



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Ανάπτυξη δυναμικών ισοδύναμων μοντέλων δικτύων διανομής
ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση Hammerstein-Wiener μοντέλων**

Διπλωματική Εργασία

Μπίλας Ιγνάτιος

Επιβλέπων: Κόντης Ελευθέριος

Σεπτέμβριος 2025



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

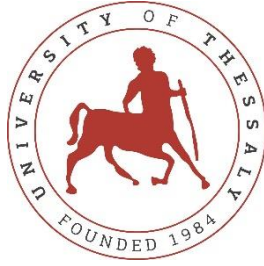
**Ανάπτυξη δυναμικών ισοδύναμων μοντέλων δικτύων διανομής
ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση Hammerstein-Wiener μοντέλων**

Διπλωματική Εργασία

Μπίλας Ιγνάτιος

Επιβλέπων: Κόντης Ελευθέριος

Σεπτέμβριος 2025



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**Dynamic equivalents of distribution networks using
Hammerstein-Wiener models**

Diploma Thesis

Bilas Ignatios

Supervisor: Kontis Eleutherios

September 2025

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Κόντης Ελευθέριος

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Μπαργιώτας Δημήτριος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Δασκαλοπούλου Ασπασία

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

Μπίλας Ιγνάτιος

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this diploma thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Bilas Ignatios

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή, Ελευθέριο Κόντη, για την αμέριστη βοήθεια και στήριξη στην εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή, Δημήτριο Μπαργιώτα, και την καθηγήτρια, Ασπασία Δασκαλοπούλου, που θα συμμετάσχουν στην εξέταση και αξιολόγηση της διπλωματικής εργασίας και θα αφιερώσουν πολύτιμο χρόνο γι' αυτό.

Τέλος ευχαριστώ όλους τους ανθρώπους που με βοήθησαν σε όλα τα χρόνια σπουδών μου.

Ανάπτυξη δυναμικών ισοδύναμων μοντέλων δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση Hammerstein-Wiener μοντέλων

Μπίλας Ιγνάτιος

Περίληψη

Η αυξανόμενη διείσδυση μονάδων διανεμημένης παραγωγής έχει μετατρέψει τα συμβατικά δίκτυα διανομής σε ενεργές μονάδες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στις μέρες μας, να γίνεται λόγος πλέον για ενεργά δίκτυα διανομής (ΕΔΔ). Τα ΕΔΔ αλληλοεπιδρούν με το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, μεταβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο δραστικά τη δυναμική συμπεριφορά και τα όρια ευστάθειας ολόκληρου του ΣΗΕ. Στο πλαίσιο αυτό, καθίσταται λοιπόν αναγκαία η αποτελεσματική μοντελοποίηση των ΕΔΔ, ώστε αυτά να μπορούν εύκολα και αποτελεσματικά να ενσωματωθούν σε μελέτες ευστάθειας του ΣΗΕ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη δυναμικών ισοδύναμων μοντέλων για την ανάλυση παθητικών δικτύων διανομής (ΠΔΔ) και ΕΔΔ ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ισοδύναμα που αναπτύσσονται στα πλαίσια της διπλωματικής βασίζονται στην χρήση μοντέλων Hammerstein-Wiener. Τα ισοδύναμα μοντέλα αξιολογούνται σε πραγματικές μετρήσεις που έχουν καταγραφεί σε οχτώ (8) διαφορετικές τοπολογίες δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας εργοστασιακής κλίμακας. Για κάθε τοπολογία πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση των εκτιμώμενων παραμέτρων των μοντέλων και καταγράφεται η αποτελεσματικότητα τους για τη μοντελοποίηση της ενεργού και της άεργου ισχύος κάτω από διαφορετικές μεταβολές τάσης. Η ανάλυση κατέδειξε ότι τα Hammerstein-Wiener μοντέλα μπορούν να προσεγγίσουν με χαμηλό μετρικό σφάλμα αποκρίσεις ενεργού και άεργου ισχύος σε ενεργά και παθητικά δίκτυα διανομής.

Λέξεις-κλειδιά: δίκτυο διανομής, εκτίμηση παραμέτρων, ισοδύναμα μοντέλα, μοντέλα Hammerstein-Wiener, μοντελοποίηση με χρήση μετρήσεων

Diploma Thesis

Dynamic equivalents of distribution networks using Hammerstein-Wiener models

Bilas Ignatios

Abstract

The increased penetration of distributed generation units (DGUs) has transformed conventional distribution networks into active units of electrical power systems (EPS). As a result, nowadays, there is talk about active distribution networks (ADNs). ADNs interact with electrical power transfer system, modifying drastically the dynamic behavior and stability limit of the EPS. In this context, there is necessity for effective modelling of ADNs, in order for them to be easily and effectively incorporated into stability studies of EPS.

The purpose of this thesis is to develop dynamic equivalent models for the analysis of electrical power passive distribution networks (PDNs) and ADNs, using the Hammerstein-Wiener models. These equivalents that are developed in the context of this thesis are based on the Hammerstein-Wiener models. The equivalent models are tested in real measurements that have been recorded in eight (8) different plant scale electrical power distribution networks topologies. For each topology, a statistical analysis of the estimated parameters from the developed models is performed and their efficiency is recorded for the modelling of active and reactive power under different voltage changes. The analysis proved that Hammerstein-Wiener models can approach with low metric error the responses of active and reactive power in active and passive distribution networks.

Keywords: distribution networks, equivalent models, Hammerstein-Wiener models, measurement-based approach, parameter estimation

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες	vii
Περίληψη	viii
Abstract	ix
Πίνακας περιεχομένων	x
Κατάλογος εικόνων	xii
Κατάλογος πινάκων	xiv
Συντομογραφίες	xvi
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	3
1.2 Οργάνωση του Τόμου	4
Κεφάλαιο 2 Hammerstein-Wiener Μοντέλα	5
2.1 Εισαγωγή	5
2.2 Δομή Hammerstein-Wiener Μοντέλων	5
2.3 Αλγόριθμος Εύρεσης Μοντέλων	6
Κεφάλαιο 3 Δίκτυο Διανομής Προς Μελέτη	8
3.1 Παρουσίαση του Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας	8
3.2 Τοπολογίες του Δικτύου Διανομής	9
Κεφάλαιο 4 Επικύρωση Προτεινόμενων Μοντέλων	12
4.1 Γραφικές Παραστάσεις Παραγόμενων Μοντέλων Hammerstein-Wiener	12
4.2 Στατιστική Ανάλυση Μετρικού Σφάλματος	29
Κεφάλαιο 5 Στατιστική Ανάλυση Μεταβλητών και Εύρεση Μοντέλων Κατά Ομαδοποίηση	31
5.1 Δημιουργία Μοντέλων με χρήση των εκτιμώμενων παραμέτρων	31

5.2 Εύρεση Μοντέλων Με Ομαδοποίηση Μετρήσεων	39
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα	41
6.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα	41
6.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις και Δυνατότητες για Περαιτέρω Έρευνα	42
Βιβλιογραφία	43

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1 Γενική δομή των Hammerstein-Wiener μοντέλων	5
Εικόνα 2.2: Αλγόριθμος εύρεσης μοντέλων Hammerstein-Wiener	7
Εικόνα 3.1: Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας Εργαστηριακής Κλίμακας	9
Εικόνα 4.1: Ενδεικτική Διαταραχή Τάσης για την Τοπολογία 1.	13
Εικόνα 4.2: Μοντελοποίηση Ενεργού Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 1	14
Εικόνα 4.3: Μοντελοποίηση Άεργου Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 1	14
Εικόνα 4.4: Ενδεικτική Διαταραχή Τάσης για την Τοπολογία 2	15
Εικόνα 4.5: Μοντελοποίηση Ενεργού Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 2	16
Εικόνα 4.6: Μοντελοποίηση Άεργου Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 2	16
Εικόνα 4.7: Ενδεικτική Διαταραχή Τάσης για την Τοπολογία 3	17
Εικόνα 4.8: Μοντελοποίηση Ενεργού Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 3	18
Εικόνα 4.9: Μοντελοποίηση Άεργου Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 3	18
Εικόνα 4.10: Ενδεικτική Διαταραχή Τάσης για την Τοπολογία 4	19
Εικόνα 4.11: Μοντελοποίηση Ενεργού Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 4	20
Εικόνα 4.12: Μοντελοποίηση Άεργου Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 4	20
Εικόνα 4.13: Ενδεικτική Διαταραχή Τάσης για την Τοπολογία 5	21
Εικόνα 4.14: Μοντελοποίηση Ενεργού Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 5	22

Εικόνα 4.15: Μοντελοποίηση Άεργου Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 5	22
Εικόνα 4.16: Ενδεικτική Διαταραχή Τάσης για την Τοπολογία 6	23
Εικόνα 4.17: Μοντελοποίηση Ενεργού Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 6	24
Εικόνα 4.18: Μοντελοποίηση Άεργου Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 6	24
Εικόνα 4.19: Ενδεικτική Διαταραχή Τάσης για την Τοπολογία 7	25
Εικόνα 4.20: Μοντελοποίηση Ενεργού Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 7	26
Εικόνα 4.21: Μοντελοποίηση Άεργου Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 7	26
Εικόνα 4.22: Ενδεικτική Διαταραχή Τάσης για την Τοπολογία 8	27
Εικόνα 4.23: Μοντελοποίηση Ενεργού Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 8	28
Εικόνα 4.24: Μοντελοποίηση Άεργου Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 8	28
Εικόνα 5.1: Μετρικό σφάλμα ενεργού ισχύος πρώτης τυχαίας διαταραχής τάσης της Τοπολογίας 7	38
Εικόνα 5.2: Μετρικό σφάλμα ενεργού ισχύος δεύτερης τυχαίας διαταραχής τάσης της Τοπολογίας 7	39

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1: Παράμετροι Μοντέλων ενδεικτικής διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 1.....	13
Πίνακας 4.2: Παράμετροι Μοντέλων ενδεικτικής διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 2	15
Πίνακας 4.3: Παράμετροι Μοντέλων ενδεικτικής διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 3.....	17
Πίνακας 4.4: Παράμετροι Μοντέλων ενδεικτικής διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 4.....	19
Πίνακας 4.5: Παράμετροι Μοντέλων ενδεικτικής διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 5.....	21
Πίνακας 4.6: Παράμετροι Μοντέλων ενδεικτικής διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 6.....	23
Πίνακας 4.7: Παράμετροι Μοντέλων ενδεικτικής διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 7.....	25
Πίνακας 4.8: Παράμετροι Μοντέλων ενδεικτικής διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 8.....	27
Πίνακας 4.9: Μέσοι Όροι Μετρικών Σφαλμάτων Ενεργού Ισχύος	29
Πίνακας 4.10: Μέσοι Όροι Μετρικών Σφαλμάτων Άεργου Ισχύος	29
Πίνακας 5.1: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 1 Ενεργός Ισχύς	32
Πίνακας 5.2: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 1 Άεργος Ισχύς	32
Πίνακας 5.3: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 2 Ενεργός Ισχύς	33
Πίνακας 5.4: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 2 Άεργος Ισχύς	33
Πίνακας 5.5: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 3 Ενεργός Ισχύς	33
Πίνακας 5.6: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 3 Άεργος Ισχύς	34
Πίνακας 5.7: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 4 Ενεργός Ισχύς	34
Πίνακας 5.8: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 4 Άεργος Ισχύς	34
Πίνακας 5.9: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 5 Ενεργός Ισχύς	35
Πίνακας 5.10: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 5 Άεργος Ισχύς	35
Πίνακας 5.11: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 6 Ενεργός Ισχύς	35
Πίνακας 5.12: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 6 Άεργος Ισχύς	36
Πίνακας 5.13: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 7 Ενεργός Ισχύς	36

Πίνακας 5.14: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 7 Άεργος Ισχύς	36
Πίνακας 5.15: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 8 Ενεργός Ισχύς	37
Πίνακας 5.16: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 8 Άεργος Ισχύς	37

Συντομογραφίες

ΕΔΔ	Ενεργό Δίκτυο Διανομής
ΜΔΠ	Μονάδες διανεμημένης παραγωγής
ΠΔΔ	Παθητικό δίκτυο διανομής
ΠΠΤ	Πηγή προγραμματιζόμενης τάσης
ΣΗΕ	Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας
ΧΣΔ	Χειριστές συστημάτων διανομής
ΧΣΜ	Χειριστές συστημάτων μετάδοσης
P	Ενεργός Ισχύς
Q	Άεργος Ισχύς
V	Τάση

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Κατά την διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η ολοένα και αυξανόμενη διείσδυση των μονάδων διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ) έχει αλλάξει σε μεγάλο βαθμό τις δυναμικές ιδιότητες των δικτύων διανομής. Αποτέλεσμα αυτής της αλλαγής είναι η μετατροπή των συμβατικών δικτύων διανομής σε ενεργές μονάδες (ενεργά τμήματα) των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ). Έτσι στις μέρες μας γίνεται λόγος για ενεργά δίκτυα διανομής (ΕΔΔ), τα οποία επηρεάζουν μέσω των ΜΔΠ και των φορτίων που είναι εγκατεστημένα σε αυτά τη δυναμική συμπεριφορά και την ευστάθεια ολόκληρου του διασυνδεδεμένου ΣΗΕ. Τα ΕΔΔ αποτελούνται από μια πληθώρα φορτίων, ΜΔΠ, μετασχηματιστών, υπόγεια καλώδια, εναέριες γραμμές και άλλα στοιχεία, όπως για παράδειγμα συσκευές αντιστάθμισης και αυτοματισμοί προστασίας. Η λεπτομερής, λοιπόν, μοντελοποίηση των ΕΔΔ δεν είναι πρακτική αφενός εξαιτίας του μεγάλου πλήθους δεδομένων που απαιτείται να συλλεχθούν και αφετέρου εξαιτίας της μεγάλης υπολογιστικής πολυπλοκότητας που θα εισήγαγε ένα αναλυτικό μοντέλο με εκατοντάδες στοιχεία [1]. Επομένως για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος είναι αναγκαία η ανάπτυξη ισοδύναμων μοντέλων.

Πρακτικά, τα ισοδύναμα μοντέλα αποτελούν μαθηματικές αναπαραστάσεις που εκφράζουν την σχέση μεταξύ της τάσης ενός ζυγού του ΣΗΕ και της ενεργού και άεργου ισχύος [2]. Στόχος των ισοδύναμων μοντέλων ΕΔΔ είναι να προσομοιώνουν με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια γίνεται τις πραγματικές αποκρίσεις ενεργού και άεργου ισχύος ενός ΕΔΔ κατά τη διάρκεια διαταραχών τάσης ή/και συχνότητας [3].

Η διαδικασία ανάπτυξης ισοδύναμων μοντέλων ΕΔΔ μπορεί να διακριθεί σε δύο βασικά στάδια. Στο πρώτο στάδιο πρέπει να επιλεγεί μία κατάλληλη δομή για το ισοδύναμο μοντέλο, ενώ στο δεύτερο στάδιο προσδιορίζονται οι παράμετροι του ισοδύναμου μοντέλου.

Η δομή του μοντέλου μπορεί να προσδιοριστεί με βάση αφενός τη σύνθεση του φορτίου και το είδος των ΜΔΠ του εξεταζόμενου ΕΔΔ και αφετέρου με βάση την επιδιωκόμενη ακρίβεια [4]. Όπως αναλύεται στις [3] και [4], τα ισοδύναμα μοντέλα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, με βάση την δομή τους : στα στατικά και τα δυναμικά μοντέλα. Τα στατικά μοντέλα περιγράφουν τη σχέση μεταξύ ενεργού και άεργου ισχύος ως συνάρτηση της τάσης ή/και της συχνότητας σε κάποια χρονική στιγμή. Τα στατικά μοντέλα βασίζονται στην χρήση αλγεβρικών εξισώσεων και χρησιμοποιούνται κυρίως για την

μοντελοποίηση της μόνιμης κατάστασης ισορροπίας ή σε περιπτώσεις ΕΔΔ που δεν εμφανίζουν έντονη δυναμική συμπεριφορά/απόκριση κατά τη διάρκεια διαταραχών τάσης ή/και συχνότητας [4]. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα μοντέλων είναι το πολυωνυμικό ή αλλιώς ZIP μοντέλο και το εκθετικό μοντέλο [3]. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα στατικά μοντέλα χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν για την αναπαράσταση δικτύων διανομής. Δικτύων διανομής, δηλαδή, που δεν φιλοξενούσαν ΜΔΠ και συνεπώς μπορούσαν να μοντελοποιηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια ως ένα σύνολο συμβατικών ηλεκτρικών φορτίων [5]. Ωστόσο, στα σύγχρονα ΕΔΔ δεν μπορεί να αμεληθεί η επίδραση των ΜΔΠ στη δυναμική συμπεριφορά των ΕΔΔ κατά τη διάρκεια διαταραχών του συστήματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται η χρήση δυναμικών ισοδύναμων μοντέλων, τα οποία χρησιμοποιούν διαφορικές εξισώσεις ή συναρτήσεις μεταφοράς ώστε να περιγράψουν αποτελεσματικά την σχέση μεταξύ της ενεργού (ή της άεργου ισχύος) συναρτήσεως της τάσης του δικτύου και του χρόνου [4]. Παραδείγματα δυναμικών μοντέλων αποτελούν το induction motor model (IMM) και το exponential recovery load model (ERLM) [3].

Με την επιλογή της κατάλληλης δομής ισοδύναμου μοντέλου, ακολουθεί το δεύτερο στάδιο, δηλαδή, η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου [4]. Δύο είναι οι προσεγγίσεις με βάση τις οποίες μπορούν να υπολογιστούν οι παράμετροι ενός ισοδύναμου μοντέλου: προσέγγιση με βάση την σύνθεση (component-based approach) και προσέγγιση με χρήση μετρήσεων (measurement-based approach). Η προσέγγιση με βάση την σύνθεση απαιτεί αναλυτικές πληροφορίες για τα είδη των ηλεκτρικών φορτίων και των ΜΔΠ που βρίσκονται συνδεδεμένες στο δίκτυο, καθώς και προ υπάρχουσα γνώση σχετικά με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των επί μέρους στοιχείων του δικτύου. Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό η συλλογή αυτών των πληροφοριών καθίσταται πολύ δύσκολη, όχι μόνο εξαιτίας του μεγέθους των σύγχρονων δικτύων διανομής αλλά και για λόγους εμπιστευτικότητας [4]. Από την άλλη, η προσέγγιση που στηρίζεται στην χρήση μετρήσεων για τον προσδιορισμό παραμέτρων μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα σε εκτεταμένα δίκτυα διανομής καθώς απαιτεί απλώς τη χρήση μετρήσεων ενεργού και άεργου ισχύος κατά τη διάρκεια διαταραχών τάσης. Σε αυτή την προσέγγιση, οι παράμετροι των ισοδύναμων μοντέλων προσδιορίζονται με την βοήθεια τεχνικών αναγνώρισης. Επίσης αξίζει να αναφερθεί ότι μέσω αυτής της προσέγγισης μπορεί να μοντελοποιηθεί πολύ καλύτερα η πραγματική δυναμική συμπεριφορά του εξεταζόμενου συστήματος οδηγώντας έτσι σε μοντέλα με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια. Ένα ακόμη πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι πως όταν

υπάρχουν διαθέσιμες νέες μετρήσεις, τότε οι παράμετροι των μοντέλων μπορούν να επικαιροποιηθούν βελτιώνοντας έτσι σημαντικά την ακρίβεια τους [4].

Ανάλογα με την γνώση που υπάρχει για το δίκτυο που εξετάζεται, διακρίνονται δύο βασικές κατηγορίες μοντέλων που μπορούν να αναπτυχθούν μέσω της αξιοποίησης των μετρήσεων: μοντέλα μαύρου κουτιού (black-box models) και μοντέλα γκριζού κουτιού (grey-box models) [6]. Τα μοντέλα μαύρου κουτιού αναπτύσσονται θεωρώντας πως δεν υπάρχει προηγούμενη γνώση του δικτύου. Για την ανάπτυξη τους απαιτούνται μόνο τα δεδομένα (μετρήσεις) για τις εισόδους και τις εξόδους του μοντέλου. Στόχος του προσδιορισμού των παραμέτρων είναι να αντιστοιχιστούν όσο το δυνατό καλύτερα τα δεδομένα εξόδου του μοντέλου με τις πραγματικές εξόδους του εξεταζόμενου συστήματος. Από την άλλη, τα μοντέλα γκριζού κουτιού αναπτύσσονται όταν υπάρχει (έστω και κάποια βασική) γνώση του εξεταζόμενου συστήματος. Η γνώση αυτή αξιοποιείται ώστε να κατασκευαστεί η δομή του υπό ανάπτυξη ισοδύναμου μοντέλου. Σε κάθε περίπτωση, για την ανάπτυξη μοντέλων γκριζού κουτιού δεν είναι απαραίτητη η γνώση για την ακριβή σύνθεση των στοιχείων και της τοπολογίας του δικτύου.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπτύσσονται μέσω της μεθόδου Hammerstein-Wiener δυναμικά ισοδύναμα μοντέλα μαύρου κουτιού για την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς παθητικών δικτύων διανομής και ΕΔΔ. Η είσοδος των μοντέλων που αναπτύσσονται είναι η δυναμική απόκριση του εξεταζόμενου δικτύου διανομής και η έξοδος του περιλαμβάνει τις δυναμικές αποκρίσεις της ενεργού και της άεργου ισχύος του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας:

1. Αναπτύσσεται αλγόριθμος για την εύρεση της βέλτιστης δομής των μοντέλων Hammerstein-Wiener που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να προσομοιωθεί ικανοποιητικά η δυναμική συμπεριφορά ΠΔΔ και ΕΔΔ.
2. Ο αλγόριθμος και τα μοντέλα που αναπτύσσονται, αξιολογούνται ενδελεχώς σε οχτώ διαφορετικές τοπολογίες δικτύων διανομής.
3. Πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση των παραμέτρων που αναπτύχθηκαν στις εξεταζόμενες τοπολογίες, ώστε να διερευνηθεί η δυνατότητα γενίκευσης των

παραμέτρων (χρήση κοινών παραμέτρων για την ανάλυση διαφορετικών τοπολογιών).

4. Αξιολογείται η δυνατότητα δημιουργίας Hammerstein-Wiener μοντέλων μέσω της χρήσης πολλαπλών μετρήσεων που έχουν προέλθει από διαφορετικές διαταραχές τάσης στην ίδια τοπολογία.

1.2 Οργάνωση του τόμου

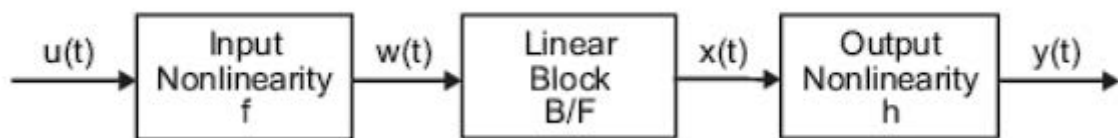
Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία οργανώνεται ως εξής. Στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται τα Hammerstein-Wiener μοντέλα. Συγκεκριμένα, αναλύεται η δομή τους και παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για να προσδιοριστεί η δομή και οι παράμετροι τους. Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας εργαστηριακής κλίμακας στο οποίο έγινε η αξιολόγηση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν. Επίσης, αναλύονται οι οκτώ τοπολογίες του δικτύου που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές των μοντέλων. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται αποτελέσματα από την αξιολόγηση των προτεινόμενων μοντέλων. Εν συνέχεια, στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση των παραμέτρων των μοντέλων. Επίσης, δημιουργούνται ισοδύναμα μοντέλα με βάση τις μέσες τιμές των εξαγόμενων παραμέτρων καθώς και μοντέλα που έχουν προκύψει από την χρήση πολλαπλών μετρήσεων. Μοντέλα, δηλαδή, οι παράμετροι των οποίων έχουν εξαχθεί μέσω της ομαδοποίησης πολλαπλών αποκρίσεων/πειραμάτων. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρατίθενται τα συμπεράσματα της έρευνας και προτείνονται ορισμένες ιδέες για περαιτέρω έρευνα.

Κεφάλαιο 2

Hammerstein-Wiener Μοντέλα

2.1 Εισαγωγή

Όπως είχε αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 1, τα μοντέλα που θα δοκιμαστούν στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι τα Hammerstein-Wiener. Η ιδιαιτερότητα των Hammerstein-Wiener μοντέλων είναι ότι μπορούν να προσομοιώσουν την μη-γραμμική συμπεριφορά ενός συστήματος χρησιμοποιώντας ένα μπλοκ εισόδου, ένα μπλοκ εξόδου και ανάμεσα τους ένα ακόμη μπλοκ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1. Αναλυτική περιγραφή της δομής των μοντέλων αυτών παρουσιάζεται στην υποενότητα 2.2. Η ανάπτυξη των Hammerstein-Wiener μοντέλων έγινε μέσω του προγράμματος MATLAB, κάνοντας χρήση του System Identification Toolbox που προσφέρει το MATLAB [7].



Εικόνα 2.1: Γενική δομή των Hammerstein-Wiener μοντέλων [8].

2.2 Δομή Hammerstein-Wiener Μοντέλων

Έχοντας ως αναφορά την Εικόνα 2.1, τα μπλοκ από τους οποίους αποτελείται η δομή των Hammerstein-Wiener μοντέλων, αναλύονται ως εξής :

- Τα σήματα $u(t)$ και $y(t)$ ορίζονται ως τα σήματα εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Στην παρούσα διπλωματική το σήμα εισόδου $u(t)$ είναι η δυναμική απόκριση της τάσης, ενώ το σήμα εξόδου του μοντέλου $y(t)$ είναι η δυναμική απόκριση της ενεργού ή της άεργου ισχύος.
- Η μη γραμμική συνάρτηση εισόδου (Input Nonlinearity) είναι στην πράξη μία συνάρτηση της οποίας η έξοδος σε μια οποιαδήποτε χρονική στιγμή εξαρτάται μόνο από την είσοδο εκείνης της χρονικής στιγμής με: $w(t) = f(u(t))$.

- Η γραμμική συνάρτηση μεταφοράς B/F μετατρέπει το σήμα $w(t)$ στο $x(t) = (B/F)w(t)$. Το B είναι ένα πολυώνυμο τάξης nb . Το πλήθος των πόλων ορίζεται ως nf το οποίο είναι και ο βαθμός του πολυωνύμου F .
- Η μη γραμμική συνάρτηση εξόδου (Output Nonlinearity) είναι στην πράξη μια συνάρτηση της οποίας η έξοδος μια οποιαδήποτε χρονική στιγμή δίνεται από την σχέση: $y(t) = h(x(t))$.

2.3 Αλγόριθμος Εύρεσης Μοντέλων

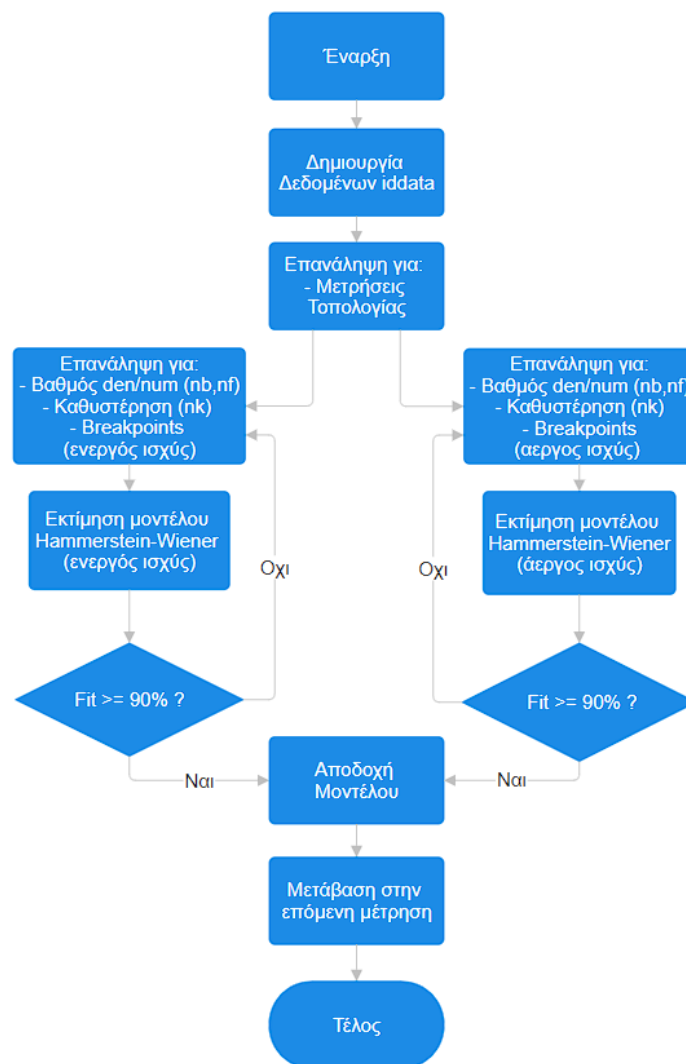
Ο γενικότερος σκοπός που επιδιώκεται, καθώς αναπτύσσεται ένα ισοδύναμο μοντέλο ενός δικτύου, είναι η απόκτηση του απλούστερου δυνατού μοντέλου, ενώ παράλληλα πληρούνται τα ελάχιστά δυνατά κριτήρια που καθιστούν το μοντέλο λειτουργικό και κατάλληλο για την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός συστήματος [5]. Αυτός είναι και ο στόχος του αλγορίθμου, όπου στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται η λογική του, δηλαδή για κάθε μέτρηση μιας τοπολογίας να βρει τα απλούστερα μοντέλα για ενεργό και άεργο ισχύ, καθώς ταυτόχρονα το ποσοστό προσομοίωσης αυτών των μοντέλων είναι τουλάχιστον 90%, διότι μόνο από αυτό το ποσοστό και πάνω θεωρείται ότι ένα μοντέλο μπορεί να αναπαραστήσει κατάλληλα την συμπεριφορά της αντίστοιχης τοπολογίας.

Πιο αναλυτικά, η διαδικασία ξεκινάει με την αρχικοποίηση και τη δημιουργία δεδομένων εισόδου υπό τη μορφή αντικειμένων τύπου `iddata` [9]. Για κάθε μέτρηση που διατίθεται, δημιουργούνται δύο σύνολο δεδομένων : το πρώτο αναφέρεται στην ενεργό ισχύ και το δεύτερο στην άεργο ισχύ. Ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία στην οποία εξετάζονται όλες οι διαθέσιμες μετρήσεις της επιλεγμένης τοπολογίας. Για κάθε μέτρηση, εκτελείται ένας εσωτερικός βρόχος που καλύπτει διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων του γραμμικού τμήματος του μοντέλου. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται επανάληψη για:

- Τον βαθμό των πολυωνύμων αριθμητή και παρονομαστή (nb, nf αντίστοιχα)
- Την καθυστέρηση εισόδου (nk)
- Καθώς και τον αριθμό των σημείων καμπής (*breakpoints*)

Η διαδικασία αυτή υλοποιείται ξεχωριστά τόσο για το μοντέλο της ενεργού ισχύος όσο και για το μοντέλο της άεργου ισχύος. Για κάθε συνδυασμό παραμέτρων, εκτιμάται ένα μοντέλο Hammerstein-Wiener με τη χρήση της συνάρτησης `nlhw` του MATLAB [10]. Το μοντέλο που προκύπτει αξιολογείται με την χρήση της συνάρτησης `compare`, η οποία υπολογίζει το ποσοστό ακρίβειας (μετρικό σφάλμα %) μεταξύ των προσομοιωμένων και

των πραγματικών αποκρίσεων ισχύος. Αν αυτό το ποσοστό είναι μεγαλύτερο ή ίσο του 90% τότε το μοντέλο θεωρείται αποδεκτό. Σε αυτή την περίπτωση η διαδικασία τερματίζει για την τρέχουσα μέτρηση και το μοντέλο αποθηκεύεται ως το κατάλληλο για την συγκεκριμένη περίπτωση. Η διαδικασία μετά συνεχίζει στην επόμενη μέτρηση της επιλεγμένης τοπολογίας. Σε περίπτωση που ούτε το μοντέλο της ενεργού ισχύος ούτε το μοντέλο της άεργου ισχύος φτάσουν το επιθυμητό ποσοστό ακρίβειας, η διαδικασία συνεχίζει με νέους συνδυασμούς παραμέτρων, μέχρι να εντοπιστεί ένας αποδεκτός ή να εξαντληθούν όλες οι δυνατές επιλογές. Με αυτόν τον τρόπο, ο αλγόριθμος εξασφαλίζει ότι για κάθε μέτρηση επιλέγεται το καταλληλότερο μοντέλο Hammerstein-Wiener, με τουλάχιστον 90% ποσοστό ακρίβειας, πριν προχωρήσει στην επόμενη. Η συνολική διαδικασία ολοκληρώνεται όταν έχουν αναλυθεί όλες οι διαθέσιμες μετρήσεις.



Εικόνα 2.2: Αλγόριθμος εύρεσης μοντέλων Hammerstein-Wiener.

Κεφάλαιο 3

Δίκτυο Διανομής Προς Μελέτη

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία εκτενής ανάλυση του δικτύου διανομής εργαστηριακής κλίμακας που επιλέχθηκε, ώστε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων δυναμικών ισοδύναμων μοντέλων. Το παρόν κεφάλαιο οργανώνεται σε δύο υποκεφάλαια. Στο πρώτο υποκεφάλαιο αναλύεται η βασική τοπολογία του τριφασικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και παρουσιάζονται τα επί μέρους στοιχεία από τα οποία αποτελείται το συγκεκριμένο δίκτυο. Στο δεύτερο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι 8 τοπολογίες, που έχουν προκύψει από τη βασική τοπολογία, και εξετάζονται στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Οι εξεταζόμενες τοπολογίες πρακτικά προκύπτουν από τη σύνδεση και αποσύνδεση των επί μέρους στοιχείων (μονάδων παραγωγής και φορτίων) του εξεταζόμενου δικτύου.

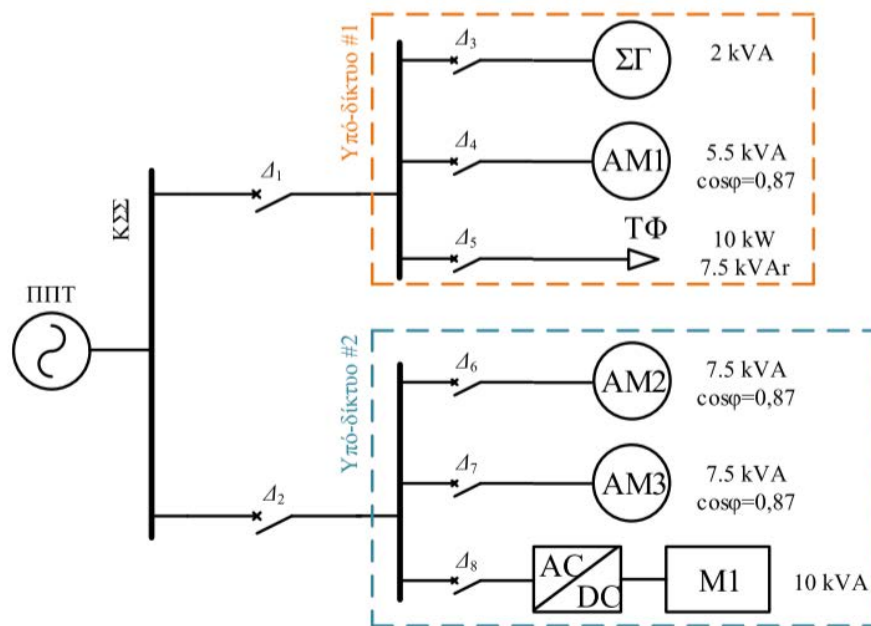
3.1 Παρουσίαση του Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το δίκτυο διανομής που χρησιμοποιείται για τις ανάγκες των πειραμάτων είναι ένα δίκτυο χαμηλής τάσης 400 V, και συχνότητας 50 Hz που αποτελείται από δύο επί μέρους υποδίκτυα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.1 [11]. Το εξεταζόμενο δίκτυο θεωρείται ότι διασυνδέεται με το κυρίως δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Το τελευταίο προσομοιώνεται για τις ανάγκες των εργαστηριακών μετρήσεων με τη βοήθεια ενός ψηφιακού προσομοιωτή πραγματικού χρόνου και συνδέεται στο εξεταζόμενο δίκτυο εργαστηριακής κλίμακας μέσω μιας προγραμματιζόμενης πηγής τάσης.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1, στο υποδίκτυο 1, περιλαμβάνονται: i) μία σύγχρονη γεννήτρια (ΣΓ) των 2 KVA, η οποία κινείται με την βοήθεια ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος, ο οποίος προσομοιώνει έναν στρόβιλο γρήγορης απόκρισης, ii) μία ασύγχρονη επαγωγική μηχανή (AM1) των 5,5 KVA με επαγωγικό συντελεστή ισχύος ίσο με 0.87, iii) μία τράπεζα φορτίου (ΤΦ), η οποία έχει μέγιστη ισχύ 10 KW/7,5 KVAR και είναι 64 βημάτων. Στο υποδίκτυο 2, συνδέονται δύο ασύγχρονες μηχανές (AM2,AM3) οι οποίες έχουν ονομαστική ισχύ 7,5 KVA και επαγωγικό συντελεστή ισχύος 0,87 και μία ΜΔΠ (M1) των 10 KVA. Η εν λόγω μονάδα αποτελείται από μία πηγή συνεχούς τάσης πίσω από έναν αντιστροφέα, συνδέεται με το υπόλοιπο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, και ελέγχεται έτσι ώστε να παρέχει στο δίκτυο συνεχώς μία σταθερή ποσότητα ενεργού ισχύος των 10

KW και άεργο ισχύ ίση με μηδέν. Οι ασύγχρονες μηχανές (AM1, AM2 και AM3) έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν είτε ως κινητήρες είτε ως γεννήτριες [11].

Τα υποδίκτυα, οι μονάδες και τα φορτία του δικτύου διαθέτουν διακόπτες. Μέσω του ανοίγματος και του κλεισίματος των διακοπών δίνεται η δυνατότητα μοντελοποίησης διαφορετικών τοπολογιών.



Εικόνα 3.1: Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας Εργαστηριακής Κλίμακας [11].

3.2 Τοπολογίες του Δικτύου Διανομής

Έχοντας παρουσιάσει και αναλύσει το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που θα αξιοποιηθεί για τους σκοπούς της διπλωματικής εργασίας, επόμενο βήμα είναι να παρουσιαστούν οι οκτώ τοπολογίες που χρησιμοποιήθηκαν για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των Hammerstein-Wiener μοντέλων για την ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς δικτύων διανομής. Συγκεκριμένα, οι τοπολογίες που μελετώνται είναι ως εξής :

- Τοπολογία 1: Συνδέονται στο δίκτυο η ασύγχρονη μηχανή AM1 και η τράπεζα φορτίου. Η ασύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας. Εδώ υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις από 96 πειράματα.

- Τοπολογία 2: Συνδέονται στο δίκτυο όλες οι ασύγχρονες μηχανές και η τράπεζα φορτίου, με τις μηχανές να λειτουργούν ως κινητήρες. Εδώ υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις από 96 πειράματα.
- Τοπολογία 3: Στο δίκτυο συνδέονται η σύγχρονη γεννήτρια, οι ασύγχρονες AM2 και AM3 και η τράπεζα φορτίου. Εδώ οι ασύγχρονες μηχανές λειτουργούν και οι δύο ως γεννήτριες. Εδώ υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις από 94 πειράματα.
- Τοπολογία 4: Στο δίκτυο συνδέονται οι ασύγχρονες μηχανές AM2 και AM3 και η τράπεζα φορτίου. Σε αυτήν την περίπτωση οι ασύγχρονες μηχανές λειτουργούν ως γεννήτριες. Εδώ υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις από 98 πειράματα.
- Τοπολογία 5: Συνδέονται στο δίκτυο όλες οι ασύγχρονες μηχανές, η σύγχρονη γεννήτρια και η τράπεζα φορτίου. Οι AM2 και AM3 λειτουργούν ως γεννήτριες, ενώ η AM1 λειτουργεί ως κινητήρας. Εδώ υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις από 98 πειράματα.
- Τοπολογία 6: Στο δίκτυο συνδέονται όλες οι ασύγχρονες μηχανές και η τράπεζα φορτίου. Οι AM2 και AM3 λειτουργούν ως γεννήτριες, ενώ η AM1 λειτουργεί ως κινητήρας. Εδώ υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις από 48 πειράματα.
- Τοπολογία 7: Συνδέονται στο δίκτυο η τράπεζα φορτίου, όλες οι ασύγχρονες μηχανές και η M1. Η AM1 λειτουργεί ως γεννήτρια. Οι AM2 και AM3 λειτουργούν ως κινητήρες. Εδώ υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις από 48 πειράματα.
- Τοπολογία 8: Συνδέονται στο δίκτυο η τράπεζα φορτίου, η σύγχρονη γεννήτρια, όλες οι ασύγχρονες μηχανές και η M1. Οι AM2 και AM3 λειτουργούν ως κινητήρες, ενώ η AM1 λειτουργεί ως γεννήτρια. Εδώ υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις από 48 πειράματα.

Η εξέταση των μοντέλων πραγματοποιείται σε οκτώ διαφορετικές τοπολογίες, ώστε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα τους κάτω από ένα πλήθος διαφορετικών συνθηκών. Τα πειράματα που διεξάχθηκαν σε κάθε μέτρηση περιλαμβάνουν δυναμικές αποκρίσεις τάσης, ενεργού και άεργου ισχύος. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι Τοπολογίες 1 και 2 απεικονίζουν τυπικά ΠΔΔ ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ οι Τοπολογίες 3,4,5,6,7 και 8 αναπαριστούν ενδεικτικές τοπολογίες σύγχρονων ΕΔΔ. Επιπλέον, η τάση λειτουργίας του

δικτύου μεταβάλλεται από τα 360 V (0.9 p.u) έως 440 V (1.1 p.u) και οι διαφορετικές βηματικές διαταραχές τάσης που πραγματοποιούνται κυμαίνονται από -0.1 έως 0.1 p.u. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αποτελέσματα από το πειραματικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας, με την παρουσίαση αποτελεσμάτων μέσω γραφικών παραστάσεων μοντέλων Hammerstein-Wiener από ορισμένες μετρήσεις κάθε τοπολογίας και λίγα λόγια για το μέσο όρο fit, δηλαδή το μέσο όρο του ποσοστού σύγκρισης της μέτρησης του μοντέλου με την πραγματική μέτρηση.

Κεφάλαιο 4

Επικύρωση Προτεινόμενων Μοντέλων

Στα πλαίσια αυτού το κεφαλαίου θα παρουσιαστούν αποτελέσματα από το πειραματικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας τα οποία προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου του Κεφαλαίου 2 στις μετρήσεις του Κεφαλαίου 3. Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν ενδεικτικά αποτελέσματα για συγκεκριμένες (τυχαίες) διαταραχές ανά Τοπολογία. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στη μοντελοποίηση της ενεργού ισχύος και της άεργου ισχύος για μια τυχαία διαταραχή ανά Τοπολογία. Για κάθε μοντέλο, θα παρουσιαστούν γραφικές παραστάσεις, ώστε να καταδειχτεί η ικανότητα του για τη μοντελοποίηση της ενεργού και της άεργου ισχύος και επίσης θα δοθούν οι παράμετροι του. Με τον όρο παράμετροι, αναφερόμαστε στο βαθμό των πολωνύμων του αριθμητή και του παρονομαστή της γραμμικής συνάρτησης μεταφοράς (nb, nf) και η καθυστέρηση (nk) και οι μεταβλητές a και b που αφορούν τον παρονομαστή και αριθμητή αντίστοιχα, και ο αριθμός των σημείων καμπής (*breakpoints*) που επιλέχθηκαν στην είσοδο και έξοδο του μοντέλου.

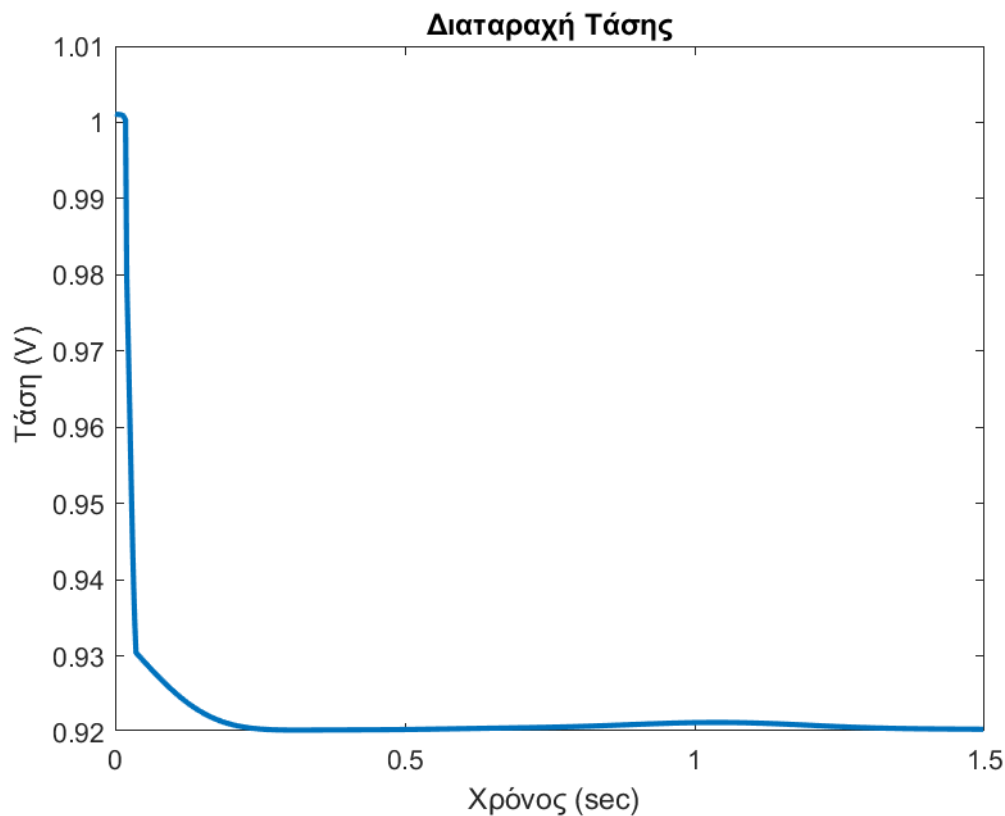
Επομένως το παρόν κεφάλαιο οργανώνεται ως εξής: στο υποκεφάλαιο 4.1 παρουσιάζονται τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν για τυχαίες μετρήσεις κάθε Τοπολογίας. Επίσης, παρουσιάζονται οι παράμετροι των μοντέλων ανά μέτρηση, και αξιολογείται η ικανότητα τους να προσομοιώνουν με ακρίβεια τις πραγματικές αποκρίσεις ενεργού και άεργου ισχύος με τη βοήθεια μετρικών σφάλματος. Ο τύπος του μετρικού σφάλματος είναι: $\text{μετρικό σφάλμα} = 100 * (1 - \frac{|Y_{measured} - Y_{model}|}{|Y_{measured} - Y_{measured}|})$, όπου το $Y_{measured}$ είναι η πραγματική απόκριση ισχύος, $\overline{Y_{measured}}$ ο μέσος όρος της πραγματικής απόκρισης και Y_{model} η μοντελοποιημένη απόκριση ισχύος. Στο υποκεφάλαιο 4.2 θα παρουσιαστούν οι μέσοι όροι των μετρικών σφάλματος για τη μοντελοποίηση ενεργού και άεργου ισχύος σε κάθε Τοπολογία.

4.1 Γραφικές Παραστάσεις Παραγόμενων Μοντέλων Hammerstein-Wiener

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις για μία τυχαία μέτρηση από κάθε Τοπολογία. Για κάθε μέτρηση θα παρουσιάζονται δύο γραφικές παραστάσεις. Μία για την ενεργό ισχύ και μία για την άεργο ισχύ. Επιπλέον καταγράφονται

για κάθε μοντέλο Hammerstein-Wiener οι τιμές των μεταβλητών nf , nb , nk , a , b και τα breakpoints που απαιτούνται στις συναρτήσεις εισόδου και εξόδου.

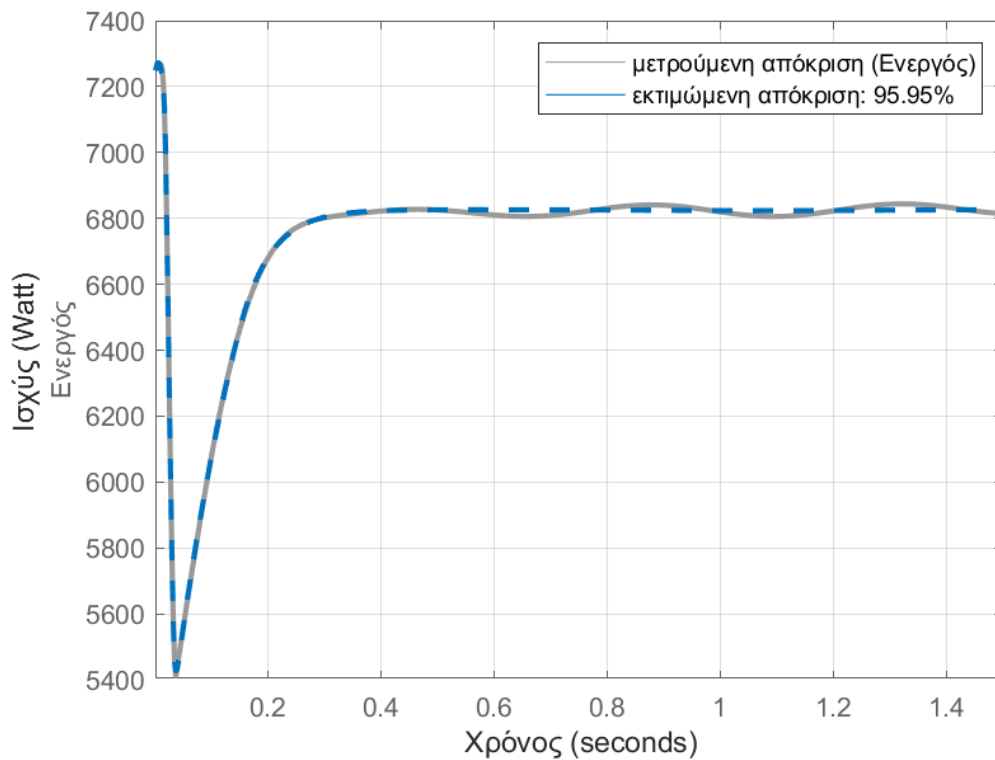
Ξεκινώντας με την Τοπολογία 1, στην Εικόνα 4.1 φαίνεται η δυναμική απόκριση της τάσης σε μια ενδεικτική διαταραχή. Αυτή η δυναμική απόκριση της τάσης αποτελεί είσοδο για τα μοντέλα αυτής της περίπτωσης. Στην Εικόνα 4.2 φαίνεται η μοντελοποίηση της ενεργού ισχύος μαζί με το αντίστοιχο σφάλμα για την συγκεκριμένη ενδεικτική διαταραχή, ενώ η μοντελοποίηση της άεργου ισχύος φαίνεται στην Εικόνα 4.3. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι παράμετροι των εξαγόμενων μοντέλων.



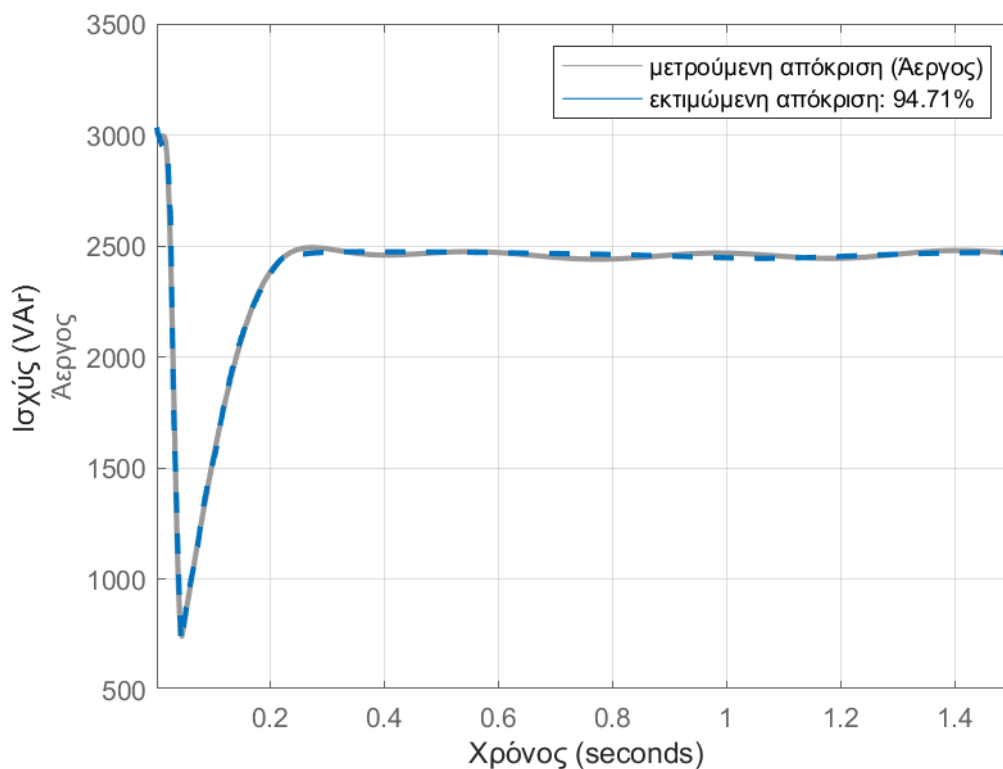
Εικόνα 4.1: Ενδεικτική Διαταραχή Τάσης για την Τοπολογία 1.

Πίνακας 4.1: Παράμετροι Μοντέλων ενδεικτικής διαταραχής τάσης της Τοπολογίας 1.

	nb	nf	nk	$breakpoints$	a	b
Ενεργός	1	2	1	8	$a_0 = 1$ $a_1 = -1.3687$ $a_2 = 0.3906$	$b_0 = 0$ $b_1 = 1$
Άεργος	1	2	1	4	$a_0 = 1$ $a_1 = 0.0647$ $a_2 = -0.9056$	$b_0 = 0$ $b_1 = 1$

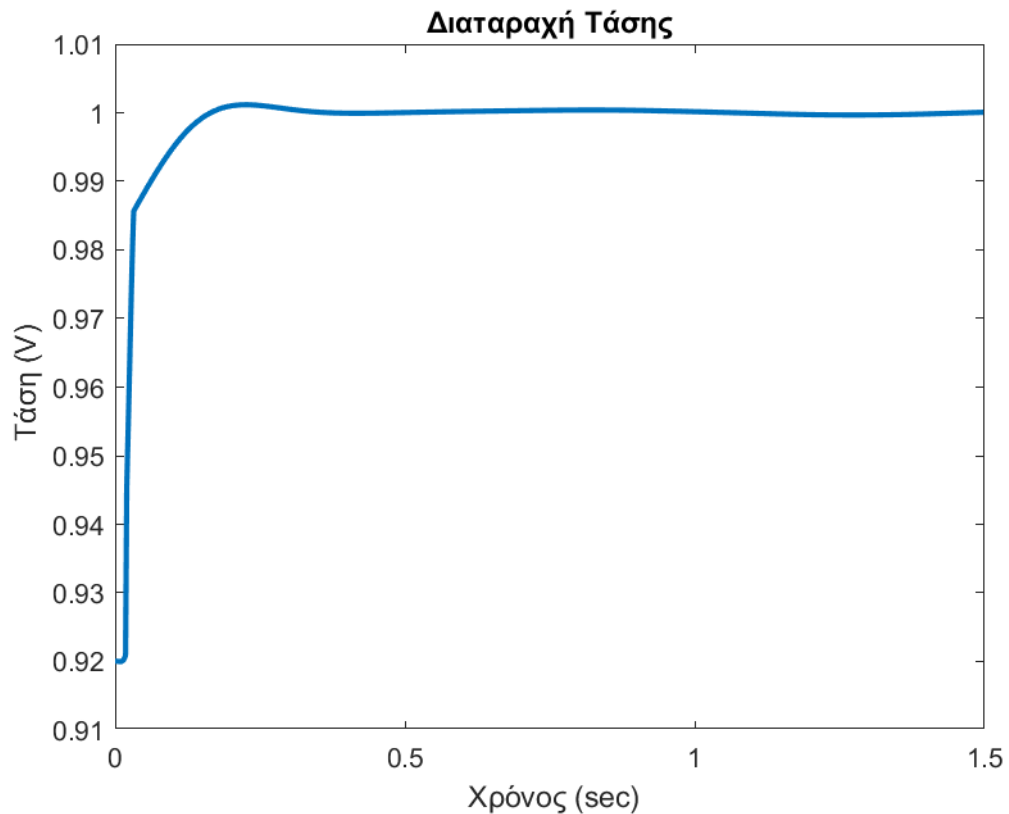


Εικόνα 4.2: Μοντελοποίηση Ενεργού Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 1.



Εικόνα 4.3: Μοντελοποίηση Άεργου Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 1.

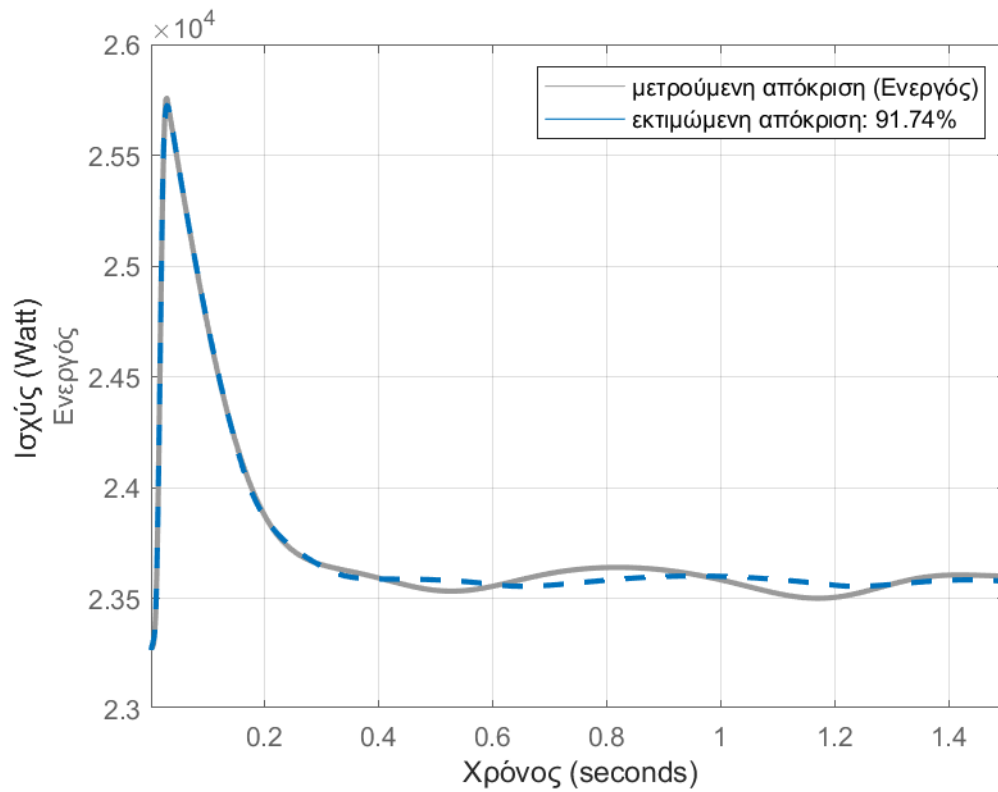
Για την Τοπολογία 2, στην Εικόνα 4.4 φαίνεται η δυναμική απόκριση της τάσης σε μια ενδεικτική διαταραχή. Αυτή η δυναμική απόκριση της τάσης αποτελεί είσοδο για τα μοντέλα αυτής της περίπτωσης. Στην Εικόνα 4.5 φαίνεται η μοντελοποίηση της ενεργού ισχύος μαζί με το αντίστοιχο σφάλμα για την συγκεκριμένη ενδεικτική διαταραχή, ενώ η μοντελοποίηση της άεργου ισχύος φαίνεται στην Εικόνα 4.6. Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι παράμετροι των εξαγόμενων μοντέλων.



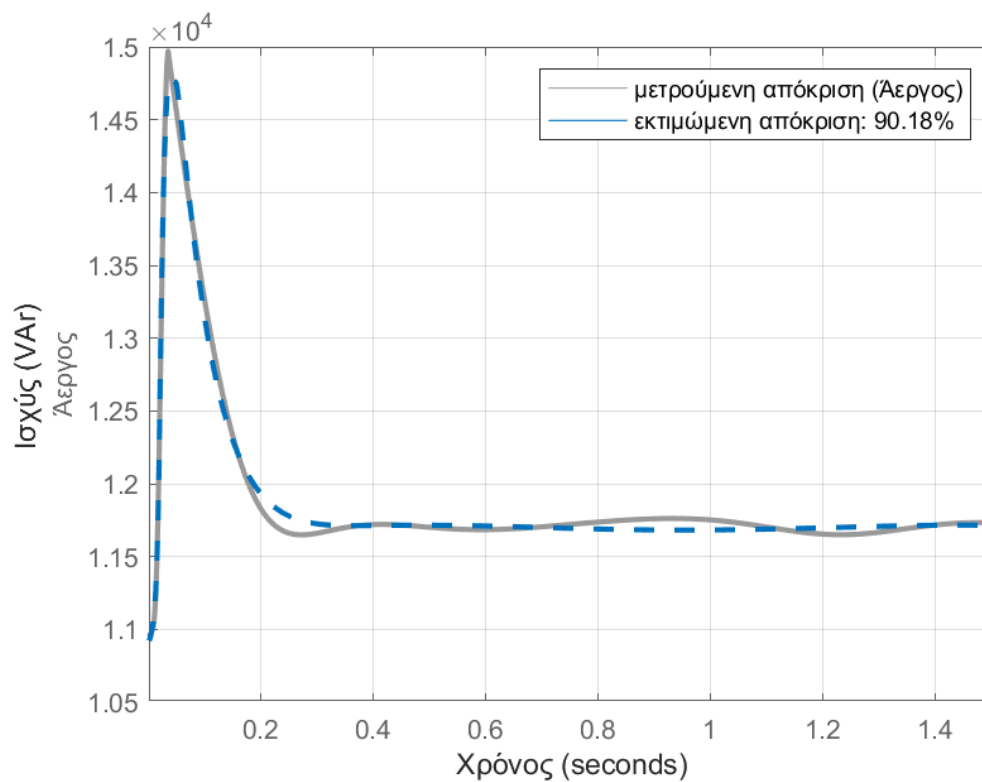
Εικόνα 4.4: Ενδεικτική Διαταραχή Τάσης για την Τοπολογία 2.

Πίνακας 4.2: Παράμετροι Μοντέλων ενδεικτικής διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 2.

	nb	nf	nk	$breakpoints$	a	b
Ενεργός	1	2	1	7	$a_0 = 1$ $a_1 = -1.4663$ $a_2 = 0.4813$	$b_0 = 0$ $b_1 = 1$
Άεργος	1	2	1	4	$a_0 = 1$ $a_1 = -1.8050$ $a_2 = 0.8109$	$b_0 = 0$ $b_1 = 1$

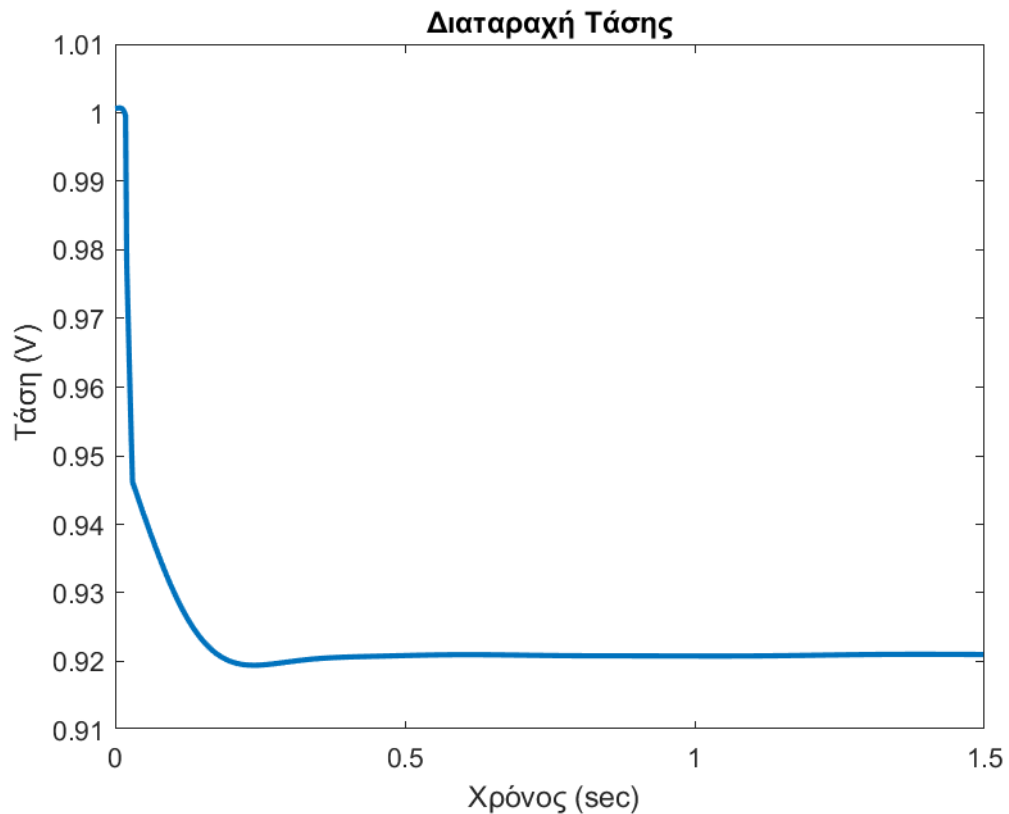


Εικόνα 4.5: Μοντελοποίηση Ενεργού Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 2.



Εικόνα 4.6: Μοντελοποίηση Άεργου Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 2

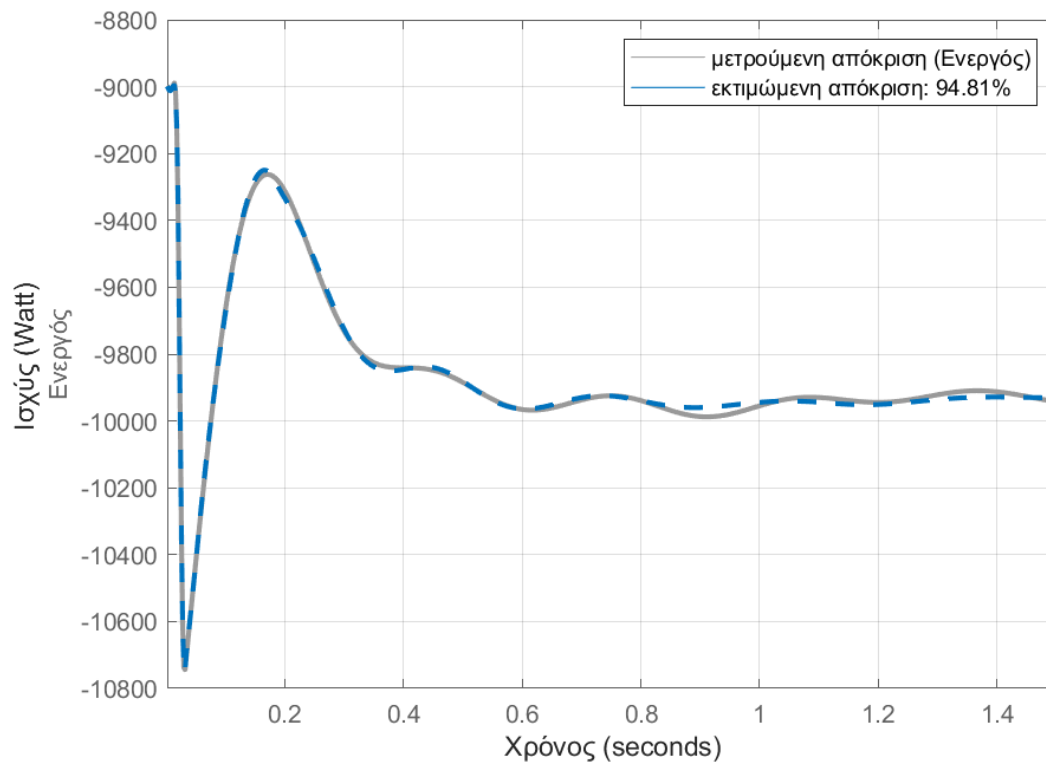
Για την Τοπολογία 3, στην Εικόνα 4.7 φαίνεται η δυναμική απόκριση της τάσης σε μια ενδεικτική διαταραχή. Αυτή η δυναμική απόκριση της τάσης αποτελεί είσοδο για τα μοντέλα αυτής της περίπτωσης. Στην Εικόνα 4.8 φαίνεται η μοντελοποίηση της ενεργού ισχύος μαζί με το αντίστοιχο σφάλμα για την συγκεκριμένη ενδεικτική διαταραχή, ενώ η μοντελοποίηση της άεργου ισχύος φαίνεται στην Εικόνα 4.9. Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι παράμετροι των εξαγόμενων μοντέλων.



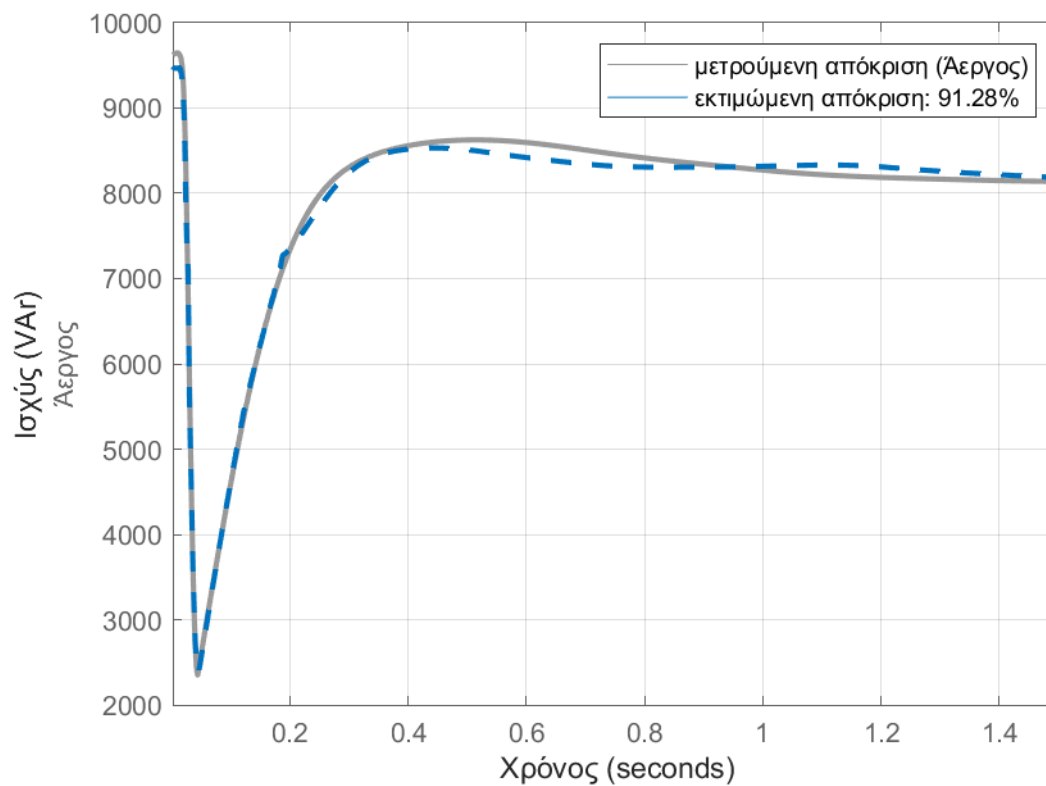
Εικόνα 4.7: Ενδεικτική Διαταραχή Τάσης για την Τοπολογία 3.

Πίνακας 4.3: Παράμετροι Μοντέλων ενδεικτικής διαταραχής τάσης της Τοπολογίας 3.

	nb	nf	nk	$breakpoints$	a	b
Ενεργός	3	4	1	7	$a_0 = 1$ $a_1 = -2.5159$ $a_2 = 1.6270$ $a_3 = 0.2976$ $a_4 = -0.4086$	$b_0 = 0$ $b_1 = -0.5112$ $b_2 = 1$ $b_3 = -0.4902$
Άεργος	1	2	1	9	$a_0 = 1$ $a_1 = 0.0041$ $a_2 = -0.9945$	$b_0 = 0$ $b_1 = 1$

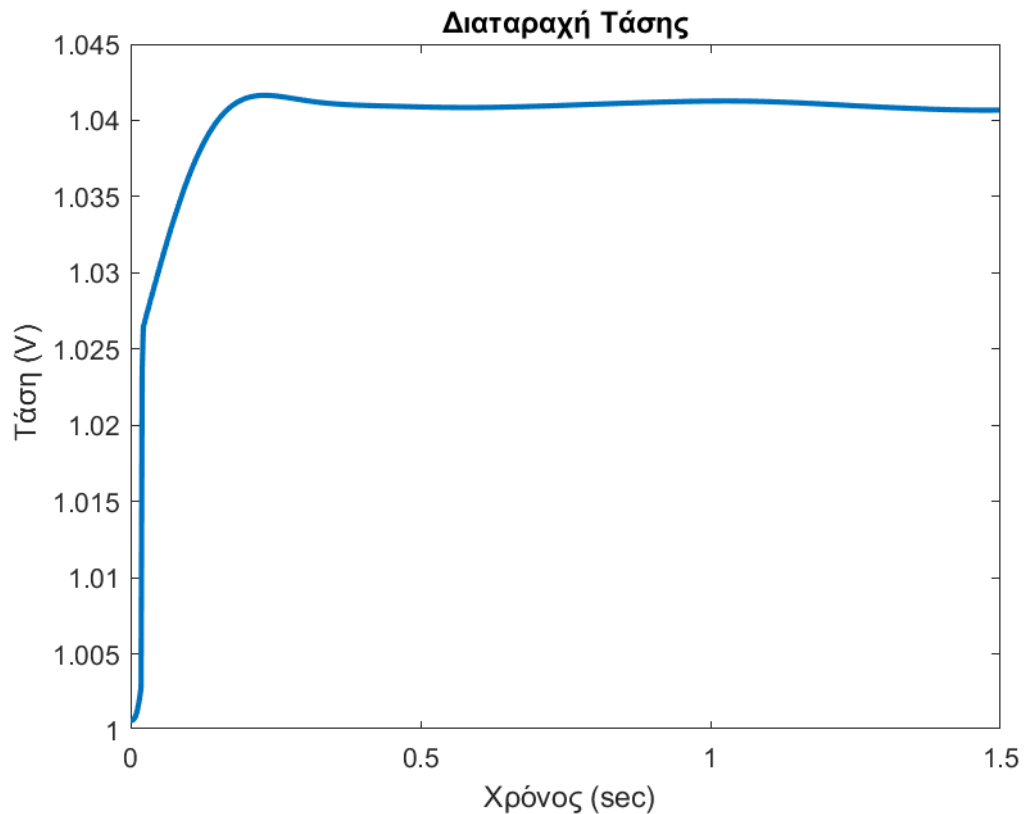


Εικόνα 4.8: Μοντελοποίηση Ενεργού Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 3.



Εικόνα 4.9: Μοντελοποίηση Άεργου Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 3.

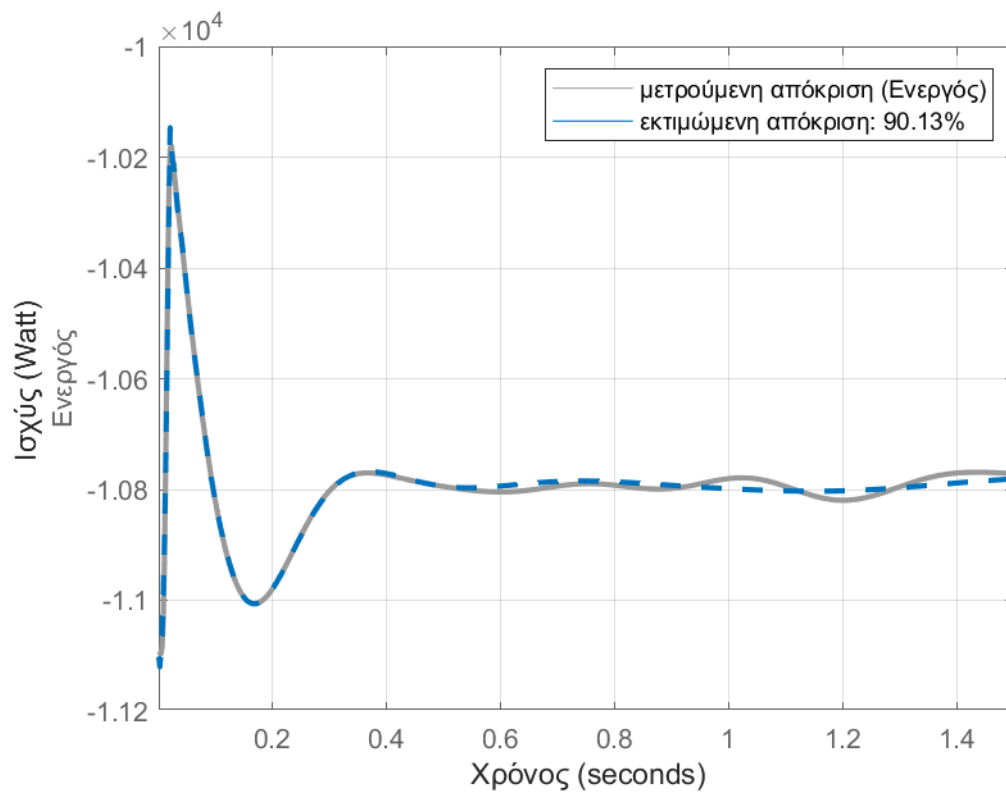
Συνεχίζοντας στην Τοπολογία 4, στην Εικόνα 4.10 φαίνεται η δυναμική απόκριση της τάσης σε μια ενδεικτική διαταραχή. Αυτή η δυναμική απόκριση της τάσης αποτελεί είσοδο για τα μοντέλα αυτής της περίπτωσης. Στην Εικόνα 4.11 φαίνεται η μοντελοποίηση της ενεργού ισχύος μαζί με το αντίστοιχο σφάλμα για την συγκεκριμένη ενδεικτική διαταραχή, ενώ η μοντελοποίηση της άεργου ισχύος φαίνεται στην Εικόνα 4.12. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι παράμετροι των εξαγόμενων μοντέλων.



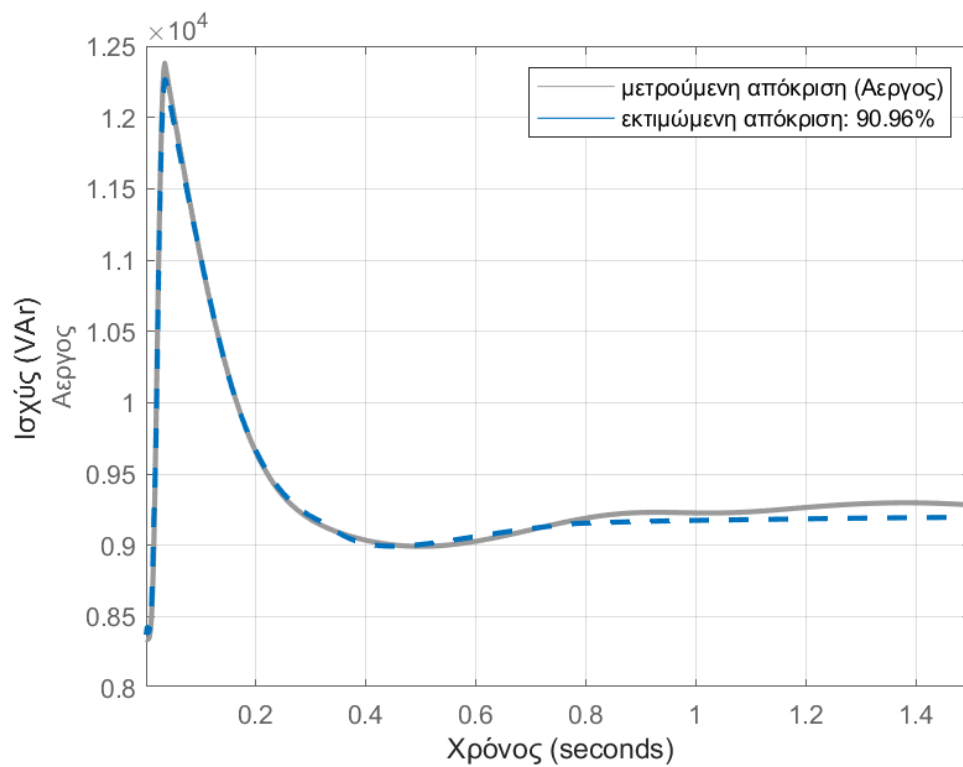
Εικόνα 4.10: Ενδεικτική Διαταραχή Τάσης για την Τοπολογία 4.

Πίνακας 4.4: Παράμετροι Μοντέλων ενδεικτικής διαταραχής τάσης της Τοπολογίας 4.

	nb	nf	nk	$breakpoints$	a	b
Ενεργός	4	5	1	16	$a_0 = 1$ $a_1 = -3.3485$ $a_2 = 3.7670$ $a_3 = -1.1889$ $a_4 = -0.5287$ $a_5 = 0.2990$	$b_0 = 0$ $b_1 = -2.5487$ $b_2 = 1$ $b_3 = 0.6583$ $b_4 = -0.6940$
Άεργος	2	3	1	11	$a_0 = 1$ $a_1 = -1.5908$ $a_2 = 0.2207$ $a_3 = 0.3703$	$b_0 = 0$ $b_1 = 1$ $b_2 = -0.9961$

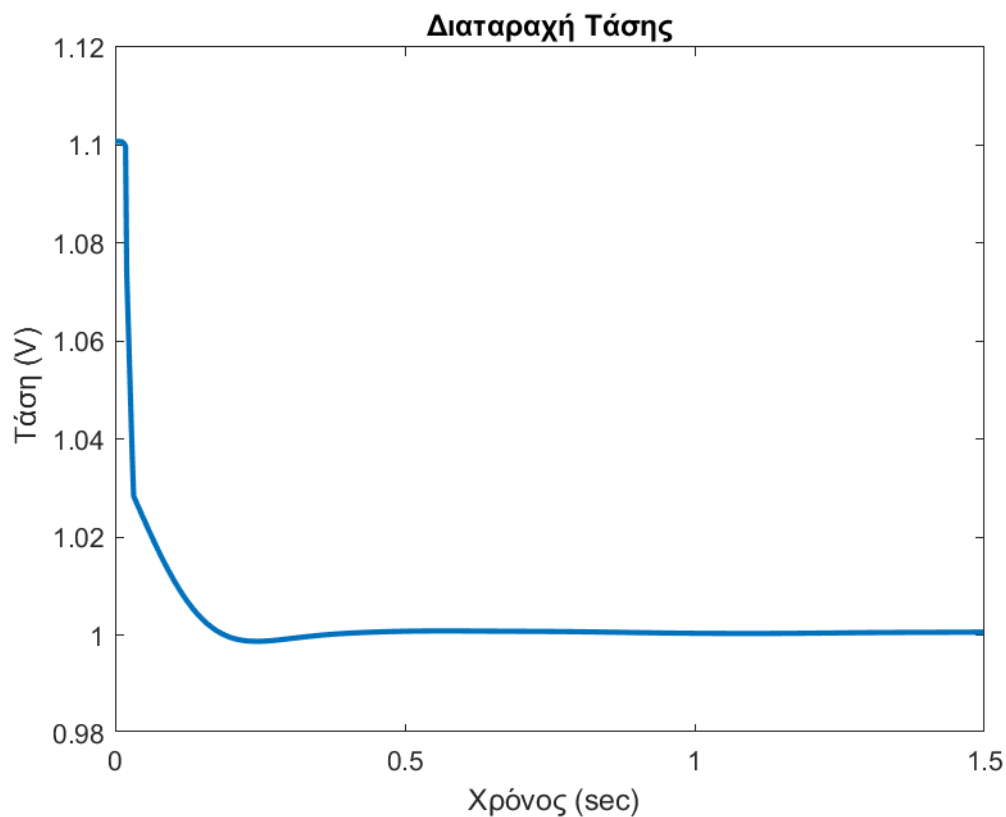


Εικόνα 4.11: Μοντελοποίηση Ενεργού Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 4.



Εικόνα 4.12: Μοντελοποίηση Άεργου Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 4.

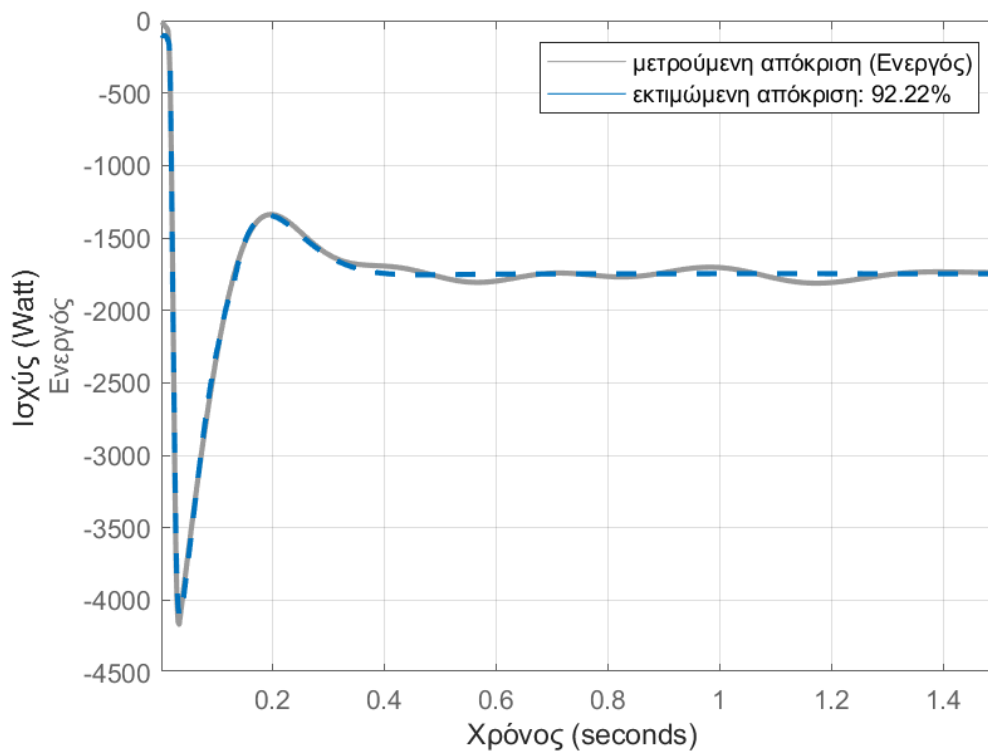
Όσον αφορά την Τοπολογία 5, στην Εικόνα 4.13 φαίνεται η δυναμική απόκριση της τάσης σε μια ενδεικτική διαταραχή. Αυτή η δυναμική απόκριση της τάσης αποτελεί είσοδο για τα μοντέλα αυτής της περίπτωσης. Στην Εικόνα 4.14 φαίνεται η μοντελοποίηση της ενεργού ισχύος μαζί με το αντίστοιχο σφάλμα για την συγκεκριμένη ενδεικτική διαταραχή, ενώ η μοντελοποίηση της άεργου ισχύος φαίνεται στην Εικόνα 4.15. Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι παράμετροι των εξαγόμενων μοντέλων.



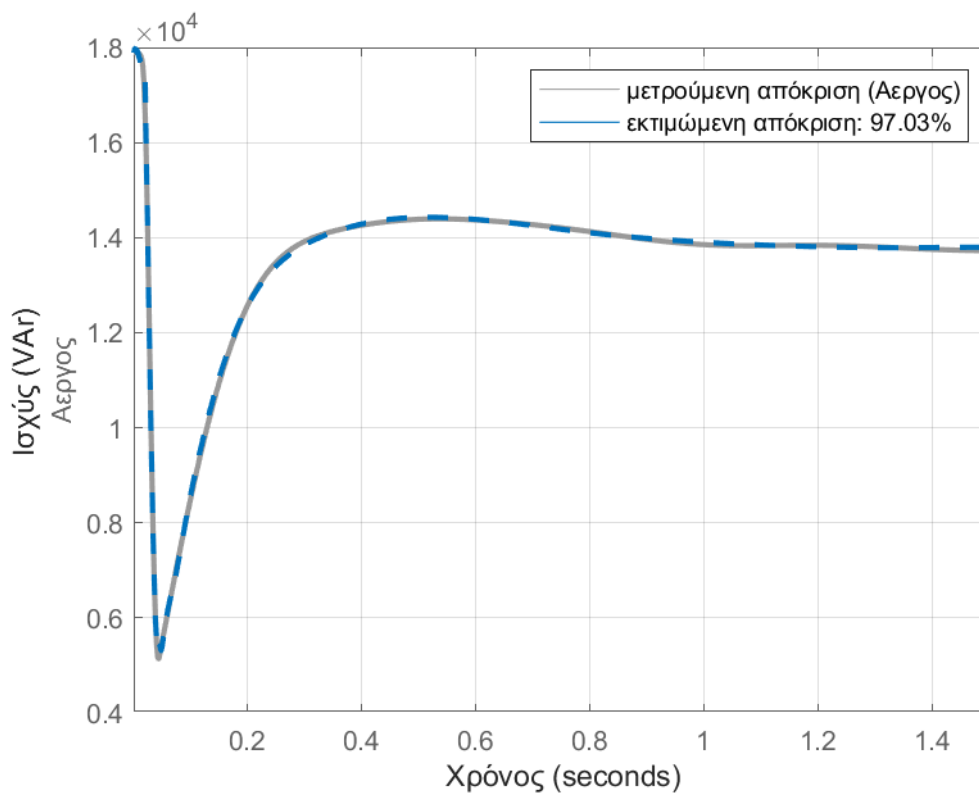
Εικόνα 4.13: Ενδεικτική Διαταραχή Τάσης για την Τοπολογία 5.

Πίνακας 4.5: Παράμετροι Μοντέλων ενδεικτικής διαταραχής τάσης της Τοπολογίας 5.

	nb	nf	nk	$breakpoints$	a	b
Ενεργός	3	4	1	3	$a_0 = 1$ $a_1 = -3.7929$ $a_2 = 5.4062$ $a_3 = -3.4325$ $a_4 = 0.8192$	$b_0 = 0$ $b_1 = -0.4214$ $b_2 = 1$ $b_3 = -0.5761$
Άεργος	4	5	1	3	$a_0 = 1$ $a_1 = -2.7960$ $a_2 = 1.9909$ $a_3 = 0.9729$ $a_4 = -1.7310$ $a_5 = 0.5460$	$b_0 = 0$ $b_1 = -0.5579$ $b_2 = 1$ $b_3 = -0.3326$ $b_4 = -0.1095$

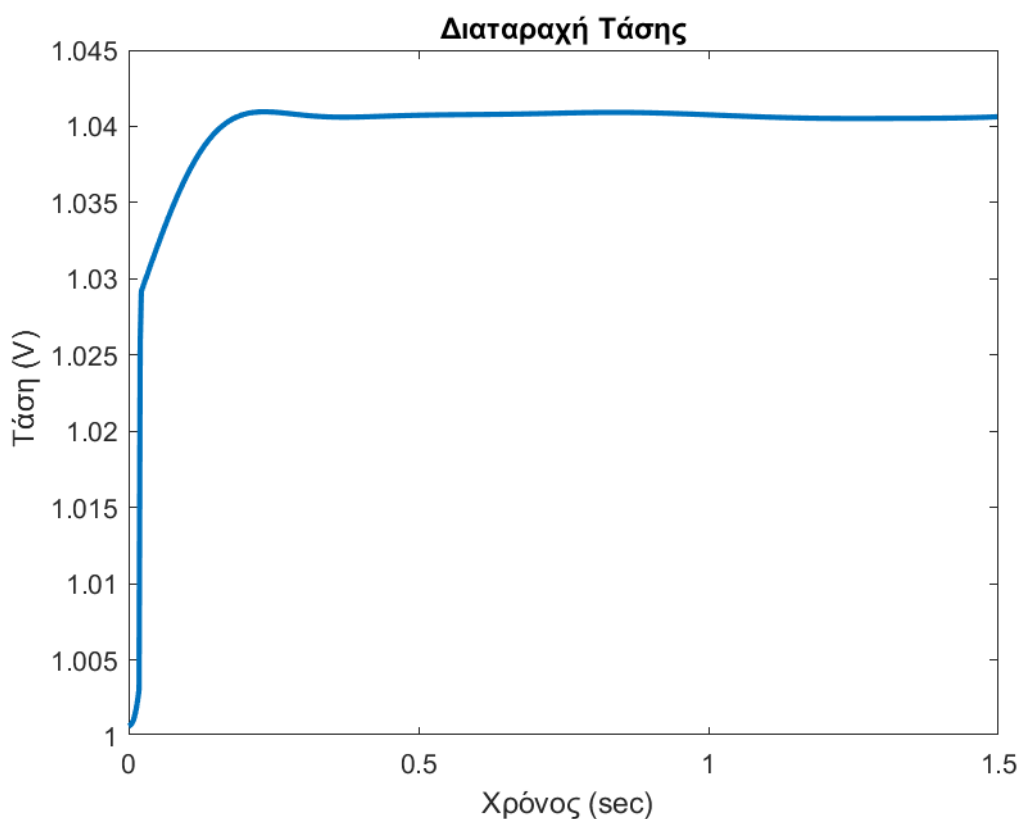


Εικόνα 4.14: Μοντελοποίηση Ενεργού Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 5.



Εικόνα 4.15: Μοντελοποίηση Άεργου Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 5.

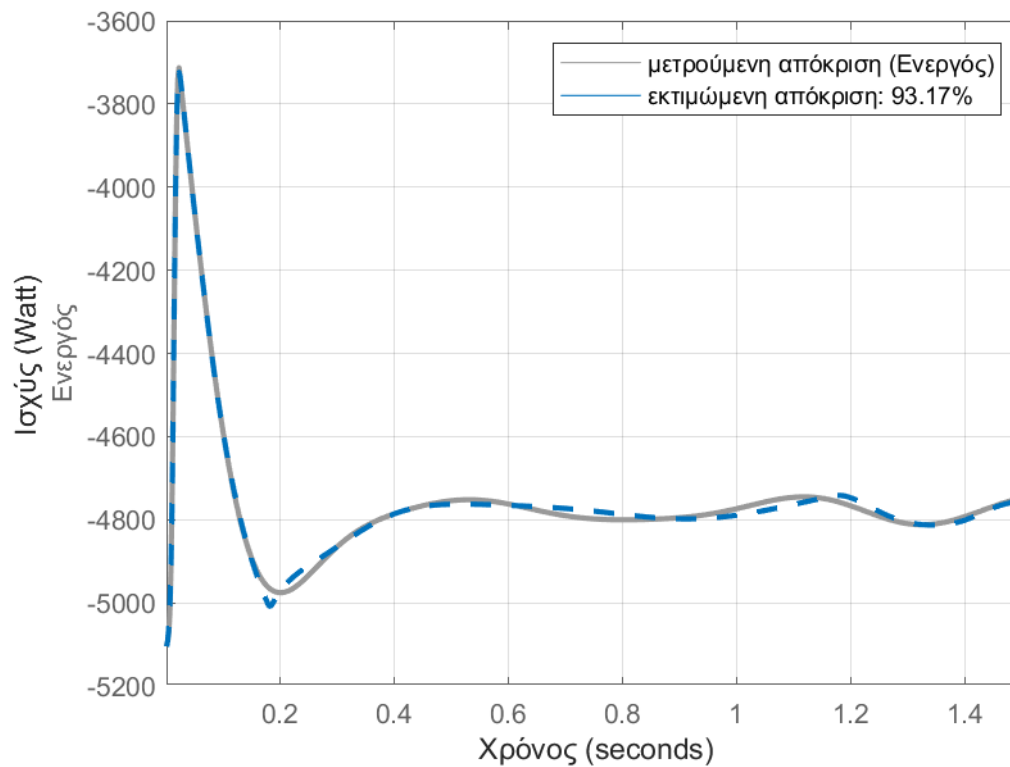
Αμέσως μετά στην Τοπολογία 6, στην Εικόνα 4.16 φαίνεται η δυναμική απόκριση της τάσης σε μια ενδεικτική διαταραχή. Αυτή η δυναμική απόκριση της τάσης αποτελεί είσοδο για τα μοντέλα αυτής της περίπτωσης. Στην Εικόνα 4.17 φαίνεται η μοντελοποίηση της ενεργού ισχύος μαζί με το αντίστοιχο σφάλμα για την συγκεκριμένη ενδεικτική διαταραχή, ενώ η μοντελοποίηση της άεργου ισχύος φαίνεται στην Εικόνα 4.18. Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται οι παράμετροι των εξαγόμενων μοντέλων.



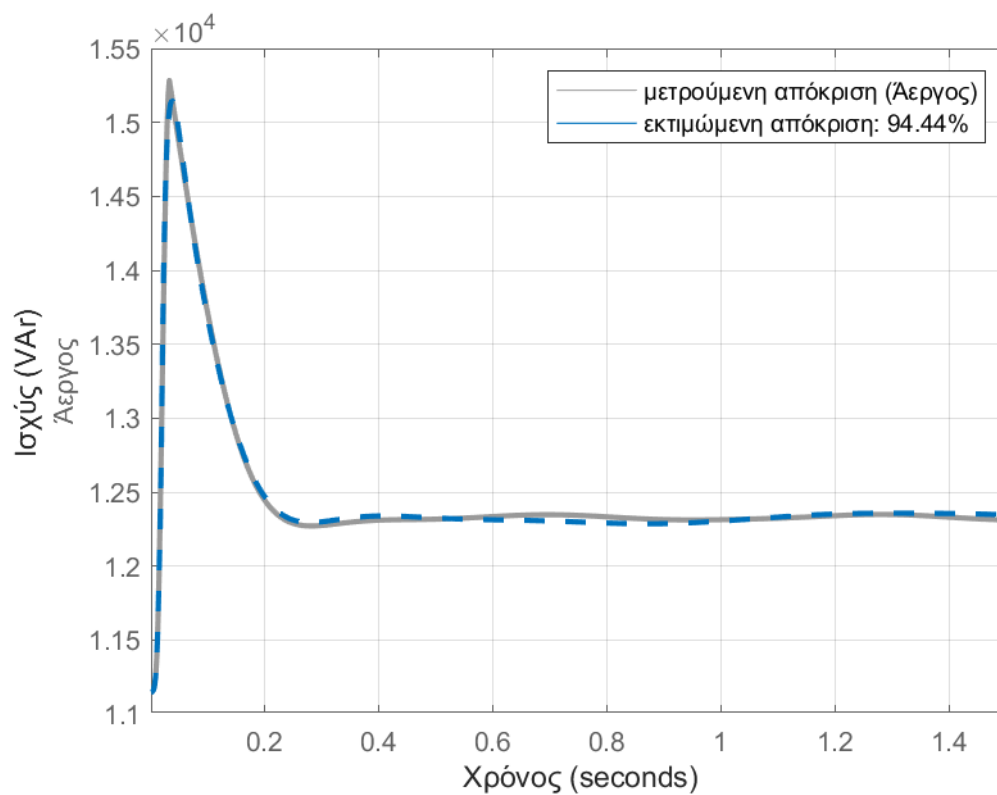
Εικόνα 4.16: Ενδεικτική Διαταραχή Τάσης για την Τοπολογία 6.

Πίνακας 4.6: Παράμετροι Μοντέλων ενδεικτικής διαταραχής τάσης της Τοπολογίας 6.

	nb	nf	nk	$breakpoints$	a	b
Ενεργός	1	2	1	14	$a_0 = 1$ $a_1 = -1.3177$ $a_2 = 0.3301$	$b_0 = 0$ $b_1 = 1$
Άεργος	1	2	1	2	$a_0 = 1$ $a_1 = -1.7080$ $a_2 = 0.7244$	$b_0 = 0$ $b_1 = 1$

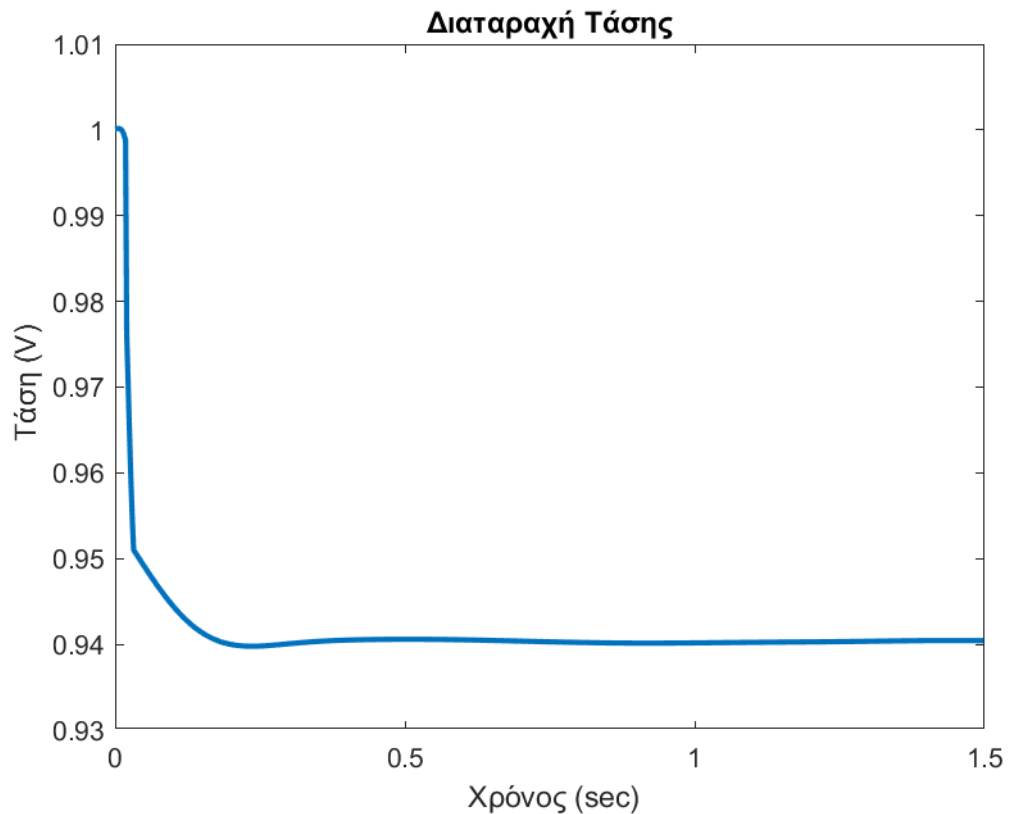


Εικόνα 4.17: Μοντελοποίηση Ενεργού Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 6.



Εικόνα 4.18: Μοντελοποίηση Άεργου Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 6.

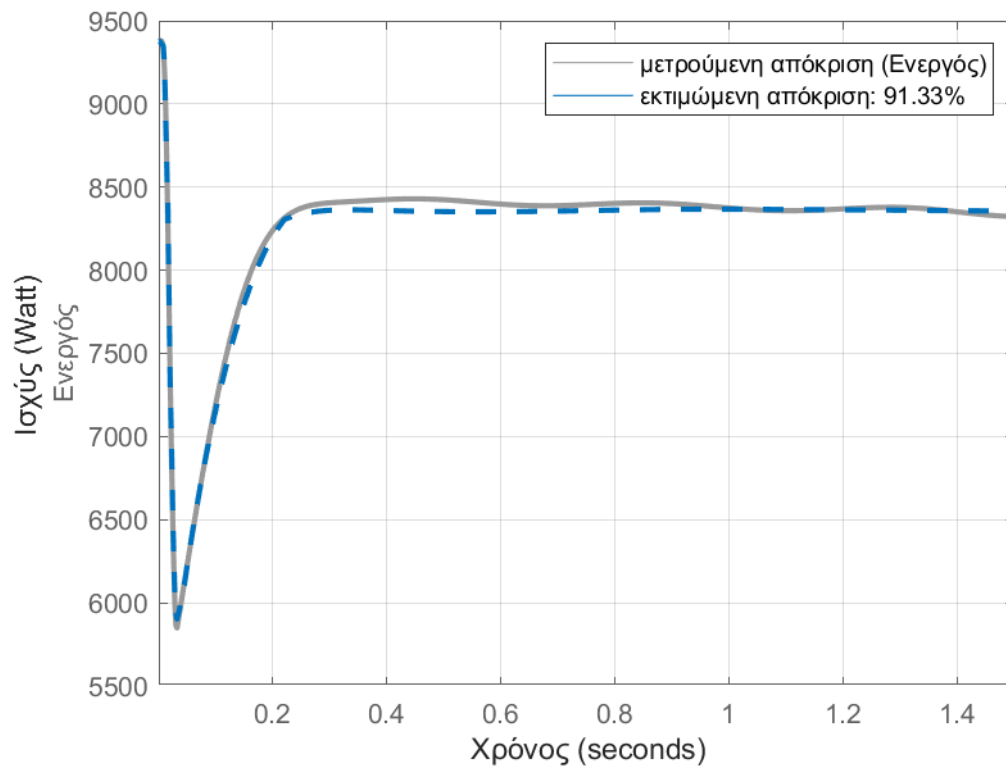
Προχωρώντας στην Τοπολογία 7, στην Εικόνα 4.19 φαίνεται η δυναμική απόκριση της τάσης σε μια ενδεικτική διαταραχή. Αυτή η δυναμική απόκριση της τάσης αποτελεί είσοδο για τα μοντέλα αυτής της περίπτωσης. Στην Εικόνα 4.20 φαίνεται η μοντελοποίηση της ενεργού ισχύος μαζί με το αντίστοιχο σφάλμα για την συγκεκριμένη ενδεικτική διαταραχή, ενώ η μοντελοποίηση της άεργου ισχύος φαίνεται στην Εικόνα 4.21. Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται οι παράμετροι των εξαγόμενων μοντέλων.



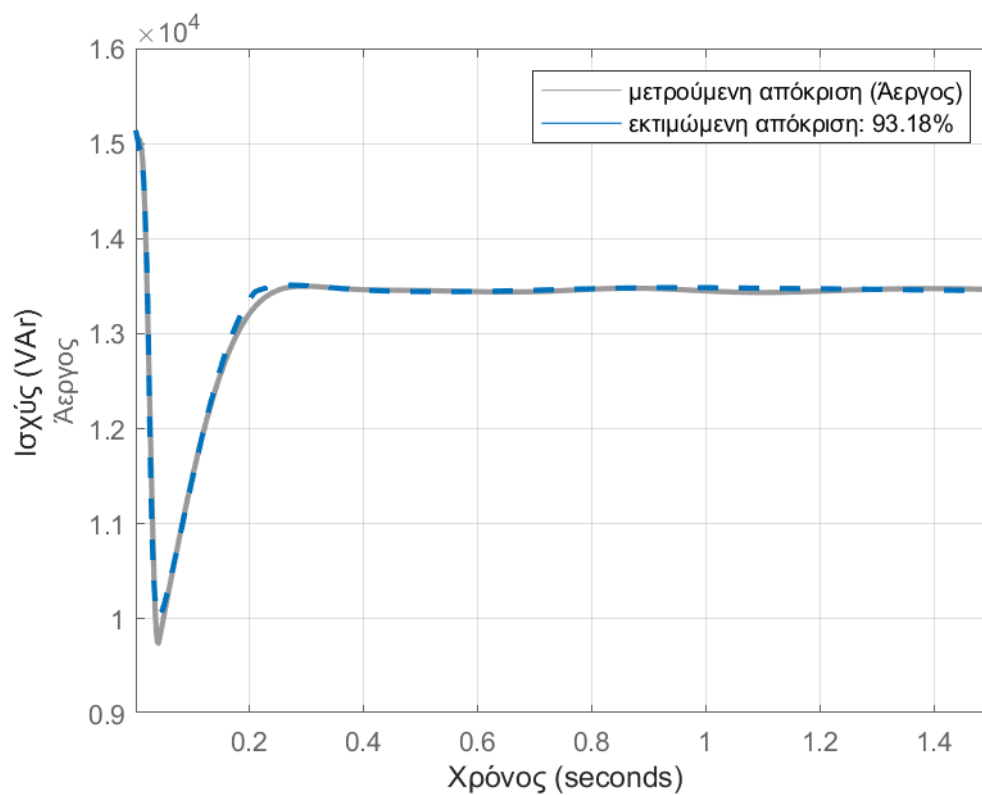
Εικόνα 4.19: Ενδεικτική Διαταραχή Τάσης για την Τοπολογία 7.

Πίνακας 4.7: Παράμετροι Μοντέλων ενδεικτικής διαταραχής τάσης της Τοπολογίας 7.

	nb	nf	nk	$breakpoints$	a	b
Ενεργός	1	2	1	4	$a_0 = 1$ $a_1 = -0.7323$ $a_2 = 0.2240$	$b_0 = 0$ $b_1 = 1$
Άεργος	1	2	1	1	$a_0 = 1$ $a_1 = -1.5970$ $a_2 = 0.6163$	$b_0 = 0$ $b_1 = 1$

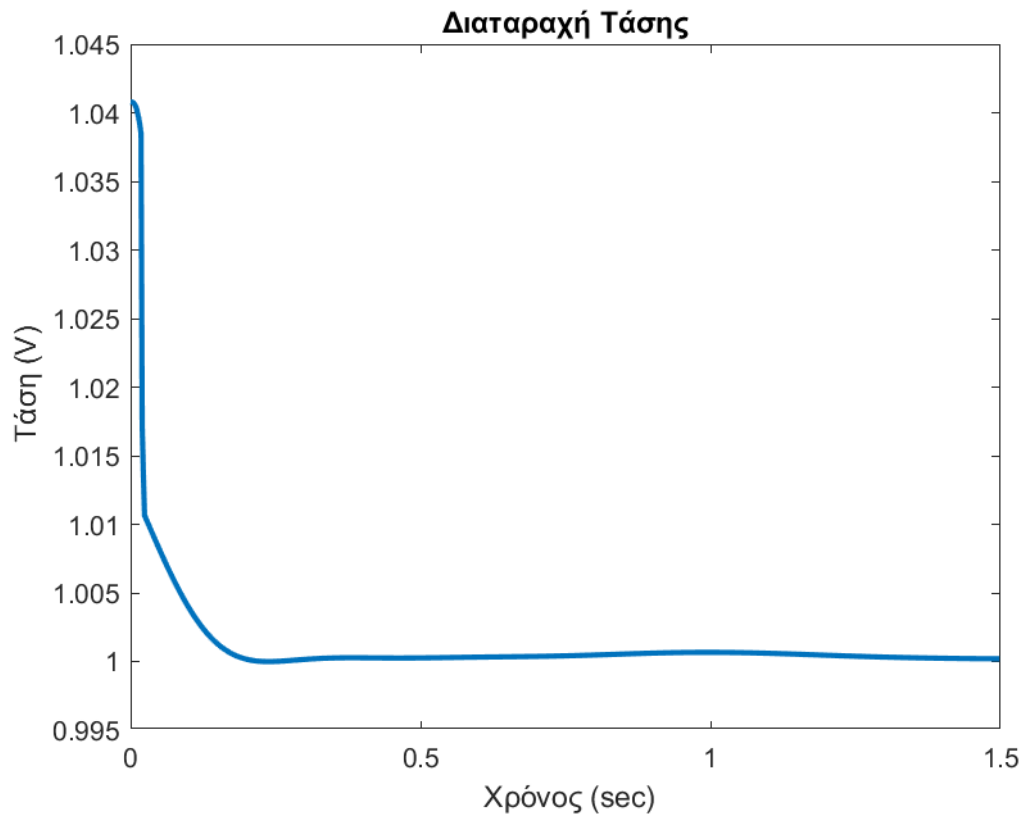


Εικόνα 4.20: Μοντελοποίηση Ενεργού Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 7.



Εικόνα 4.21: Μοντελοποίηση Άεργου Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 7.

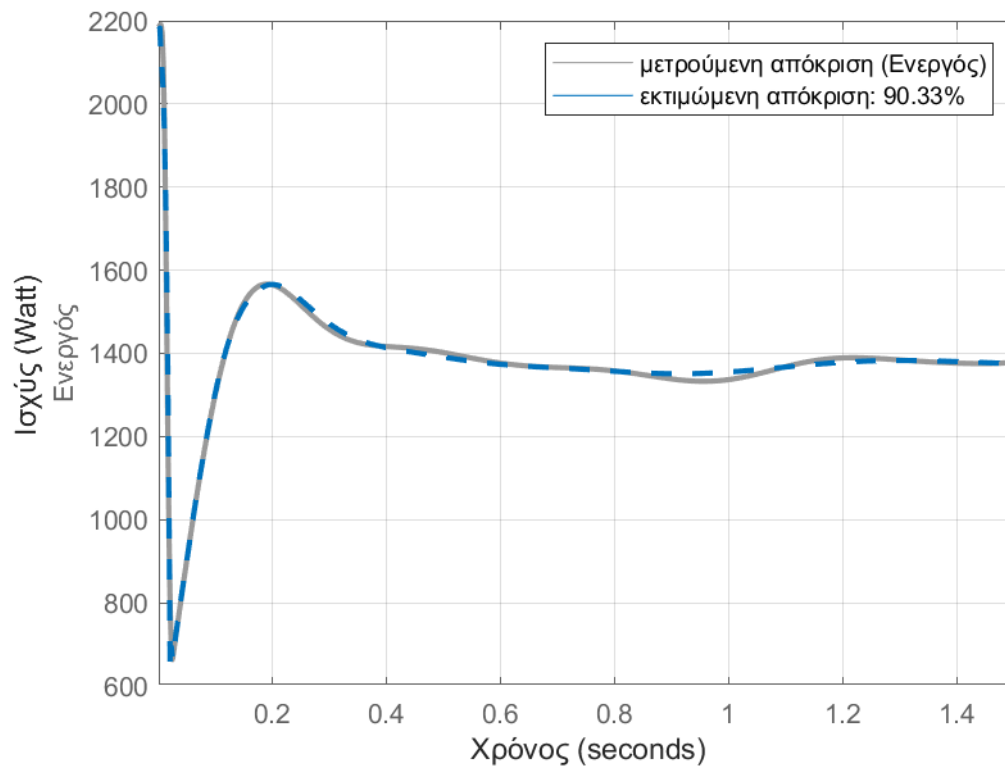
Τέλος στην Τοπολογία 8, στην Εικόνα 4.22 φαίνεται η δυναμική απόκριση της τάσης σε μια ενδεικτική διαταραχή. Αυτή η δυναμική απόκριση της τάσης αποτελεί είσοδο για τα μοντέλα αυτής της περίπτωσης. Στην Εικόνα 4.23 φαίνεται η μοντελοποίηση της ενεργού ισχύος μαζί με το αντίστοιχο σφάλμα για την συγκεκριμένη ενδεικτική διαταραχή, ενώ η μοντελοποίηση της άεργου ισχύος φαίνεται στην Εικόνα 4.24. Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται οι παράμετροι των εξαγόμενων μοντέλων.



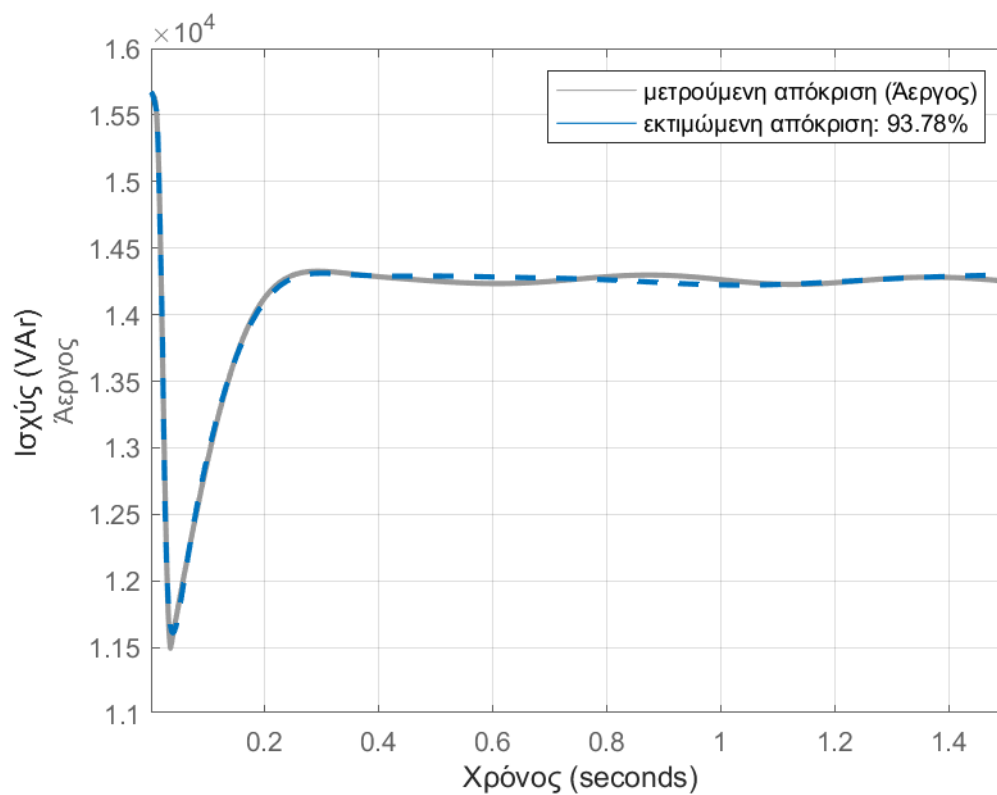
Εικόνα 4.22: Ενδεικτική Διαταραχή Τάσης για την Τοπολογία 8.

Πίνακας 4.8: Παράμετροι Μοντέλων ενδεικτικής διαταραχής τάσης της Τοπολογίας 8.

	nb	nf	nk	$breakpoints$	a	b
Ενεργός	2	3	1	13	$a_0 = 1$ $a_1 = -1.0066$ $a_2 = 0.1118$ $a_3 = -0.0926$	$b_0 = 0$ $b_1 = 1$ $b_2 = -1.0024$
Άεργος	1	2	1	2	$a_0 = 1$ $a_1 = -1.7093$ $a_2 = 0.7229$	$b_0 = 0$ $b_1 = 1$



Εικόνα 4.23: Μοντελοποίηση Ενεργού Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 8.



Εικόνα 4.24: Μοντελοποίηση Άεργου Ισχύος για την ενδεικτική διαταραχή τάσης της Τοπολογίας 8.

Έχοντας παραθέσει κάποια από τα μοντέλα που παράχθηκαν στο πειραματικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας, στο επόμενο υποκεφάλαιο θα αναφερθούμε πάνω στα ποσοστά μετρικών σφαλμάτων κάθε τοπολογίας.

4.2 Στατιστική Ανάλυση Μετρικού Σφάλματος

Αφού προηγουμένως αναδείχθηκαν κάποια από τα μοντέλα που παράχθηκαν και το ποσοστό μετρικών σφαλμάτων αυτών, εδώ θα παρουσιαστεί για κάθε Τοπολογία ο μέσος όρος μετρικών σφαλμάτων των μετρήσεων της. Πιο συγκεκριμένα, για τον μέσο όρο μετρικού σφάλματος ανά Τοπολογία όσον αφορά τα μοντέλα της ενεργού ισχύος (P), που παράχθηκαν για όλες τις μετρήσεις, τα αποτελέσματα βρίσκονται στον Πίνακα 4.9. Τα σχετικά αποτελέσματα καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα των Hammerstein-Wiener μοντέλων για τη μοντελοποίηση της ενεργού ισχύος.

Πίνακας 4.9: Μέσοι Όροι Μετρικών Σφαλμάτων Ενεργού Ισχύος.

Τοπολογία	1	2	3	4	5	6	7	8
Μέσος Όρος μετρικού σφάλματος	92.05	93.41	92.12	91.66	92.04	92.60	93.82	92.79
Πλήθος πειραμάτων	96	96	94	98	94	48	48	48

Όσον αφορά την άεργο ισχύ, οι μέσοι όροι μετρικών σφαλμάτων για κάθε Τοπολογία παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.10. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν την ικανότητα των Hammerstein-Wiener μοντέλων να περιγράφουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά της άεργου ισχύος.

Πίνακας 4.10: Μέσοι Όροι Μετρικών Σφαλμάτων Άεργου Ισχύος.

Τοπολογία	1	2	3	4	5	6	7	8
Μέσο fit	91.78	92.67	94.38	93.84	92.80	93.65	93.50	93.30
Πλήθος πειραμάτων	96	96	94	98	94	48	48	48

Επομένως με την παρουσίαση των προσομοιώσεων μίας μέτρησης ανά Τοπολογία, αλλά και του μέσου όρου μετρικού σφάλματος για κάθε Τοπολογία, βγαίνει το συμπέρασμα ότι τα μοντέλα Hammerstein-Wiener έχουν την ικανότητα να προσομοιώσουν αποτελεσματικά αποκρίσεις ενεργού και άεργου ισχύος παθητικών και ενεργών δικτύων διανομής κατά την εμφάνιση διαταραχών τάσης.

Κεφάλαιο 5

Στατιστική Ανάλυση Μεταβλητών και Εύρεση Μοντέλων κατά Ομαδοποίηση

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε και αποδείχτηκε, μέσω γραφικών παραστάσεων και μέσων όρων μετρικών σφαλμάτων ανά Τοπολογία, ότι τα μοντέλα Hammerstein-Wiener μπορούν με επαρκή ακρίβεια να προσομοιάσουν μεμονωμένες αποκρίσεις ενεργού και άεργου ισχύος ενός δικτύου διανομής. Έτσι σε αυτό το κεφάλαιο, ο σκοπός είναι να δοκιμαστεί η δομή των Hammerstein-Wiener στην εύρεση ενός μοντέλου για κάθε Τοπολογία. Χρησιμοποιείται δηλαδή το σύνολο των μετρήσεων για την εξαγωγή ενός μόνο μοντέλου.

Το κεφάλαιο χωρίζεται σε δύο μέρη. Το υποκεφάλαιο 5.1 περιλαμβάνει την στατιστική ανάλυση των παραμέτρων των μοντέλων Hammerstein-Wiener που αναπτύχθηκαν για κάθε μέτρηση ξεχωριστά. Επιπλέον, θα εξεταστεί αν η χρήση του μέσου όρου των παραμέτρων nb , nf , nk , *breakpoint*, a και b , όπως αυτός υπολογίστηκε από τις διαφορετικές μετρήσεις της Τοπολογίας, μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη αποτελεσματικών μοντέλων για την ανάλυση όλων των μετρήσεων κάθε τοπολογίας. Στο υποκεφάλαιο 5.2 εξετάζεται η εφαρμογή των Hammerstein-Wiener με στόχο την ανάπτυξη μοντέλων που επιτυγχάνουν μετρικό σφάλμα μεγαλύτερο ή ίσο του 90%. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται είτε σε όλα τα πειράματα συνολικά είτε σε επιμέρους ομάδες πειραμάτων, χρησιμοποιώντας ως είσοδο το κατάλληλο σύνολο δεδομένων *iddata*. Με τον τρόπο αυτό διερευνάται η δυνατότητα δημιουργίας μοντέλου μέσω ομαδοποίησης καθώς και τα κριτήρια που απαιτούνται για την επίτευξη ικανοποιητικής προσαρμογής.

5.1 Δημιουργία μοντέλων με χρήση των μέσο όρων των εκτιμώμενων παραμέτρων

Όπως αναφέρθηκε και πριν, στα πλαίσια του υποκεφάλαιου αυτού θα πραγματοποιηθεί στατιστική ανάλυση των εξαγόμενων παραμέτρων ανά Τοπολογία. Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιείται για τις παραμέτρους nb , nf , nk , τα *breakpoints* των μη-γραμμικών συναρτήσεων εισόδου και εξόδου και τις τιμές των a και b που αφορούν τους

συντελεστές των πολυωνύμων του παρονομαστή και του αριθμητή γραμμικής συνάρτησης μεταφοράς.

Για κάθε Τοπολογία παρουσιάζονται δύο πίνακες. Ένας που αφορά τις μεταβλητές των μοντέλων ενεργού ισχύος και ένας που αναφέρεται στις μεταβλητές των μοντέλων άεργου ισχύος. Σε κάθε πίνακα αποτυπώνεται η ελάχιστη (min) και μέγιστη τιμή (max), ο μέσος όρος (mean), η διάμεσος (median) και η τυπική απόκλιση (std) των μεταβλητών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το πλήθος των μεταβλητών a και b που προέκυψαν στην στατιστική ανάλυση κάθε τοπολογίας είναι ο συνολικός μέσος όρος του πλήθους των μεταβλητών a και b που προέκυψαν σε κάθε μέτρηση ανά τοπολογία, καθώς και ότι πάντα η μεταβλητή $a_0=1$ και $b_0=0$. Παρακάτω παρουσιάζονται οι Πίνακες 5.1, 5.3, 5.5, 5.7, 5.9, 5.11, 5.13 και 5.15 που αφορούν τις παραμέτρους της ενεργού ισχύος, καθώς και οι Πίνακες 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 5.10, 5.12, 5.14 και 5.16 που αφορούν τις παραμέτρους άεργου ισχύος αντίστοιχα.

Πίνακας 5.1: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 1 Ενεργός Ισχύς

	min	max	mean	median	std
nb	1	4	1.1354	1	0.4946
nf	2	5	2.1354	2	0.4946
nk	1	1	1	1	0
$breakpoints$	1	19	4.4063	3	3.2721
a_1, a_2	-3.8774, -0.9623	0.0377, 5.7835	-1.4653, 0.6057	-1.6094, 0.6247	-0.7121, 1.0930
b_1	-0.5005	1	0.9390	1	0.2943

Πίνακας 5.2: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 1 Άεργος Ισχύς

	Min	max	mean	median	Std
nb	1	6	1.1458	1	0.6485
nf	2	7	2.1458	2	0.6485
nk	1	1	1	1	0
$breakpoints$	1	19	5.0938	9	4.0081
a_1, a_2	-4.5821, -0.9570	0.7628, 8.3027	-1.6854, 0.8959	0.7093, 0.7343	-1.7152, 1.2045
b_1	-0.7483	1	0.9522	1	0.2691

Πίνακας 5.3: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 2 Ενεργός Ισχύς

	Min	max	mean	median	std
<i>nb</i>	1	3	1.0521	1	0.3033
<i>nf</i>	2	4	2.0521	2	0.3033
<i>nk</i>	1	1	1	1	0
<i>breakpoints</i>	2	20	4.1771	3	3.2799
<i>a₁, a₂</i>	-3.0792, -0.9746	0.0351, 3.2869	-1.1965, 0.2318	-1.4667, 0.4882	0.6383, 0.6733
<i>b₁</i>	-0.5013	1	0.9887	1	0.2155

Πίνακας 5.4: Στατιστικά Παραμέτρων Τοπολογίας 2 Άεργος Ισχύς

	Min	max	mean	median	std
<i>nb</i>	1	1	1	1	0
<i>nf</i>	2	2	2	2	0
<i>nk</i>	1	1	1	1	0
<i>breakpoints</i>	1	10	3.6458	3	2.0824
<i>a₁, a₂</i>	-1.9457, -0.9572	0.0351, 0.9556	-1.6072, 0.6233	-1.7401, 0.7517	0.3946, 0.3780
<i>b₁</i>	1	1	1	1	0

Πίνακας 5.5: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 3 Ενεργού Ισχύος

	Min	max	mean	median	std
<i>nb</i>	1	10	2.5638	2	1.7693
<i>nf</i>	2	11	3.5638	3	1.7693
<i>nk</i>	1	2	1.0106	1	0.1031
<i>breakpoints</i>	1	20	8.7340	9	5.3905
<i>a₁, a₂, a₃, a₄</i>	-5.4353, -0.9993, -18.0671, -2.5121	1.0171, 12.7480, 2.2039, 17.1085	-2.1197, 1.8774, -1.1330, 0.5678	-1.9436, 0.9263, -0.6827, 0.0124	1.3237, 2.9947, 3.3438, 2.4170
<i>b₁, b₂, b₃</i>	-2.5487, -2.9776, - 28.4290	1, 6.4452, 2.9554	0.3910, 0.2076, -0.3715	1, 1, -0.4887	0.8164, 1.1067, 2.9915

Πίνακας 5.6: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 3 Άεργου Ισχύος

	Min	max	mean	median	std
nb	1	4	1.3191	1	0.6912
nf	2	5	2.3191	2	0.6912
nk	1	1	1	1	0
$breakpoints$	2	20	7.8404	7	4.2333
a_1, a_2	-4.7618, -0.9945	0.0239, 9.0880	-1.7861, 0.9915	-1.9775, 0.9776	0.8659, 1.5354
b_1	-0.5388	1	0.8898	1	0.3908

Πίνακας 5.7: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 4 Ενεργού Ισχύος

	Min	max	mean	median	std
nb	1	16	2.4330	2	2.4954
nf	2	17	3.4330	3	2.4954
nk	1	10	1.2165	1	1.1386
$breakpoints$	1	20	8.7526	8	5.6200
a_1, a_2, a_3	-5.7126, -0.9993, -20.5047	0.4907, 14.3191, 2.4368	-1.9832, 1.5602, -0.8289	-1.9462, 0.9432, -0.3836	1.1709, 2.5698, 3.0050
b_1, b_2	-3.5845, -2.9776	1, 9.8205	0.4834, 0.0482	1, 0.3688	0.9013, 1.3013

Πίνακας 5.8: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 4 Άεργου Ισχύος

	Min	max	mean	median	std
nb	1	3	1.0408	1	0.2453
nf	2	4	2.0408	2	0.2453
nk	1	1	1	1	0
$breakpoints$	1	15	3.5204	3	2.6680
a_1, a_2	-2.5899, -0.9824	0.0176, 2.5119	-1.6317, 0.6564	-1.7261, 0.7375	0.4302, 0.4478
b_1	-0.5040	1	0.9847	1	0.1519

Πίνακας 5.9: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 5 Ενεργού Ισχύος

	Min	max	mean	median	std
nb	1	9	2.2234	2	1.2107
nf	2	10	3.2234	3	1.2107
nk	1	1	1	1	0
$breakpoints$	1	20	8.8191	8	5.7529
a_1, a_2, a_3	-5.4942, -0.9975, -16.0156	0.6405, 12.7556, 1.8815	-1.9601, 1.5211, -0.8018	-1.9463, 0.9321, -0.1590	1.2324, 2.6478, 2.6175
b_1, b_2	-1.8642, -1.7417	1, 5.0302	0.6089, -0.2029	1, -0.6540	0.6909, 0.9914

Πίνακας 5.10: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 5 Άεργου Ισχύος

	Min	max	mean	median	std
nb	1	4	1.2021	1	0.5201
nf	2	5	2.2021	2	0.5201
nk	1	1	1	1	0
$Breakpoints$	2	20	7.9574	7	5.1157
a_1, a_2	-2.9469, -0.9997	1.0189, 2.8946	-1.4647, 0.4761	-1.7346, 0.7428	0.7821, 0.8761
b_1	-2.0761	1	0.9134	1	0.4332

Πίνακας 5.11: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 6 Ενεργού Ισχύος

	Min	max	mean	median	std
nb	1	10	2.2292	2	1.5877
nf	2	11	3.2292	3	1.5877
nk	1	1	1	1	0
$breakpoints$	1	19	7.3542	6.5	4.8047
a_1, a_2, a_3	-5.7863, -0.8033, -23.5750	-0.5232, 15.0537, 0.8685	-2.0312, 1.6994, -1.1353	-1.7209, 0.8524, -0.1254	1.1120, 2.8898, 2.7781
b_1, b_2	-0.5080, -2.0785	1, 1.2880	0.7452, -0.3374	1, -0.7647	0.5451, 0.8179

Πίνακας 5.12: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 6 Άεργου Ισχύος

	Min	max	mean	median	std
nb	1	1	1	1	0
nf	2	2	2	2	0
nk	1	1	1	1	0
<i>Breakpoints</i>	1	17	3.2083	2	2.7596
a_1, a_2	-1.9467, -0.9564	0.0435, 0.9487	-1.4653, 0.5009	-1.7083, 0.7240	0.5669, 0.5239
b_1	1	1	1	1	0

Πίνακας 5.13: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 7 Ενεργού Ισχύος

	Min	max	mean	median	std
nb	1	2	1.0208	1	0.1443
nf	2	3	2.0208	2	0.1443
nk	1	1	1	1	0
<i>Breakpoints</i>	1	13	2.4792	2	2.1927
a_1, a_2	2.4507, -0.9294	0.0717, 1.9124	-1.2246, 0.2789	-1.4854, 0.5174	0.5750, 0.5701
b_1	1	1	1	1	0

Πίνακας 5.14: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 7 Άεργου Ισχύος

	Min	max	mean	median	std
nb	1	3	1.0417	1	0.2887
nf	2	4	2.0417	2	0.2887
nk	1	1	1	1	0
<i>Breakpoints</i>	1	17	2.8125	2	2.9654
a_1, a_2	-1.9421, -0.9450	0.0550, 0.9438	-1.6219, 0.6460	-1.6920, 0.7111	0.3247, 0.3065
b_1	-0.6209	1	0.9962	1	0.2340

Πίνακας 5.15: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 8 Ενεργού Ισχύος

	Min	max	mean	median	std
nb	1	7	2.1667	2	4.3546
nf	2	8	3.1667	3	1.2772
nk	1	1	1	1	0
$breakpoints$	1	19	7.8750	7	4.3546
a_1, a_2, a_3	-6.0964, -1.1129, -26.7916	0.1555, 16.6310, 0.9500	-1.8672, 1.4932, -1.2254	-1.9503, 0.9510, -0.0926	1.2328, 3.2392, 4.5592
b_1, b_2	-1.0121, -1.0024	1, 1.5504	0.6037, -0.0480	1, -0.6768	0.6581, 0.8196

Πίνακας 5.16: Στατιστικά παραμέτρων Τοπολογίας 8 Άεργου Ισχύος

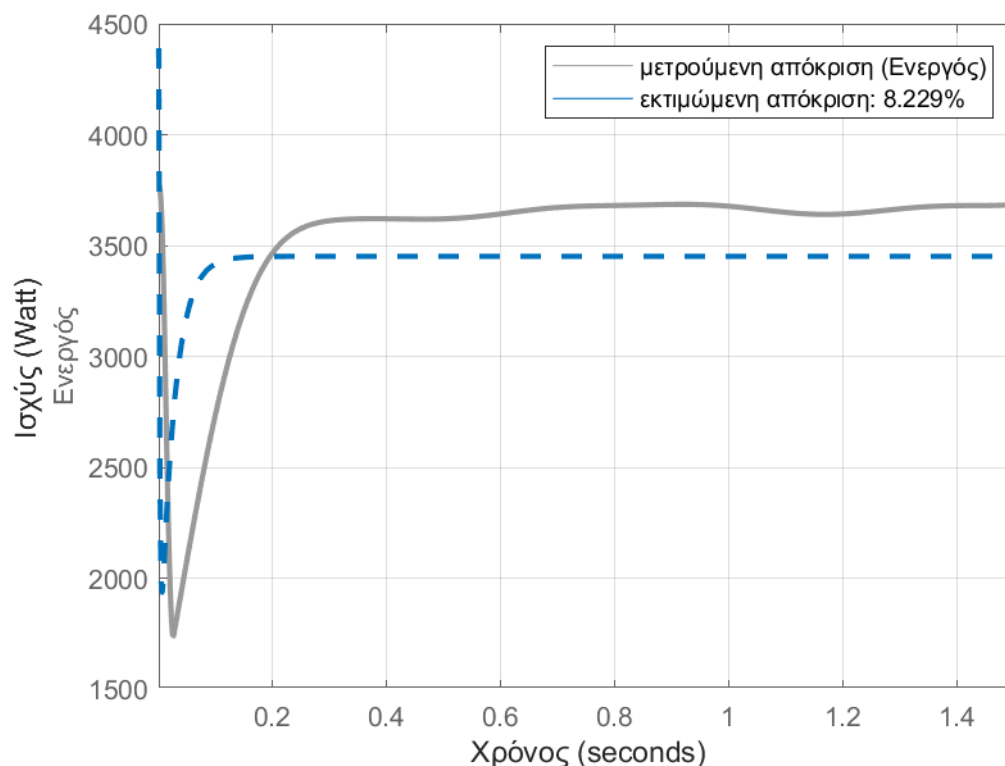
	Min	max	mean	median	std
nb	1	1	1	1	0
nf	2	2	2	2	0
nk	1	1	1	1	0
$Breakpoints$	1	14	3.5	3	2.6256
a_1, a_2	-1.9180, -0.6879	-0.2279, 0.9204	-1.6314, 0.6515	-1.7116, 0.7245	0.3102, 0.2946
b_1	1	1	1	1	0

Έχοντας παρουσιάσει την στατιστική ανάλυση των παραμέτρων nb , nf , nk , $breakpoints$ και a , b για όλες τις τοπολογίες, το επόμενο βήμα είναι να δημιουργηθεί ένα μοντέλο Hammerstein-Wiener για μια τυχαία Τοπολογία, χρησιμοποιώντας για παράμετρούς του μοντέλου αυτού τους μέσους όρους των παραμέτρων της αντίστοιχης τοπολογίας. Και αφού φτιαχτεί αυτό το μοντέλο, έπειτα να γίνουν δοκιμές πάνω στην ικανότητα του να προσομοιώσει με ακρίβεια τη δυναμική συμπεριφορά της ισχύος του δικτύου.

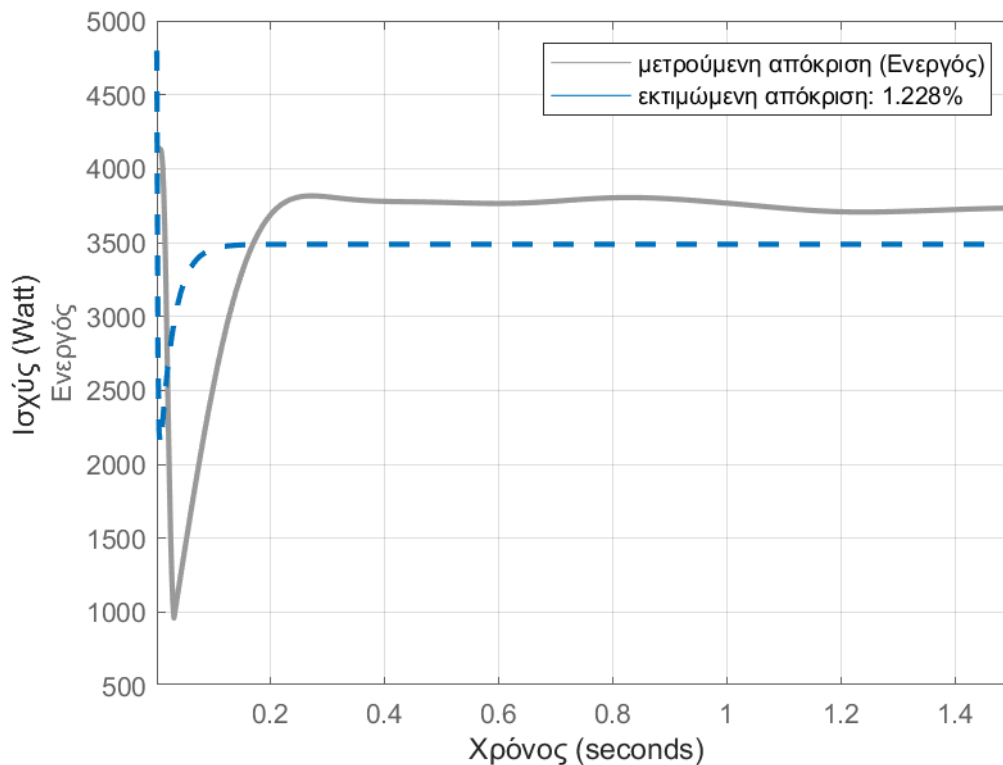
Η διαδικασία της ανάπτυξης ενός μοντέλου Hammerstein-Wiener, όπως αυτό περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, ξεκινάει με τον προσδιορισμό των δομικών μεταβλητών του μοντέλου και τα σημεία καμπής για την είσοδο και την έξοδο, ενώ παράλληλα ορίζονται οι παράμετροι του με βάση τους μέσους όρους που έχουν υπολογιστεί.

Στη συνέχεια, κατασκευάζεται το μοντέλο ακολουθώντας τη διαδικασία σύνδεσης του μπλοκ της γραμμικής συνάρτησης μεταφοράς με τα μπλοκ των μη-γραμμικών συναρτήσεων στην είσοδο και έξοδο. Τέλος το μοντέλο αξιολογείται ως προς την ικανότητα του να αναπαραστήσει τη πραγματική απόκριση της ενεργού ισχύος για κάθε μέτρηση της υπό εξέταση Τοπολογίας, ώστε να διαπιστωθεί ο βαθμός ακρίβειας της προσέγγισης.

Η ανάπτυξη γενικευμένων μοντέλων με τη χρήση τιμών για τις παραμέτρους των μοντέλων, δοκιμάστηκε στην Τοπολογία 7, χωρίς θετικά αποτελέσματα. Ενδεικτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.1 και 5.2, όπου αποτυπώνεται η απόκριση ενεργού ισχύος για δύο τυχαίες μετρήσεις και συγκρίνεται με την εκτίμηση από το προτεινόμενο μοντέλο. Όπως φαίνεται, σε κάθε περίπτωση η χρήση τιμών για τις παραμέτρους του μοντέλου οδηγεί σε σημαντικά σφάλματα προσέγγισης. Συνεπώς η ανάπτυξη μοντέλων χρησιμοποιώντας τους μέσους όρους των παραμέτρων των μοντέλων μιας Τοπολογίας δεν μπορεί να θεωρηθεί ως ικανοποιητική για την μοντελοποίηση και ανάλυση όλων των μετρήσεων μιας Τοπολογίας. Επομένως, εγκαταλείφθηκε η προσπάθεια ανάπτυξης μοντέλων με χρήση μέσων τιμών για τις παραμέτρους και στις υπόλοιπες Τοπολογίες.



Εικόνα 5.1: Μετρικό σφάλμα ενεργού ισχύος πρώτης τυχαίας διαταραχής τάσης της Τοπολογίας 7.



Εικόνα 5.2: Μετρικό σφάλμα ενεργού ισχύος δεύτερης τυχαίας διαταραχής τάσης της Τοπολογίας 7.

Το ερευνητικό ερώτημα που παραμένει αναπάντητο είναι το εξής: μπορεί να βρεθεί ένα Hammerstein-Wiener μοντέλο το οποίο να έχει την δυνατότητα να προσομοιώσει με επαρκή ακρίβεια (οδηγώντας, δηλαδή, σε μια ακρίβεια $\geq 90\%$) τις αποκρίσεις από όλες τις μετρήσεις μιας Τοπολογίας; Σε περίπτωση που δεν είναι δυνατό να προσεγγιστούν μόνο με ένα μοντέλο όλες οι μετρήσεις μιας τοπολογίας, θα μπορούσαμε να αναπτύξουμε ορισμένα μόνο μοντέλα (έναν μικρό αριθμό) που θα ήταν σε θέση να αναπαραστήσουν με ακρίβεια τις μετρήσεις κάθε Τοπολογίας;

Με βάση αυτά τα ερωτήματα, το επόμενο υποκεφάλαιο επικεντρώνεται στην εύρεση μοντέλων Hammerstein-Wiener με βάση την ομαδοποίηση μετρήσεων. Αναπτύσσονται, δηλαδή, μοντέλα που δέχονται ως είσοδο ένα σύνολο μετρήσεων για μια τυχαία Τοπολογία.

5.2 Εύρεση Μοντέλου Κατά Ομαδοποίηση

Στο υποκεφάλαιο αυτό εξετάζεται η δυνατότητα ανάπτυξης μοντέλων Hammerstein-Wiener που βασίζονται σε όσο το δυνατόν περισσότερες πραγματικές μετρήσεις. Αρχικά, η παραμετροποίηση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το σύνολο των μετρήσεων μιας

Τοπολογίας. Σε περίπτωση που δεν είναι εφικτή η δημιουργία μοντέλου με ικανοποιητική ακρίβεια (μετρικό σφάλμα $\geq 90\%$), ο αριθμός των μετρήσεων που δίνονται για την παραμετροποίηση μειώνεται προοδευτικά. Στόχος είναι η διερεύνηση της ικανότητας των Hammerstein-Wiener μοντέλων να αναπαράγουν με επαρκή ακρίβεια τις αποκρίσεις ισχύος με τη χρήση ενός και μόνο μοντέλου. Κατά τη διαδικασία αυτή, διευκρινίζονται τα κριτήρια επιλογής των μετρήσεων, ώστε να εντοπιστούν οι κοινές συνθήκες που επιτρέπουν τη μοντελοποίηση του μεγαλύτερου δυνατού εύρους αποκρίσεων.

Η Τοπολογία πάνω στην οποία έγινε η ανάλυση αυτή είναι η Τοπολογία 7. Αρχικά η διαδικασία εκτελέστηκε για όλες τις πραγματικές μετρήσεις της ενεργού ισχύος και δεν βρέθηκε μοντέλο με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Έπειτα οι μετρήσεις διαχωρίστηκαν σε αυτές που προκύπτουν από πτώση τάσης και σε αυτές που προκύπτουν από αύξηση τάσης. Αλλά και σε αυτήν την προσπάθεια πάλι δεν αναπτύχθηκε μοντέλο με αποδεκτά αποτελέσματα. Επομένως, οι μετρήσεις διαχωρίστηκαν σε πτώση/αύξηση τάσης και παραπλήσιες συνθήκες φόρτισης, όπου και εδώ δεν υπήρχαν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Όμως όταν οι μετρήσεις ισχύος ομαδοποιήθηκαν σε πτώση/αύξηση τάσης και κοινές συνθήκες φόρτισης, το μοντέλο που προέκυψε μπόρεσε να αναπαραστήσει με επαρκή ακρίβεια (μετρικό σφάλμα $\geq 90\%$) όλες τις πραγματικές μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για να παραμετροποιηθεί.

Συνεπώς, βάσει της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε, προκύπτει ότι η επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων απαιτεί την ομαδοποίηση των μετρήσεων σύμφωνα με τα συγκεκριμένα κριτήρια: 1) την πτώση ή αύξηση της τάσης και 2) να υπάρχουν κοινές συνθήκες φόρτισης.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η αξιολόγηση των Hammerstein-Wiener μοντέλων για την ανάπτυξη δυναμικών ισοδύναμων μοντέλων παθητικών και ενεργών δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια πραγματικών μετρήσεων τάσης, ενεργού και άεργου ισχύος που καταγράφηκαν σε ένα δίκτυο διανομής εργαστηριακής κλίμακας. Μετρήσεις διεξήχθησαν σε οχτώ διαφορετικές Τοπολογίες του εξεταζόμενου δικτύου διανομής, ώστε να εξαχθούν όσο το δυνατόν γενικότερα συμπεράσματα.

6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο υποκεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της πειραματικής μελέτης και της εφαρμογής των μοντέλων Hammerstein-Wiener σε δίκτυα διανομής. Η ανάλυση έδειξε ότι τα μοντέλα αυτά μπορούν να αναπαραστήσουν με ικανοποιητική ακρίβεια τις δυναμικές αποκρίσεις δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη είναι τα εξής:

- Τα Hammerstein-Wiener μοντέλα μπορούν να προσεγγίσουν με χαμηλό μετρικό σφάλμα μεμονωμένες αποκρίσεις ενεργού και άεργου ισχύος. Επομένως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς σύγχρονων δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Αξίζει να σχολιαστεί ότι τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν αποδίδουν εν γένει καλύτερα για τη μοντελοποίηση της άεργου ισχύος σε σχέση με τη μοντελοποίηση της ενεργού ισχύος.
- Οι παράμετροι των μοντέλων κυμαίνονται σε σχετικά μεγάλο εύρος για κάθε Τοπολογία. Επομένως, δεν είναι εφικτή η ανάπτυξη ενός μοναδικού μοντέλου που να καλύπτει όλες τις μετρήσεις μίας Τοπολογίας.
- Η ομαδοποίηση των μετρήσεων με κριτήρια όπως οι κοινές συνθήκες φόρτισης, επιτρέπει την ανάπτυξη μοντέλων που αναπαριστούν περισσότερες περιπτώσεις ταυτόχρονα. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται η ανάγκη δημιουργίας ξεχωριστών μοντέλων ανά μέτρηση.

6.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις και Δυνατότητες για Περαιτέρω Έρευνα

Όσον αφορά τις μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αυτές θα μπορούσαν να επικεντρωθούν στα εξής:

- Συνδυασμός των μοντέλων Hammerstein Wiener με άλλα μοντέλα μαύρου ή γκριζού κουτιού, ώστε να καταστεί εφικτή μια πιο αποτελεσματική μοντελοποίηση των εξεταζόμενων δικτύων διανομής.
- Διερεύνηση εναλλακτικών μεθόδων εκτίμησης παραμέτρων, όπως για παράδειγμα τεχνικές μηχανικής μάθησης, οι οποίες θα επέτρεπαν την κάλυψη μεγαλύτερου εύρους περιπτώσεων.
- Εφαρμογή σε δίκτυα μεγαλύτερης κλίμακας και χρήση μετρήσεων από πραγματικά δίκτυα διανομής.
- Συγκριτική αξιολόγηση με άλλα μη γραμμικά μοντέλα, όπως μη γραμμικά μοντέλα κατάστασης ή αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα, με έμφαση στη σχέση απόδοσης-κόστους.

Βιβλιογραφία

- [1] F. Conte, F. D'Agostino, S. Massucco, G. Palombo, F. Silvestro, C. Bossi, “Dynamic equivalent modelling of active distribution networks for TSO-DSO interactions” in Proc. IEEE ISGT Europe, pp. 1-6, Sep. 2017, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8260235>.
- [2] B. Choi, H. Chiang, Y. Li, H. Li, Y. Chen, D. Huang, M. Lauby, “Measurement-Based Dynamic Load Models: Derivation, Comparison and Validation”, IEEE Trans. Power Syst. Vol.21, no. 3, pp. 1276-1283, Aug. 2006, <https://ieeexplore.ieee.org/document/1664964>.
- [3] A. Arif, Z. Wang, J. Wang, B. Mather, H. Bashualdo, and D. Zhao, “Load modeling—A review,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 6, pp. 5986–5999, Nov. 2018, <https://ieeexplore.ieee.org/document/7917348>.
- [4] E. O. Kontis, G. K. Papagiannis, M. H. Syed, E. Guillo-Sansano, G. M. Burt, T. A. Papadopoulos, “Development of Measurement-Based Load Models for the Dynamic Simulation of Distribution Grid” , 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, Jan. 2017, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8260251>.
- [5] L. D. P. Ospina, V. U. Salazar and D. P. Ospina, "Dynamic Equivalents of Nonlinear Active Distribution Networks Based on Hammerstein-Wiener Models: An Application for Long-Term Power System Phenomena," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, no. 6, pp. 4286-4296, Nov. 2022, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9721138>.
- [6] F. O. Resende, J. Matevosyan, and J. V. Milanovic, “Application of dynamic equivalence techniques to derive aggregated models of active distribution network cells and microgrids,” in Proc. IEEE PowerTech, pp. 1–6, Jun. 2013, <https://ieeexplore.ieee.org/document/6652356>.
- [7] The MathWorks, Inc., “MatLab technical reference on System Identification Toolbox” Accessed: Sep. 1, 2025. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/ident/index.html?s_tid=CRUX_topnav.
- [8] The MathWorks, Inc., “MatLab technical reference on Hammerstein-Wiener models - What are Hammerstein-Wiener models?,” Accessed: Sep. 1, 2025. [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/help/ident/ug/what-are-hammerstein-wiener-models.html>.

- [9] The MathWorks, Inc., “MatLab technical reference on IDDATA objects - iddata,”
Accessed: Sep. 1, 2025. [Online]. Available:
<https://de.mathworks.com/help/ident/ref/iddata.html>.
- [10] The MathWorks, Inc., “MatLab technical reference on the NLHW function - nlhw,”
Accessed: Sep. 1, 2025. [Online]. Available:
<https://de.mathworks.com/help/ident/ref/nlhw.html>.
- [11] Ε. Ο. Κόντης, “Ανάπτυξη δυναμικών ισοδύναμων μοντέλων μειωμένης τάξης με χρήση μετρήσεων για την ανάλυση έξυπνων δικτύων”, Σεπ. 2018.