:,2), 'red', t,y(:,11), 'blue')
legend('real \Delta f_2', 'estimated \Delta f_2', 'Location', 'southeast')
```

```
%apeikonish ths katastashs x_7 kai ths antistoixhs ektimwmenhs
figure(3)
hold on
grid on
box on
title('$Real\ and\ estimated\ \Delta P_{tie,1}\ trajectories$',
      'Interpreter','latex','FontSize', 14)
xlabel('Time t,\ sec','Interpreter','latex','FontSize', 14)
ylabel('$x_7,\hat{x}_7\ (t),\ MW$', 'Interpreter','latex','FontSize',
      14)
plot(t,y(:,7),'red',t,y(:,16),'blue')
legend('real \Delta P_{tie,1}', 'estimated \Delta P_{tie,1}', 'Location', '
      southeast')

function [A_obs, L] = Orismos_observer(SysC)
%evresh idiotimwn tou pinaka A
l=eig(SysC.A);
%orismos idiotimwn parathrhth ligo pio aristera apo tis idiotimes tou
%pragmatikou systhmatos
l_obs=[-14 -16 -0.7 + 3.9339i -0.7 - 3.9339i -1.3 + 2.7016i -1.3 -
      2.7016i -1.9 -0.0380 -0.04];
%evresh pinaka L vash twv parapanw idiotimwn
L=place(SysC.A',SysC.C',l_obs);
L=L';
%ypologismos tou pinaka A-LC
A_obs=(SysC.A-L*SysC.C);

function x_dot=control_and_observer(t,x,SysC,u,w,A_obs,L)
%pragmatiko dianysma katastashs
x_real=[x(1);x(2);x(3);x(4);x(5);x(6);x(7);x(8);x(9)];
%ektimwmeno dianysma katastashs
x_obs=[x(10);x(11);x(12);x(13);x(14);x(15);x(16);x(17);x(18)];

for i=1:9
    %systhma diaforikwn eksiswsewn tou systhmatos
    x_dot(i,:)=SysC.A(i,:)*x_real+SysC.B(i,:)*u+SysC.D(i,:)*w;
    %systhma diaforikwn eksiswsewn tou parathrhth lamvanontas yp'opsin
    kai
    %tis diataraxes
    x_dot(i+9,:)=A_obs(i,:)*x_obs+SysC.B(i,:)*u+L(i,:)*SysC.C*x_real+
    SysC.D(i,:)*w;
end
end
```

Με Παρατηρητή και Θόρυβο

```
%%
clear all
clc

set(0, 'defaultlinelength', 1.5)
```

```

%%
[SysC] = Orismos_systhmatos;
[A_obs, L] = Orismos_observer(SysC);
% timh diataraxhs
w=[200;0];

% xronos
t_init=0;T_s=0.1;t_fin=200;options=[];

row_num=18;
x_system=zeros(row_num,ceil((t_fin-t_init)/T_s));
x_ode_sys=zeros(row_num,1);
x_system(:,1)=x_ode_sys;
x_measured=zeros(3,ceil((t_fin-t_init)/T_s));

cnt=1;
noise=zeros(9,9);
for t=t_init:T_s:t_fin-T_s
cnt=cnt+1;
noise=(1/1000)*(-1 + (2).*rand(9,9));
noise_obs=(1/1000)*(-1 + (2).*rand(1,3));

[t_ode,x_ode_sys]=ode45(@system_ode_obs,[t t+T_s],[x_ode_sys],options,
SysC,[w],[noise],[A_obs],[L],[noise_obs]);
szx_ode=size(x_ode_sys);
x_ode_sys=x_ode_sys(szx_ode(1),:);
x_system(:,cnt)=x_ode_sys;
x_measured(1,cnt)=x_ode_sys(1)+noise_obs(1)*x_ode_sys(1);
x_measured(2,cnt)=x_ode_sys(2)+noise_obs(1)*x_ode_sys(2);
x_measured(3,cnt)=x_ode_sys(3)+noise_obs(1)*x_ode_sys(3);
end

% plot
t=[t_init:T_s:t_fin];

% apeikonish ths katastashs x_1 kai ths antistoixhs ektimwmenhs
figure(1)
hold on
grid on
box on
title('$Real\ and\ estimated\ \Delta f_1\ trajectories$', 'Interpreter',
'latex', 'FontSize', 14)
xlabel('Time t,\ sec', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)
ylabel('$x_1, \hat{x}_1\ (t),\ Hz$', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize',
14)
plot(t,x_system(1,:), 'red', t,x_system(10,:), 'blue')
legend('real \Delta f_1', 'estimated \Delta f_1', 'Location', 'southeast')

%apeikonish ths katastashs x_2 kai ths antistoixhs ektimwmenhs
figure(2)
hold on
grid on
box on

```

```
title('$Real\ and\ estimated\ \Delta f_2\ trajectories$', 'Interpreter',  
      'latex', 'FontSize', 14)  
xlabel('Time t, \ sec', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)  
ylabel('$x_2, \hat{x}_2\ (t), \ Hz$', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize',  
      14)  
plot(t, x_system(2,:), 'red', t, x_system(11,:), 'blue')  
legend('real \Delta f_2', 'estimated \Delta f_2', 'Location', 'southeast')  
  
%apeikonish ths katastashs x_7 kai ths antistoixhs ektimwmenhs  
figure(3)  
hold on  
grid on  
box on  
title('$Real\ and\ estimated\ \Delta P_{tie,1}\ trajectories$', '  
      Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)  
xlabel('Time t, \ sec', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)  
ylabel('$x_7, \hat{x}_7\ (t), \ MW$', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize',  
      14)  
plot(t, x_system(7,:), 'red', t, x_system(16,:), 'blue')  
legend('real \Delta P_{tie,1}', 'estimated \Delta P_{tie,1}', 'Location', '  
      southeast')
```

Ανίχνευση Σφαλμάτων

```
%%  
clear all  
clc  
  
set(0, 'defaultlinelength', 1.5)  
  
%%  
[SysC] = Orismos_sythmatos;  
[A_obs, L] = Orismos_observer(SysC);  
  
% timh diataraxhs  
w=[200;0];  
  
% xronos  
t_init=0;T_s=0.1;t_fin=200;options=[];  
  
row_num=18;  
x_system=zeros(row_num, ceil((t_fin-t_init)/T_s));  
x_ode_sys=zeros(row_num,1);  
x_system(:,1)=x_ode_sys;  
x_measured=zeros(3, ceil((t_fin-t_init)/T_s));  
  
cnt=1;  
  
for t=t_init:T_s:t_fin-T_s  
    cnt=cnt+1;  
  
    noise=(1/1000)*(-1 + (2).*rand(9,9));  
    noise_obs=(1/1000)*(-1 + (2).*rand(1,3));
```

```
[t_ode,x_ode_sys]=ode45(@system_ode_obs,[t t+T_s],[x_ode_sys],options,
    SysC,[w],[noise],[A_obs],[L],[noise_obs]);

szx_ode=size(x_ode_sys);
x_ode_sys=x_ode_sys(szx_ode(1),:);

x_system(:,cnt)=x_ode_sys;

x_measured(1,cnt)=x_ode_sys(1)+noise_obs(1)*x_ode_sys(1);
x_measured(2,cnt)=x_ode_sys(2)+noise_obs(2)*x_ode_sys(2);
x_measured(3,cnt)=x_ode_sys(7)+noise_obs(3)*x_ode_sys(7);

end

% Residuals
r1=abs(x_system(10,:)-x_measured(1,:));
r2=abs(x_system(11,:)-x_measured(2,:));
r3=abs(x_system(16,:)-x_measured(3,:));

r=[r1; r2; r3];
thres=[4.5*10^-4 6.2*10^-4 0.55];

%plot
t=[t_init:T_s:t_fin];
figures(t,x_system,r,thres,x_measured)

%%

% xronos
t_init=200;T_s=0.1;t_fin=300;options=[];

% Sensor Fault
sensor_fault=[(0.0074/100)*0.2767,0,0];
% Actuator Fault
actuator_fault=[0,0];

%row_num=18;
x_system=zeros(row_num,ceil((t_fin-t_init)/T_s));
x_system(:,1)=x_ode_sys;
x_measured=zeros(3,ceil((t_fin-t_init)/T_s));
x_measured(1,1)=x_ode_sys(1)+noise_obs(1)*x_ode_sys(1);
x_measured(2,1)=x_ode_sys(2)+noise_obs(2)*x_ode_sys(2);
x_measured(3,1)=x_ode_sys(7)+noise_obs(3)*x_ode_sys(7);

cnt=1;

for t=t_init:T_s:t_fin-T_s
    cnt=cnt+1;

    noise=(1/1000)*(-1+(2).*rand(9,9));
    noise_obs=(1/1000)*(-1+(2).*rand(1,3));
```

```
[t_ode,x_ode_sys]=ode45(@system_ode_obs_fault,[t t+T_s],[x_ode_sys],
    options,SysC,[w],[noise],[A_obs],[L],[noise_obs],[sensor_fault],[
    actuator_fault]);

szx_ode=size(x_ode_sys);
x_ode_sys=x_ode_sys(szx_ode(1),:);

x_system(:,cnt)=x_ode_sys;

x_measured(1,cnt)=x_ode_sys(1)+noise_obs(1)*x_ode_sys(1)+sensor_fault
    (1);
x_measured(2,cnt)=x_ode_sys(2)+noise_obs(2)*x_ode_sys(2);
x_measured(3,cnt)=x_ode_sys(7)+noise_obs(3)*x_ode_sys(7);

end

% Residuals
r1=abs(x_system(10,:)-x_measured(1,:));
r2=abs(x_system(11,:)-x_measured(2,:));
r3=abs(x_system(16,:)-x_measured(3,:));

r=[r1; r2; r3];
thres=[4.5*10^-4 6.2*10^-4 0.55];

%plot
t=[t_init:T_s:t_fin];
figures(t,x_system,r,thres,x_measured)

%%

% xronos
t_init=300;T_s=0.1;t_fin=400;options=[];

%row_num=18;
x_system=zeros(row_num,ceil((t_fin-t_init)/T_s));
x_system(:,1)=x_ode_sys;
x_measured=zeros(3,ceil((t_fin-t_init)/T_s));
x_measured(1,1)=x_ode_sys(1)+noise_obs(1)*x_ode_sys(1)+sensor_fault(1);
x_measured(2,1)=x_ode_sys(2)+noise_obs(2)*x_ode_sys(2);
x_measured(3,1)=x_ode_sys(7)+noise_obs(3)*x_ode_sys(7);

cnt=1;

for t=t_init:T_s:t_fin-T_s
    cnt=cnt+1;

    noise=(1/1000)*(-1+(2).*rand(9,9));
    noise_obs=(1/1000)*(-1+(2).*rand(1,3));

    [t_ode,x_ode_sys]=ode45(@system_ode_obs,[t t+T_s],[x_ode_sys],options,
        SysC,[w],[noise],[A_obs],[L],[noise_obs]);
```

```
szx_ode=size(x_ode_sys);  
x_ode_sys=x_ode_sys(szx_ode(1),:);  
  
x_system(:,cnt)=x_ode_sys;  
  
x_measured(1,cnt)=x_ode_sys(1)+noise_obs(1)*x_ode_sys(1);  
x_measured(2,cnt)=x_ode_sys(2)+noise_obs(2)*x_ode_sys(2);  
x_measured(3,cnt)=x_ode_sys(7)+noise_obs(3)*x_ode_sys(7);  
  
end  
  
% Residuals  
r1=abs(x_system(10,:)-x_measured(1,:));  
r2=abs(x_system(11,:)-x_measured(2,:));  
r3=abs(x_system(16,:)-x_measured(3,:));  
  
r=[r1; r2; r3];  
thres=[4.5*10^-4 6.2*10^-4 0.55];  
  
%plot  
t=[t_init:T_s:t_fin];  
figures(t,x_system,r,thres,x_measured)
```

Απομόνωση Σφαλμάτων

```
%%  
clear all  
clc  
  
set(0, 'defaultlinelength', 1.5)  
  
%%  
[SysC] = Orismos_synthmatos;  
[A_obs, L] = Orismos_observer(SysC);  
  
[A_obs1, L1] = Orismos_observer1(SysC);  
[A_obs2, L2] = Orismos_observer2(SysC);  
[A_obs3, L3] = Orismos_observer3(SysC);  
  
% timh diataraxhs  
w=[200;0];  
  
% xronos  
t_init=0;T_s=0.1;t_fin=200;options=[];  
  
row_num=36;  
x_system=zeros(row_num,ceil((t_fin-t_init)/T_s));  
x_ode_sys=zeros(row_num,1);  
x_system(:,1)=x_ode_sys;  
x_measured=zeros(3,ceil((t_fin-t_init)/T_s));  
cnt=1;
```

```
for t=t_init:T_s:t_fin-T_s
cnt=cnt+1;

noise=(1/1000)*(-1 + (2).*rand(9,9));
noise_obs=(1/1000)*(-1 + (2).*rand(1,3));

[t_ode,x_ode_sys]=ode45(@system_ode_obs_bank,[t t+T_s],[x_ode_sys],
options,SysC,[w],[noise],[A_obs1],[L1],[A_obs2],[L2],[A_obs3],[L3
],[noise_obs]);

szx_ode=size(x_ode_sys);
x_ode_sys=x_ode_sys(szx_ode(1),:);

x_system(:,cnt)=x_ode_sys;

x_measured(1,cnt)=x_ode_sys(1)+noise_obs(1)*x_ode_sys(1);
x_measured(2,cnt)=x_ode_sys(2)+noise_obs(2)*x_ode_sys(2);
x_measured(3,cnt)=x_ode_sys(7)+noise_obs(3)*x_ode_sys(7);

end

% Residuals
r1=abs(x_system(10,:)-x_measured(1,:));
r2=abs(x_system(20,:)-x_measured(2,:));
r3=abs(x_system(34,:)-x_measured(3,:));

r=[r1; r2; r3];
%thres=[4*10^-4 6*10^-4 0.5];
thres = [4*10^-4; 5*10^-4; 0.23];

%plot
t=[t_init:T_s:t_fin];
figures(t,x_system,r,thres,x_measured)

%%

% xronos
t_init=200;T_s=0.1;t_fin=300;options=[];

% Sensor Fault
sensor_fault=[(0.15/100)*0.2767,0,0];
% Actuator Fault
actuator_fault=[0,0];

%row_num=18;
x_system=zeros(row_num,ceil((t_fin-t_init)/T_s));
x_system(:,1)=x_ode_sys;
x_measured=zeros(3,ceil((t_fin-t_init)/T_s));
x_measured(1,1)=x_ode_sys(1)+noise_obs(1)*x_ode_sys(1);
x_measured(2,1)=x_ode_sys(2)+noise_obs(2)*x_ode_sys(2);
x_measured(3,1)=x_ode_sys(7)+noise_obs(3)*x_ode_sys(7);

cnt=1;
```

```
for t=t_init:T_s:t_fin-T_s
cnt=cnt+1;

noise=(1/1000)*(-1 + (2).*rand(9,9));
noise_obs=(1/1000)*(-1 + (2).*rand(1,3));

[t_ode,x_ode_sys]=ode45(@system_ode_obs_fault_bank,[t t+T_s],[x_ode_sys
],options, SysC,[w],[noise],[A_obs1],[L1],[A_obs2],[L2],[A_obs3],[L3
],[noise_obs],[sensor_fault],[actuator_fault]);

szx_ode=size(x_ode_sys);
x_ode_sys=x_ode_sys(szx_ode(1),:);

x_system(:,cnt)=x_ode_sys;

x_measured(1,cnt)=x_ode_sys(1)+noise_obs(1)*x_ode_sys(1)+sensor_fault
(1);
x_measured(2,cnt)=x_ode_sys(2)+noise_obs(2)*x_ode_sys(2);
x_measured(3,cnt)=x_ode_sys(7)+noise_obs(3)*x_ode_sys(7);

end

% Residuals
r1=abs(x_system(10,:)-x_measured(1,:));
r2=abs(x_system(20,:)-x_measured(2,:));
r3=abs(x_system(34,:)-x_measured(3,:));

r=[r1; r2; r3];
%thres=[4*10^-4 6*10^-4 0.5];
thres = [4*10^-4; 5*10^-4; 0.23];

%plot
t=[t_init:T_s:t_fin];
figures(t,x_system,r,thres,x_measured)

%%

% xronos
t_init=300;T_s=0.1;t_fin=400;options=[];

%row_num=18;
x_system=zeros(row_num,ceil((t_fin-t_init)/T_s));
x_system(:,1)=x_ode_sys;
x_measured=zeros(3,ceil((t_fin-t_init)/T_s));
x_measured(1,1)=x_ode_sys(1)+noise_obs(1)*x_ode_sys(1)+sensor_fault(1);
x_measured(2,1)=x_ode_sys(2)+noise_obs(2)*x_ode_sys(2);
x_measured(3,1)=x_ode_sys(7)+noise_obs(3)*x_ode_sys(7);

cnt=1;

for t=t_init:T_s:t_fin-T_s
```

```
cnt=cnt+1;

noise=(1/1000)*(-1 + (2).*rand(9,9));
noise_obs=(1/1000)*(-1 + (2).*rand(1,3));

[t_ode,x_ode_sys]=ode45(@system_ode_obs_bank,[t t+T_s],[x_ode_sys],
    options, SysC,[w],[noise],[A_obs1],[L1],[A_obs2],[L2],[A_obs3],[L3
    ],[noise_obs]);

szx_ode=size(x_ode_sys);
x_ode_sys=x_ode_sys(szx_ode(1),:);

x_system(:,cnt)=x_ode_sys;

x_measured(1,cnt)=x_ode_sys(1)+noise_obs(1)*x_ode_sys(1);
x_measured(2,cnt)=x_ode_sys(2)+noise_obs(2)*x_ode_sys(2);
x_measured(3,cnt)=x_ode_sys(7)+noise_obs(3)*x_ode_sys(7);

end

% Residuals
r1=abs(x_system(10,:)-x_measured(1,:));
r2=abs(x_system(20,:)-x_measured(2,:));
r3=abs(x_system(34,:)-x_measured(3,:));

r=[r1; r2; r3];
%thres=[4*10^-4 6*10^-4 0.5];
thres = [4*10^-4; 5*10^-4; 0.23];

%plot
t=[t_init:T_s:t_fin];
figures(t,x_system,r,thres,x_measured)
```

B' Προσομοίωση Simulink

Ανίχνευση Σφαλμάτων

```
%%  
clear all  
clc  
  
set(0, 'defaultlinelength', 1.5)  
  
%%  
[SysC] = Orismos_systhmatos;  
  
[A_obs, L] = Orismos_observer(SysC);  
  
% Times perioxhs 1  
  
Kp1=0.06;  
Tp1=24;  
R1=1.2*10^(-3);  
Kt1=1;  
Tt1=0.3;  
Kg1=1;  
Tg1=0.08;  
B1=1/R1;  
  
Kp2=0.095;  
Tp2=22.85;  
R2=1.33*10^(-3);  
Kg2=1;  
Tg2=0.07;  
Kt2=1;  
Tt2=0.25;  
B2=1/R2;  
  
T12=175;  
a12=-1;  
  
KP1=-0.1;  
KP2=-0.1;  
KI1=-0.033;  
KI2=-0.033;  
  
% tyxaia metavolh  
w = [-200+400*rand, -150+300*rand]  
  
% noise  
alpha=1/1000;  
  
% max x1 = 0.2767  
% max x2 = 0.2345  
% max x7 = 200
```

```

% Sensor Fault
sensor_fault = [0;0;0];

% max actuator1 = 200
% max actuator2 = 150

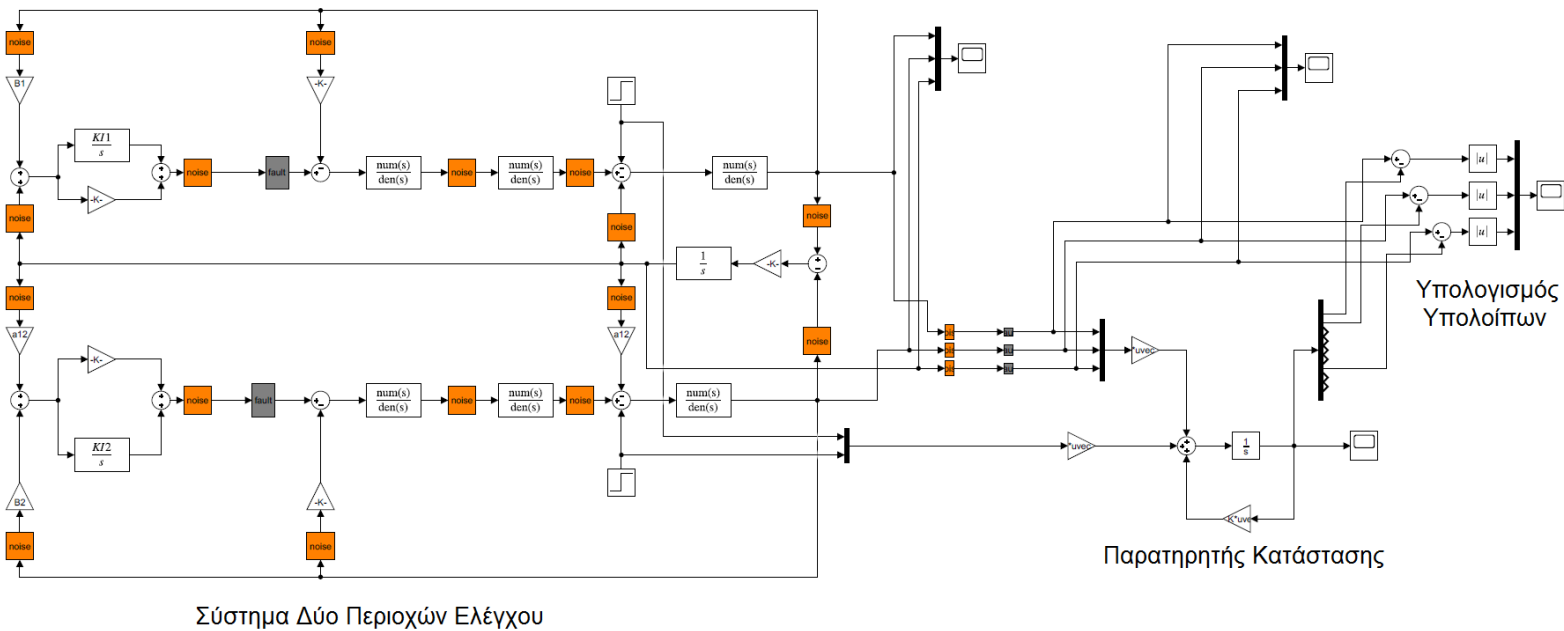
% Actuator Fault
actuator_fault=[0;0];

% threshold
thres=[4.5*10^-4 6.2*10^-4 0.55];

fault_time=[200;300];
sim('fault_sim')

%plot
t=Real.time;
figures_simulink(t,Real.signals.values',Estimated.signals.values',
    Residuals.signals.values',thres,Measured.signals.values')
start_fault = unique(simout.Data)
end_fault = unique(simout1.Data)

```



Σχήμα 2.1: Προσομοίωση Συστήματος Δύο Περιοχών Ελέγχου, Παρατηρητή Κατάστασης και Υπολογισμού Υπολοίπων για την εύρεση σφαλμάτων με χρήση Simulink

Απομόνωση Σφαλμάτων

```
%%  
clear all  
clc  
  
set(0, 'defaultlinelength', 1.5)  
  
%%  
[SysC] = Orismos_systhmatos;  
  
[A_obs, L] = Orismos_observer(SysC);  
  
[A_obs1, L1] = Orismos_observer1(SysC);  
[A_obs2, L2] = Orismos_observer2(SysC);  
[A_obs3, L3] = Orismos_observer3(SysC);  
  
% Times perioxhs 1  
  
Kp1=0.06;  
Tp1=24;  
R1=1.2*10^(-3);  
Kt1=1;  
Tt1=0.3;  
Kg1=1;  
Tg1=0.08;  
B1=1/R1;  
  
Kp2=0.095;  
Tp2=22.85;  
R2=1.33*10^(-3);  
Kg2=1;  
Tg2=0.07;  
Kt2=1;  
Tt2=0.25;  
B2=1/R2;  
  
T12=175;  
a12=-1;  
  
KP1=-0.1;  
KP2=-0.1;  
KI1=-0.033;  
KI2=-0.033;  
  
% tyxaia metavolh  
w = [-200+400*rand, -150+300*rand]  
  
alpha=1/1000;  
  
% max x1 = 0.2767 (0.15/100)*0.2767  
% max x2 = 0.2345 (0.24/100)*0.2345
```

```
% max x3 = 200      (0.14/100)*200

sensor_fault=[(0.15/100)*0.2767;0;0];

% actuator1 = 200    (0.31/100)*200
% actuator2 = 150    (0.42/100)*150

actuator_fault=[0;0];

thres = [3.6*10^-4; 5*10^-4; 0.25]; % ligo aristera
thres_2=[4.5*10^-4 6.2*10^-4 0.55];

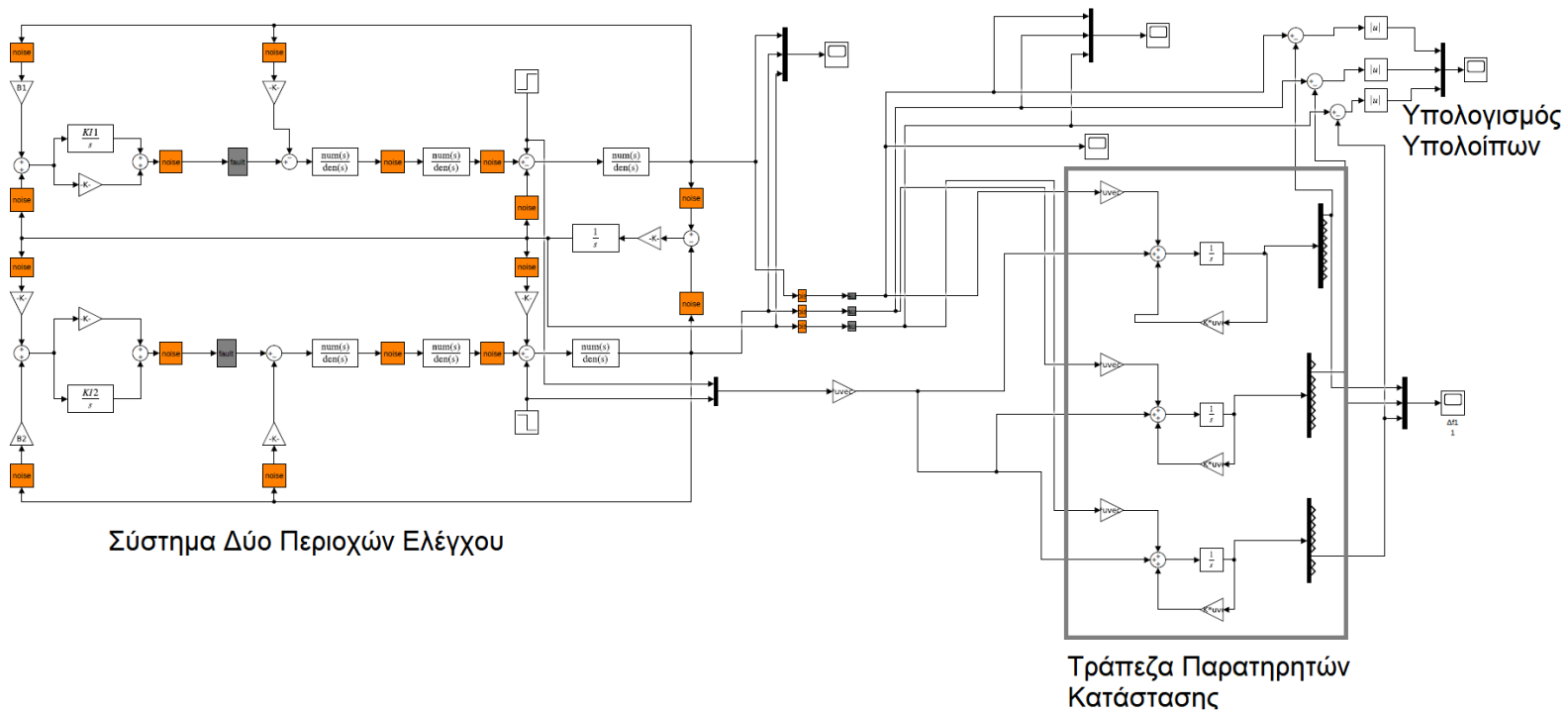
fault_time=[200;300];
sim('Bank')

%plot
%t=[t_init:T_s:t_fin];
t=Real.time;
figures_simulink(t,Real.signals.values',Estimated.signals.values',
    Residuals.signals.values',thres,Measured.signals.values')
start_fault = unique(simout.Data)
end_fault = unique(simout1.Data)

figures_simulink_2(t,Real.signals.values',Estimated_2.signals.values',
    Residuals_2.signals.values',thres_2,Measured.signals.values')
start_fault = unique(simout2.Data)
end_fault = unique(simout3.Data)

% threshold
thres=[4.5*10^-4 6.2*10^-4 0.55];
sim('oneObs')

t=Real.time;
figures_simulink(t,Real.signals.values',Estimated.signals.values',
    Residuals.signals.values',thres,Measured.signals.values')
start_fault = unique(simout.Data)
end_fault = unique(simout1.Data)
```



Σχήμα 2.2: Προσομοίωση Συστήματος Δύο Περιοχών Ελέγχου, Παρατηρητών Κατάστασης και Υπολογισμού Υπολοίπων για την απομόνωση σφαλμάτων με χρήση Simulink