



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Εκτίμηση παραμέτρων μη γραμμικού μοντέλου γεννήτριας diesel εγκατεστημένης σε μικροδίκτυο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Μαντζιώρου

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Εκτίμηση παραμέτρων μη γραμμικού μοντέλου γεννήτριας diesel εγκατεστημένης σε μικροδίκτυο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Μαντζιώρου

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2016.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Πάυλος Γεωργιάκης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....

Μαρία Μαντζιώρου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μαρία Μαντζιώρου, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η γεννήτρια diesel παίζει καθοριστικό ρόλο στην εξασφάλιση της ευστάθειας ενός μικροδικτύου και για την ενσωμάτωση της σε αυτό, είναι αναγκαία η γνώση των τιμών των παραμέτρων που περιγράφουν τη δυναμική της συμπεριφορά. Η κυρίαρχη τάση τα μικροδίκτυα να αναπτύσσονται γύρω από ήδη εγκατεστημένες γεννήτριες, για τις οποίες η γνώση των τιμών των τυπικών παραμέτρων τους είναι συχνά αδύνατη, είτε λόγω απώλειας των κατασκευαστικών τους στοιχείων, είτε λόγω αλλαγής των τιμών των παραμέτρων με την πάροδο των ετών, δημιουργεί την ανάγκη ανάπτυξης μεθόδων αναγνώρισης συστήματος για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αυτών. Στην παρούσα διπλωματική, επιχειρείται ο προσδιορισμός τους, εφαρμόζοντας μια μέθοδο που ακολουθεί την προσέγγιση του Γκρίζου Κουτιού, δηλαδή υποθέτει μια γνωστή δομή για την περιγραφή της γεννήτριας και βασίζεται σε πραγματικές μετρήσεις των αποκρίσεων της για την εκτίμηση των παραμέτρων της. Για τη μοντελοποίηση της γεννήτριας χρησιμοποιείται το μη γραμμικό μοντέλο τρίτης τάξης στο χώρο κατάστασης, ενώ οι αποκρίσεις της πραγματικής γεννήτριας προέρχονται από την προσομοίωση του ίδιου και του ανώτερης (πέμπτης) τάξης μοντέλου. Αρχικά, η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η Μέθοδος Σφάλματος Πρόβλεψης, η οποία χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό γνωστούς αλγόριθμους τοπικής βελτιστοποίησης όπως ο αλγόριθμος Trust-Region Reflective Newton και ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt. Η μέθοδος εφαρμόζεται τόσο για δεδομένα από την προσομοίωση του μοντέλου τρίτης τάξης όσο και για δεδομένα από το μοντέλο πέμπτης τάξης. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζονται όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία αναγνώρισης και ορίζονται συγκεκριμένα μέτρα και δοκιμές για την αξιολόγηση των μοντέλων. Έτσι, εξάγονται συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα και τα κρίσιμα σημεία της μεθόδου. Τέλος, μελετάται η εφαρμογή της μεθόδου ολικής βελτιστοποίησης Προσομοιωμένη Ανόπτηση στο πρόβλημά και αξιολογείται η αποτελεσματικότητά της σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο. Για την υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε το System Identification Toolbox της Matlab.

Λέξεις κλειδιά

σύγχρονη γεννήτρια, μικροδίκτυο, μοντέλα χώρου κατάστασης, αναγνώριση συστήματος, Γκρίζο κουτί, Μέθοδος Σφάλματος Πρόβλεψης, τοπική βελτιστοποίηση, Trust-Region Reflective Newton, Levenberg-Marquardt, ολική βελτιστοποίηση, Προσομοιωμένη Ανόπτηση

Abstract

Diesel generator plays a key role in ensuring the stability of a microgrid and the knowledge of the parameter values that describe its dynamic behavior is necessary for its integration into the microgrid. The dominant trend for microgrids is to be built around already installed diesel generators. The knowledge of their parameters is often impossible, either because of the loss of the designing data of the machine, either because the parameter values have changed over the years. This fact creates the need for developing system identification methods to determine these parameters. In this thesis, an attempt is made to identify these parameters, using a method which follows the Grey Box approach, i.e. assumes a known structure for the description of the generator and the estimation of the parameters is based on actual measurements of its responses. For the modeling of the generator a nonlinear third-order state space model is used while the responses of the actual generator come from the simulation of the same and the higher-order (fifth-order) model. To start with, the used method is the Prediction Error Method (PEM), which uses for the calculation known local optimization algorithms such as the Trust-Region Reflective Newton algorithm and the Levenberg-Marquardt algorithm. The method is applied both for data from the simulation of the third-order model and for data from the simulation of the fifth-order model. In this context, we examined all the factors that influence the identification process and we defined specific measures and tests to evaluate the models. Thus, conclusions are drawn about the effectiveness and the critical points of the method. Finally, we applied the global optimization method Simulated Annealing to the problem and evaluated its effectiveness in comparison with the prior method. For the implementation of the methods, we used the System Identification Toolbox of Matlab.

Keywords

synchronous generator, microgrid, state space models, System Identification, Gray Box, Prediction Error Method, local optimization, Trust-Region Reflective Newton, Levenberg-Marquardt, global optimization, Simulated Annealing

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμη τον υποψήφιο διδάκτορα Αλέξανδρο Ρήγα για το χρόνο που διέθεσε για την περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας καθώς και για τις πολύτιμες υποδείξεις του.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τους γονείς μου, τον αδερφό μου και τους φίλους μου για τη στήριξη που μου έδειξαν όλο αυτό το διάστημα της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου Διονύση, Θωμά και Φωτεινή, που ήταν πάντα δίπλα μου και με ενθάρρυναν να συνεχίσω την προσπάθεια μπροστά σε κάθε δυσκολία.

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή.....	13
1.1.	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	13
1.2.	Διεσπαρμένη παραγωγή - Μικροδίκτυα.....	16
1.2.1.	Δομή και λειτουργία μικροδικτύου	16
1.2.2.	Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα μικροδικτύου	18
1.3.	Η γεννήτρια diesel στο μικροδίκτυο	19
1.4.	Σκοπός και δομή διπλωματικής εργασίας	20
2.	Μοντελοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς της σύγχρονης γεννήτριας.....	23
2.1.	Μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα.....	23
2.1.1.	Παραδοχές για την ανάπτυξη του μοντέλου	23
2.1.2.	Εξαγωγή των ηλεκτρικών εξισώσεων του μοντέλου	24
2.1.3.	Οι μηχανικές εξισώσεις του μοντέλου.....	27
2.2.	Τυπικές παράμετροι σύγχρονης μηχανής.....	28
2.2.1.	Σημασία των τυπικών παραμέτρων.....	28
2.3.	Μη γραμμικά μοντέλα σύγχρονης γεννήτριας.....	30
2.3.1.	Μοντέλο 5ης τάξης.....	31
2.3.2.	Μοντέλο 3ης τάξης.....	32
2.3.3.	Συμπληρωματικές σχέσεις των μοντέλων	33
2.4.	Τα μοντέλα σύγχρονης γεννήτριας στο χώρο κατάστασης	34
3.	Μη γραμμική αναγνώριση συστήματος	38
3.1.	Διαφορετικές προσεγγίσεις στη μοντελοποίηση ενός δυναμικού συστήματος	38
3.2.	Η διαδικασία της αναγνώρισης συστήματος.....	39
3.3.	Απλά σήματα για αναγνώριση συστήματος	41
3.4.	Μέθοδος του σφάλματος πρόβλεψης (Prediction Error Method).....	43
3.5.	Μέθοδοι μη γραμμικής βελτιστοποίησης	45
3.5.1.	Μέθοδοι τοπικής βελτιστοποίησης	46
3.5.2.	Μέθοδοι ολικής βελτιστοποίησης.....	50
4.	Υλοποίηση αναγνώρισης γεννήτριας diesel με τη χρήση μεθόδων τοπικής βελτιστοποίησης	54
4.1.	Δεδομένα αποκρίσεων της γεννήτριας diesel	54
4.2.	Μέτρα αξιολόγησης του μοντέλου	58

4.3.	Καθορισμός βασικών παραγόντων της διαδικασίας.....	60
4.4.	Επίδραση λευκού θορύβου στον προσδιορισμό των παραμέτρων	68
4.5.	Εφαρμογή της διαδικασίας με δεδομένα από το μοντέλο 5ης τάξης.....	69
4.5.1.	Αναγνώριση γεννήτριας από ένα σημείο λειτουργίας.....	70
4.5.2.	Αναγνώριση γεννήτριας από πολλά σημεία λειτουργίας	75
4.6.	Εφαρμογή της διαδικασίας για τον προσδιορισμό περισσότερων παραμέτρων	84
4.7.	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων της διαδικασίας.....	86
5.	Εφαρμογή της Προσομοιωμένης Ανόπτησης στην αναγνώριση της γεννήτριας diesel	87
5.1.	Αλγόριθμος Προσομοιωμένης Ανόπτησης	87
5.2.	Αποτελέσματα Προσομοιωμένης Ανόπτησης	88
5.3.	Συνδυασμός της μεθόδου Προσομοιωμένης Ανόπτησης με μια μέθοδο τοπικής βελτιστοποίησης	94
6.	Συμπεράσματα και Δυνατότητες Επέκτασης.....	95
7.	Βιβλιογραφία	97

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1: Εκτιμώμενο μερίδιο των ΑΠΕ στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο τέλος του 2014	14
Εικόνα 2:Μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας στην ΕΕ - 28 χώρες το 2014 (σε %)	15
Εικόνα 3:Δομή ενός Μικροδικτύου.....	17
Εικόνα 4:Μικροδίκτυο με γεννήτρια Diesel.....	20
Εικόνα 5:Τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα μιας σύγχρονης μηχανής	23
Εικόνα 6: Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα	27
Εικόνα 7: Ρεύματα βραχυκυκλώματος στις 3 φάσεις.....	29
Εικόνα 8: Η συνιστώσα θεμελιώδους συχνότητας του ρεύματος σπλισμού	30
Εικόνα 9: Διανυσματικό διάγραμμα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.....	34
Εικόνα 10: Προσεγγιστικό κύκλωμα για τον υπολογισμό των αρχικών καταστάσεων.....	37
Εικόνα 11: Βασική διαφορά μεταξύ White Box, Grey Box και Black Box	39
Εικόνα 12: Τυπικό διάγραμμα της αναγνώρισης συστήματος	39
Εικόνα 13: Η διαδικασία της αναγνώρισης συστήματος.....	41
Εικόνα 14: Παράδειγμα σήματος chirp.....	42
Εικόνα 15:Παράδειγμα σήματος PRBS	43
Εικόνα 16: Μέθοδοι μη γραμμικής βελτιστοποίησης	46
Εικόνα 17: Αποδοχή βημάτων αναρρίχησης στην ολική βελτιστοποίηση	51
Εικόνα 18: Διάγραμμα ροής ενός κανονικού αλγορίθμου Προσομοιωμένης Ανόπτησης.....	53
Εικόνα 19: Δεδομένα προσομοίωσης από το μη γραμμικό μοντέλο 5ης τάξης	56
Εικόνα 20: Δεδομένα προσομοίωσης από το μη γραμμικό μοντέλο 3ης τάξης	57
Εικόνα 21: Στιγμιότυπο από την εκτέλεση του προγράμματος στην περίπτωση εγκλωβισμού σε τοπικό ελάχιστο.....	61
Εικόνα 22: Στιγμιότυπο από την εκτέλεση του προγράμματός στην περίπτωση επιτυχημένου προσδιορισμού των παραμέτρων με τον αλγόριθμο TRRN	62
Εικόνα 23: Στιγμιότυπο από την εκτέλεση του προγράμματος με τον αλγόριθμο LM.....	63
Εικόνα 24: Σχετικά σφάλματα των παραμέτρων για τους διαφορετικούς αλγορίθμους για $T_s=10ms$ και Set1	65
Εικόνα 25: Σχετικά σφάλματα των παραμέτρων για τους διαφορετικούς αλγορίθμους για $T_s=10ms$ και Set2	67
Εικόνα 26: Σχετικά σφάλματα παραμέτρων για προσθήκη θορύβου διαφορετικού SNR.....	69
Εικόνα 27: Σχετικά σφάλματα των παραμέτρων, με δεδομένα από το μοντέλο 5ης τάξης	71
Εικόνα 28: Αποτελέσματα της αναγνώρισης στο σημείο λειτουργίας $P=0.8$ pu, $Q=0$ pu, $V=0.98$ pu, όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα παλμών.....	72
Εικόνα 29: Αποτελέσματα της αναγνώρισης στο σημείο λειτουργίας $P=1.1$ pu, $Q=0.4$ pu, $V=1.02$ pu, όταν εφαρμόζεται στην είσοδο μια βηματική συνάρτηση	73
Εικόνα 30: Σήμα εισόδου PRBS στο σημείο λειτουργίας $P=1.1$ pu, $Q=0.4$ pu, $V=1.02$ pu.....	74
Εικόνα 31: Η πρώτη απόκριση (γωνία δ) στο σημείο λειτουργίας $P=1.1$ pu, $Q=0.4$ pu, $V=1.02$ pu, όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα PRBS.....	74
Εικόνα 32: Η δεύτερη απόκριση (P_e) στο σημείο λειτουργίας $P=1.1$ pu, $Q=0.4$ pu, $V=1.02$ pu, όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα PRBS.....	75

Εικόνα 33: Δεδομένα προσομοίωσης από το μη γραμμικό μοντέλο 5ης τάξης στο σημείο λειτουργίας $P=0.6$ ρυ, $Q=0.53$ ρυ, $V=1.22$ ρυ (PRBS 10%).....	76
Εικόνα 34: Σχετικά σφάλματα για διαφορετικά σημεία λειτουργίας (Είσοδος PRBS 10%)	78
Εικόνα 35: Σχετικά σφάλματα για διαφορετικά σημεία λειτουργίας (Είσοδος PRBS 20%)	79
Εικόνα 36: Αποτελέσματα της αναγνώρισης (για την προσέγγιση του μέσου όρου), όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα παλμών.....	81
Εικόνα 37: Αποτελέσματα της αναγνώρισης (για την προσέγγιση του μέσου όρου), όταν εφαρμόζεται στην είσοδο μια βηματική συνάρτηση	82
Εικόνα 38: Η πρώτη απόκριση (γωνία δ), όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα PRBS (για την προσέγγιση του μέσου όρου).....	83
Εικόνα 39: Η δεύτερη απόκριση (P_e), όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα PRBS (για την προσέγγιση του μέσου όρου)	83
Εικόνα 40: Σχετικά σφάλματα στον υπολογισμό των παραμέτρων με τη μέθοδο SA	90
Εικόνα 41: Αποτελέσματα της αναγνώρισης με SA στο σημείο λειτουργίας $P=0.8$ ρυ, $Q=0$ ρυ, $V=0.98$ ρυ, όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα παλμών.....	91
Εικόνα 42: Αποτελέσματα της αναγνώρισης με SA στο σημείο λειτουργίας $P=1.1$ ρυ, $Q=0.4$ ρυ, $V=1.02$ ρυ, όταν στην είσοδο εφαρμόζεται μια βηματική συνάρτηση	92
Εικόνα 43: Η πρώτη απόκριση (γωνία δ) στο σημείο λειτουργίας $P=1.1$ ρυ, $Q=0.4$ ρυ, $V=1.02$ ρυ, όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα PRBS (SA)	93
Εικόνα 44: Η δεύτερη απόκριση (P_e) στο σημείο λειτουργίας $P=1.1$ ρυ, $Q=0.4$ ρυ, $V=1.02$ ρυ, όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα PRBS (SA)	93

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη της σύγχρονης γεννήτριας	32
Πίνακας 2: Πεδίο τιμών των τυπικών παραμέτρων μιας σύγχρονης γεννήτριας [13]	54
Πίνακας 3: Τιμές των τυπικών παραμέτρων των μοντέλων προσομοίωσης.....	55
Πίνακας 4: Αποτελέσματα διαφορετικών αλγορίθμων για αρχικό διάνυσμα παραμέτρων Set1 και χρόνο δειγματοληψίας $T_s=10ms$	64
Πίνακας 5: Αποτελέσματα διαφορετικών αλγορίθμων για αρχικό διάνυσμα παραμέτρων Set1 και χρόνο δειγματοληψίας $T_s=1ms$	65
Πίνακας 6: Αποτελέσματα διαφορετικών αλγορίθμων για αρχικό διάνυσμα παραμέτρων Set2 και χρόνο δειγματοληψίας $T_s=10ms$	66
Πίνακας 7: Αποτελέσματα διαφορετικών αλγορίθμων για αρχικό διάνυσμα παραμέτρων Set1 και χρόνο δειγματοληψίας $T_s=1ms$	66
Πίνακας 8: Επίδραση θορύβου με διαφορετικό SNR στον υπολογισμό των παραμέτρων	69
Πίνακας 9: Αποτελέσματα της αναγνώρισης συστήματος σε ένα λειτουργικό σημείο με δεδομένα από το μοντέλο 5ης τάξης.....	70
Πίνακας 10: Αποτελέσματα της αναγνώρισης από πέντε διαφορετικά σημεία λειτουργίας (Είσοδος PRBS 10%)	77
Πίνακας 11: Παράμετροι μοντέλου από τη διαδικασία αναγνώρισης σε πολλά σημεία λειτουργίας (Είσοδος PRBS 10%)	78
Πίνακας 12: Αποτελέσματα της αναγνώρισης από πέντε διαφορετικά σημεία λειτουργίας (Είσοδος PRBS 20%)	79
Πίνακας 13: Παράμετροι μοντέλου από τη διαδικασία αναγνώρισης σε πολλά σημεία λειτουργίας (Είσοδος PRBS 20%)	80
Πίνακας 14: Εκτίμηση περισσότερων παραμέτρων, με δεδομένα από το μη γραμμικό μοντέλο 5ης τάξης	84
Πίνακας 15: Εκτίμηση περισσότερων παραμέτρων, με δεδομένα από το μη γραμμικό μοντέλο 5ης τάξης με προσθήκη θορύβου	85
Πίνακας 16: Αποτελέσματα της Προσομοιωμένης Ανόπτησης για δεδομένα από το μη γραμμικό μοντέλο 3ης τάξης	89
Πίνακας 17: Αποτελέσματα της Προσομοιωμένης Ανόπτησης, για δεδομένα από το μη γραμμικό μοντέλο 5ης τάξης	90

1. Εισαγωγή

Στον σύγχρονο κόσμο, όλες σχεδόν οι πτυχές της κοινωνίας εξαρτώνται άμεσα ή έμμεσα από την ηλεκτρική ενέργεια, εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που έχει η χρήση της. Για το λόγο αυτό, είναι επιτακτική η ανάγκη τα σύγχρονα ηλεκτρικά δίκτυα να είναι αξιόπιστα, ώστε να εξασφαλίζουν ασφάλεια και ποιότητα στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, ευέλικτα, ώστε να καλύπτουν κάθε στιγμή τις ανάγκες των καταναλωτών, οικονομικά, παρέχοντας την καλύτερη τιμή μέσω αποδοτικής διαχείρισης και καινοτομιών, καθώς και φιλικά προς το περιβάλλον.

Η ανάγκη αυτή σε συνδυασμό με την απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας, τη στενότητα στα αποθέματα ορυκτών καυσίμων και τα μεγάλα ενεργειακά προβλήματα της εποχής μας, έχουν οδηγήσει στη συνεχή και ραγδαία ανάπτυξη εναλλακτικών μορφών ενέργειας ή αλλιώς των **Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ)**. Ως ΑΠΕ θεωρούνται γενικά οι εναλλακτικές των παραδοσιακών πηγών ενέργειας (π.χ. του πετρελαίου ή του άνθρακα) που από τη φύση τους ανανεώνονται και είναι διαρκώς διαθέσιμες.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ γίνεται κυρίως με την οργάνωση σε **Μικροδίκτυα (Microgrids)**. Η **Διεσπαρμένη παραγωγή (Distributed Energy Resource -DER)**, όπως αλλιώς ονομάζεται, έχει το βασικό πλεονέκτημα ότι γίνεται πολύ κοντά στα φορτία, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι απώλειες κατά τη διανομή αλλά και το κόστος κατασκευής ενός μεγάλου δικτύου. Τα μικροδίκτυα συνήθως αποτελούνται από ένα συνδυασμό ΑΠΕ και συμβατικών μεθόδων παραγωγής ενέργειας με αποτέλεσμα να είναι πολύ φιλικά προς το περιβάλλον. Η παραγωγή ηλεκτρισμού οργανώνεται ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των πηγών ενέργειας της περιοχής και πολλές φορές περιλαμβάνει και την συμπαραγωγή θερμότητας.

1.1. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ως ΑΠΕ έχουν οριστεί οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Είναι η πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος πριν στραφεί στη χρήση των ορυκτών καυσίμων και το ενδιαφέρον για την εκμετάλλευσή τους επανεμφανίστηκε μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1974. Η εφαρμογή τεχνολογιών ΑΠΕ έχει εδραιωθεί την τελευταία εικοσαετία μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων. Οι ΑΠΕ είναι πολύ «φιλικές» στο περιβάλλον αφού δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα. Επίσης, είναι πρακτικά ανεξάντλητες, και για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη ή άντληση όπως συμβαίνει για την εκμετάλλευσή των ορυκτών καυσίμων [22].

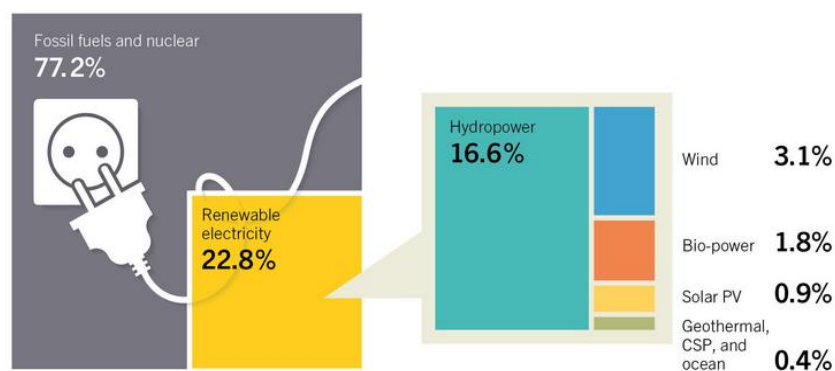
Οι κυριότερες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας είναι:

- η ηλιακή ενέργεια, με κύριες εφαρμογές τα ηλιακά θερμικά συστήματα, στα οποία χρησιμοποιούνται κατάλληλοι συλλέκτες για τη δέσμευση της ηλιακής

ακτινοβολίας και τη μετατροπή της σε θερμότητα, και τα φωτοβολταϊκά συστήματα, με τα οποία μετατρέπεται η ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική, μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου,

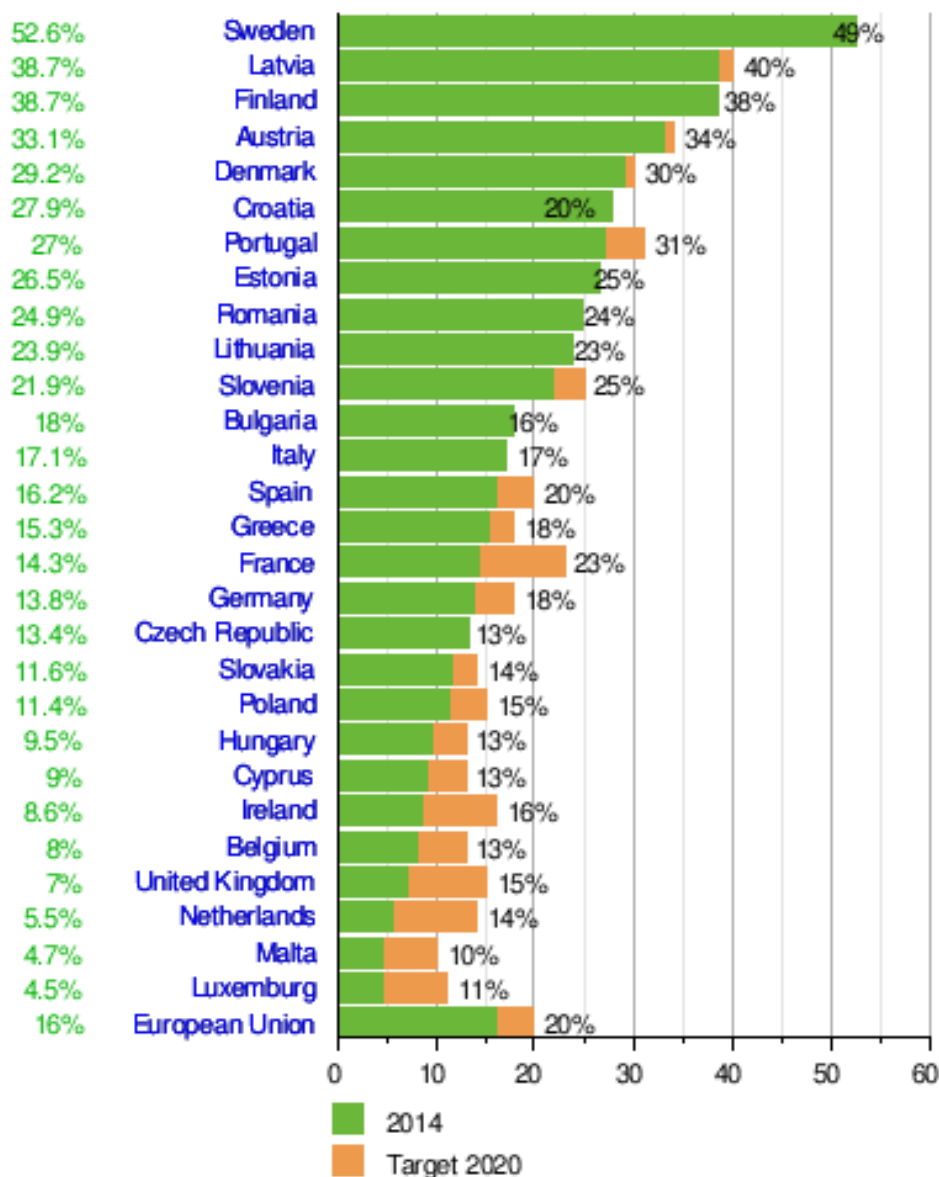
- η αιολική ενέργεια, η οποία χρησιμοποιείται στις μέρες μας στην ηλεκτροπαραγωγή με τις ανεμογεννήτριες,
- οι υδατοπτώσεις - υδραυλική ενέργεια, με περιορισμό στα μικρά υδροηλεκτρικά, ισχύος κάτω των 10 MW, που αποτελούν και την πιο διαδεδομένη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας,
- η γεωθερμία - γεωθερμική ενέργεια, η οποία προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται από τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης και είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, όπως για παράδειγμα στις πηγές ζεστού νερού ή στους θερμοπίδακες,
- η βιομάζα, δηλαδή θερμική ή χημική ενέργεια που προέρχεται από τη χρήση υπολειμμάτων δασικών εκμεταλλεύσεων και την αξιοποίηση βιομηχανικών, αγροτικών και αστικών αποβλήτων και μπορεί να παράγει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που αποτελούν καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα παραδοσιακά, καθώς και
- η ενέργεια από τη θάλασσα, δηλαδή η παλιρροϊκή ενέργεια, η κινητική ενέργεια των κυμάτων και η ενέργεια από τους ωκεανούς λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας των νερών στην επιφάνεια και σε μεγάλο βάθος.

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται σε παγκόσμιο επίπεδο, μια αυξανόμενη τάση ανάπτυξης των ΑΠΕ. Η διείσδυση των ΑΠΕ, γίνεται με γοργούς ρυθμούς, καθώς νέου τύπου ανεμογεννήτριες εγκαθίσταται βελτιώνοντας αισθητά την απόδοση των αιολικών πάρκων και μειώνοντας τα προβλήματα διασύνδεσής τους με το δίκτυο, τα υδροηλεκτρικά αποτελούν σταθερή αξία στην ανανεώσιμη ηλεκτροπαραγωγή, τα φωτοβολταϊκά συστήματα γνωρίζουν σημαντική άνοδο με αισθητή μείωση του κόστους επένδυσης, η βιοενέργεια προσφέρει λύσεις για θέρμανση, ισχύ και καύσιμα μεταφορών, και τέλος η γεωθερμία χρησιμοποιείται σε ποικίλες εφαρμογές θέρμανσης και ηλεκτρισμού. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται από τα ποσοστά των ΑΠΕ που φαίνονται στην εικόνα 1.



Εικόνα 1: Εκτιμώμενο μερίδιο των ΑΠΕ στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο τέλος του 2014

Ενδεικτική είναι η ανοδική πορεία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρώπη. Στο διάστημα 2005-2012, η παραγόμενη από ΑΠΕ ηλεκτρική ενέργεια στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) αυξήθηκε με μέσο ετήσιο ρυθμό 7,1% (αρκετά υψηλότερο από το 4,1% της περιόδου 1990-2012). Το 2013, η ανάπτυξη των ΑΠΕ συνεχίστηκε και σε επίπεδο ΕΕ, το μερίδιο της πράσινης ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα έφτασε σχεδόν το 15%, ξεπερνώντας τον στόχο της ευρωπαϊκής οδηγίας για τις ΑΠΕ που ήταν 12%. Μέχρι το 2020, η ΕΕ στοχεύει να λαμβάνει τουλάχιστον το 20% της ενέργειάς της χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.



Εικόνα 2:Μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας στην ΕΕ - 28 χώρες το 2014 (σε %)

1.2. Διεσπαρμένη παραγωγή - Μικροδίκτυα

Η **Διεσπαρμένη παραγωγή** (στα αγγλικά γνωστή ως **Distributed Energy Resource - DER**), ορίζεται ως η παραγωγή ενέργειας μικρής κλίμακας, με τιμές που κατά κανόνα κυμαίνονται από 1kW μέχρι 100MW και είναι η νέα τάση στην παραγωγή ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, όταν αναφερόμαστε στη διεσπαρμένη παραγωγή εννοούμε ότι οι μονάδες παραγωγής ενέργειας έχουν εγκατασταθεί κοντά στο σημείο κατανάλωσης (φορτίο) [2].

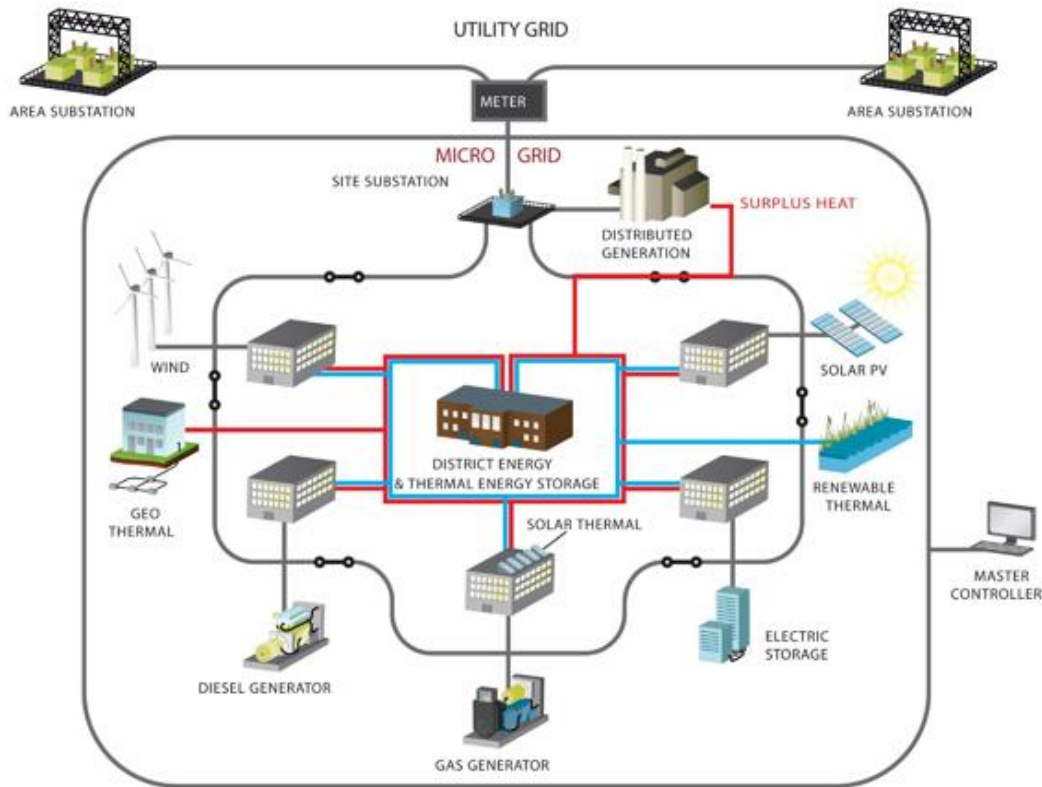
Οι ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες ΑΠΕ, λόγω της σχετικά μικρής εγκατεστημένης ισχύος τους, μπορούν να θεωρηθούν στο σύνολό τους ως διεσπαρμένη παραγωγή. Εξαιρέση αποτελούν τα αιολικά πάρκα, τα μεγάλα φωτοβολταϊκά συστήματα και οι μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικοί σταθμοί, που εγκαθίστανται κατά κοινή πρακτική σε αραιοκατοικημένες και μη αστικές περιοχές για λόγους επάρκειας χώρου, περιβαλλοντικών περιορισμών και κυρίως καλύτερης εκμετάλλευσης της ΑΠΕ. Τα διερχόμενα πλησίον των περιοχών αυτών δίκτυα είναι ασθενή, με αποτέλεσμα να απαιτείται η ενίσχυσή τους ή η κατασκευή νέων, για να είναι δυνατή η σύνδεση των παραπάνω ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων σε αυτά. Συνεπώς, οι μονάδες αυτές δεν μπορούν να θεωρηθούν ως διεσπαρμένη παραγωγή, εφόσον η ισχύς τους δεν καταναλώνεται τοπικά. Ως διεσπαρμένη παραγωγή, μπορούν να θεωρηθούν μόνο οι ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί ΑΠΕ που εγκαθίστανται πλησίον των φορτίων (Μέσης ή Χαμηλής Τάσης).

Παρόλο που η χρήση κεντρικών σταθμών ΑΠΕ μπορεί να ενισχύσει το υπάρχον ηλεκτρικό σύστημα, η μεγάλη απόσταση των μονάδων αυτών από τα σημεία κατανάλωσης έχει ως αποτέλεσμα το υψηλό επίπεδο φόρτισης των γραμμών μεταφοράς και διανομής, με αποτέλεσμα την καταπόνηση των τελευταίων, λόγω των αυξημένων ηλεκτρικών απωλειών. Αντίθετα, η χρησιμοποίηση των ΑΠΕ, με τη μορφή μικρών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, συμβάλλει καθοριστικά στη μείωση των απωλειών και στην εξοικονόμηση ενέργειας. Στις διεσπαρμένες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής συμπεριλαμβάνεται ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών με τις ΑΠΕ να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο, ιδιαίτερα σε χώρες όπου οι γεωγραφικές και κλιματολογικές συνθήκες το επιτρέπουν. Επίσης, αρκετά συχνά, η δυνατότητα τοπικής κάλυψης του φορτίου ή ενός μέρους αυτού από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, με τη χρησιμοποίηση ΑΠΕ, επιτρέπει στις επιχειρήσεις διανομής ηλεκτρικής ενέργειας να αντιμετωπίσουν τις αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις με μικρότερο κόστος. Σε αυτόν τον τρόπο εξυπηρέτησης τοπικών φορτίων βασίζεται η φιλοσοφία πάνω στην οποία έχουν δομηθεί τα μικροδίκτυα [1].

1.2.1. Δομή και λειτουργία μικροδικτύου

Ένα τυπικό μικροδίκτυο αποτελείται από διάφορες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συνολικής ισχύος μερικών MW. Ο σχεδιασμός του μικροδικτύου είναι ανεξάρτητος από το κεντρικό δίκτυο, ωστόσο μπορεί να υπάρχει διασύνδεση με αυτό, για ανταλλαγή ενέργειας. Τυπικές πηγές ενός μικροδικτύου είναι οι γεννήτριες diesel ή φυσικού αερίου, συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού (γεννήτριες, μικροστρόβιλοι), οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες, οι ανεμογεννήτριες, τα μικρά

υδροηλεκτρικά, οι κυψέλες καυσίμου, οι γεωθερμικοί και οι ηλιοθερμικοί σταθμοί, μονάδες που χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη βιομάζα, biodiesel ή οποιαδήποτε άλλη πηγή ενέργειας. Επιπλέον, το μικροδίκτυο αποτελείται από φορτία και διαθέτει συσσωρευτές για την αποθήκευση περίσσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Κάθε πηγή και μέσο αποθήκευσης συνδέεται στο μικροδίκτυο μέσω ελεγκτών για να ρυθμίζεται η ομαλή λειτουργία του. Έτσι, ένα μικροδίκτυο μπορεί να εγκατασταθεί εκεί όπου υπάρχει διαθέσιμη μία από τις παραπάνω φυσικές πηγές ενέργειας και αυτή μπορεί να καλύπτει τις καταναλώσεις της περιοχής στην οποία εγκαθίσταται. Η κλασική δομή ενός μικροδικτύου απεικονίζεται στην εικόνα 3.



Εικόνα 3: Δομή ενός Μικροδικτύου

Δεδομένης της μικρής ισχύος των περισσότερων μονάδων ενός μικροδικτύου, η παραγωγή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι προτιμότερο να γίνεται στη Χαμηλή Τάση καθώς δεν απαιτείται η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Το μέγεθος των μονάδων παραγωγής είναι ουσιαστικά αυτό που καθορίζει τη στάθμη λειτουργίας του μικροδικτύου, ενώ το συνολικό μέγεθος των μονάδων παραγωγής και των φορτίων καθορίζει τον τρόπο διασύνδεσής του με άλλα μικροδίκτυα ή με το κεντρικό δίκτυο, στη Μέση ή στη Χαμηλή Τάση. Προφανώς, μεγάλη ισχύς απαιτεί διασύνδεση στη Μέση Τάση [25]. Η σύνδεση αυτή γίνεται μέσω ενός ελεγκτή, ο οποίος ρυθμίζει την επικοινωνία με το δίκτυο.

Το μικροδίκτυο μπορεί να έχει δύο τρόπους λειτουργίας: Λειτουργία με σύνδεση στο δίκτυο (grid-connected) και απομονωμένη λειτουργία (stand-alone). Στη πρώτη περίπτωση το μικροδίκτυο παραμένει πλήρως ή μερικώς συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο και ανταλλάσσει ενέργεια με αυτό. Σε περίπτωση ανωμαλίας του κεντρικού

δικτύου, αλλάζει η λειτουργία του μικροδικτύου σε απομονωμένη και τροφοδοτούνται διαρκώς τα φορτία που έχουν προτεραιότητα. Στην απομονωμένη λειτουργία το μικροδίκτυο είναι το κεντρικό δίκτυο του συστήματος και είναι υπεύθυνο για την πλήρη κάλυψη των αναγκών των φορτίων του συστήματος.

Η αξιόπιστη λειτουργία ενός μικροδικτύου, απαιτεί εκτός από την κάλυψη των απαιτήσεων ενεργού και άεργου ισχύος, και τη συνεχή ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας αυτού. Παράλληλα, το μικροδίκτυο θα πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες διατάξεις προστασίας από σφάλματα, βραχυκυκλώματα ή διαρροές.

1.2.2. Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα μικροδικτύου

Ο συνδυασμός ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και παραδοσιακών τρόπων παραγωγής ηλεκτρισμού σε ένα μικροδίκτυο επιφέρει οφέλη τόσο για τους τελικούς χρήστες όσο και για το ίδιο το δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα:

- Βελτιώνεται η αξιοπιστία του δικτύου στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και σε αρκετές περιπτώσεις μειώνεται το κόστος ενέργειας.
- Μειώνονται σε μεγάλο βαθμό οι απώλειες ισχύος στις γραμμές μεταφοράς, αφού η παραγωγή γίνεται τοπικά.
- Μειώνεται ο κίνδυνος της απωλειών ισχύος, φαινόμενο αρκετά συχνό στα μεγάλα και κεντρικά δίκτυα. Επίσης, καθίσταται δυνατός ο έλεγχος τάσης και συχνότητας του δικτύου.
- Οι εταιρείες παροχής ηλεκτρισμού μπορούν να κάνουν επισκευή τμημάτων του δικτύου χωρίς να επηρεάζεται το φορτίο των καταναλωτών, καθώς αυτό μπορεί να εξυπηρετηθεί από τα μικροδίκτυα. Επίσης, στις ώρες αιχμής μειώνεται η πίεση στο κεντρικό δίκτυο μεταφοράς και διανομής.
- Ενισχύεται η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.
- Η συνολική απόδοση της ενέργειας αυξάνεται με τις εφαρμογές συμπαραγωγής (ΣΗΘ) που αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό των μικροδικτύων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κατανάλωση της ενέργειας που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα να μειώνεται κατά το 1/3 [25].

Στον αντίποδα, τα μικροδίκτυα παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία όμως δεν επισκιάζουν τα πλεονεκτήματά τους. Πιο συγκεκριμένα:

- Απαιτείται πολύπλοκος έλεγχος για τη διατήρηση του ισοζυγίου ενέργειας και ισχύος του μικροδικτύου. Η τάση, η συχνότητα και η ισχύς είναι οι τρεις κύριες παράμετροι που πρέπει να εξετάζονται.

- Η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να αποθηκεύεται σε συστοιχίες μπαταριών, με αποτέλεσμα να απαιτείται αρκετός χώρος αλλά και συντήρηση.
- Ο επανασυγχρονισμός με το κεντρικό δίκτυο παρουσιάζει συχνά δυσκολία.
- Η ακριβής μέτρηση της ενέργειας (παραγόμενης και λαμβανόμενης από το δίκτυο) και η αναμονή φορτίου αποτελούν συχνά εμπόδια για την ανάπτυξη των μικροδικτύων.
- Ο σχεδιασμός της τοποθέτησης αξιόπιστων διατάξεων προστασίας για τη σωστή λειτουργία του μικροδικτύου είναι πολύπλοκος και επιδέχεται βελτιώσεων.
- Ορισμένοι κανονισμοί διασύνδεσης, προκαλούν προβλήματα στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των μικροδικτύων γιατί πρακτικά αντιμετωπίζουν τη διεσπαρμένη παραγωγή ως αιτία διαταράξεων του κεντρικού δικτύου. Ακόμη, στα στοιχεία ελέγχου μεταξύ του μικροδικτύου και του κεντρικού δικτύου, τίθενται κανόνες που περιορίζουν την αλληλεπίδραση των δύο δικτύων.

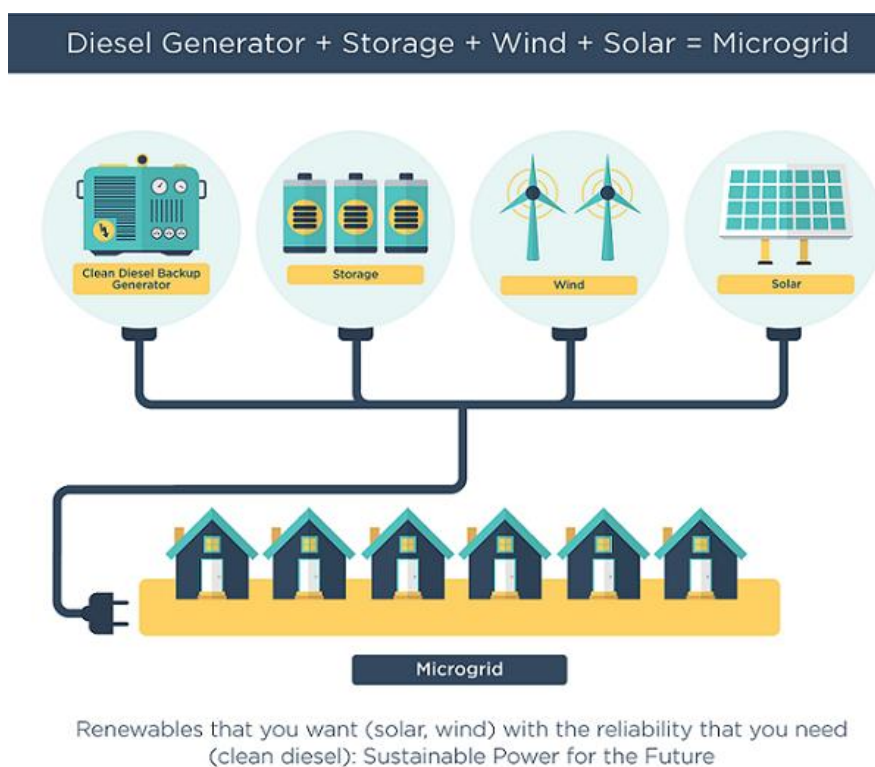
1.3. Η γεννήτρια diesel στο μικροδίκτυο

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ένα από τα πλεονεκτήματα των μικροδικτύων είναι η ικανότητά τους να ενσωματώνουν περισσότερες ΑΠΕ. Ωστόσο, ένα σημαντικό πρόβλημα των ΑΠΕ είναι η εγγενής αστάθεια στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εξαιτίας εξωγενών παραγόντων όπως οι καιρικές συνθήκες. Αυτή μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ευστάθεια του δικτύου. Η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στον ηλεκτρικό τομέα και πολλές λύσεις αναπτύσσονται διαρκώς για την απρόβλεπτη και συχνά διαλείπουσα παροχή ηλεκτρισμού από τις ΑΠΕ όπως [23]:

- καλύτερος σχεδιασμός ανεμογεννητριών, που έχει ως αποτέλεσμα ο συντελεστής δυναμικού τους, δηλαδή ο λόγος της πραγματικής ενέργειας που παράγει μια μονάδα σε ορισμένο χρονικό διάστημα προς τη μέγιστη ενέργεια που θα μπορούσε να παράγει στο διάστημα αυτό, να αυξάνεται και να αντισταθμίζει τις "κορυφές" και τις "κοιλιάδες" της διαλείπουσας παραγωγής,
- καινοτόμα φωτοβολταϊκά πάνελ, που μπορούν να δώσουν απάντηση στο πρόβλημα της παραγωγής ηλιακής ενέργειας σε συνθήκες σκιάς,
- αποθήκευση ενέργειας, από μπαταρίες σε επίπεδο φωτοβολταϊκού ή αιολικού πάρκου ως και μπαταρίες δικτύου, η οποία μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες σε ώρες αιχμής, καθώς και
- εξισορρόπηση μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, μέσω συγκεκριμένης τιμολογιακής πολιτικής.

Πέρα από τις παραπάνω λύσεις, για λόγους τόσο αξιοπιστίας όσο και οικονομίας, σχεδόν πάντα, είναι απαραίτητη στο μικροδίκτυο η ενσωμάτωση κάποιας συμβατικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, τόσο τα διασυνδεδεμένα όσο και τα απομονωμένα μικροδίκτυα αποτελούνται συνήθως από κάποιο συνδυασμό πηγών ηλιακής ενέργειας, πηγών αιολικής ενέργειας, συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ), από αποθήκευση ενέργειας και από γεννήτριες diesel. Σύμφωνα με έρευνα της Navigant Research, γεννήτριες diesel χρησιμοποιούνται περίπου σε ποσοστό 38% των νέων μικροδικτύων και σε ποσοστό 11% της παγκόσμιας δυναμικότητας ηλεκτροπαραγωγής.

Οι γεννήτριες diesel έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν γρήγορα να προσαρμόσουν την ισχύ τους στις εκάστοτε απαιτήσεις. Για αυτό, στην περίπτωση διασυνδεδεμένου μικροδικτύου ενισχύουν την αξιοπιστία του κεντρικού δικτύου και λειτουργούν ως βαλβίδα ασφαλείας σε περίπτωση κατάρρευσης του. Ιδιαίτερα όταν το μικροδίκτυο βρίσκεται σε απομονωμένη λειτουργία, όπου οι διακυμάνσεις ισχύος και τα μεταβατικά φαινόμενα είναι ζωτικής σημασίας, οι γεννήτριες diesel εξασφαλίζουν την εξισορρόπηση ισχύος και την ευστάθεια του συστήματος.



Εικόνα 4: Μικροδίκτυο με γεννήτρια Diesel

1.4. Σκοπός και δομή διπλωματικής εργασίας

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η γεννήτρια Diesel παίζει καθοριστικό ρόλο στην εξασφάλιση της ευστάθειας ενός μικροδικτύου. Για το λόγο αυτό, για την ενσωμάτωση της στο μικροδίκτυο, θα πρέπει να είναι δυνατή η πλήρης ανάλυση της

δυναμικής της συμπεριφοράς και κατά συνέπεια, η γνώση των τιμών των παραμέτρων που την περιγράφουν. Οι παράμετροι αυτές, για τις οποίες γίνεται λόγος στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας, είναι απαραίτητες για την υλοποίηση του απαραίτητου ελέγχου της λειτουργίας του μικροδικτύου και περιλαμβάνονται συχνά στα στοιχεία που παρέχει ο κατασκευαστής της γεννήτριας.

Ωστόσο, επειδή η γεννήτρια diesel αποτελεί μια εδραιωμένη τεχνολογία, πολλές φορές μικροδίκτυα αναπτύσσονται γύρω από ήδη εγκατεστημένες γεννήτριες. Για τις γεννήτριες αυτές, η ακριβής γνώση των τιμών των τυπικών παραμέτρων τους είναι συνήθως αδύνατη, καθώς μπορεί είτε τα κατασκευαστικά τους στοιχεία να μην είναι διαθέσιμα, είτε ακόμα κι αν είναι, οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων της γεννήτριας τη δεδομένη χρονική στιγμή να έχουν αλλάξει με την πάροδο πολλών χρόνων λειτουργίας της. Πιο συγκεκριμένα, η καταπόνηση της γεννήτριας από διάφορα μεταβατικά φαινόμενα κατά τη διάρκεια των χρόνων λειτουργίας της επηρεάζουν σημαντικά τις τιμές αυτές.

Στην παρούσα διπλωματική, γίνεται η εκτίμηση των παραμέτρων αυτών μέσω του μη γραμμικού μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας, με τη χρήση μεθόδων ανίχνευσης που βασίζονται πάνω σε πραγματικές μετρήσεις των αποκρίσεων της. Λόγω της απουσίας πραγματικής γεννήτριας για τη διεξαγωγή των απαραίτητων μετρήσεων, απαιτείται αρχικά η προσομοίωση μιας σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων με συγκεκριμένο διάνυσμα παραμέτρων, χρησιμοποιώντας τα μη γραμμικά μοντέλα της σύγχρονης γεννήτριας στο χώρο κατάστασης. Η γεννήτρια αυτή αντιπροσωπεύει το πραγματικό σύστημα και η απόκριση της σε κατάλληλα επιλεγμένο σήμα διαταραχής αντιστοιχεί στα πραγματικά δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν ως βάση για την αναγνώριση συστήματος που θα υλοποιηθεί.

Θεωρώντας αρχικά ως αποκρίσεις της γεννήτριας τα δεδομένα προσομοίωσης από το μη γραμμικό μοντέλο τρίτης τάξης και χρησιμοποιώντας ως το προς προσδιορισμό μοντέλο ένα μοντέλο ίδιας τάξης, υλοποιείται η διαδικασία προσδιορισμού των παραμέτρων του συστήματος με τη χρήση της μεθόδου PEM (Prediction Error Method) και συγκεκριμένων αλγορίθμων τοπικής βελτιστοποίησης. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιείται μια σύγκριση μεταξύ των αλγορίθμων αυτών.

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται θεωρώντας ως αποκρίσεις της γεννήτριας τα δεδομένα προσομοίωσης από το μη γραμμικό μοντέλο πέμπτης τάξης, ώστε το πρόβλημα προσδιορισμού των παραμέτρων να είναι πιο ρεαλιστικό.

Τέλος, μελετάται η εφαρμογή της γνωστής μεθόδου ολικής βελτιστοποίησης Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing), στο πρόβλημά και αξιολογείται η αποτελεσματικότητά της σε σχέση με τον επιλεγμένο αλγόριθμο τοπικής βελτιστοποίησης.

Η ανάπτυξη της διερεύνησης έγινε σε 5 κεφάλαια, περίληψη των οποίων δίνεται παρακάτω.

Στο κεφάλαιο 2 δίνεται όλο το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς μιας σύγχρονης γεννήτριας. Αφού αρχικά παρουσιάζεται ένα λεπτομερές μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας συναρτήσει των κυκλωματικών της στοιχείων, στη συνέχεια αναπτύσσονται βασισμένα σε αυτό τα διαφορετικής τάξης μοντέλα χώρου κατάστασης που περιγράφονται μόνο από τις τυπικές παραμέτρους. Στο πλαίσιο αυτό, ορίζονται όλες οι τυπικές παράμετροι και σταθερές χρόνου που απαιτούν προσδιορισμό και καταδεικνύεται η σημασία τους.

Στο κεφάλαιο 3 παρατίθενται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες γύρω από την αναγνώριση συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στις διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης ενός συστήματος, στα βασικά στάδια της διαδικασίας αναγνώρισης συστήματος και στη μέθοδο του σφάλματος πρόβλεψης (PEM). Επιπλέον, περιγράφονται οι αλγόριθμοι τοπικής βελτιστοποίησης και η μέθοδος της Προσομοιωμένης Ανόπτησης, που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της εργασίας.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της γεννήτριας και βασίζεται στη μέθοδο PEM. Στο πλαίσιο αυτό, παρατίθενται όλα τα ενδιάμεσα αποτελέσματα για τον καθορισμό βασικών παραγόντων της διαδικασίας καθώς και τα τελικά αποτελέσματα με βάση τα οποία αξιολογείται η προτεινόμενη μέθοδος. Επίσης, γίνεται επαλήθευση των μοντέλων που προκύπτουν από τη διαδικασία με συγκεκριμένες δοκιμές.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται εν συντομία ο αλγόριθμος της Προσομοιωμένης Ανόπτησης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Το μοντέλο που προκύπτει επαληθεύεται με τις ίδιες δοκιμές που εφαρμόστηκαν και για την προηγούμενη μέθοδο. Τέλος, εξετάζεται ο συνδυασμός των δύο μεθόδων.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα και οι δυνατότητες επέκτασης της εργασίας.

Τέλος, παρουσιάζεται πλήρες ευρετήριο της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε.

2. Μοντελοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς της σύγχρονης γεννήτριας

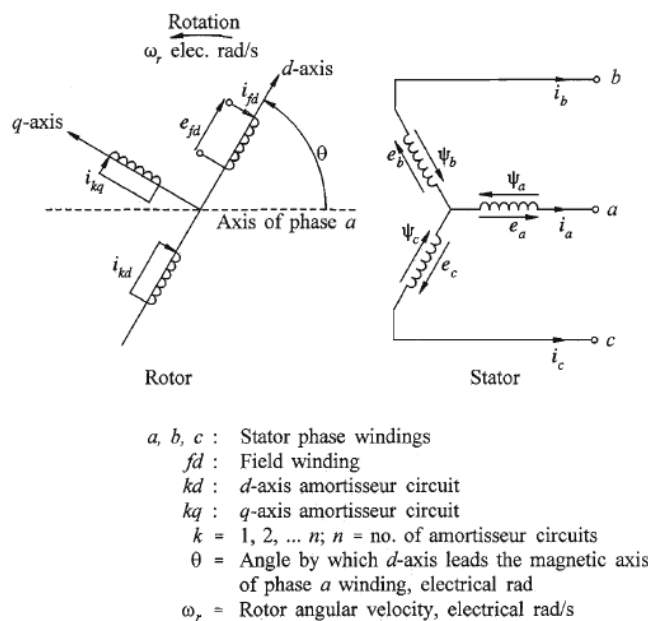
2.1. Μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα

Ο σκοπός αυτής της ενότητας είναι να εισάγει ένα λεπτομερές μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας, το οποίο λαμβάνει υπόψη όλα τα σχετικά δυναμικά φαινόμενα που συμβαίνουν σε αυτήν. Από το μοντέλο αυτό, με συγκεκριμένες απλοποιήσεις, μπορεί κανείς να οδηγηθεί στα μη γραμμικά μοντέλα διαφορετικών τάξεων που χρησιμοποιούμε στα πλαίσια της εργασίας. Το μοντέλο είναι ευρέως γνωστό από τη δεκαετία του 1930 και για αυτό θα παρουσιαστούν μόνο οι κύριες παραδοχές και τα αποτελέσματα του.

2.1.1. Παραδοχές για την ανάπτυξη του μοντέλου

Ως γνωστόν μια σύγχρονη ηλεκτρική μηχανή αποτελείται από δύο μέρη, ένα σταθερό μέρος που ονομάζεται στάτης και ένα στρεφόμενο που λέγεται δρομέας. Τα δύο αυτά μέρη χωρίζονται από ένα μικρό διάκενο αέρα. Μια τριφασική σύγχρονη γεννήτρια έχει τρία όμοια τυλίγματα οπλισμού συμμετρικά καταναμημένα γύρω από το διάκενο αέρος, και ένα τύλιγμα πεδίου διέγερσης. Επίσης, μπορεί να διαθέτει ένα ή περισσότερα τυλίγματα απόσβεσης. Για λόγους ευκολίας, στην ενότητα αυτή θα υποθέσουμε ότι υπάρχει ένα τύλιγμα απόσβεσης σε κάθε άξονα (d,q) της μηχανής. Συνηθίζεται τα τυλίγματα οπλισμού να τοποθετούνται στο στάτη και τα τυλίγματα πεδίου και απόσβεσης στο δρομέα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν και περιπτώσεις όπου συμβαίνει το αντίθετο. Αυτό δεν έχει καμία επίδραση στην προσέγγιση της μοντελοποίησης της μηχανής, αφού μόνο η σχετική κίνηση ανάμεσα στο στάτη και το δρομέα είναι σημαντική.

Η εικόνα 5 παρουσιάζει τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη του μοντέλου.



Εικόνα 5: Τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα μιας σύγχρονης μηχανής

Οι παρακάτω παραδοχές είναι απαραίτητες για να απλοποιήσουμε την πραγματική σύγχρονη γεννήτρια και να αναπτύξουμε πιο εύκολα το μοντέλο της [5].

1. Υποθέτουμε ότι κάθε τύλιγμα που υπάρχει στη μηχανή παράγει μια ημιτονοειδή μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) κατά μήκος του διακένου αέρος, η οποία - για τη φάση α - μπορεί να εκφραστεί ως $\theta_\alpha = \Theta_\alpha \sin(\frac{P}{2}\omega_s)$, όπου P αντιπροσωπεύει τον αριθμό των πόλων της μηχανής και το ω_s συμβολίζει την γωνιακή ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη.
2. Η μαγνητική διαπερατότητα του σιδήρου της μηχανής θεωρείται άπειρη, με αποτέλεσμα να αγνοούνται όλα τα φαινόμενα μαγνητικού κορεσμού και το φαινόμενο των άκρων (θυσάνωση).
3. Οι σχισμές του στάτη δεν προκαλούν αισθητή διακύμανση των επαγωγών του δρομέα με τη θέση του δρομέα. Ο μόνος παράγοντας που συμβάλλει στην μαγνητική ασυμμετρία της μηχανής είναι η κατασκευή του δρομέα. Η επίδραση των εγκοπών του δρομέα ή του στάτη μπορούν να ληφθούν υπόψη με τον συντελεστή Carter, με αποτέλεσμα την προσέγγιση της συνάρτησης της μαγνητικής αγωγιμότητας ως $\lambda = \lambda_0 - \lambda_2 \cos(P \omega_s)$, όπου τα λ_0 και λ_2 εξαρτώνται από τη γεωμετρία του διακένου.
4. Η μαγνητική υστέρηση θεωρείται αμελητέα.

Τα σφάλματα που εισάγονται από τις παραδοχές αυτές είναι συνήθως αρκετά μικρά ώστε να αγνοούνται, ειδικά στα πλαίσια της ανάλυσης της δυναμικής συμπεριφοράς της μηχανής.

2.1.2. Εξαγωγή των ηλεκτρικών εξισώσεων του μοντέλου

Μία σύγχρονη μηχανή μπορεί να περιγραφεί από ένα σύστημα $n+2$ εξισώσεων, n από τις οποίες είναι ηλεκτρικές και 2 μηχανικές.

Αρχικά, θα ασχοληθούμε με τις ηλεκτρικές εξισώσεις. Ο αριθμός n των ηλεκτρικών εξισώσεων είναι ίσος με τον αριθμό των ανεξάρτητων ηλεκτρικών μεταβλητών που απαιτούνται για να περιγράψουν τη μηχανή. Οι μεταβλητές αυτές μπορούν να είναι είτε τα ρεύματα είτε οι κλειστές διαδρομές της μαγνητικής ροής. Στην παρούσα προσέγγιση, τα ρεύματα επιλέγονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι ηλεκτρικές εξισώσεις προκύπτουν από την εφαρμογή του νόμου τάσεων του Kirchoff για κάθε τύλιγμα, δηλαδή εξισώνοντας την τάση τερματισμού του τυλίγματος με το άθροισμα των ωμικών και επαγωγικών πτώσεων τάσης κατά μήκος αυτού. Τα τυλίγματα απόσβεσης είναι πάντα βραχυκυκλωμένα, οπότε η τερματική τους τάση είναι μηδέν. Για να υπολογίσουμε σωστά την επαγωγική πτώση τάσης σε ένα τύλιγμα, πρέπει να εκτιμηθεί η συνολική μαγνητική ροή που συνδέεται με το τύλιγμα. Αυτό επιτυγχάνεται με έναν πίνακα επαγωγών, που συσχετίζει τις μαγνητικές ροές με τα ρεύματα όλων των τυλιγμάτων. Για τις μηχανές έκτυπων πόλων, αυτός ο πίνακας εξαρτάται από τη θέση

του δρομέα. Αυτό οφείλεται στην μαγνητική ασυμμετρία του δρομέα: λόγω του τρόπου με τον οποίο διαμορφώνεται ο δρομέας μιας μηχανής έκτυπων πόλων, υπάρχει μια προτιμητέα μαγνητική κατεύθυνση. Αυτή η κατεύθυνση συμπίπτει με την κατεύθυνση της ροής που παράγεται από το τύλιγμα πεδίου, και ορίζεται ως ο άξονας της μηχανής "d". Ο άξονας "q" βρίσκεται 90° μπροστά (με την αντιωρολογιακή φορά) σε σχέση με τον άξονα "d" [5].

Έτσι, η θέση του δρομέα μπορεί να εκφραστεί ως μία γωνία θ , μεταξύ του μαγνητικού άξονα της φάσης a του οπλισμού και του άξονα "d" του δρομέα. Η εξάρτηση του πίνακα επαγωγών από την θέση του δρομέα αντιπροσωπεύει την κύρια δυσκολία στη μοντελοποίηση της σύγχρονης μηχανής. Μια λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η αλλαγή συστήματος αναφοράς, (ή πλαισίου αναφοράς), στο οποίο εκφράζονται οι ηλεκτρικές και μαγνητικές μεταβλητές της μηχανής. Στο παρελθόν, το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιούταν ήταν το ονομαζόμενο στατικό (stationary), ή πλαίσιο αναφοράς του στάτη, ή πλαίσιο αναφοράς "abc". Σε αυτό, οι μεταβλητές εκφράζονται σαν πραγματικά να μετρούνται στην μηχανή, αλλά οι παράμετροι της μηχανής είναι χρονικά μεταβαλλόμενες (αφού η θ είναι συνάρτηση του χρόνου).

Η αλλαγή συστήματος αναφοράς γίνεται με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Park, που βοηθάει στο να εκφραστούν οι μεταβλητές από το ακίνητο σύστημα αναφοράς "abc" στο σύστημα "dq", το οποίο είναι το μόνο σύστημα αναφοράς που οδηγεί σε σταθερές παραμέτρους της μηχανής, καθώς περιστρέφεται με την ταχύτητα του δρομέα. Ο πίνακας μετασχηματισμού Park είναι ο ακόλουθος:

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \theta & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Η γωνία θ χαρακτηρίζει την κίνηση του δρομέα και σχηματίζεται ανάμεσα στον ευθύ άξονα "d" και τον άξονα της φάσης a του στάτη, ενώ το πεδίο του δρομέα περιστρέφεται με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_r . Η σχέση που συνδέει τα παραπάνω μεγέθη είναι:

$$\theta = \omega_r t + \theta(0) \quad (2.2)$$

όπου $\theta(0)$ η αρχική τιμή της γωνίας σε (rad).

Ισχύει γενικά:

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

όπου f_d, f_q οποιεσδήποτε παράμετροι εκφρασμένες στο "dq" σύστημα και f_a, f_b, f_c οποιεσδήποτε παράμετροι εκφρασμένες στο "abc" σύστημα αναφοράς.

Όταν οι ηλεκτρικές εξισώσεις της μηχανής μετασχηματίζονται από το "abc" στο "dq" σύστημα αναφοράς, παίρνουμε τις ακόλουθες σχέσεις με όλα τα μεγέθη εκφρασμένα στο ανά μονάδα σύστημα (pu) [4]:

- Εξισώσεις τάσης του στάτη

$$v_d = p\psi_d - \psi_q\omega_r - R_s i_d \quad (2.3)$$

$$v_q = p\psi_q + \psi_d\omega_r - R_s i_q \quad (2.4)$$

- Εξισώσεις τάσης του δρομέα

$$v_{fd} = p\psi_{fd} + R_{fd} i_{fd} \quad (2.5)$$

$$0 = p\psi_{kd} + R_{kd} i_{kd} \quad (2.6)$$

$$0 = p\psi_{kq} + R_{kq} i_{kq} \quad (2.7)$$

- Εξισώσεις μαγνητικής ροής του στάτη

$$\psi_d = -(L_{md} + L_{ls})i_d + L_{md}i_{fd} + L_{md}i_{kd} \quad (2.8)$$

$$\psi_q = -(L_{mq} + L_{ls})i_q + L_{mq}i_{kq} \quad (2.9)$$

- Εξισώσεις μαγνητικής ροής του δρομέα

$$\psi_{fd} = (L_{lfd} + L_{md})i_{fd} + L_{md}i_{kd} - L_{md}i_d \quad (2.10)$$

$$\psi_{kd} = L_{md}i_{fd} + (L_{lkd} + L_{md})i_{kd} - L_{md}i_d \quad (2.11)$$

$$\psi_{kq} = (L_{lkq} + L_{mq})i_{kq} - L_{mq}i_q \quad (2.12)$$

όπου:

ω_r : η ταχύτητα του δρομέα

v_d, v_q : η τερματική τάση οπλισμού στον ευθύ και στον εγκάρσιο άξονα αντίστοιχα

i_d, i_q : το ρεύμα οπλισμού στον ευθύ και στον εγκάρσιο άξονα αντίστοιχα

v_{fd} : η τάση του τυλίγματος διέγερσης (ανηγμένη στο στάτη)

i_{fd} : το ρεύμα του τυλίγματος διέγερσης (ανηγμένο στο στάτη)

i_{kd}, i_{kq} : το ρεύμα του τυλίγματος απόσβεσης του άξονα d και q αντίστοιχα (ανηγμένα στο στάτη)

ψ_d, ψ_q : η συνολική ροή οπλισμού στον άξονα d και q αντίστοιχα

R_s : η φασική αντίσταση οπλισμού

L_{ls} : η φασική επαγωγή σκέδασης οπλισμού

L_{md}, L_{mq} : η συζευγμένη επαγωγή στον άξονα d και q αντίστοιχα

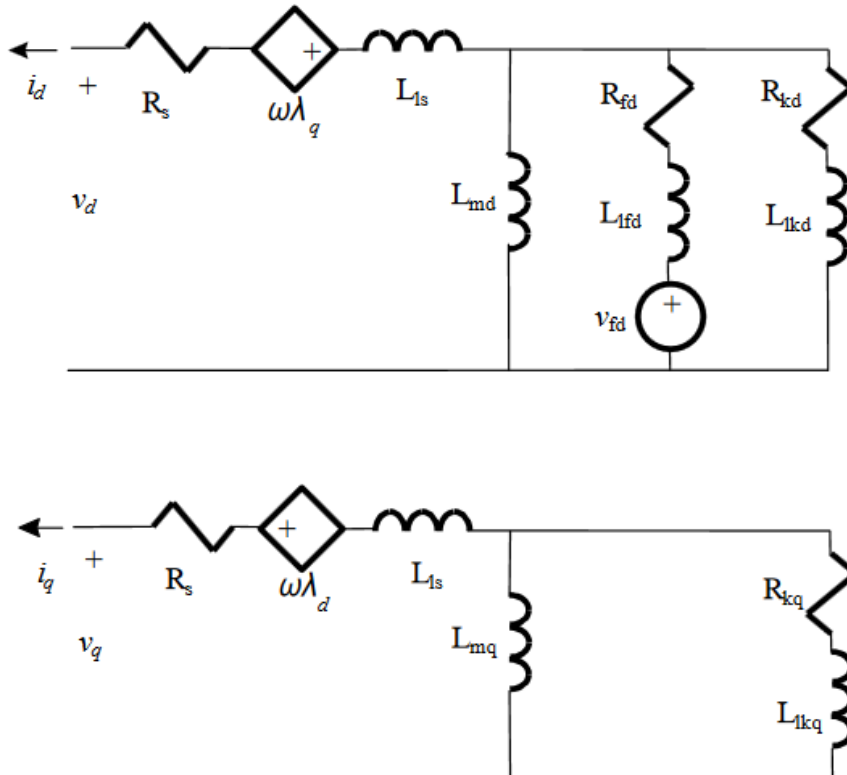
R_{fd} : η αντίσταση του τυλίγματος διέγερσης (ανηγμένη στο στάτη)

L_{lfd} : η επαγωγή σκέδασης του τυλίγματος διέγερσης (ανηγμένη στο στάτη)

R_{kd}, R_{kq} : η αντίσταση του τυλίγματος απόσβεσης του άξονα d και q αντίστοιχα (ανηγμένα στο στάτη)

L_{lkd}, L_{lkq} : η επαγωγή σκέδασης του τυλίγματος απόσβεσης του άξονα d και q αντίστοιχα (ανηγμένα στο στάτη)

Οι εξισώσεις (2.3) – (2.12) περιγράφουν το ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα, το οποίο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 6: Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα

Παρόλο που τα τυλίγματα οπλισμού εκφράζονται στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα και που δεν υπάρχουν χρονικά μεταβαλλόμενες επαγωγές, το γεγονός ότι τα τυλίγματα οπλισμού είναι μαγνητικά συζευγμένα λαμβάνεται υπόψη μέσω των συζευκτικών όρων στους κλάδους οπλισμού στα ισοδύναμα κυκλώματα των αξόνων "d" και "q". Για κάθε άξονα, ο όρος αυτός ισούται με το γινόμενο της ταχύτητας του δρομέα και της συζευγμένης ροής με τα τυλίγματα οπλισμού του άλλου άξονα [5].

2.1.3. Οι μηχανικές εξισώσεις του μοντέλου

Για να ολοκληρωθεί το μοντέλο, απαραίτητες είναι οι μηχανικές του εξισώσεις.

Η θέση του πεδίου του δρομέα καθορίζεται από την ηλεκτρική γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του δρομέα και ενός άξονα που στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα ω_s . Η γωνία αυτή συμβολίζεται με δ (rad) και ονομάζεται εσωτερική γωνία του δρομέα. Για τη γωνία αυτή ισχύει:

$$\delta = \theta - \omega_s t + \delta_0 \quad (2.13)$$

όπου δ_0 είναι η αρχική τιμή της γωνίας ως προς το στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Παραγωγίζοντας την παραπάνω σχέση, με δεδομένο ότι ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας θ είναι ίσος με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_r προκύπτει ότι:

$$\dot{\delta} = \dot{\theta} - \omega_s = \omega_r - \omega_s \quad (2.14)$$

Η σχέση αυτή μας δείχνει ότι ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας δ ισούται με τη διαφορά της γωνιακής ταχύτητας του άξονα αναφοράς ω_s από την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_r . Εκφράζοντας τις γωνιακές ταχύτητες στο ανά μονάδα σύστημα προκύπτει η σχέση:

$$\dot{\delta} = \omega_r - 1 \quad (2.15)$$

Η δυναμική εξίσωση η οποία εκφράζει το ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας του δρομέα συναρτήσει της μεταβολής της ροπής στο ανά μονάδα σύστημα είναι:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} [T_m - T_e - D(\omega_r - 1)] \quad (2.16)$$

όπου

J : η ανά μονάδα αδράνεια του δρομέα

T_m, T_e : η ανά μονάδα μηχανική και ηλεκτρομαγνητική ροπή αντίστοιχα

D : ο ανά μονάδα συντελεστής απόσβεσης.

2.2. Τυπικές παράμετροι σύγχρονης μηχανής

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα χρησιμοποιεί τις επαγωγές και τις αντιστάσεις των τυλιγμάτων του δρομέα και του στάτη ως παραμέτρους. Αυτές ονομάζονται θεμελιώδεις ή βασικές παράμετροι και παρόλο που καθορίζουν πλήρως τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της μηχανής, δεν μπορούν να προσδιοριστούν από τις μετρούμενες αποκρίσεις της σύγχρονης μηχανής. Έτσι, τα δεδομένα απόκρισης μιας μηχανής πρέπει να εκφράζονται σε όρους παραμέτρων που σχετίζονται με την παρατηρούμενη από τους ακροδέκτες της μηχανής συμπεριφορά σε συγκεκριμένες δοκιμές. Αυτές είναι οι τυπικές παράμετροι της σύγχρονης μηχανής που προσδιορίζονται στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

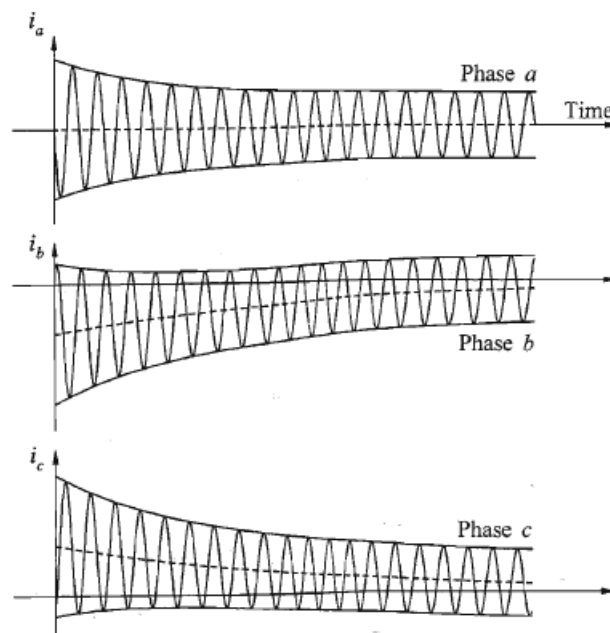
2.2.1. Σημασία των τυπικών παραμέτρων

Οι τυπικές παράμετροι είναι πολύ σημαντικές, καθώς δίνουν στους κατασκευαστές όσο και στους χρήστες των σύγχρονων μηχανών μια πρώτη προσέγγιση του μεγέθους των ρευμάτων βραχυκυκλώματος καθώς και του ρυθμού με τον οποίο αυτά μειώνονται. Επιπλέον, η γνώση των μεγεθών αυτών δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των μηχανικών καταπονήσεων των τυλιγμάτων του στάτη που είναι αποτέλεσμα των υπερβολικών ρευμάτων που διαρρέουν τη μηχανή κατά τη διάρκεια ηλεκτρικών διαταραχών που υφίστανται οι ακροδέκτες της.

Πιο συγκεκριμένα, εάν ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα συμβεί σε μια σύγχρονη μηχανή τα ρεύματα των τριών φάσεων είναι όπως φαίνονται στην εικόνα 7. Το ρεύμα του σφάλματος σε κάθε φάση αποτελείται από δύο διακριτές συνιστώσες [3]:

1. Μια εναλλασσόμενη συνιστώσα θεμελιώδους συχνότητας, η οποία μειώνεται αρχικά πολύ γρήγορα (σε λίγους κύκλους) και στη συνέχεια σχετικά αργά (σε αρκετά δευτερόλεπτα) μέχρι την τιμή της μόνιμης κατάστασης.
2. Μια dc συνιστώσα που μειώνεται εκθετικά σε αρκετούς κύκλους.

Η γρήγορη αρχική μείωση της εναλλασσόμενης συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης οφείλεται στη γρήγορη μείωση της μαγνητικής ροής που συνδέει τα υπομεταβατικά κυκλώματα (k_d και k_q όπως συμβολίζονται στο πλήρες μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας) ενώ το αργά μειούμενο μέρος της εναλλασσόμενης συνιστώσας οφείλεται στη σχετικά αργή μείωση της μαγνητικής ροής που συνδέει τα μεταβατικά κυκλώματα (τύλιγμα πεδίου και επιπλέον τύλιγμα απόσβεσης στον άξονα q , αν υπάρχει).

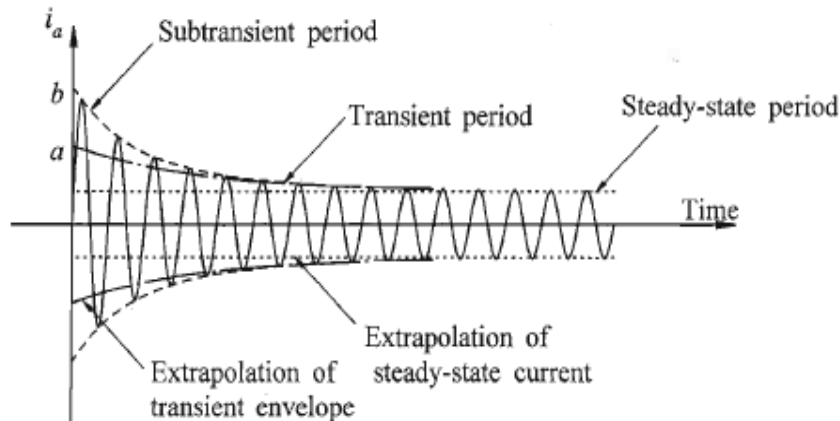


Εικόνα 7: Ρεύματα βραχυκυκλώματος στις 3 φάσεις

Οι dc συνιστώσες έχουν διαφορετικά πλάτη στις τρεις φάσεις και μειώνονται με μια σταθερά χρόνου T_α , την χρονική σταθερά του οπλισμού. Αυτή η χρονική σταθερά ισούται με το βαθμό της πραγματικής επαγωγής οπλισμού (με τα dc ρεύματα στον οπλισμό) προς την αντίσταση οπλισμού [3].

Η επίδραση της dc συνιστώσας στο φασικό ρεύμα συχνά αμελείται ή μελετάται ξεχωριστά. Αυτό γίνεται αμελώντας τους όρους $p\psi_d$ και $p\psi_q$ από τις σχέσεις (2.3) και (2.4) του πλήρους μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας. Αυτοί οι όροι αναπαριστούν τα μεταβατικά φαινόμενα στον στάτη και εμποδίζουν τις ψ_d και ψ_q από το να αλλάζουν στιγμιαία παράγοντας την dc συνιστώσα στα φασικά ρεύματα. Με την παράλειψη

αυτών των όρων, δεν υποθέτουμε ότι οι ψ_d και ψ_q παραμένουν σταθερές, αλλά ότι αλλάζουν στιγμιαία ακολουθώντας μια διαταραχή [3]. Το ρεύμα βραχυκυκλώματος του οπλισμού, μετά από αυτήν την απλοποίηση, φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 8: Η συνιστώσα θεμελιώδους συχνότητας του ρεύματος οπλισμού

Η κυματομορφή του ρεύματος μπορεί να διαιρεθεί σε 3 διακριτές χρονικές περιόδους:

- την υπομεταβατική περίοδο, που διαρκεί μόνο για τους πρώτους λίγους κύκλους, κατά τη διάρκεια των οποίων το ρεύμα μειώνεται γρήγορα,
- τη μεταβατική περίοδο, που διαρκεί περισσότερο χρόνο, κατά τη διάρκεια της οποίας το πλάτος του ρεύματος μειώνεται σημαντικά πιο αργά, και τέλος
- την περίοδο μόνιμης κατάστασης, κατά τη διάρκεια της οποίας το πλάτος του ρεύματος παραμένει σταθερό.

Οι τυπικές παράμετροι της σύγχρονης μηχανής καθορίζουν τα πλάτη της κυματομορφής βραχυκυκλώματος κατά τη διάρκεια των τριών χρονικών περιόδων και τον ρυθμό μείωσης κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων περιόδων.

2.3. Μη γραμμικά μοντέλα σύγχρονης γεννήτριας

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα μη γραμμικά μοντέλα σύγχρονης γεννήτριας διαφόρων τάξεων που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας. Για τη μοντελοποίηση της σύγχρονης γεννήτριας, παρόλο που έχουν χρησιμοποιηθεί γραμμικά μοντέλα για κάποιες μελέτες, ένα μη γραμμικό μοντέλο είναι απαραίτητο για περισσότερη ακρίβεια. Υπάρχουν δύο είδη μη γραμμικοτήτων. Το πρώτο είδος είναι αυτές που μπορούν να μοντελοποιηθούν από τις γνωστές δομές των μη γραμμικών μοντέλων, όπως για παράδειγμα οι ημιτονοειδείς και συνημιτονοειδείς συναρτήσεις της γωνίας του δρομέα (δ) που εμπεριέχονται στα παρακάτω μοντέλα. Το δεύτερο είδος είναι αυτές που δε λαμβάνονται υπόψη στη δομή των μοντέλων, όπως για παράδειγμα ο μαγνητικός κορεσμός στα σιδερένια μέρη του στάτη και του δρομέα. Πολλά μοντέλα έχουν προταθεί ώστε να λαμβάνεται υπόψη ο μαγνητικός κορεσμός, αλλά κρίνονται

αποτυχημένα καθώς οι καμπύλες κορεσμού διαφέρουν σε διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες της σύγχρονης μηχανής [24].

2.3.1. Μοντέλο 5ης τάξης

Όπως προκύπτει από την προηγούμενη ενότητα, η παράλειψη των όρων $p\psi_d$ και $p\psi_q$ δεν θα επηρέαζε ουσιαστικά τον προσδιορισμό των τιμών των τυπικών παραμέτρων της σύγχρονης γεννήτριας, οπότε οι όροι αυτοί αμελούνται από το μοντέλο και οι εξισώσεις τάσης του στάτη εμφανίζονται ως αλγεβρικές. Έτσι, το μοντέλο που προκύπτει αποτελείται από πέντε διαφορικές εξισώσεις (τις τρεις εξισώσεις τάσης του δρομέα και τις δύο μηχανικές εξισώσεις). Ταυτόχρονα, αμελείται και η επίδραση των διακυμάνσεων της ταχύτητας με την υπόθεση ότι $\omega_r \cong 1.0 pu$, δηλαδή $\omega_r \cong \omega_o \frac{rad}{s}$. Αυτό δεν σημαίνει ότι η ταχύτητα είναι σταθερή, αλλά ότι οι αλλαγές της είναι μικρές και δεν επηρεάζουν την τάση. Οι απλοποιημένες εξισώσεις τάσης του στάτη είναι:

$$v_d = -\psi_q - R_s i_d \quad (2.17)$$

$$v_q = +\psi_d - R_s i_q \quad (2.18)$$

Με τη βοήθεια του πίνακα 1, επαναδιατυπώνουμε τις εξισώσεις τάσης του δρομέα συναρτήσει των τυπικών παραμέτρων της σύγχρονης γεννήτριας ως εξής:

$$\frac{d}{dt} e'_q = \frac{1}{T'_{do}} [E_{fd} - e'_q - i_d (x_d - x'_d)] \quad (2.19)$$

$$\frac{d}{dt} e''_q = \frac{1}{T''_{do}} [-e''_q - i_d (x'_d - x''_d) + e'_q] \quad (2.20)$$

$$\frac{d}{dt} e''_d = \frac{1}{T''_{qo}} [-e''_d + i_q (x_q - x''_q)] \quad (2.21)$$

Μαζί με τις εξισώσεις (2.15) και (2.16) αποτελούν το μοντέλο πέμπτης τάξης της σύγχρονης γεννήτριας. Οι εξισώσεις τάσης του στάτη παίρνουν τη μορφή [17]:

$$v_d = e''_d + x''_q i_q - R_s i_d \quad (2.22)$$

$$v_q = e''_q - x''_d i_d - R_s i_q \quad (2.23)$$

Για την ηλεκτρομαγνητική ροπή ισχύει η σχέση [17]:

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d \Rightarrow T_e = e''_q i_q + e''_d i_d - (x''_d - x''_q) i_d i_q \quad (2.24)$$

Στις εξισώσεις του μοντέλου πέμπτης τάξης συμμετέχουν οι τυπικές παράμετροι:

$$J, D, x_d, x'_d, x''_d, x_q, x''_q, T'_{do}, T''_{do}, T''_{qo}, R_s$$

Πέρα από αυτές, από το μοντέλο πέμπτης τάξης μπορούν να προσδιοριστούν και οι σταθερές χρόνου βραχυκυκλώματος από τις σχέσεις:

$$\frac{x_d}{x'_d} = \frac{T'_{do}}{T'_{d'}} \quad (2.25)$$

$$\frac{x'_d}{x''_d} = \frac{T''_{do}}{T''_{d'}} \quad (2.26)$$

$$\frac{x_q}{x''_q} = \frac{T''_{qo}}{T''_{q'}} \quad (2.27)$$

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη της σύγχρονης γεννήτριας

Σύγχρονη επαγωγή L_d στον άξονα d	$L_d = L_{md} + L_{ls}$
Μεταβατική επαγωγή L'_d στον άξονα d	$L'_d = L_{ls} + \frac{L_{md}L_{lfd}}{L_{md} + L_{lfd}}$
Υπομεταβατική επαγωγή L''_d στον άξονα d	$L''_d = L_{ls} + \frac{L_{md}L_{lfd}L_{lkd}}{L_{md}L_{lfd} + L_{md}L_{lkd} + L_{lfd}L_{lkd}}$
Σύγχρονη επαγωγή L_q στον άξονα q	$L_q = L_{mq} + L_{ls}$
Υπομεταβατική επαγωγή L''_q στον άξονα q	$L''_q = L_{ls} + \frac{L_{mq}L_{lkq}}{L_{mq} + L_{lkq}}$
Μεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτοκυκλώματος T'_{do} στον άξονα d	$T'_{do} = \frac{L_{lfd} + L_{md}}{R_{fd}}$
Υπομεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτοκυκλώματος T''_{do} στον άξονα d	$T''_{do} = \frac{L_{lkd} + \frac{L_{md}L_{lfd}}{L_{md} + L_{lfd}}}{R_{kd}}$
Υπομεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτοκυκλώματος T''_{qo} στον άξονα q	$T''_{qo} = \frac{L_{lkq} + L_{mq}}{R_{kq}}$
Μεταβατική ΗΕΔ e'_q στον άξονα q	$e'_q = \frac{X_{md}}{X_{md} + X_{lfd}} \psi_{fd}$
Υπομεταβατική ΗΕΔ e''_q στον άξονα q	$e''_q = \frac{X_{md}}{X_{md} + X_{lkd}} \psi_{kd}$
Υπομεταβατική ΗΕΔ e''_d στον άξονα d	$e''_d = -\frac{X_{mq}}{X_{mq} + X_{lkq}} \psi_{kq}$
ΗΕΔ διέγερσης	$E_{fd} = \frac{X_{md}}{R_{fd}} v_{fd}$

2.3.2. Μοντέλο 3ης τάξης

Το μοντέλο 3ης τάξης προκύπτει από το μοντέλο 5ης τάξης αν αγνοήσουμε την επίδραση των τυλιγμάτων απόσβεσης στη δυναμική συμπεριφορά της σύγχρονης

γεννήτριας. Αυτή η απλοποίηση εφαρμόζεται πολύ συχνά όταν μελετάται η ευστάθεια και οι ταλαντώσεις ενός ηλεκτρικού συστήματος με πολλές μηχανές. Τα τυλίγματα απόσβεσης μπορούν να παραλειφθούν ιδιαίτερα όταν δεν μας ενδιαφέρει η συμπεριφορά της μηχανής στην υπομεταβατική περίοδο [24].

Έτσι, θεωρούμε πώς το μόνο τύλιγμα της σύγχρονης γεννήτριας είναι το τύλιγμα του πεδίου διέγερσης στον άξονα "d" και η μόνη ηλεκτρική διαφορική εξίσωση του μοντέλου είναι η εξίσωση 2.19:

$$\frac{d}{dt} e'_q = \frac{1}{T'_{do}} [E_{fd} - e'_q - i_d(x_d - x'_d)] \quad (2.19)$$

Οι εξισώσεις τάσης του στάτη για το μοντέλο αυτό παίρνουν τη μορφή:

$$v_d = x'_q i_q - R_s i_d \quad (2.28)$$

$$v_q = e'_q - x'_d i_d - R_s i_q \quad (2.29)$$

ενώ η ηλεκτρομαγνητική ροπή εκφράζεται τώρα ως:

$$\begin{aligned} T_e &= \psi_d i_q - \psi_q i_d \Rightarrow \\ T_e &= e'_q i_q - (x'_q - x'_d) i_d i_q \end{aligned} \quad (2.30)$$

Οι παράμετροι που συμμετέχουν στις εξισώσεις του μοντέλου 3ης τάξης είναι:

$$J, D, x_d, x_q, x'_q, T'_{do}, R_s$$

2.3.3. Συμπληρωματικές σχέσεις των μοντέλων

Για την ολοκληρωμένη παρουσίαση των μοντέλων απαιτούνται ακόμα μερικές μαθηματικές σχέσεις.

$$P_t = v_d i_d + v_q i_q \quad (2.31)$$

$$Q_t = v_q i_d - v_d i_q \quad (2.32)$$

$$P_e = \omega_r T_e \Rightarrow P_e \cong T_e \quad (2.33)$$

$$P_e = P_t + R_s (i_d^2 + i_q^2) \quad (2.34)$$

Επίσης, απαιτείται η αναφορά στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας, αφού είναι απαραίτητο να εκφραστούν οι αρχικές τιμές των μεταβλητών της γεννήτριας ως συνάρτηση των τερματικών ποσοτήτων της. Το διανυσματικό διάγραμμα της γεννήτριας στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας φαίνεται στην εικόνα 9. Γνωρίζοντας την ενεργό και άεργο ισχύ εξόδου, P_t και Q_t , καθώς και το πλάτος της τερματικής τάσης, V_t , μπορούμε να προσδιορίσουμε:

- το τερματικό ρεύμα: $I_t = \frac{\sqrt{P_t^2 + Q_t^2}}{V_t} \quad (2.35)$

- τη γωνία του συντελεστή ισχύος: $\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{P_t}{V_t I_t}\right)$ (2.36)
- την εσωτερική γωνία του δρομέα: $\delta_i = \tan^{-1}\left(\frac{x_q I_t \cos \varphi - R_s I_t \sin \varphi}{V_t + R_s I_t \cos \varphi + x_q I_t \sin \varphi}\right)$ (2.37)

και ακολούθως τις συνιστώσες d και q της τάσης και του ρεύματος του στάτη στη μόνιμη κατάσταση:

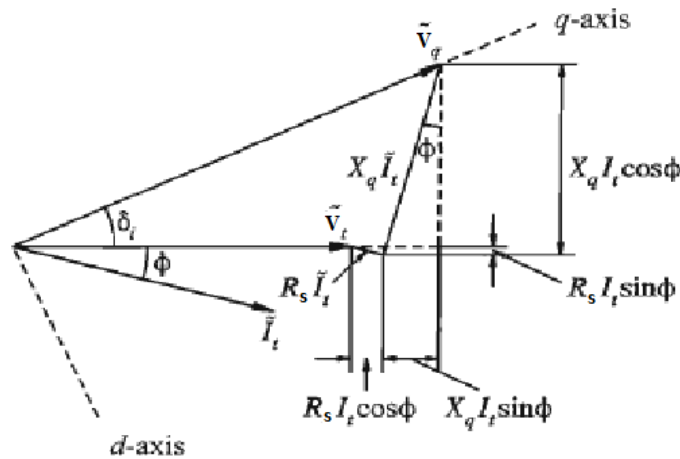
$$V_d = V_t \sin \delta_i, V_q = V_t \cos \delta_i \quad (2.38a, 2.38b)$$

$$I_d = I_t \sin(\delta_i + \varphi), I_q = I_t \cos(\delta_i + \varphi) \quad (2.39a, 2.39b)$$

Για τη μόνιμη κατάσταση ισχύει ότι όλα τα ρεύματα των τυλιγμάτων απόσβεσης είναι μηδενικά και όλοι οι διαφορικοί όροι των εξισώσεων μηδενίζονται. Οι σχέσεις 2.17 και 2.18 μετατρέπονται στη μόνιμη κατάσταση ως εξής:

$$V_d = x_q I_q - R_s I_d \quad (2.40)$$

$$V_q = -x_d I_d - R_s I_q + E_{fd} \Rightarrow E_{fd} = V_q + x_d I_d + R_s I_q \quad (2.41)$$



Εικόνα 9: Διανυσματικό διάγραμμα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

Τελευταίες απαιτούμενες σχέσεις είναι αυτές που εκφράζουν κάθε χρονική στιγμή τις συνιστώσες d και q της τάσης και του ρεύματος του στάτη.

$$v_d = V_t \sin \delta, v_q = V_t \cos \delta \quad (2.42a, 2.42b)$$

$$i_d = I_t \sin(\delta + \varphi), i_q = I_t \cos(\delta + \varphi) \quad (2.43a, 2.43b)$$

2.4. Τα μοντέλα σύγχρονης γεννήτριας στο χώρο κατάστασης

Μια μεγάλη κατηγορία συστημάτων (γραμμικά, μη γραμμικά, χρονικά μεταβαλλόμενα και μη κ.α.) αναλύονται με τη μεθοδολογία του χώρου κατάστασης (state space) όπου το σύστημα περιγράφεται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης, που περιγράφουν τις μεταβλητές κατάστασης.

Οι μεταβλητές κατάστασης (state variables) είναι ο μικρότερος αριθμός των μεταβλητών που περιγράφουν τη μελλοντική απόκριση ενός συστήματος, όταν είναι γνωστές η παρούσα κατάσταση του συστήματος, οι εισόδοι του και οι εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του. Οι μεταβλητές κατάστασης είναι αυτές που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται το σύστημα και κατά κάποιο τρόπο "αποθηκεύουν" την προηγούμενη συμπεριφορά του [26].

Οι μεταβλητές κατάστασης $x_1(n), x_2(n), \dots, x_k(n)$ ορίζονται ως ένας ελάχιστος αριθμός μεταβλητών τέτοιων ώστε όταν γνωρίζουμε

- τις τιμές τους στη χρονική στιγμή n_0
- την είσοδο του συστήματος για $n \geq n_0$
- το μαθηματικό μοντέλο,

να καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός της κατάστασης του συστήματος για οποιαδήποτε χρονική στιγμή $n \geq n_0$.

Για την προσομοίωση μιας σύγχρονης γεννήτριας από ένα μοντέλο χώρου καταστάσεων, πρέπει να επιλεγούν ως εισόδοι και εξόδοι του μοντέλου μεγέθη που μπορούν να μετρηθούν στο πραγματικό σύστημα. Στην περίπτωση της σύγχρονης μηχανής, αυτά τα μεγέθη είναι: οι τάσεις στις 3 φάσεις και τα αντίστοιχα ρεύματα, το ρεύμα και η τάση του πεδίου διέγερσης, η ηλεκτρική ισχύς καθώς και η εσωτερική γωνία του δρομέα. Από αυτά, επιλέγουμε ως εξόδους του μοντέλου την ηλεκτρική ισχύ και την εσωτερική γωνία του δρομέα, ενώ ως εισόδους την τάση του πεδίου διέγερσης και τη μηχανική ροπή. Επειδή η τάση του πεδίου διέγερσης μπορεί να διαταραχθεί πιο εύκολα από τη μηχανική ροπή, ουσιαστικά μπορεί μόνο αυτή να θεωρηθεί ως είσοδος του συστήματος και η μηχανική ροπή θεωρείται σταθερή [12].

Με βάση τα παραπάνω και τις μαθηματικές σχέσεις που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, αναπτύσσονται τα μη γραμμικά μοντέλα στο χώρο κατάστασης. Στα μοντέλα έχει θεωρηθεί ότι η αντίσταση του τυλίγματος οπλισμού (R_s) είναι μηδενική με αποτέλεσμα η ηλεκτρική ισχύς εξόδου να είναι ίση με την ηλεκτρομαγνητική ισχύ ($P_t = P_e$).

Μοντέλο 3ης τάξης

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{-D}{J} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_{do}} \left(\frac{x_d}{x'_d} \right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J} \\ \frac{1}{T_{do}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J} \left(\frac{V}{x'_d} x_3 \sin x_1 + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x'_d} \right) \sin 2x_1 \right) \\ \frac{1}{T_{do}} \left(\frac{x_d - x'_d}{x'_d} \right) V \cos x_1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \frac{V}{x'_d} x_3 \sin x_1 + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x'_d} \right) \sin 2x_1 \end{pmatrix}$$

όπου οι μεταβλητές κατάστασης, οι είσοδοι και οι έξοδοι ορίζονται ως εξής:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ \omega - 1 \\ \acute{e}_q \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{fd} \\ T_m \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ P_e \end{bmatrix}$$

Μοντέλο 5ης τάξης

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-D}{J} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T'_{do}} & \frac{\acute{x}_d - x_d}{T'_{do} x''_d} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T''_{do}} & \frac{x''_d - \acute{x}_d - 1}{T''_{do} x''_d} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{x''_q - x_q - 1}{T''_{qo} x''_q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J} \\ \frac{1}{T'_{do}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J} \left(\frac{V}{x''_d} x_4 \sin x_1 - \frac{V}{x''_q} x_5 \cos x_1 + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x''_d} \right) \sin 2x_1 \right) \\ \frac{1}{T'_{do}} \left(\frac{x_d - \acute{x}_d}{x''_d} \right) V \cos x_1 \\ \frac{\acute{x}_d - x''_d}{T''_{do} x''_d} V \cos x_1 \\ \frac{x_q - x''_q}{T''_{qo} x''_q} V \sin x_1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \frac{V}{x''_d} x_4 \sin x_1 - \frac{V}{x''_q} x_5 \cos x_1 + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x''_d} \right) \sin 2x_1 \end{pmatrix}$$

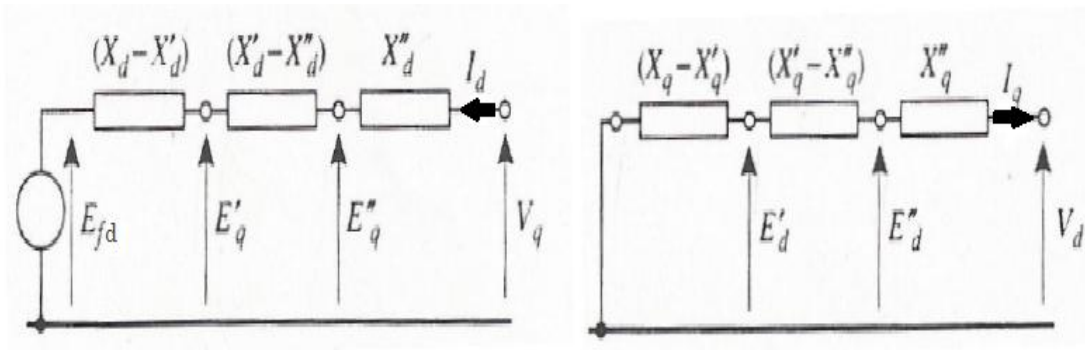
όπου οι μεταβλητές κατάστασης, οι είσοδοι και οι έξοδοι ορίζονται ως εξής:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ \omega - 1 \\ \acute{e}_q \\ \acute{e}''_q \\ \acute{e}''_d \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{fd} \\ T_m \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ P_e \end{bmatrix}$$

Όλα τα μεγέθη είναι εκφρασμένα στο ανά μονάδα σύστημα, εκτός από τις χρονικές σταθερές που εκφράζονται σε δευτερόλεπτα (s) και τη γωνία δ που εκφράζεται σε ακτίνια (rad).

Τα μοντέλα χώρου κατάστασης συμπληρώνονται από τις σχέσεις υπολογισμού των αρχικών τιμών των μεταβλητών κατάστασης. Η αρχική τιμή της γωνίας δ (δ_i) δίνεται από τη σχέση 2.35 ενώ η αρχική τιμή της μεταβολής της γωνιακής ταχύτητας που αποτελεί τη δεύτερη μεταβλητή κατάστασης ισούται με μηδέν. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στη μόνιμη κατάσταση της σύγχρονης γεννήτριας πριν από τη διαταραχή που εφαρμόζεται στη γεννήτρια στα πλαίσια της αναγνώρισης συστήματος.

Για τις υπόλοιπες μεταβλητές κατάστασης οι αρχικές τιμές υπολογίζονται από τις σχέσεις που προκύπτουν μετά το μηδενισμό των διαφορικών όρων των εξισώσεων κατάστασης. Οι σχέσεις μπορούν να διεξαχθούν κυκλωματικά με τη βοήθεια της εικόνας 10, όπου V_d, V_q, I_d, I_q είναι οι συνιστώσες τάσης και ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση που υπολογίζονται με τη βοήθεια των σχέσεων 2.36 και 2.37, ενώ η αντίσταση του τυλίγματος οπλισμού (R_s), όπως προαναφέρθηκε, είναι μηδενική.



Εικόνα 10: Προσεγγιστικό κύκλωμα για τον υπολογισμό των αρχικών καταστάσεων

3. Μη γραμμική αναγνώριση συστήματος

Το πεδίο της αναγνώρισης συστημάτων (System Identification) ασχολείται με την κατασκευή μαθηματικών μοντέλων των δυναμικών συστημάτων από στοιχεία μετρήσεων των συστημάτων αυτών. Δυναμικό σύστημα είναι κάθε σύστημα που εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου και η εξέλιξη του από κάποια αρχική κατάσταση περιγράφεται μαθηματικά από ένα σύνολο εξισώσεων. Ένα τέτοιο σύστημα είναι και η γεννήτρια diesel, η αναγνώριση των παραμέτρων της οποίας είναι το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.

3.1. Διαφορετικές προσεγγίσεις στη μοντελοποίηση ενός δυναμικού συστήματος

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές πρακτικές μοντελοποίησης, που είτε ανήκουν στην κατηγορία της θεωρητικής μοντελοποίησης, η οποία στηρίζεται στις βασικές αρχές ενός συστήματος, είτε στην κατηγορία της εμπειρικής μοντελοποίησης που βασίζεται σε δεδομένα μέτρησης του συστήματος, είτε προκύπτουν από τον συνδυασμό θεωρητικής και εμπειρικής μοντελοποίησης. Ουσιαστικά, διακρίνονται τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης:

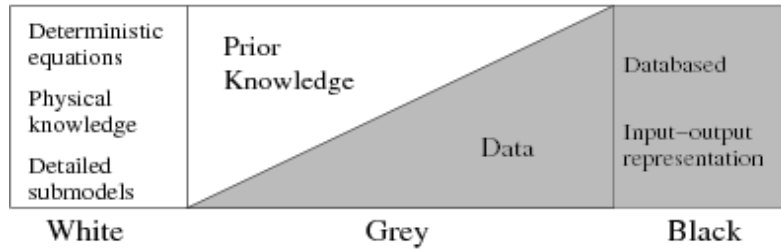
- **Μοντέλα που ακολουθούν την τεχνική του άσπρου κουτιού (White Box):** Αυτά είναι μοντέλα που εξάγονται ολοκληρωτικά από βασικές αρχές, όπως για παράδειγμα νόμους της φυσικής, της χημείας, της βιολογίας, της οικονομικής θεωρίας. Όλες οι εξισώσεις και οι παράμετροι καθορίζονται με θεωρητική μοντελοποίηση. Μοντέλα των οποίων η δομή προέρχεται ολοκληρωτικά από βασικές αρχές, ακόμα και αν κάποιες παράμετροι τους υπολογίζονται από δεδομένα μετρήσεων, θεωρείται ότι ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

Όσον αφορά τη μοντελοποίηση σύγχρονης γεννήτριας, σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν παραδοσιακές μέθοδοι μοντελοποίησης που απαιτούν συνήθως πειράματα όπως δοκιμές βραχυκύκλωσης (short-circuit tests), δοκιμές κενού φορτίου ή ακίνητου δρομέα (open-circuit frequency response, standstill frequency response). Τα μειονεκτήματα αυτών των μεθόδων είναι ότι οι δοκιμές αυτές είναι συνήθως χρονοβόρες και πολύπλοκες και κυρίως ότι για τη διεξαγωγή τους η γεννήτρια πρέπει να είναι εκτός λειτουργίας.

- **Μοντέλα που ακολουθούν την τεχνική του μαύρου κουτιού (Black Box)-Μη Παραμετρικά Μοντέλα:** Σε αυτό τον τύπο συστήματος δεν έχουμε κανένα στοιχείο για τη δομή του συστήματος, δηλαδή το βλέπουμε ως ένα «μαύρο κουτί» και οι εκτιμήσεις γίνονται από δεδομένα μετρήσεων. Ο μόνος στόχος των μοντέλων είναι να αντιστοιχήσουν τα δεδομένα εισόδου στα δεδομένα εξόδου του συστήματος. Παραδείγματα της προσέγγισης αυτής είναι η κρουστική απόκριση για γραμμικά συστήματα στο πεδίο του χρόνου, η απόκριση συχνοτήτων για γραμμικά συστήματα στο πεδίο της συχνότητας και το μοντέλο 'Volterra-Wiener series' στα μη γραμμικά συστήματα.

- **Μοντέλα που ακολουθούν την τεχνική του γκριζου κουτιού (Gray Box) - Παραμετρικά Μοντέλα:** Αποτελούν ένα συμβιβασμό μεταξύ των δύο παραπάνω μοντέλων. Διαμορφώνονται χρησιμοποιώντας τόσο τη γνώση βασικών αρχών και εμπειρικών κανόνων, όσο και πληροφορίες από δεδομένα μετρήσεων. Συνήθως, η δομή τους θεωρείται γνωστή εκ των προτέρων και οι παράμετροι των μοντέλων καθορίζονται από δεδομένα μετρήσεων.

Η βασική διαφορά των τριών προσεγγίσεων μοντελοποίησης αποτυπώνεται στην εικόνα 11.

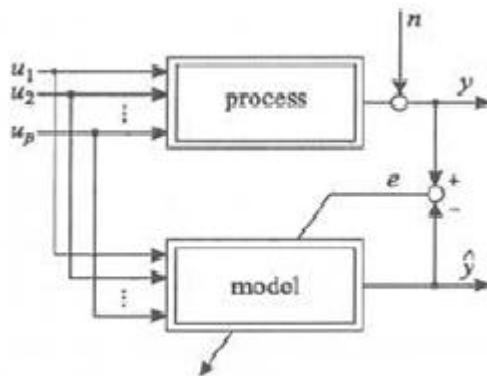


Εικόνα 11: Βασική διαφορά μεταξύ White Box, Grey Box και Black Box

Η αναγνώριση συστημάτων είναι μια διαδικασία που εφαρμόζεται στα μοντέλα των δύο τελευταίων κατηγοριών. Τα μοντέλα αυτά πλεονεκτούν για τη μοντελοποίηση της γεννήτριας diesel καθώς μπορούν να εξαχθούν με τη γεννήτρια εντός λειτουργίας, με βάση τις εν ώρα λειτουργίας αποκρίσεις της. Ανάμεσα στις δύο αυτές προσεγγίσεις, ένα Grey Box μοντέλο υπερτερεί καθώς υπολογίζει τις παραμέτρους που υπεισέρχονται σε αυτό οι οποίες αντιστοιχούν στις φυσικές παραμέτρους της γεννήτριας. Αυτές τις παραμέτρους χρησιμοποιούμε στη συνέχεια για τον έλεγχο της λειτουργία της γεννήτριας ώστε να εναρμονίζεται με τις άλλες πηγές του μικροδικτύου.

3.2. Η διαδικασία της αναγνώρισης συστήματος

Στη γενική περίπτωση, μια μέθοδος αναγνώρισης συστήματος απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 12: Τυπικό διάγραμμα της αναγνώρισης συστήματος

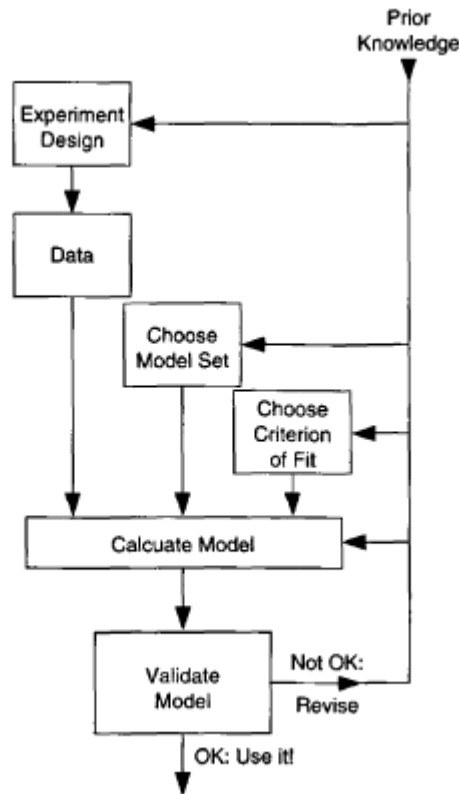
Ένα μοντέλο υιοθετείται για να αναπαραστήσει τη διαδικασία του συστήματος. Η πραγματική διαδικασία και το μοντέλο τροφοδοτούνται με τις ίδιες εισόδους $\bar{u} = [u_1, u_2, \dots, u_p]^T$ και οι έξοδοι τους y και \hat{y} συγκρίνονται δίνοντας έτσι το σήμα του λάθους e , το οποίο χρησιμοποιείται για την προσαρμογή του μοντέλου. Η πραγματική έξοδος συνήθως διαταράσσεται από θόρυβο n .

Η αναγνώριση συστήματος ανάγεται ουσιαστικά σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που οδηγεί στον καθορισμό των παραμέτρων του μοντέλου από δεδομένα μετρήσεων για δεδομένη αρχιτεκτονική μοντέλου. Η βελτιστοποίηση ακολουθεί την προσέγγιση της επιβλεπόμενης μάθησης, καθώς βασίζεται στη γνώση των εισόδων και των εξόδων του συστήματος που θέλουμε να προσομοιώνει το μοντέλο. Δηλαδή για κάθε δεδομένο εισόδου, η έξοδος είναι γνωστή από τα δεδομένα των μετρήσεων. Ουσιαστικά, στην επιβλεπόμενη μάθηση, αντικειμενικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του λάθους e , με στόχο την απόκτηση του "καλύτερου" μοντέλου.

Η διαδικασία για την αναγνώριση συστήματος απεικονίζεται στην εικόνα 13 και περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- Συγκέντρωση κατάλληλων πειραματικών δεδομένων: Για το σκοπό αυτό, απαιτείται σωστός σχεδιασμός του πειράματος, που συνίσταται κυρίως στη σωστή επιλογή των σημάτων εξόδου και εισόδου, ώστε τα δεδομένα να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο κατατοπιστικά και να μην τίθεται σε κίνδυνο η ομαλή λειτουργία του συστήματος.
- Επιλογή κατάλληλης δομής μοντέλου: Οι διαφορετικές προσεγγίσεις στη μοντελοποίηση ενός συστήματος αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Συγκεκριμένα για τη γεννήτρια diesel, τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα μοντέλα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και είναι μη γραμμικά, ανάγοντας τον προσδιορισμό των παραμέτρων της σύγχρονης γεννήτριας σε ένα πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης.
- Επιλογή του κριτηρίου προσαρμογής του μοντέλου στο σύστημα: Το κριτήριο αυτό αποτελεί τη βάση της υπολογιστικής διαδικασίας και η ικανοποίηση του οδηγεί στον προσδιορισμό των σωστών τιμών των παραμέτρων του συστήματος.
- Εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου: Στο πλαίσιο αυτό, μπορούν να δοκιμαστούν πολλές διαφορετικές μέθοδοι εκτίμησης. Ιδιαίτερα, στην περίπτωση της μη γραμμικής βελτιστοποίησης, υπάρχει πληθώρα διαφορετικών αλγορίθμων, οι οποίοι είναι ιδιαίτερα πολύπλοκοι και για αυτό το βήμα αυτό απαιτεί πολλή διερεύνηση.
- Επαλήθευση του μοντέλου: Τελευταίο αλλά πολύ σημαντικό βήμα είναι ο έλεγχος της καταλληλότητας του μοντέλου. Υπάρχουν διαφορετικές διαδικασίες και μέτρα εκτίμησης της καταλληλότητας του μοντέλου, όπως για παράδειγμα η ικανότητα γενίκευσης του μοντέλου, που οδηγούν στην αποδοχή ή την

απόρριψη του. Στην περίπτωση που το μοντέλο κριθεί μη αποδεκτό, απαιτείται η επανάληψη των παραπάνω βημάτων.



Εικόνα 13: Η διαδικασία της αναγνώρισης συστήματος

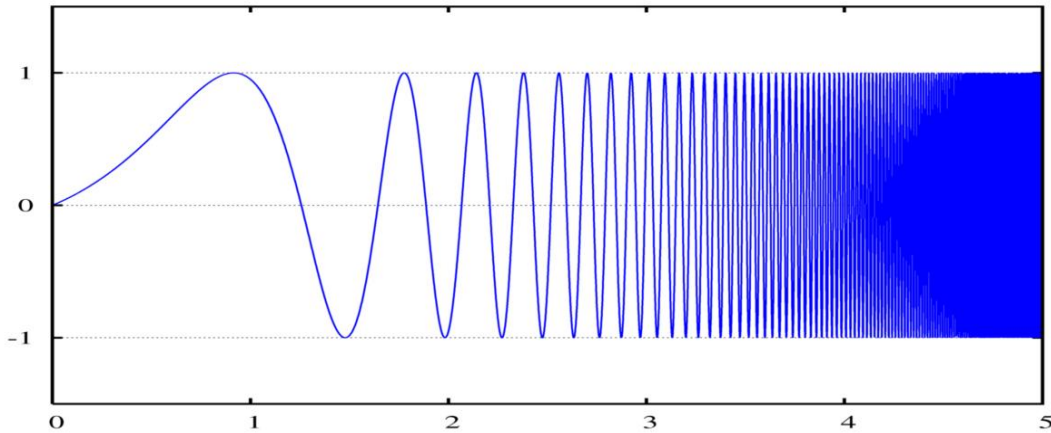
Στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου, αναλύονται τρία από τα προαναφερθέντα βήματα της διαδικασίας αναγνώρισης συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στα συνήθη σήματα εισόδου που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της αναγνώρισης συστήματος, στο κριτήριο προσαρμογής που θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της εργασίας και παρουσιάζονται οι πιο γνωστές τεχνικές μη γραμμικής βελτιστοποίησης, μερικές από τις οποίες εφαρμόζονται για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων του μη γραμμικού μοντέλου της γεννήτριας diesel.

3.3. Απλά σήματα για αναγνώριση συστήματος

Εάν οι παράμετροι του συστήματος ποικίλουν με τη συχνότητα, όπως συμβαίνει συνήθως, η μέτρηση σε μια συχνότητα δεν είναι αρκετή για να περιγράψει πλήρως το προς αναγνώριση σύστημα. Έτσι, απαιτούνται μετρήσεις σε πολλές διαφορετικές συχνότητες.

Για το σκοπό αυτό, ως διέγερση του συστήματος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα σήματα "chirp" (τερέτισμα). Αυτά είναι ημιτονοειδή σήματα πολλών κύκλων στα οποία η συχνότητα αυξάνεται ή μειώνεται συνεχώς ως συνάρτηση του χρόνου. Ένα τέτοιο σήμα απεικονίζεται στην εικόνα 14. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι το καλά ορισμένο φάσμα συχνοτήτων τους, η προκαθορισμένη πυκνότητα φάσματός ισχύος και ο καλός συντελεστής κορυφής. Ορθογώνια σήματα αυτού του είδους χρησιμοποιούνται

για περαιτέρω απλοποίηση της παραγωγής και επεξεργασίας σήματος. Επιπλέον, αυτά έχουν τη μικρότερη δυνατή τιμή συντελεστή κορυφής (αναλογία της μέγιστης τιμής προς το μέσο τετραγωνικό επίπεδο) δηλαδή τη μονάδα.



Εικόνα 14: Παράδειγμα σήματος chirp

Άλλο σήμα που χρησιμοποιείται συχνά είναι η ψευδοτυχαία ακολουθία μέγιστου μήκους (MLS, Maximum Length Sequence). Σημαντικό μειονέκτημα των σημάτων των δύο παραπάνω κατηγοριών είναι ότι η ενέργειά τους είναι κατανομημένη ισάξια ή σχεδόν ισάξια σε όλο το φάσμα συχνοτήτων, με αποτέλεσμα η πυκνότητα του φάσματος ισχύος να είναι συγκριτικά χαμηλή.

Στην πράξη είναι καλύτερα να συγκεντρώνεται η ενέργεια του σήματος διέγερσης σε συγκεκριμένες συχνότητες που ενδιαφέρουν και για αυτό προτιμώνται ως σήματα διέγερσης σήματα που προκύπτουν ως αθροίσματα πολλών ημιτονοειδών. Επειδή ο συντελεστής κορυφής αυτών των σημάτων μπορεί να πάρει διάφορες τιμές, τα σήματα μέτρησης πρέπει να παραμένουν εντός ενός στενού εύρους πλατών [18].

Ωστόσο, ως σήμα διέγερσης χρησιμοποιείται πιο συχνά μια ψευδοτυχαία δυαδική ακολουθία (PRBS, Pseudo Random Binary Sequence). Αυτό είναι και το σήμα διέγερσης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Μια δυαδική ακολουθία είναι μία ακολουθία a_0, \dots, a_{N-1} αποτελούμενη από N bits, όπου $a_j \in \{0,1\}$ για $j = 0, 1, \dots, N-1$. Αποτελείται από m μονάδες και $N-m$ μηδενικά. Μια δυαδική ακολουθία θεωρείται ψευδοτυχαία (PRBS) αν η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης $C(v)$ έχει μόνο δύο τιμές

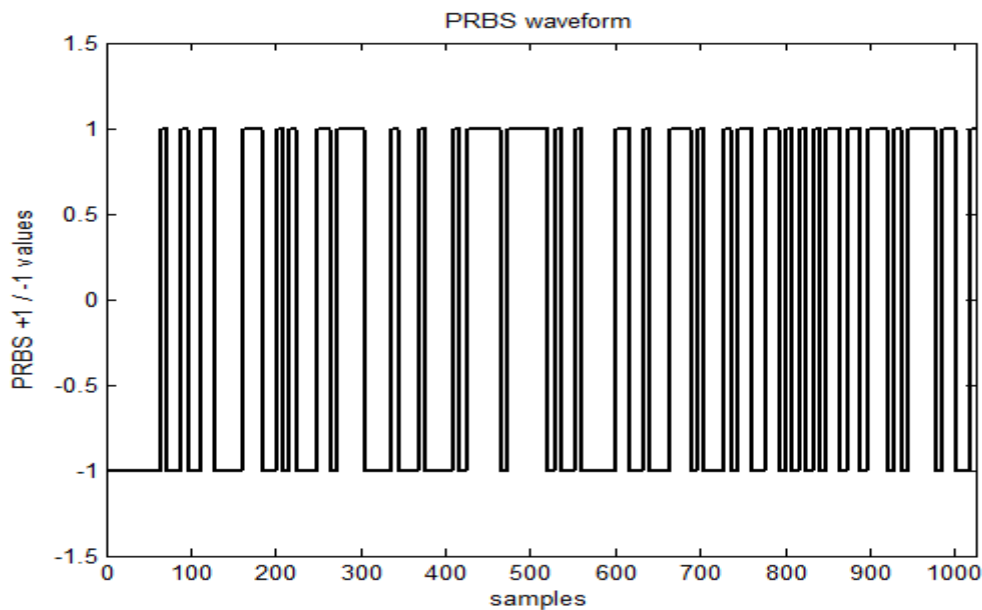
$$C(v) = \sum_{j=0}^{N-1} a_j \cdot a_{j+v} = \begin{cases} m, & \text{αν } v = 0 \\ c \cdot m, & \text{αλλού} \end{cases}$$

όπου

$$c = \frac{m-1}{N-1}$$

είναι ο κύκλος λειτουργίας της PRBS ανάλογος του κύκλου λειτουργίας ενός σήματος συνεχούς χρόνου. Ο χαρακτηρισμός "ψευδοτυχαία", οφείλεται στο ότι παρόλο που είναι ντετερμινιστική, μοιάζει τυχαία καθώς η τιμή a_j είναι ανεξάρτητη των τιμών των άλλων στοιχείων, όμοια με τις πραγματικά τυχαίες ακολουθίες. Μια τέτοια ακολουθία μπορεί να εκταθεί προς το άπειρο επαναλαμβανόμενη μετά από N στοιχεία, σε αντίθεση με τις περισσότερες τυχαίες ακολουθίες, όπως για παράδειγμα ο λευκός θόρυβος, που είναι εκ φύσεως άπειρες [20].

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ένα σήμα PRBS:



Εικόνα 15: Παράδειγμα σήματος PRBS

Το σήμα αυτό είναι ιδανικό για την αναγνώριση γραμμικών συστημάτων, καθώς μπορεί να διεγείρει όλες τις συχνότητες εξίσου καλά. Ωστόσο για τα μη γραμμικά συστήματα, όχι μόνο οι συχνότητες, αλλά και τα πλάτη πρέπει να επιλέγονται σωστά για να καλύπτουν όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Για αυτό πιο ιδανικό σήμα διέγερσης για ένα μη γραμμικό σύστημα είναι μια επέκταση της PRBS, ώστε σε κάθε βήμα να έχει ένα διαφορετικό πλάτος (APRBS). Στην διαδικασία αναγνώρισης συστήματος που προτείνεται στην παρούσα εργασία, παρότι το σύστημα είναι μη γραμμικό, χρησιμοποιείται ως σήμα διέγερσης η PRBS και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για πολλά σημεία λειτουργίας.

3.4. Μέθοδος του σφάλματος πρόβλεψης (Prediction Error Method)

Η μέθοδος PEM είναι μια επαναληπτική μέθοδος αναγνώρισης συστημάτων που έχει στόχο την ελαχιστοποίηση ενός κριτηρίου, το οποίο σχετίζεται με το σφάλμα πρόβλεψης (prediction error). Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε ένα σύνολο γνωστών αποκρίσεων του συστήματος y που αντιστοιχούν σε γνωστές εισόδους u . Η έξοδος τη χρονική στιγμή t συμβολίζεται με $y(t)$ και αντίστοιχα η είσοδος με $u(t)$. Αυτά τα σήματα είναι διανύσματα πεπερασμένων διαστάσεων. Έστω το σύνολο $Z^N =$

$\{u(1), y(1), u(2), y(2), \dots, u(N), y(N)\}$ συγκεντρώνει όλα τα δεδομένα μέχρι την στιγμή N . Για τα μετρημένα δεδομένα θεωρείται πάντα ότι έχουν προκύψει από δειγματοληψία σε διακριτά χρονικά σημεία. Η βασική ιδέα πίσω από την προσέγγιση του σφάλματος πρόβλεψης είναι πολύ απλή [6]:

- Περιγραφή του μοντέλου ως προβλέπτη της επόμενης εξόδου:

$$\hat{y}_m(t|t-1) = f(Z^{t-1})$$

όπου ως $\hat{y}_m(t|t-1)$ συμβολίζεται η πρόβλεψη ενός βήματος μπροστά και ως f μια αυθαίρετη συνάρτηση των προηγούμενων μετρημένων δεδομένων.

- Έκφραση του προβλέπτη συναρτήσει του πεπερασμένων διαστάσεων διανύσματος θ ($\hat{\theta}_N$) των παραμέτρων του μοντέλου οι οποίες είναι προς υπολογισμό:

$$\hat{y}_m(t|\theta) = f(Z^{t-1}, \theta)$$

- Καθορισμός κριτηρίου υπολογισμού του διανύσματος $\hat{\theta}_N$, με βάση τη δομή του μοντέλου και το σύνολο δεδομένων Z^N , ώστε η απόσταση μεταξύ των $\hat{y}(1|\theta), \dots, \hat{y}(N|\theta)$ και $y(1), \dots, y(N)$ να ελαχιστοποιείται. Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται ως κριτήριο πρέπει να μπορεί να αποτιμηθεί με ένα βαθμωτό μέγεθος και να είναι συνάρτηση όλων των σφαλμάτων πρόβλεψης $\varepsilon(t_k, \theta), k = 1, \dots, N$.

Ανάλογα με τη δομή του μοντέλου, τον αριθμό των εξόδων, τη ρητή ή μη μοντελοποίηση του θορύβου, η συνάρτηση που χρησιμοποιείται ως κριτήριο μπορεί να πάρει διαφορετικές μορφές. Το πιο συνηθισμένο κριτήριο είναι (για την περίπτωση μιας εξόδου) η διακύμανση των σφαλμάτων πρόβλεψης:

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \varepsilon^2(t_k, \theta)$$

Στην περίπτωση περισσότερων εξόδων, υποθέτοντας ότι τα σφάλματα πρόβλεψης $\varepsilon(t_k, \theta)$ ακολουθούν την Γκαουσιανή κατανομή (γνωστή και ως κανονική κατανομή – normal distribution), το βέλτιστο διάνυσμα παραμέτρων πρέπει να ελαχιστοποιεί τον πίνακα συνδιακύμανσης των $\varepsilon(t_k, \theta)$, οπότε η συνάρτηση δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \varepsilon(t_k, \theta) \varepsilon^T(t_k, \theta)$$

Γενικά, μια γνησίως αύξουσα συνάρτηση που αντιστοιχίζει την παραπάνω συνάρτηση σε μια τιμή επιλέγεται ως συνάρτηση κριτηρίου ή όπως αλλιώς λέγεται συνάρτηση απωλειών και αυτή είναι η εξής:

$$h(V_N(\theta)) = \det(V_N(\theta))$$

Αυτή η συνάρτηση προτιμάται, καθώς αντιστοιχεί στη συνάρτηση κριτηρίου της μεθόδου μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum likelihood method) για σφάλματα πρόβλεψης που ακολουθούν τη Γκαουσιανή κατανομή [8].

Όταν η δομή του μοντέλου είναι της μορφής:

$$y(t) = G(q^{-1}, \theta)u(t) + e(t)$$

το σφάλμα πρόβλεψης είναι η διαφορά μεταξύ της μετρούμενης εξόδου $y(t)$ και της χωρίς θόρυβο εξόδου $G(q^{-1}, \theta)u(t)$, και ταυτίζεται με το σφάλμα προσομοίωσης του μοντέλου.

3.5. Μέθοδοι μη γραμμικής βελτιστοποίησης

Οι μέθοδοι αυτές έχουν ως στόχο να βρουν το ελάχιστο σημείο μιας μη γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης. Θεωρώντας ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, μαθηματικά το διατυπώνουμε ως εξής:

$$\min F(x)$$

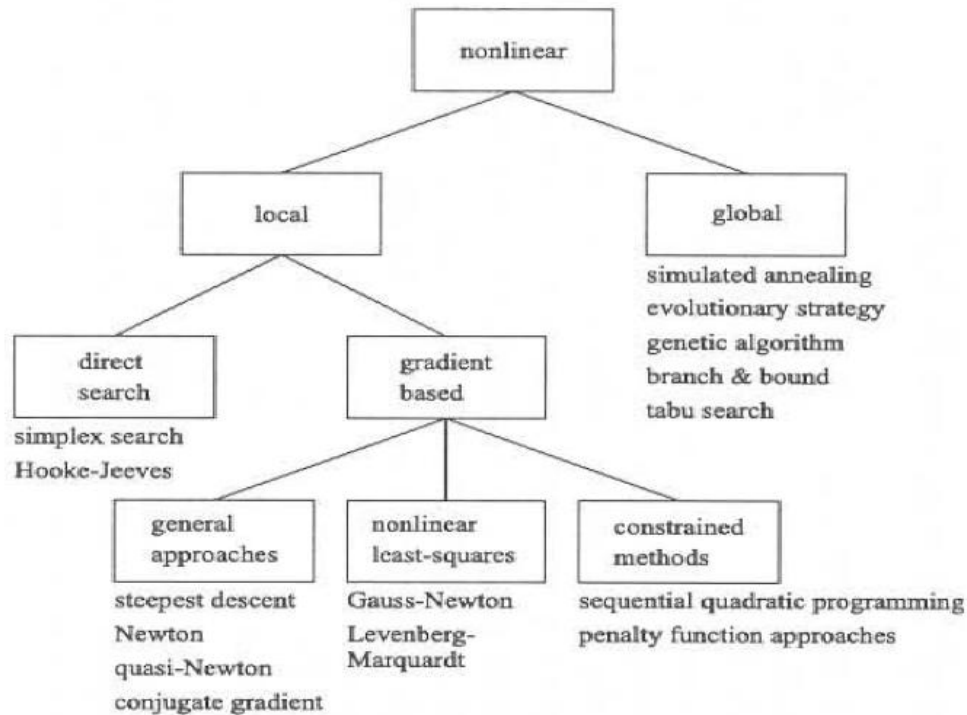
όπου $F(x)$ είναι μια μη γραμμική συνάρτηση των μεταβλητών x , όπου x μπορεί να είναι ένα διάνυσμα όπως $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ για το οποίο ισχύει:

$$x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max}, \text{ για } i = 1, \dots, n$$

Στην περίπτωση όπου η κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μη γραμμική συνάρτηση των μεταβλητών x , τότε με βεβαιότητα αναφερόμαστε σε μη γραμμική βελτιστοποίηση. Τα προβλήματα μη γραμμικής βελτιστοποίησης έχουν, στη γενική περίπτωση, τις παρακάτω ιδιότητες:

- η συνάρτηση εμφανίζει περισσότερα του ενός τοπικά ελάχιστα,
- η επιφάνεια της γειτονιάς του τοπικού ελάχιστου μπορεί να προσεγγιστεί με τη βοήθεια μιας υπερπαραβολής της μορφής $x^T A x + b^T x + c$,
- δεν εφαρμόζεται αναλυτική μαθηματική επίλυση, και
- απαιτείται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος [7].

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι επίλυσης των προβλημάτων μη γραμμικής βελτιστοποίησης, οι οποίες πολύ γενικά διαχωρίζονται με βάση το αν στοχεύουν στην εύρεση ενός τοπικού ελαχίστου ή του ολικού ελαχίστου της αντικειμενικής συνάρτησης. Η εικόνα 16 συγκεντρώνει τις περισσότερες από αυτές.



Εικόνα 16: Μέθοδοι μη γραμμικής βελτιστοποίησης

3.5.1. Μέθοδοι τοπικής βελτιστοποίησης

Πρόκειται για επαναληπτικές αριθμητικές μεθόδους που, ξεκινώντας από μια αρχική τιμή του x (x^0), βελτιώνουν σταδιακά την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης F , μεταβαίνοντας στο επόμενο σημείο με εφαρμογή του γενικού κανόνα:

$$x^{k+1} = x^k + \beta^k d^k$$

όπου β βαθμωτή παράμετρος κλίμακας και d μια διεύθυνση στο R^n , τέτοιες ώστε:

$$F(x^{k+1}) < F(x^k), \text{ για κάθε μετατόπιση } k$$

Η παραπάνω προσδιοριστική διαδικασία εγγυάται σύγκλιση στο τοπικό ελάχιστο που βρίσκεται εγγύτερα στο σημείο εκκίνησης x^0 [11].

Οι διάφορες μέθοδοι διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τρόπο ορισμού των β και d και μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τον αν χρησιμοποιούν ή όχι τις παραγώγους της συνάρτησης:

- μέθοδοι κλίσης (gradient methods)
- μέθοδοι άμεσης αναζήτησης (direct search methods)

Στα πλαίσια της εργασίας εφαρμόζονται γνωστοί αλγόριθμοι που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία και για αυτό αναλύονται στη συνέχεια.

3.5.1.1. Μέθοδος Levenberg-Marquardt

Η μέθοδος Levenberg-Marquardt (LM) αποτελεί μια βελτιωμένη εκδοχή της μεθόδου Gauss-Newton (GN), η οποία ενσωματώνει και τη μέθοδο της Απότομης Καθόδου (Steepest Descent ή αλλιώς Gradient Descent, GRAD) στην επαναληπτική διαδικασία. Η μέθοδος GRAD είναι η πιο απλή μέθοδος βελτιστοποίησης, όπου η διεύθυνση d^k είναι αντίθετη στην κλίση $\nabla F(x^k)$ της συνάρτησης. Η διαδικασία αναζήτησης γράφεται:

$$x^{k+1} = x^k - \beta^k \nabla F(x^k)$$

Κάθε νέο σημείο είναι η θέση ελαχίστου της F κατά μήκος της διεύθυνσης που ορίζει η κλίση της. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μιας μεταβλητής, που επιλύεται με τυπικές αριθμητικές μεθόδους (π.χ. χρυσή τομή, παραβολική παρεμβολή). Η πορεία σύγκλισης της μεθόδου είναι αργή, ενώ η μετακίνηση της είναι πάντα κάθετη στη διεύθυνση του προηγούμενου βήματος. Παρόλα αυτά, είναι μια σχετικά εύρωστη μέθοδος, ακόμα και αν το αρχικό σημείο απέχει πολύ από την πραγματική λύση.

Η μέθοδος Newton προχωράει ένα βήμα μπροστά: στο ανάπτυγμα Taylor της αντικειμενικής συνάρτησης στο τρέχον σημείο, ο όρος της παραγώγου δεύτερης τάξης λαμβάνεται υπόψη για την ενημέρωση των μεταβλητών x σύμφωνα με την εξίσωση:

$$x^{k+1} = x^k - [H_F(x^k)]^{-1} \nabla F(x^k)$$

όπου $H_k = H_F(x^k)$ είναι ο Εσσιανός πίνακας της συνάρτησης $F(x)$ στο x^k .

Πιο συγκεκριμένα, το ανάπτυγμα Taylor της αντικειμενικής συνάρτησης γύρω από το x^k δίνεται από τη σχέση:

$$F(x^k + d) = Q_k(d) = F(x^k) + \nabla F_k^T d + \frac{1}{2} d^T H_k d$$

και για την ελαχιστοποίηση της $Q(d)$ υπολογίζεται βήμα d^k ώστε:

$$\nabla Q(d^k) = \nabla F_k + H_k d^k = 0 \Leftrightarrow H_k d^k = -\nabla F_k$$

Η μέθοδος Newton συγκλίνει γρηγορότερα από την GRAD, ωστόσο μειονεκτεί σε ευρωστία αφού είναι περισσότερο ευαίσθητη στην επιλογή του αρχικού σημείου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για να συγκλίνει είναι απαραίτητο ο Εσσιανός πίνακας να είναι πάντα θετικά ορισμένος, δηλαδή η καμπυλότητα της $F(x)$ να είναι πάντα θετική. Ένα άλλο μειονέκτημα της είναι ότι απαιτεί τον υπολογισμό του Εσσιανού πίνακα H , ο οποίος μπορεί να είναι αρκετά πολύπλοκος σε εφαρμογές που η αναλυτική μορφή της $F(x)$ δεν είναι διαθέσιμη.

Για μια συγκεκριμένη κατηγορία προβλημάτων βελτιστοποίησης, τη βελτιστοποίηση ελαχίστων τετραγώνων, όπου

$$\min F(x) = \|f(x)\|_2^2 = f(x)^T f(x)$$

χρησιμοποιείται πιο συχνά η μέθοδος GN. Αυτή είναι μια τροποποιημένη εκδοχή της μεθόδου Newton, όπου ο Εσσιανός πίνακας αντικαθίσταται με πίνακα της μορφής $[J_f(x^k)^T J_f(x^k)]$ όπου J_f ο Ιακωβιανός πίνακας της συνάρτησης f .

Η εξίσωση για την ενημέρωση των μεταβλητών x γράφεται ως εξής:

$$x^{k+1} = x^k - [J_f(x^k)^T J_f(x^k)]^{-1} J_f(x^k)^T f(x)$$

ή διαφορετικά:

$$[J_f(x^k)^T J_f(x^k)](\Delta x)^k = -J_f(x^k)^T f(x)$$

Για τον συγκεκριμένο των πλεονεκτημάτων των δύο μεθόδων (GRAD και GN), δημιουργήθηκε η υβριδική μέθοδος Levenberg-Marquardt. Στη μέθοδο αυτή, ένας συντελεστής διεύθυνσης λ επιτρέπει την εναλλαγή μεταξύ των διευθύνσεων που καθορίζονται από τις δύο μεθόδους. Η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$[J_f(x^k)^T J_f(x^k) + \lambda I](\Delta x)^k = -J_f(x^k)^T f(x)$$

Όταν $\lambda \rightarrow 0$, η LM λειτουργεί όπως η GN, ενώ όταν $\lambda \rightarrow \infty$ όπως η GRAD. Πιο συγκεκριμένα, στις πρώτες επαναλήψεις, ο συντελεστής λ παίρνει μεγάλες τιμές, οπότε λόγω της ευρωστίας της μεθόδου GRAD, η αρχική τιμή μπορεί να επιλεγεί με λιγότερη προσοχή. Ακόμα και αν στις πρώτες επαναλήψεις το x^k απέχει πολύ από τη λύση, οπότε είναι πολύ πιθανόν ο H_k να είναι αρνητικά ορισμένος (αρνητική καμπυλότητα της $F(x)$), η μέθοδος LM μπορεί να συγκλίνει, απλά με πολύ πιο αργό ρυθμό, ακολουθώντας τη μέθοδο GRAD. Σε κάθε επανάληψη, εάν $F(x^{k+1}) < F(x^k)$, ο συντελεστής μειώνεται με συγκεκριμένο τρόπο, για να επιταχυνθεί η σύγκλιση, αλλιώς αυξάνεται ώστε να μεγαλώνει η περιοχή αναζήτησης (trust-region) [9].

3.5.1.2. Μέθοδος Trust-Region Reflective Newton

Η μέθοδος Trust-Region Reflective Newton (TRRN) ανήκει σε μια ευρύτερη κατηγορία μεθόδων τοπικής βελτιστοποίησης, των μεθόδων περιοχής εμπιστοσύνης (trust-region), τη βάση για την ανάπτυξη των οποίων αποτέλεσε η μέθοδος Levenberg-Marquardt.

Σε κάθε επανάληψη x^k ενός αλγόριθμου περιοχής εμπιστοσύνης, δημιουργείται ένα τετραγωνικό μοντέλο που προσεγγίζει την αντικειμενική συνάρτηση γύρω από μια γειτονιά με κέντρο το x^k . Η γειτονιά αυτή ονομάζεται περιοχή εμπιστοσύνης, καθώς θεωρούμε πως το μοντέλο σε αυτή τη γειτονιά θα είναι μια πολύ καλή προσέγγιση της F . Σε κάθε επανάληψη υπολογίζεται ένα βήμα σε ένα δοκιμαστικό σημείο που ανήκει στην περιοχή εμπιστοσύνης, επιλύοντας το λεγόμενο υποπρόβλημα περιοχής

εμπιστοσύνης (trust-region subproblem), με στόχο τη μείωση του μοντέλου. Στο δοκιμαστικό αυτό σημείο, υπολογίζεται η μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης και συγκρίνεται με τη μείωση που προβλέφθηκε από το μοντέλο. Αν το πηλίκο της πραγματικής μείωσης προς την προβλεπόμενη μείωση είναι επαρκώς θετικό, τότε το τρέχον σημείο ενημερώνεται και το μέγεθος της περιοχής εμπιστοσύνης αυξάνεται. Σε αντίθετη περίπτωση, το μέγεθός της μειώνεται και ο αλγόριθμος ξαναπροσπαθεί να βρει νέο βήμα στην καινούργια περιοχή εμπιστοσύνης.

Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή εμπιστοσύνης περιγράφεται από το σύνολο B_k

$$B_k = \{ x \in R^n \mid \|x - x_k\| \leq \Delta_k \},$$

όπου Δ_k είναι η ακτίνα της περιοχής εμπιστοσύνης.

Το υποπρόβλημα περιοχής εμπιστοσύνης εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

$$\min_{d \in R^n} m_k(x_k + d) \text{ υπό τον περιορισμό } \|d\| \leq \Delta_k$$

όπου:

$$m_k(x_k + d) = F_k + \nabla F_k^T d + \frac{1}{2} d^T B_k d$$

το τετραγωνικό μοντέλο που προσεγγίζει την αντικειμενική συνάρτηση και $F_k = F(x_k)$, $\nabla F_k = \nabla F(x_k)$ και B_k ένας συμμετρικός πίνακας θετικά ορισμένος ή μη.

Για βήμα d_k που επιλύει το υποπρόβλημα, η διαφορά

$$Ared_k = F(x_k) - F(x_k + d_k)$$

είναι η πραγματική μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης, ενώ η διαφορά

$$Pred_k = m_k(0) - m_k(d_k)$$

είναι η προβλεπόμενη μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης. Αν το πηλίκο

$$\rho_k = \frac{Ared_k}{Pred_k}$$

έχει τιμή κοντά στη μονάδα, το μοντέλο προσεγγίζει αρκετά καλά την αντικειμενική συνάρτηση, με αποτέλεσμα η περιοχή εμπιστοσύνης να διευρύνεται, ώστε το μοντέλο να μπορεί να παράγει ένα μεγαλύτερο βήμα. Αν το ρ_k είναι αρνητικό ή πολύ κοντά στο μηδέν, αυτό σημαίνει ότι η καινούργια τιμή $F(x_k + d_k)$ της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη τιμή $F(x_k)$, άρα το βήμα d_k πρέπει να απορριφθεί, η περιοχή εμπιστοσύνης να μειωθεί και το υποπρόβλημα να επιλυθεί ξανά. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, η περιοχή εμπιστοσύνης δε μεταβάλλεται [10].

Για την επίλυση του υποπροβλήματος, υπάρχουν πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος περιορίζει το υποπρόβλημα σε ένα δισδιάστατο υπόχωρο S , με τη βοήθεια μιας διαδικασίας συζυγών κλίσεων: Ο υπόχωρος S είναι ο γραμμικός χώρος που ορίζεται από τα διανύσματα s_1 και s_2 , όπου το s_1 είναι στη διεύθυνση της κλίσης g και το s_2 είναι είτε μια προσέγγιση της διεύθυνσης Newton, για παράδειγμα η λύση της εξίσωσης:

$$H \cdot s_2 = -g$$

ή μια διεύθυνση αρνητικής καμπυλότητας

$$s_2^T \cdot H \cdot s_2 < 0$$

$$d_k = \|D_k s_k\| < \Delta_k$$

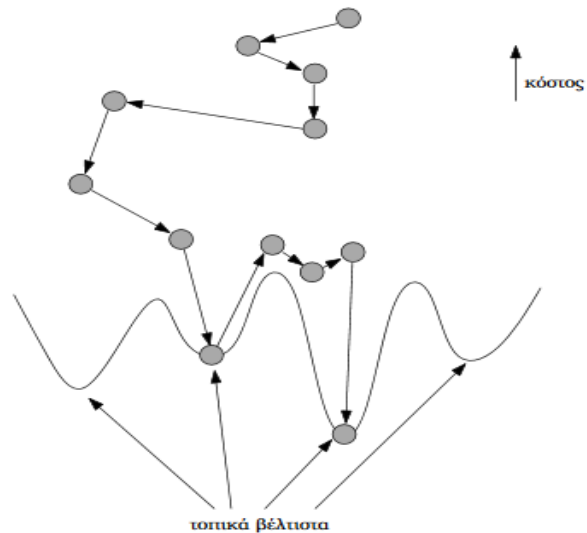
Η φιλοσοφία πίσω από την επιλογή του S είναι να οδηγήσει σε ολική σύγκλιση μέσω της διεύθυνσης απότομης καθόδου ή της διεύθυνσης αρνητικής καμπυλότητας και να πετύχει γρήγορη σύγκλιση μέσω του βήματος Newton [16].

Το πλεονέκτημά σε σχέση με την προγενέστερη μέθοδο LM είναι ότι η TRRN μπορεί να ακολουθήσει μια διεύθυνση αρνητικής καμπυλότητας της συνάρτησης $F(x)$ όταν το τρέχον διάνυσμα παραμέτρων απέχει πολύ από τη λύση, πραγματοποιώντας ένα μεγάλο βήμα d_k σε μια πιο ενδιαφέρουσα περιοχή εμπιστοσύνης [14].

3.5.2. Μέθοδοι ολικής βελτιστοποίησης

Οι μέθοδοι ολικής βελτιστοποίησης διέπονται από τις επόμενες βασικές αρχές:

- Δεν μπορούν να εγγυηθούν τον εντοπισμό του ολικού ελαχίστου μιας μη κυρτής συνάρτησης, εξαιτίας του κινδύνου εγκλωβισμού σε τοπικό ελάχιστο. Ουσιαστικά, στόχος τους είναι να βρουν ένα "καλό" τοπικό ελάχιστο.
- Για τη διαφυγή από τα τοπικά ελάχιστα απαιτείται η ελεγχόμενη αποδοχή μη βέλτιστων κινήσεων, δηλαδή βημάτων αναρρίχησης και όχι μόνο κατάβασης. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτυπώνεται στην εικόνα 17.
- Οι μέθοδοι αυτές έχουν ως κοινό θεμελιώδες χαρακτηριστικό την τυχειότητα, η οποία όχι μόνο εμποδίζει τον εγκλωβισμό σε τοπικά ελάχιστα, αλλά παρέχει και την απαιτούμενη ευελιξία κινήσεων σε έντονα μη κυρτούς χώρους.



Εικόνα 17: Αποδοχή θημάτων αναρρίχησης στην ολική βελτιστοποίηση

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι ολικής βελτιστοποίησης, όπως οι εξελικτικές μέθοδοι (Evolutionary Algorithms), οι μέθοδοι αναζητήσεων με απαγορεύσεις (Tabu Search) και οι μέθοδοι Προσομοιωμένης Ανόπτωσης (Simulated Annealing). Στην κατηγορία των εξελικτικών μεθόδων, περιλαμβάνονται μέθοδοι που είναι εμπνευσμένες από τις φυσικές διεργασίες της εξέλιξης, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι και η βελτιστοποίηση βασισμένη σε σμήνος σωματιδίων (Particle Swarm Optimization). Στην κατηγορία των μεθόδων αναζητήσεων με απαγορεύσεις, δημιουργείται μια σειρά από κινήσεις. Μια κίνηση εκτελείται αν διαπιστωθεί από προηγούμενες επαναλήψεις του αλγορίθμου ότι μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (ή συνάρτησης απωλειών). Επιπλέον, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου διατηρείται ιστορικό με μετακινήσεις που θεωρούνται απαγορευμένες για την αποφυγή εγκλωβισμού της μεθόδου σε τοπικά ελάχιστα που είχαν ανακαλυφθεί σε προηγούμενα βήματα του αλγορίθμου. Οι μέθοδοι Προσομοιωμένης Ανόπτωσης, όπως αυτή που θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της εργασίας, αναλύονται ξεχωριστά στη συνέχεια.

3.5.2.1. Προσομοιωμένη Ανόπτωση

Η Προσομοιωμένη Ανόπτωση (Simulated Annealing) είναι μια ευρέως διαδεδομένη στρατηγική βελτιστοποίησης, η οποία βασίζεται στις αρχές της ομώνυμης θερμοδυναμικής διεργασίας. Ανόπτωση καλείται η διαδικασία ανακατανομής των ατόμων κατά τη σταδιακή ψύξη ενός μετάλλου. Στις υψηλές θερμοκρασίες, τα μόρια του μετάλλου κινούνται ελεύθερα προς όλες τις κατευθύνσεις, ενώ καθώς το μέταλλο ψύχεται, η θερμική κινητικότητα των μορίων του περιορίζεται. Όταν η θερμοκρασία μειωθεί αρκετά, τα άτομα καταλαμβάνουν συγκεκριμένες θέσεις διαμορφώνοντας μια κρυσταλλική δομή, που αποτελεί την κατάσταση ελάχιστης ενέργειας του συστήματος.

Το φαινόμενο περιγράφεται από νόμους της στατιστικής μηχανικής, σύμφωνα με τους οποίους η ενέργεια E ενός συστήματος που βρίσκεται σε θερμική ισορροπία, δηλαδή σε

θερμοκρασία T , θεωρείται τυχαία μεταβλητή, που ακολουθεί μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της μορφής:

$$p(E) \sim \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$

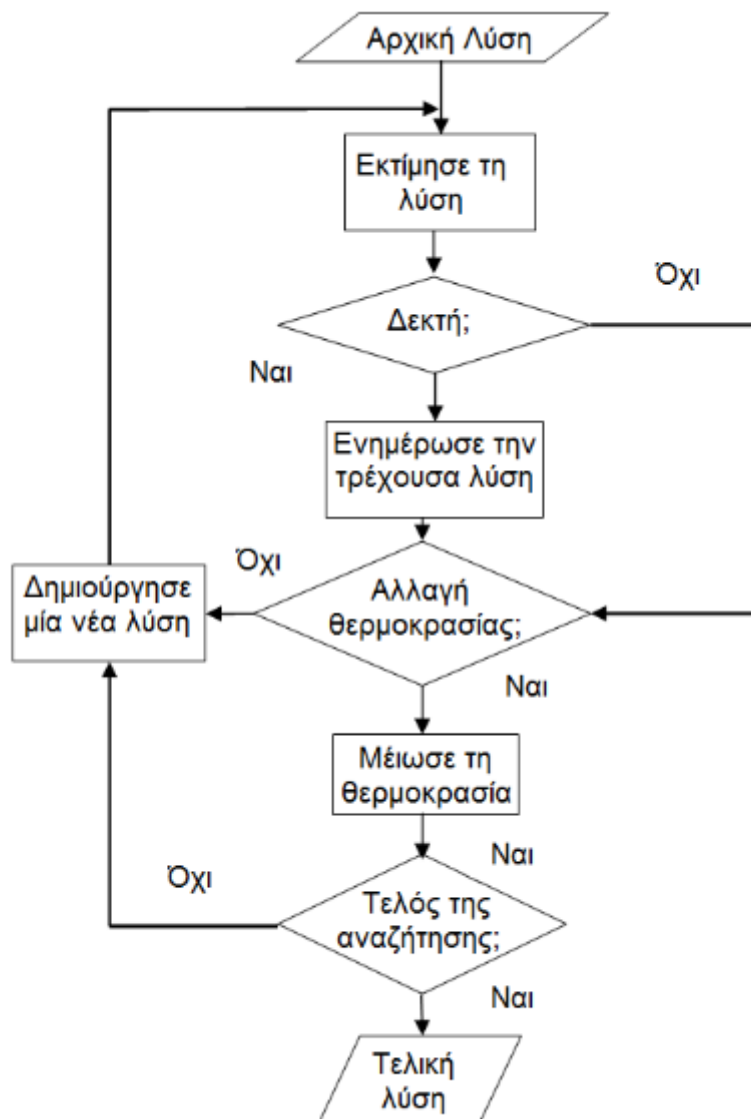
όπου k η σταθερά Boltzmann. Η σχέση αυτή επιτρέπει με μη μηδενική πιθανότητα τη μετάβαση σε κατάσταση υψηλότερης ενέργειας, δίνοντας στο σύστημα την ευκαιρία να υπερπηδήσει ένα "τοπικό" ενεργειακό ελάχιστο και να βρεθεί, μακροπρόθεσμα, σε μια ισορροπία χαμηλότερης ενέργειας. Η πιθανότητα αυτή εξαρτάται από την τιμή της θερμοκρασίας. Στην αρχή της διεργασίας, οπότε η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή, η πιθανότητα εντοπισμού καταστάσεων υψηλότερης ενέργειας είναι αντίστοιχα υψηλή, οπότε το σύστημά μπορεί να μεταβεί σε πολλαπλές καταστάσεις θερμικής ισορροπίας. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, περιορίζεται η πιθανότητα αύξησης της ενέργειας του συστήματος, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει πλέον δυνατότητα διαφυγής από τοπικά ελάχιστα. Απαραίτητη προϋπόθεση για την δημιουργία τέλειων κρυστάλλων είναι ο αργός ρυθμός ψύξης. Αν η ψύξη πραγματοποιηθεί γρήγορα, το μέταλλο δεν φτάνει στην κατάσταση ελάχιστης ενέργειας, αλλά καταλήγει σε μια πολυκρυσταλλική δομή, μεγαλύτερης ενέργειας [11].

Με βάση τα παραπάνω, ο βασικός μηχανισμός της ανόπτησης ως μέθοδος βελτιστοποίησης είναι να αποφασίζει σε κάθε επανάληψη αν θα αντικαταστήσει την τρέχουσα λύση του προβλήματος με μια νέα τυχαία επιλεγμένη λύση στη γειτονιά της προηγούμενης, με τη βοήθεια μιας συνάρτησης πιθανότητας που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και από τη διαφορά των τιμών των συναρτήσεων απωλειών των δύο λύσεων. Στην αρχή, όταν η θερμοκρασία έχει μεγάλη τιμή, η πιθανότητα αποδοχής βημάτων αναρρίχησης είναι υψηλή, ενώ όταν πλησιάζει τη μηδενική τιμή, μόνο βήματα κατάβασης μπορούν να συμβούν. Για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος με τη μέθοδο αυτή, τα παρακάτω βήματα είναι απαραίτητα:

- ο καθορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης f που θέλουμε να ελαχιστοποιηθεί,
- ο καθορισμός ενός χρονοδιαγράμματος ανόπτησης (annealing cooling schedule), που περιγράφει τη διαδικασία μείωσης της θερμοκρασίας T , και
- ο καθορισμός μιας συνάρτησης πιθανότητας, αντίστοιχης της συνάρτησης Boltzmann, που χρησιμοποιείται για την αποδοχή βημάτων αναρρίχησης. Ο κανόνας για την αποδοχή ή όχι ενός βήματος, γνωστός και ως κριτήριο Metropolis, είναι ο ακόλουθος:

➤ Εάν $\Delta f < 0$, το βήμα είναι αποδεκτό.

➤ Εάν $\Delta f > 0$, υπολογίζεται η πιθανότητα αποδοχής από τη σχέση $P = e^{-\frac{\Delta f}{T}}$, επιλέγεται ένας τυχαίος αριθμός r στο διάστημα $(0.0, 1.0)$ και το βήμα κρίνεται αποδεκτό αν και μόνο αν $P > r$.



Εικόνα 18: Διάγραμμα ροής ενός κανονικού αλγορίθμου Προσομοιωμένης Ανόπτησης

4. Υλοποίηση αναγνώρισης γεννήτριας diesel με τη χρήση μεθόδων τοπικής βελτιστοποίησης

4.1. Δεδομένα αποκρίσεων της γεννήτριας diesel

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, το πρώτο απαραίτητο βήμα στη διαδικασία αναγνώρισης συστήματος είναι η συγκέντρωση κατάλληλων δεδομένων απόκρισης του.

Τα δεδομένα αυτά, λόγω απουσίας πραγματικής γεννήτριας diesel, προέρχονται από προσομοίωση της υποτιθέμενης γεννήτριας με τα δύο μη γραμμικά μοντέλα χώρου κατάστασης, τρίτης και πέμπτης τάξης, που έχουν παρουσιαστεί. Για το σκοπό, αυτό επιλέγονται αρχικά οι τιμές των τυπικών παραμέτρων που περιγράφουν το "πραγματικό" σύστημα. Οι τιμές αυτές φαίνονται στον πίνακα 3. Για το μοντέλο τρίτης τάξης προέρχονται από την αναφορά [12], ενώ οι τιμές των παραμέτρων που συμπληρώνουν το μοντέλο 5ης τάξης έχουν επιλεγεί ώστε να ικανοποιούν τις ισχύουσες ανισότητες:

$$x_d \geq x_q \geq x'_q > x'_d > x''_q \geq x''_d > x_s \quad [13]$$

$$T'_{d0} > T'_{q0} > T''_{d0} \geq T''_{q0} \quad [13]$$

και να ανήκουν στα τυπικά για τις παραμέτρους σύγχρονης γεννήτριας πεδία τιμών, τα οποία φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 2: Πεδίο τιμών των τυπικών παραμέτρων μιας σύγχρονης γεννήτριας [13]

Parameter name (unit)	Notation	Steam turbine	Hydraulic turbine
Synchronous reactances (p.u.)	X_d	1.0~2.3	0.6~1.5
	X_q	1.0~2.3	0.4~1.0
Transient reactances (p.u.)	X'_d	0.15~0.4	0.2~0.5
	X'_q	0.2~1.0	0.2~1.0
Subtransient reactances (p.u.)	X''_d	0.1~0.25	0.15~0.35
	X''_q	0.1~0.25	0.2~0.45
Open circuit transient time constants (s)	T'_{d0}	3.0~10.0	1.5~9.0
	T'_{q0}	0.5~2.0	0~2.0
Open circuit subtransient time constants (s)	T''_{d0}	0.02~0.05	0.01~0.05
	T''_{q0}	0.02~0.07	0.01~0.09

Πίνακας 3: Τιμές των τυπικών παραμέτρων των μοντέλων προσομοίωσης

Μοντέλο 3ης τάξης	Μοντέλο 5ης τάξης
$J = 0.0252 pu$	$J = 0.0252 pu$
$D = 0.05 pu$	$D = 0.05 pu$
$x'_d = 0.568 pu$	$x''_d = 0.12 pu$
$x_d = 2.072 pu$	$x'_d = 0.568 pu$
$x_q = 1.559 pu$	$x_d = 2.072 pu$
$T'_{do} = 0.1310 s$	$x''_q = 0.12 pu$
	$x_q = 1.559 pu$
	$T'_{do} = 0.1310 s$
	$T''_{do} = 0.0681 s$
	$T''_{qo} = 0.01 s$

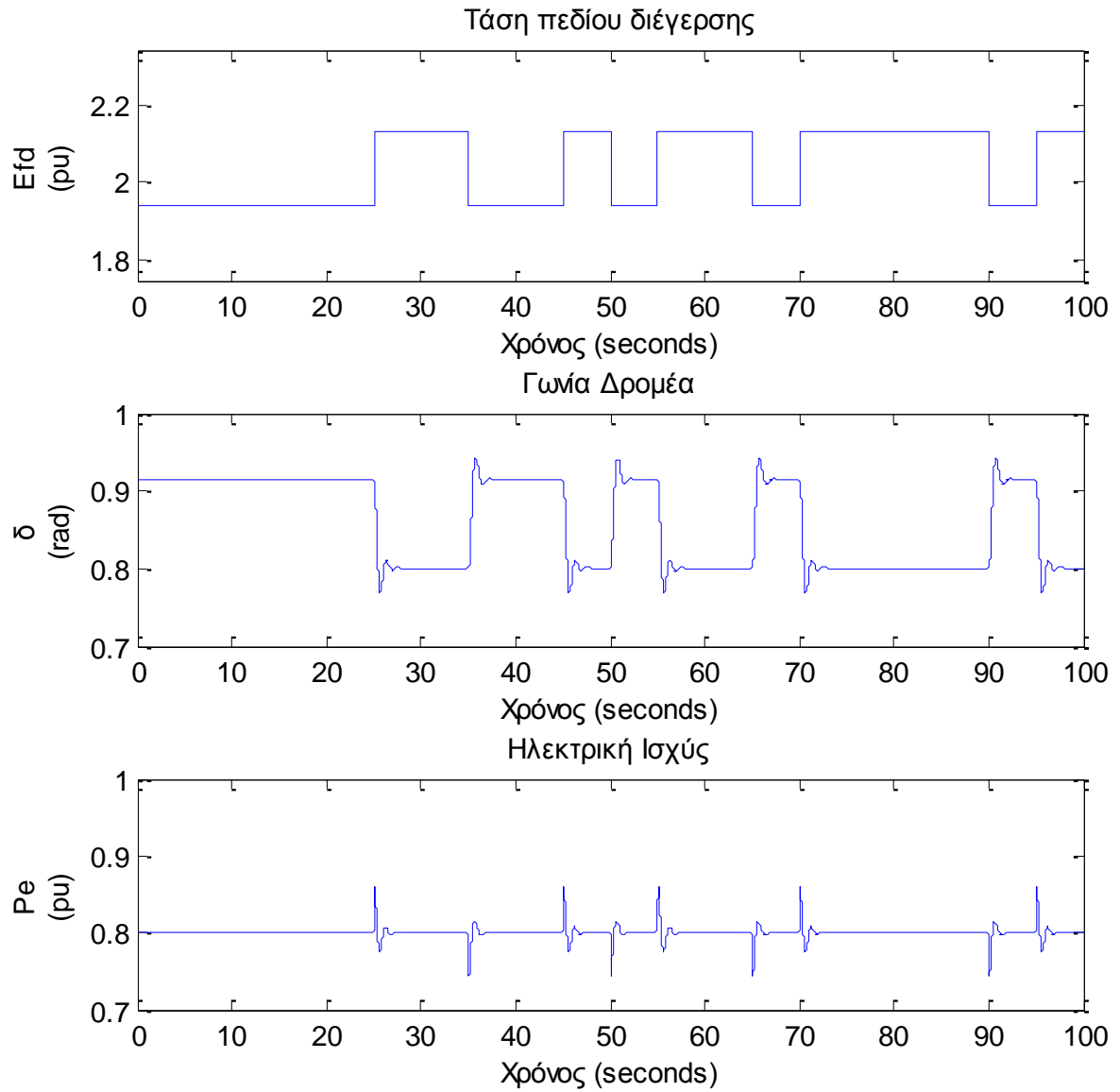
Μετά την επιλογή των τιμών των τυπικών παραμέτρων, ακολουθεί η επιλογή του κατάλληλου σήματος εισόδου που εφαρμόζεται στο σύστημα. Αυτό πρέπει να έχει ένα ευρύ φάσμα ώστε να καλύπτει όλα τα δυναμικά φαινόμενα του συστήματος και κατάλληλο πλάτος: αρκετά μεγάλο για να καλύπτει τις μη γραμμικότητες και αρκετά μικρό ώστε το πείραμα στο πραγματικό σύστημα να πραγματοποιείται με ασφάλεια. Όπως συμβαίνει κατά κανόνα στην αναγνώριση συστήματος, επιλέγεται να εφαρμοσθεί στην είσοδο των μοντέλων, δηλαδή στην τάση του πεδίου διέγερσης, μια ψευδοτυχαία δυαδική ακολουθία (PRBS) πλάτους 10% της ονομαστικής τιμής της εισόδου.

Παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις του σήματος εισόδου και των σημάτων εξόδου των δύο μοντέλων. Τα δεδομένα αντιστοιχούν στο σημείο λειτουργίας της γεννήτριας:

$$P = 0.8 pu, Q = 0 pu, V = 0.9 pu$$

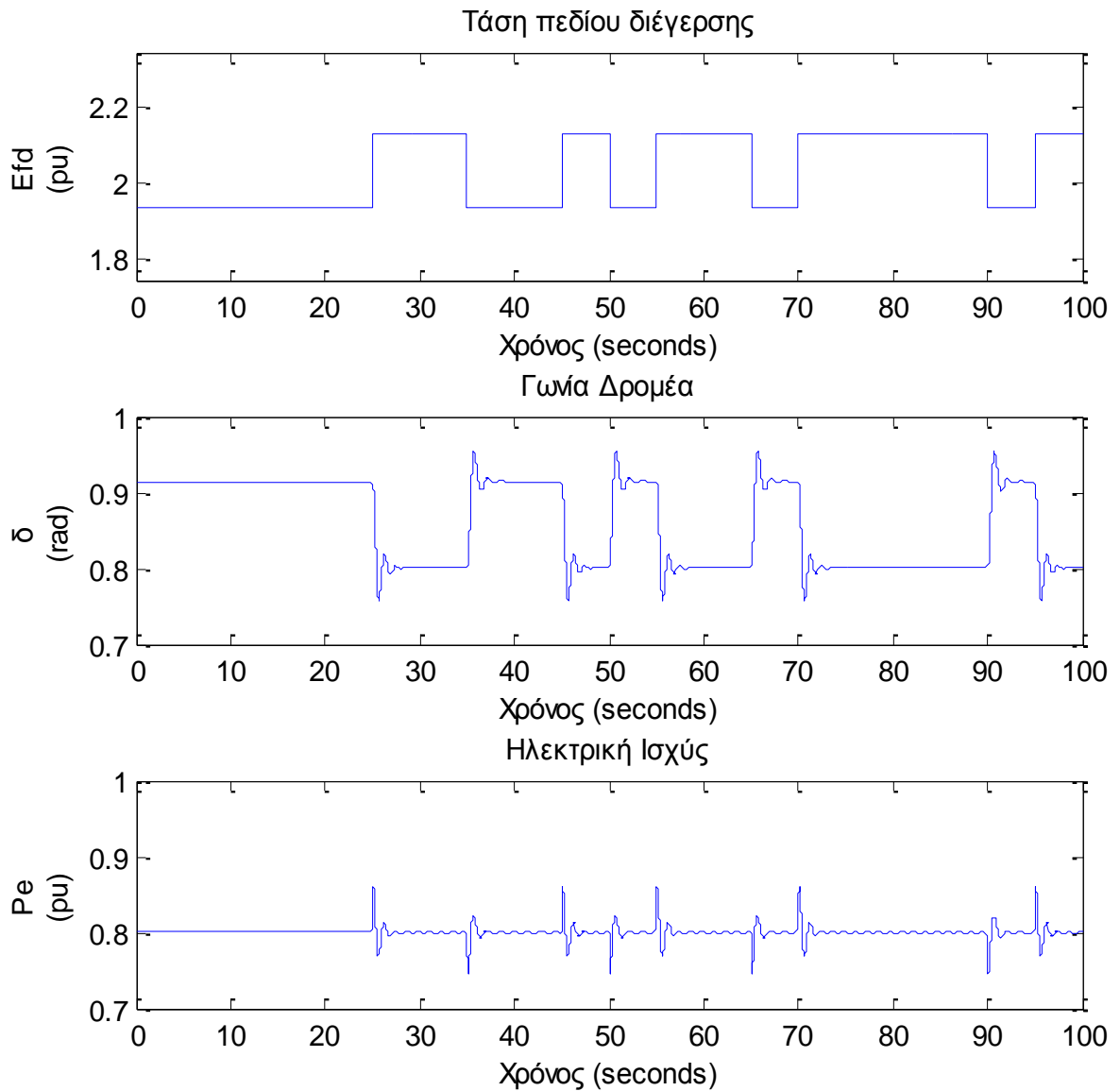
Ο χρόνος διάρκειας του "πειράματος" είναι 100 s και ο χρόνος δειγματοληψίας είναι 1 ms, η τιμή του οποίου είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχία της αναγνώρισης συστήματος και ο καθορισμός της αναλύεται σε επόμενη ενότητα του κεφαλαίου.

Η παρακάτω εικόνα αντιστοιχεί στο μοντέλο 5ης τάξης:



Εικόνα 19: Δεδομένα προσομοίωσης από το μη γραμμικό μοντέλο 5ης τάξης

Η παρακάτω εικόνα αντιστοιχεί στο μοντέλο 3ης τάξης:



Εικόνα 20: Δεδομένα προσομοίωσης από το μη γραμμικό μοντέλο 3ης τάξης

Συγκρίνοντας τις κυματομορφές των σημάτων εξόδου των διαφορετικής τάξης μοντέλων, παρατηρούμε ότι οι ταλαντώσεις είναι πιο έντονες και διαρκούν περισσότερο χρόνο για το μοντέλο τρίτης τάξης σε σχέση με το μοντέλο πέμπτης τάξης. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς στο μοντέλο πέμπτης τάξης λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των τυλιγμάτων απόσβεσης της σύγχρονης γεννήτριας, ο ρόλος των οποίων είναι να αποσβένουν τις ταλαντώσεις που δημιουργούνται μετά από μια διαταραχή.

4.2. Μέτρα αξιολόγησης του μοντέλου

Πριν την αναλυτική παρουσίαση της διαδικασίας που εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της γεννήτριας diesel, κρίνεται απαραίτητη η αναφορά στον τρόπο με τον οποίο εκτιμάται η ποιότητα των μοντέλων. Για να εκτιμηθεί η ποιότητα ενός μοντέλου που προσδιορίζεται μέσω της διαδικασίας αναγνώρισης συστήματος, υπάρχουν πολλά διαφορετικά μέτρα αξιολόγησης που μπορούν να υπολογιστούν. Στη συνέχεια, αναφέρονται όσα χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της εργασίας.

Ένα πρώτο ενδεικτικό μέτρο που μπορεί να δείξει αν ένα μοντέλο είναι ικανοποιητικό σε σύγκριση με κάποιο άλλο είναι η τιμή της συνάρτησης απωλειών όταν η υπολογιστική διαδικασία ολοκληρώνεται. Με την παρατήρηση των τιμών της συνάρτησης και ταυτόχρονα των τιμών των παραμέτρων που υπολογίστηκαν, αποκτάται μια αίσθηση της τιμής της που ανταποκρίνεται σε "καλά αναγνωρισμένο" μοντέλο, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως όριο για τον τερματισμό της επαναληπτικής διαδικασίας υπολογισμού.

Άλλα μέτρα αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται ευρύτερα στην αναγνώριση συστήματος είναι:

- το τελικό σφάλμα πρόβλεψης (Final Prediction Error), το οποίο υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$FPE = \left(\frac{1 + \frac{n_p}{N}}{1 - \frac{n_p}{N}} \right) \det \left(\frac{1}{N} E^T E \right)$$

όπου n_p : ο αριθμός των προς υπολογισμό παραμέτρων του μοντέλου

N : ο αριθμός των δειγμάτων του dataset

E : ο πίνακας $N \times n_y$ των σφαλμάτων πρόβλεψης, όπου n_y ο αριθμός των εξόδων

Εναλλακτικά, μπορεί να υπολογιστεί το τελικό σφάλμα πρόβλεψης για κάθε έξοδο ξεχωριστά μέσω της σχέσης:

$$FPE = \frac{N + n_p}{N(N - n_p)} \sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2$$

Το μέτρο αυτό περιέχει δύο όρους - ο όρος $\det \left(\frac{1}{N} E^T E \right)$ χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ακρίβειας του μοντέλου και ο όρος $\left(\frac{1 + \frac{n_p}{N}}{1 - \frac{n_p}{N}} \right)$ για να περιγράψει την πολυπλοκότητα του [20].

- Η κανονικοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Normalized Root Mean Squared Error, NRMSE) εκφρασμένη ως ποσοστό, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$fit(\%) = 100(1 - \frac{\|y_{measured} - y_{model}\|}{y_{measured} - y_{measured}}) \quad [20]$$

όπου $y_{measured}$: τα μετρούμενα δεδομένα εξόδου
 $\overline{y_{measured}}$: ο μέσος όρος των δεδομένων (ξεχωριστά για κάθε έξοδο)
 y_{model} : η απόκριση του μοντέλου

Αυτό το μέτρο παίρνει τιμές από $-Inf$ μέχρι 100 και χρησιμοποιείται για να συγκρίνουμε τις αποκρίσεις του μοντέλου και του πραγματικού συστήματος, όταν εφαρμόζονται σε αυτά διαφορετικά είδη διαταραχών.

Στην παρούσα εργασία, λόγω της μη γραμμικότητας των μοντέλων, για να αποδειχθεί ότι το υπολογισμένο μοντέλο μπορεί να καλύψει τις κύριες μη γραμμικότητες του συστήματος, είναι απαραίτητο να ελεγχθεί κατά πόσο η απόκριση του σε διαφορετικά σημεία λειτουργίας βρίσκεται κοντά στην πραγματική απόκριση του συστήματος. Για το σκοπό αυτό, για την αξιολόγηση του μοντέλου, υπολογίζουμε την απόκριση του μοντέλου σε διαφορετικό σημείο λειτουργίας από αυτό, του οποίου τα δεδομένα λειτουργίας χρησιμοποιήθηκαν για την αναγνώριση της γεννήτριας.

Το ποσοστό $fit(\%)$ μας δείχνει πόσο κοντά είναι οι αποκρίσεις μοντέλου και πραγματικού συστήματος σε όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις που εξετάζονται.

- Το σχετικό λάθος στον υπολογισμό των παραμέτρων, που υπολογίζεται από τη γνωστή σχέση:

$$error_{x_i}(\%) = \frac{|x_{i_{estimated}} - x_{i_{real}}|}{x_{i_{real}}} \cdot 100\%$$

και μας δείχνει πόσο καλή είναι η εκτίμηση κάθε παραμέτρου του μοντέλου ξεχωριστά.

- Τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σφάλματος, εκφρασμένη ως ποσοστό επί τοις εκατό, η οποία συμβολίζεται ως εξής:

$$P_{Ree} = \%R_{(y-\hat{y})(y-\hat{y})}$$

Αν περισσότερό από το 95% των δειγμάτων των σφαλμάτων παραμένουν στην εμβέλεια $(-\frac{2}{\sqrt{N}}, \frac{2}{\sqrt{N}})$, η ακρίβεια της διαδικασίας προσδιορισμού των παραμέτρων θεωρείται ικανοποιητική (N : ο αριθμός των δειγμάτων) [15].

4.3. Καθορισμός βασικών παραγόντων της διαδικασίας

Σε μια διαδικασία αναγνώρισης συστήματος υπάρχουν πολλές παράμετροι που καθορίζουν την εξέλιξη και το αποτέλεσμα της διαδικασίας, η ρύθμιση των οποίων απαιτεί συνήθως πολλή διερεύνηση. Στο παρόν πρόβλημα, όπου η δομή των μοντέλων της σύγχρονης γεννήτριας είναι γνωστή (Gray Box), οι βασικοί παράγοντες που πρέπει να ελεγχθούν είναι:

- ο χρόνος δειγματοληψίας,
- το κριτήριο τερματισμού της επαναληπτικής διαδικασίας,
- ο αλγόριθμος τοπικής βελτιστοποίησης που δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα και
- η αρχικοποίηση των προς υπολογισμό παραμέτρων, εφόσον η αναγνώριση του συστήματος ανάγεται σε διαδικασία τοπικής βελτιστοποίησης.

Για τη διερεύνηση αυτή χρησιμοποιούνται ως αποκρίσεις του πραγματικού συστήματος τα δεδομένα προσομοίωσης του μοντέλου 3ης τάξης. Το πρόβλημα προσδιορισμού των παραμέτρων με αυτά τα δεδομένα είναι πιο απλό από το ρεαλιστικό πρόβλημα που θα προσεγγιστεί θεωρώντας ως αποκρίσεις τα δεδομένα προσομοίωσης του μοντέλου 5ης τάξης, εφόσον έχουν καθοριστεί οι παραπάνω ρυθμιστικές παράμετροι.

Σε πρώτο στάδιο, όπως και για τη δημιουργία του κατάλληλου dataset, υλοποιείται το μη γραμμικό μοντέλο 3ης τάξης, με τη διαφορά ότι οι παράμετροι δε θεωρούνται σταθερές αλλά μεταβλητές. Αξίζει να αναφερθεί πως το μοντέλο περιγράφεται εκτός από τις εξισώσεις κατάστασης και τις εξισώσεις εξόδου, και από τις σχέσεις υπολογισμού των αρχικών του καταστάσεων. Οι αρχικές καταστάσεις είναι αναπόσπαστο τμήμα του μοντέλου και παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της διαδικασίας. Για το μοντέλο 3ης τάξης, οι τρεις μεταβλητές κατάστασης, όπως έχει αναφερθεί στο δεύτερο κεφάλαιο, είναι η εσωτερική γωνία του δρομέα, η μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας και η μεταβατική ΗΕΔ στον άξονα q. Η πρώτη αποτελεί και έξοδο του συστήματος, οπότε η τιμή της θεωρείται γνωστή, ενώ οι άλλες δύο αρχικοποιούνται προσεγγιστικά και μαζί με τις τιμές των παραμέτρων αλλάζουν κατά την εκτέλεση του επαναληπτικού αλγορίθμου.

Χωρίς καμία ρύθμιση, για ένα τυχαίο αρχικό διάνυσμα παραμέτρων, εφαρμόζεται η μέθοδος ελαχιστοποίησης του σφάλματος πρόβλεψης με τον προκαθορισμένο αλγόριθμο του System Identification Toolbox της Matlab, που είναι και το υπολογιστικό εργαλείο που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Ο αλγόριθμος αυτός είναι ο TRRN, που επεξηγήθηκε στο κεφάλαιο 3. Το αρχικό διάνυσμα δημιουργείται με μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών που ανήκουν όμως στο εύρος τιμών που μπορούν να πάρουν οι παράμετροι της σύγχρονης γεννήτριας. Το εύρος αυτό είναι απαραίτητο να καθοριστεί για τις παραμέτρους, πριν την εφαρμογή της μεθόδου ελαχιστοποίησης του σφάλματος πρόβλεψης ώστε να περιοριστεί το εύρος της αναζήτησης και ακολούθως ο χρόνος διάρκειας της.

Το αρχικό διάνυσμα παραμέτρων είναι ο πιο κρίσιμος παράγοντας για την επιτυχή ή μη αναγνώριση συστήματος. Αυτό επιβεβαιώνεται από τα πολύ διαφορετικά

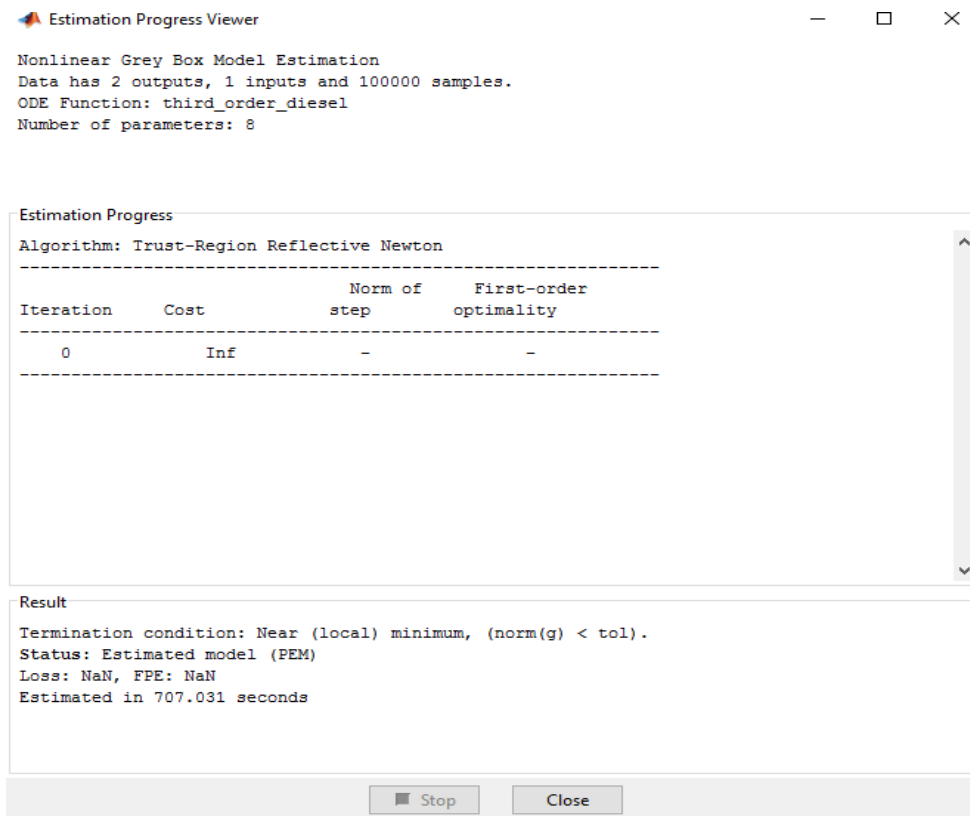
αποτελέσματα που μπορεί να πάρει κανείς αν η μέθοδος ελαχιστοποίησης του σφάλματος πρόβλεψης εκκινηθεί από διαφορετικά σημεία, με όλες τις άλλες παραμέτρους ρυθμισμένες με τον ίδιο τρόπο. Το διάνυσμα παραμέτρων ανταποκρίνεται στις τιμές των παραμέτρων με την ακόλουθη σειρά:

$$x = [J, D, x'_d, x_d, x_q, T'_{do}]$$

Για παράδειγμα, όταν το αρχικό διάνυσμα παραμέτρων είναι:

$$x_0 = [0.0249, 0.0021, 0.1335, 2.5420, 2.8753, 0.0218]$$

ο υπολογισμός των παραμέτρων αποτυγχάνει, καθώς το αρχικό διάνυσμα βρίσκεται πολύ κοντά σε τοπικό ελάχιστο και η επαναληπτική διαδικασία δεν εκκινεί. Η ακόλουθη εικόνα συνιστά το στιγμιότυπό από την εκτέλεση του προγράμματος για το συγκεκριμένο αρχικό σημείο.



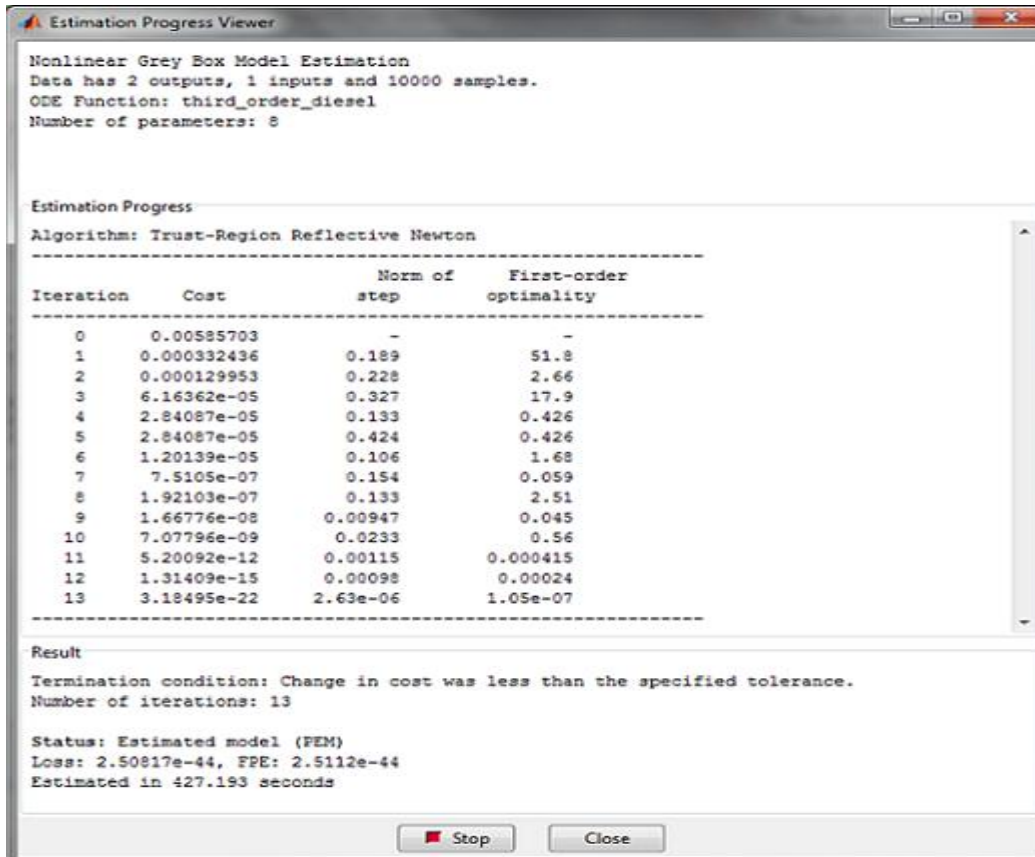
Εικόνα 21: Στιγμιότυπό από την εκτέλεση του προγράμματος στην περίπτωση εγκλωβισμού σε τοπικό ελάχιστο

Στο πρόβλημα προσδιορισμού των παραμέτρων της σύγχρονης γεννήτριας, η γνώση της μορφής της συνάρτησης απωλειών είναι αδύνατη, οπότε η μέθοδος που ακολουθείται είναι η μέθοδος δοκιμής και σφάλματος.

Με τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις, χρόνο δειγματοληψίας των δεδομένων $T_s = 10 \text{ ms}$ και αρχικό διάνυσμα παραμέτρων

$$x_0 = [0.01, 0.01, 0.35, 1.7, 1.7, 0.03]$$

επιτυγχάνεται ο ακριβής προσδιορισμός των παραμέτρων του συστήματος με πολύ μικρό χρόνο υπολογισμού. Η παρακάτω εικόνα αποτελεί στιγμιότυπο από την εκτέλεση του προγράμματος στην περίπτωση αυτή, αμέσως μετά τον τερματισμό της επαναληπτικής διαδικασίας υπολογισμού των παραμέτρων.



Εικόνα 22: Στιγμιότυπο από την εκτέλεση του προγράμματός στην περίπτωση επιτυχημένου προσδιορισμού των παραμέτρων με τον αλγόριθμο TRRN

Το παράθυρο αυτό παρέχει όλες τις πληροφορίες για την εξέλιξη της διαδικασίας προσδιορισμού των παραμέτρων, όπως τον αριθμό των επαναλήψεων που έγιναν, την τελική και τις ενδιάμεσες τιμές της συνάρτησης απωλειών, καθώς και την συνθήκη τερματισμού της επαναληπτικής διαδικασίας.

Ο αλγόριθμος TRRN, αν δεν υπάρχει όριο στον αριθμό των επαναλήψεων, τερματίζει σε 2 περιπτώσεις:

- Αν το μέτρο της βελτιστοποίησης πρώτης τάξης (First-Order Optimality measure) είναι μικρότερο της τιμής Tol_{Fun} , όπου

$$First - Order Optimality measure = \max_i |(\nabla f(x))_i| = \|\nabla f(x)\|_\infty$$

Η προκαθορισμένη τιμή Tol_{Fun} είναι 10^{-5} .

- Αν $|(x_i - x_{i+1})| < Tol_X * (1 + |x_i|)$, όπου με Tol_X συμβολίζεται το σχετικό ελάχιστο όριο στο μέγεθος του βήματος και η προκαθορισμένη τιμή του είναι 10^{-6} .

Ο λόγος τερματισμού, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, για τη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι η πρώτη από τις δύο συνθήκες.

Μετά την εύρεση ενός "καλού" αρχικού διάνυσματος (Set 1) παραμέτρων επιχειρείται η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών αλγορίθμων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα πλαίσια της μεθόδου του σφάλματος πρόβλεψης. Η ακόλουθη εικόνα συνιστά στιγμιότυπο από την εκτέλεση του προγράμματος για το ίδιο αρχικό διάνυσμα παραμέτρων, αλλά με τον αλγόριθμο LM.

Iteration	Cost	Norm of step	First-order optimality	Improvement (%) Expected	Improvement (%) Achieved	Bisections
0	0.0117141	-	380	96.1	-	-
1	0.000628498	2.84	43.4	96.1	94.6	0
2	0.000112022	1.38	38.7	88.2	82.2	0
3	7.3204e-05	0.104	24.6	69.5	34.7	4
4	1.57028e-05	0.553	13.8	87.8	78.5	0
5	8.75922e-06	0.168	1.08	46.7	44.2	0
6	8.62996e-06	0.02	1.01	2.35	1.48	0
7	8.62704e-06	0.00235	0.85	0.805	0.0338	0
8	8.62593e-06	0.00267	0.743	0.96	0.0129	0
9	8.62488e-06	0.000992	0.789	0.936	0.0122	10
10	8.62335e-06	0.000354	0.753	0.93	0.0178	4
11	8.62252e-06	0.000354	0.748	0.951	0.00956	4
12	8.62192e-06	0.000348	0.712	0.928	0.00698	4
13	8.62144e-06	0.000336	0.777	0.877	0.00559	4
14	8.62113e-06	0.000351	0.775	0.944	0.00357	4

Εικόνα 23: Στιγμιότυπο από την εκτέλεση του προγράμματος με τον αλγόριθμο LM

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εικόνα, όταν η μέθοδος PEM χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο LM, το παράθυρο που δείχνει την εξέλιξη της υπολογιστικής διαδικασίας διαφοροποιείται, καθώς προστίθενται περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη βελτίωση (αναμενόμενη και πραγματική) της συνάρτησης απωλειών σε κάθε επανάληψη. Το κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου αυτού είναι διαφορετικό: Αν το ποσοστό επί τοις εκατό της αναμενόμενης βελτίωσης προς την τρέχουσα τιμή της συνάρτησης απωλειών είναι μικρότερο της τιμής Tolerance, τότε η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται. Ο υπολογισμός της αναμενόμενης βελτίωσης της τιμής της συνάρτησης απωλειών βασίζεται στο διάνυσμα Gauss-Newton που υπολογίζεται για τις τρέχουσες τιμές παραμέτρων. Όμοια είναι και η εικόνα που παρουσιάζεται κατά την εκτέλεση των αλγορίθμων GN και GRAD. Επίσης, το κριτήριο τερματισμού των δύο αυτών αλγορίθμων είναι ίδιο με το κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου LM.

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο PEM για τους διαφορετικούς αλγορίθμους TRRN, LM, GN και GRAD με ένα "καλό" αρχικό διάνυσμα παραμέτρων, προκύπτει ο πίνακας 4. Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων έχει τεθεί στις 80. Ενώ για τον αλγόριθμο TRRN οι

τιμές των TolFun, TolX είναι οι προκαθορισμένες, για τους άλλους 3 αλγόριθμους μειώνουμε την τιμή του Tolerance ώστε να πετύχουμε όσο το δυνατόν πιο ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα διαφορετικών αλγορίθμων για αρχικό δάνυσμα παραμέτρων Set1 και χρόνο δειγματοληψίας $T_s=10ms$

$T_s = 10 ms$							
Parameters	Range	Simulation Parameters	Initial Parameters (Set1)	Identified Parameters			
				TRRN	LM	GN	GRAD
$J(pu)$	[0.0095-0.03]	0.0252	0.01	0.0252	0.0256	0.0255	0.0284
$D(pu)$	[0.001-0.1]	0.050	0.01	0.0500	0.0763	0.0762	0.0653
$x'_d(pu)$	[0.1-0.6]	0.568	0.35	0.5680	0.6000	0.6000	0.3498
$x_d(pu)$	[1.5-3.0]	2.072	1.7	2.0720	2.1081	2.1083	1.9149
$x_q(pu)$	[1.5-3.0]	1.559	1.7	1.5590	1.5160	1.5158	1.8036
$T'_{do}(s)$	[0.008-0.3]	0.1310	0.03	0.1310	0.0080	0.0080	0.0881
Iterations				13	45	17	80
Estimation Time (min)				6.90	55.91	27.13	57.58
$fit_{\delta}(\%)$				100	97.40	97.38	96.79
$fit_{P_e}(\%)$				100	71.92	72.01	80.94

Στον προηγούμενο πίνακα, τα μεγέθη $fit_{\delta}(\%)$ και $fit_{P_e}(\%)$ είναι τα ποσοστά που δείχνουν κατά πόσο οι αποκρίσεις του προσδιορισμένου μοντέλου ταιριάζουν με τις αποκρίσεις του πραγματικού συστήματος που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του μοντέλου. Οι αποκρίσεις αυτές, όπως αναφέρθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο, όπου παρουσιάστηκαν τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα, είναι η εσωτερική γωνία του δρομέα (δ) και η ηλεκτρομαγνητική ισχύς (P_e). Οι χρόνοι υπολογισμού δε θεωρούνται ακριβείς και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέτρο σύγκρισης των αλγορίθμων, καθώς εξαρτώνται από την ταχύτητα του υπολογιστή και από το αν εκτελούνται άλλες εργασίες παράλληλα. Παρατηρείται ότι μόνο ο αλγόριθμος TRRN μπορεί να οδηγήσει στον ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων, άρα και σε ταύτιση των αποκρίσεων μοντέλου - συστήματος. Επίσης, η επαναληπτική διαδικασία για τον αλγόριθμο GRAD τερματίζεται λόγω του ότι φτάνει στο μέγιστο αριθμό επαναλήψεων.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα σχετικά λάθη στον προσδιορισμό των παραμέτρων για τους 4 διαφορετικούς αλγόριθμους. Παρατηρείται ότι οι αλγόριθμοι LM και GN δίνουν σχεδόν ίδια αποτελέσματα, ενώ διαφέρουν με τους άλλους όσον αφορά ποιες παραμέτρους προσδιορίζουν ακριβέστερα και ποιες όχι.



Εικόνα 24: Σχετικά σφάλματα των παραμέτρων για τους διαφορετικούς αλγορίθμους για $T_s=10ms$ και Set1

Με αρχικό διάνυσμα παραμέτρων το Set1 και με μειωμένο χρόνο δειγματοληψίας από $10ms$ σε $1ms$, εφαρμόζεται η μέθοδος PEM για τους διαφορετικούς αλγορίθμους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 5: Αποτελέσματα διαφορετικών αλγορίθμων για αρχικό διάνυσμα παραμέτρων Set1 και χρόνο δειγματοληψίας $T_s=1ms$

$T_s = 1 ms$							
Parameters	Range	Simulation Parameters	Initial Parameters (Set 1)	Identified Parameters			
				TRRN	LM	GN	GRAD
$J(pu)$	[0.0095-0.03]	0.0252	0.01	0.0252	0.0252	0.0252	0.0287
$D(pu)$	[0.001-0.1]	0.050	0.01	0.0500	0.0500	0.0500	0.0629
$x'_d(pu)$	[0.1-0.6]	0.568	0.35	0.5680	0.5680	0.5680	0.3515
$x_d(pu)$	[1.5-3.0]	2.072	1.7	2.0720	2.0720	2.0720	1.9099
$x_q(pu)$	[1.5-3.0]	1.559	1.7	1.5590	1.5590	1.5590	1.8133
$T'_{do}(s)$	[0.008-0.3]	0.1310	0.03	0.1310	0.1310	0.1310	0.0989
Iterations				14	19	32	80
Estimation Time (min)				60.37	67.83	185.19	390.29
$fit_{\delta}(\%)$				100	100	100	96.81
$fit_{pe}(\%)$				100	100	100	82.42

Με τη μείωση του χρόνου δειγματοληψίας, οι 3 από τους 4 αλγόριθμους οδηγούν σε ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων, κάτι που θα πετύχαινε και ο αλγόριθμος GRAD αν ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ήταν μεγαλύτερος. Παρατηρείται επίσης αύξηση του χρόνου υπολογισμού για όλους τους αλγόριθμους.

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι πίνακες με τα αποτελέσματα από την εκτέλεση της μεθόδου PEM με τους διαφορετικούς αλγόριθμους για ένα διαφορετικό αρχικό διάνυσμα παραμέτρων και για τους δύο διαφορετικούς χρόνους δειγματοληψίας ($T_s = 10ms$ και $T_s = 1ms$). Το νέο αρχικό διάνυσμα παραμέτρων είναι:

$$x_0 = [0.098, 0.008, 0.15, 2.1, 1.6, 0.01]$$

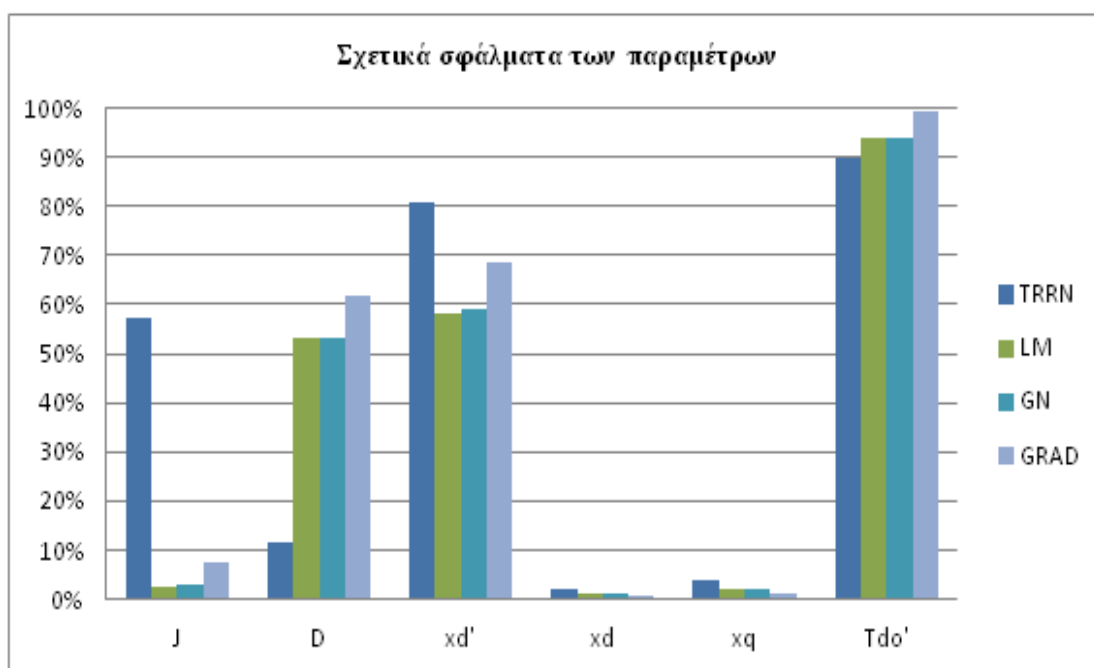
Πίνακας 6: Αποτελέσματα διαφορετικών αλγορίθμων για αρχικό διάνυσμα παραμέτρων Set2 και χρόνο δειγματοληψίας $T_s=10ms$

$T_s = 10 ms$							
Parameters	Range	Simulation Parameters	Initial Parameters (Set 2)	Identified Parameters			
				TRRN	LM	GN	GRAD
$J(pu)$	[0.0095-0.03]	0.0252	0.0098	0.0108	0.0258	0.0260	0.0271
$D(pu)$	[0.001-0.1]	0.050	0.008	0.0559	0.0766	0.0766	0.0191
$x'_d(pu)$	[0.1-0.6]	0.568	0.15	0.1100	0.2373	0.2324	0.1774
$x_d(pu)$	[1.5-3.0]	2.072	2.1	2.1184	2.0997	2.1003	2.0579
$x_q(pu)$	[1.5-3.0]	1.559	1.6	1.5000	1.5257	1.5250	1.5777
$T'_{do}(s)$	[0.008-0.3]	0.1310	0.01	0.0136	0.0080	0.0080	0.2611
Iterations				10	15	13	80
Estimation Time (s)				23.80	28.68	25.57	54.28
$fit_{\delta}(\%)$				81.32	97.36	97.40	98.52
$fit_{p_e}(\%)$				28.43	71.42	71.11	72.19

Πίνακας 7: Αποτελέσματα διαφορετικών αλγορίθμων για αρχικό διάνυσμα παραμέτρων Set1 και χρόνο δειγματοληψίας $T_s=1ms$

$T_s = 1 ms$							
Parameters	Range	Simulation Parameters	Initial Parameters (Set 2)	Identified Parameters			
				TRRN	LM	GN	GRAD
$J(pu)$	[0.0095-0.03]	0.0252	0.0098	0.0252	0.0252	0.0252	0.0270
$D(pu)$	[0.001-0.1]	0.050	0.008	0.0500	0.0500	0.0500	0.0506
$x'_d(pu)$	[0.1-0.6]	0.568	0.15	0.5680	0.5680	0.5680	0.1609
$x_d(pu)$	[1.5-3.0]	2.072	2.1	2.0720	2.0720	2.0720	2.0522
$x_q(pu)$	[1.5-3.0]	1.559	1.6	1.5590	1.5590	1.5590	1.5844
$T'_{do}(s)$	[0.008-0.3]	0.1310	0.01	0.1310	0.1310	0.1310	0.1240
Iterations				17	14	16	80
$fit_{\delta}(\%)$				100	100	100	98.20
$fit_{p_e}(\%)$				100	100	100	78.52

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα σχετικά λάθη στον προσδιορισμό των παραμέτρων για τα αποτελέσματα του πίνακα 6:



Εικόνα 25: Σχετικά σφάλματα των παραμέτρων για τους διαφορετικούς αλγορίθμους για $T_s=10ms$ και Set2

Με βάση τα παραπάνω, διαπιστώνεται αρχικά πόσο σημαντική είναι η σωστή επιλογή του χρόνου δειγματοληψίας. Για $T_s = 1 ms$ επιτυγχάνεται ο ακριβής προσδιορισμός των παραμέτρων για τους 3 πρώτους διαφορετικούς αλγορίθμους και για τα δύο διαφορετικά διανύσματα εκκίνησης. Η μέθοδος GRAD θα οδηγούσε κι αυτή σε ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων, όμως απαιτεί πολύ περισσότερες επαναλήψεις, καθώς πρόκειται για μια πολύ αργή μέθοδο βελτιστοποίησης.

Για τους άλλους 3 αλγορίθμους συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για $T_s = 10 ms$ αξίζει να αναφερθεί πως η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το αρχικό διάνυσμα παραμέτρων της γεννήτριας ($Cost = 0.00583852$, $LossFunction \cong 2.808841 \cdot 10^{-6}$ όταν εκκινεί η μέθοδος PEM), ο αλγόριθμος TRRN κρίνεται πιο αποτελεσματικός από τους άλλους δύο καθώς προσδιορίζει σωστά τις παραμέτρους, ακόμα και για αυτόν το χρόνο δειγματοληψίας. Με βάση τη θεωρία, αυτό μπορεί να οφείλεται στην ικανότητα του να ακολουθεί μια διεύθυνση αρνητικής καμπυλότητας της συνάρτησης απωλειών, περίπτωση που απαντάται στις επαναλήψεις όπου το διάνυσμα παραμέτρων απέχει ακόμα πολύ από το πραγματικό. Για το Set2, όπου δύο από τις παραμέτρους έχουν τιμές πολύ κοντά στις πραγματικές ($Cost = 0.00087133$, $LossFunction \cong 1.884684 \cdot 10^{-7}$ όταν εκκινεί η μέθοδος PEM), οι αλγόριθμοι LM και GN δίνουν καλύτερα αποτελέσματα.

Όσον αναφορά τα σχετικά σφάλματα των παραμέτρων, διαπιστώνεται ότι πιο δύσκολος είναι ο προσδιορισμός της παραμέτρου T'_{do} , ενώ πιο ακριβής ο προσδιορισμός των παραμέτρων x_d και x_q .

Στις επόμενες ενότητες, για την εκτέλεση της μεθόδου PEM, θα χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος TRRN. Επιλέγεται αυτός ο αλγόριθμος καθώς είναι ο μόνος με τον οποίο επιτεύχθηκε ο ακριβής προσδιορισμός των παραμέτρων ακόμα και για μεγαλύτερο χρόνο δειγματοληψίας. Ο χρόνος δειγματοληψίας θα είναι 1 ms.

4.4. Επίδραση λευκού θορύβου στον προσδιορισμό των παραμέτρων

Στην πράξη, σε κάθε πρόβλημα μέτρησης, έχουμε συνήθως να κάνουμε με ασθενή ηλεκτρικά σήματα. Η μέτρηση των σημάτων αυτών γίνεται πάντα με μια αβεβαιότητα που είναι εγγενής στα φυσικά φαινόμενα και στις φυσικές δομές και εμποδίζει την ανάδειξη του κύριου φαινομένου. Η χρονικά εξαρτημένη αβεβαιότητα στις φυσικές παραμέτρους αναφέρεται γενικά σαν θόρυβος. Ο θόρυβος είναι μια εντελώς ακανόνιστη διακύμανση που μπαίνει μαζί με την πληροφορία στην είσοδο της μετρητικής διάταξης ή που γεννιέται μέσα στην ίδια τη διάταξη ή στο κανάλι διαβίβασης της πληροφορίας.

Είναι πολύ σύνηθες στα δεδομένα μετρήσεων να υπεισέρχεται λευκός θόρυβος. Αυτός αποτελεί την πιο απλή μορφή θορύβου. Στο διακριτό χρόνο, ο λευκός θόρυβος είναι ένα διακριτό σήμα, τα δείγματα του οποίου θεωρούνται ως μια ακολουθία από σειριακά ασυσχέτιστες τυχαίες μεταβλητές με πεπερασμένη μέση τιμή και διασπορά. Αν κάθε δείγμα ακολουθεί την κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή, τότε το σήμα αυτό είναι ένας Γκαουσιανός λευκός θόρυβος (Gaussian White noise).

Με βάση τα παραπάνω, δοκιμάζεται στα δεδομένα εξόδου του μη γραμμικού μοντέλου 3ης τάξης να προστεθεί λευκός Γκαουσιανός θόρυβος, με σκοπό να διαπιστωθεί η επίδραση του θορύβου στην εκτίμηση των παραμέτρων. Ο θόρυβος που προστίθεται χαρακτηρίζεται από τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR, Signal to Noise Ratio).

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$$

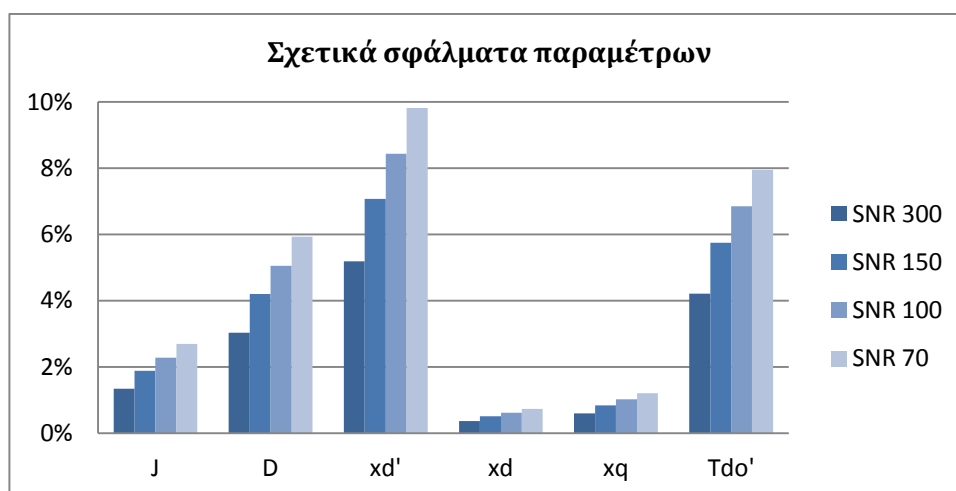
όπου P_{signal} : η μέση ισχύς του σήματος

P_{noise} : η μέση ισχύς του θορύβου

Στον πίνακα και στην εικόνα που ακολουθούν, παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές αυτές.

Πίνακας 8: Επίδραση θορύβου με διαφορετικό SNR στον υπολογισμό των παραμέτρων

Parameters	Simulation Parameters	Identified Parameters			
		SNR 300	SNR 150	SNR 100	SNR 70
$J(pu)$	0.0252	0.0255	0.0257	0.0258	0.0259
$D(pu)$	0.050	0.0485	0.0479	0.0475	0.0470
$x'_d(pu)$	0.568	0.5386	0.5278	0.5201	0.5123
$x_d(pu)$	2.072	2.0644	2.0614	2.0592	2.0569
$x_q(pu)$	1.559	1.5684	1.5721	1.5749	1.5778
$T'_{do}(s)$	0.1310	0.1365	0.1385	0.1400	0.1414



Εικόνα 26: Σχετικά σφάλματα παραμέτρων για προσθήκη θορύβου διαφορετικού SNR

Όπως ήταν αναμενόμενο, όσο μειώνεται ο συντελεστής SNR του θορύβου τα σχετικά σφάλματα στον υπολογισμό των παραμέτρων αυξάνονται, χωρίς ωστόσο να ξεπερνούν για καμία παράμετρο το 10% για τις τιμές SNR που εξετάστηκαν. Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι ο υπολογισμός των παραμέτρων είναι ικανοποιητικός, ακόμα και για δεδομένα με υψηλό ποσοστό θορύβου. Πριν τη διαδικασία αναγνώρισης συστήματος, τα δεδομένα συνήθως φιλτράρονται για την αφαίρεση του θορύβου.

4.5. Εφαρμογή της διαδικασίας με δεδομένα από το μοντέλο 5ης τάξης

Μετά τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε θεωρώντας ως πραγματικές αποκρίσεις της γεννήτριας τα δεδομένα εξόδου του μη γραμμικού μοντέλου 3ης τάξης, η διαδικασία αναγνώρισης της γεννήτριας θα εφαρμοστεί θεωρώντας ως πραγματικές αποκρίσεις τα δεδομένα εξόδου του μη γραμμικού μοντέλου 5ης τάξης. Σύμφωνα με

την προηγούμενη ενότητα. η προσθήκη θορύβου στα δεδομένα μέτρησης - ώστε το προς επίλυση πρόβλημα να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικό - δεν είναι απαραίτητη, καθώς ο θόρυβος από τις αποκρίσεις ενός συστήματος φιλτράρεται και αφαιρείται σε μεγάλο βαθμό πριν να ξεκινήσει η διαδικασία της αναγνώρισης συστήματος.

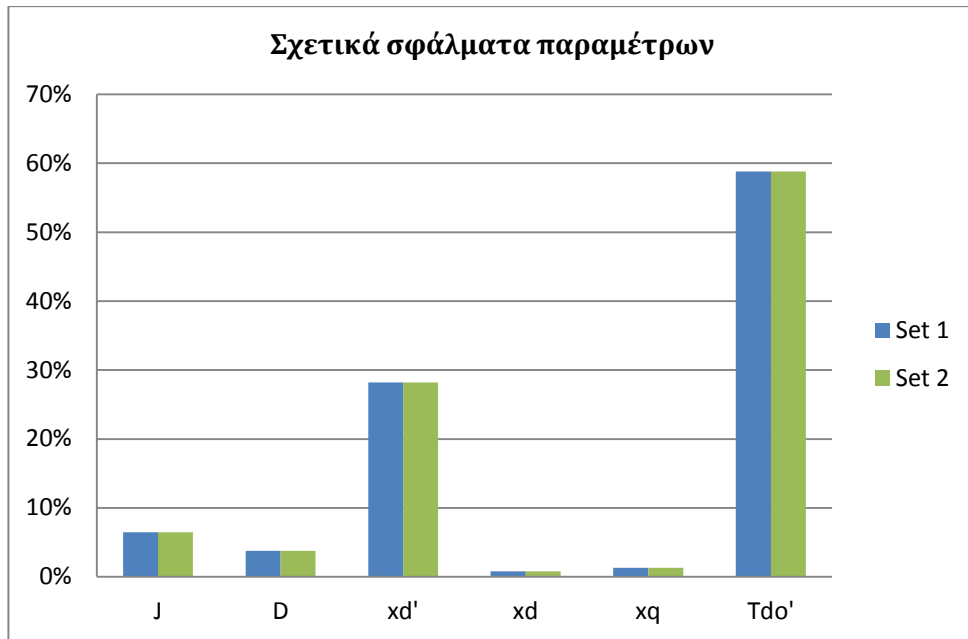
4.5.1. Αναγνώριση γεννήτριας από ένα σημείο λειτουργίας

Έχοντας καθορίσει από την προηγούμενη διερεύνηση τον αλγόριθμο τοπικής βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί και τον χρόνο δειγματοληψίας. επαναλαμβάνεται για τα νέα δεδομένα η αναγνώριση συστήματος με τη μέθοδο PEM και αρχικά διανύσματα παραμέτρων τα Set1 και Set2. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 9: Αποτελέσματα της αναγνώρισης συστήματος σε ένα λειτουργικό σημείο με δεδομένα από το μοντέλο 5ης τάξης

Parameters	Range	Simulation Parameters	Identified Parameters	
			Set 1	Set 2
$J(pu)$	[0.0095-0.03]	0.0252	0.0268	0.0268
$D(pu)$	[0.001-0.1]	0.050	0.0519	0.0519
$x'_d(pu)$	[0.1-0.6]	0.568	0.4077	0.4078
$x_d(pu)$	[1.5-3.0]	2.072	2.0887	2.0887
$x_q(pu)$	[1.5-3.0]	1.559	1.5387	1.5387
$T'_{do}(s)$	[0.008-0.3]	0.1310	0.2080	0.2080
Iterations			20	16
Estimation Time (min)			48.25	45.82
$fit_{\delta}(\%)$			99.5090	99.5089
$fit_{pe}(\%)$			91.4552	91.4552
<i>LossFunction</i>			$3.5515 \cdot 10^{-14}$	$3.5524 \cdot 10^{-14}$
<i>FPE</i>			$3.5519 \cdot 10^{-14}$	$3.5530 \cdot 10^{-14}$
FPE_{δ}			$8.3615 \cdot 10^{-8}$	$8.5532 \cdot 10^{-8}$
FPE_{pe}			$4.4188 \cdot 10^{-7}$	$4.4554 \cdot 10^{-7}$
$P_{Ree\delta}$			100%	100%
P_{Reepe}			100%	100%

Στην ακόλουθη εικόνα, φαίνονται και τα σχετικά σφάλματα στον υπολογισμό των παραμέτρων. Όπως διαπιστώνεται, αυτά είναι μεγάλα για τις παραμέτρους x'_d και T'_{do} .



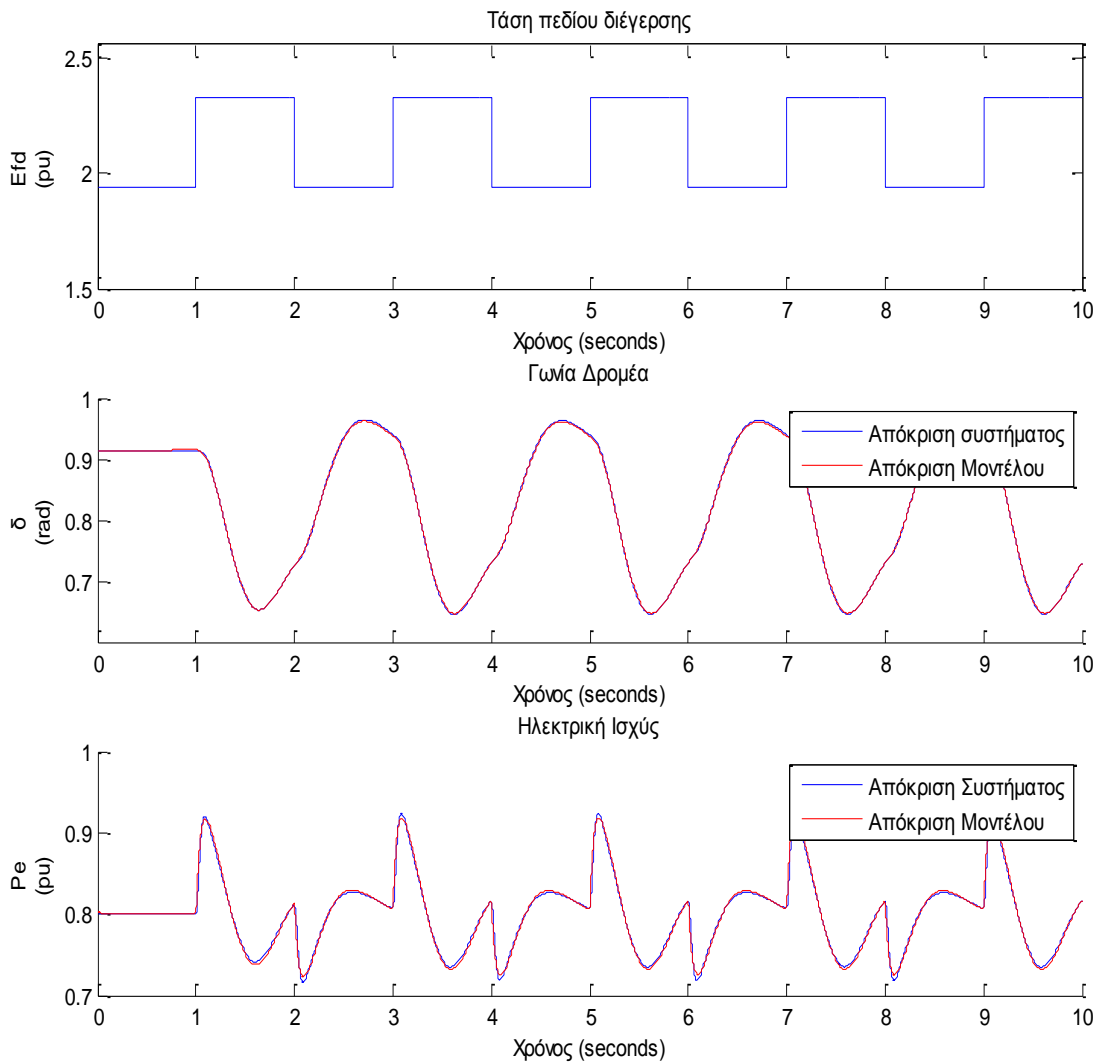
Εικόνα 27: Σχετικά σφάλματα των παραμέτρων, με δεδομένα από το μοντέλο 5ης τάξης

Για τα δύο διαφορετικά διανύσματα εκκίνησης, προκύπτει το ίδιο ακριβώς μοντέλο, οπότε από εδώ και στο εξής η ανάλυση θα αφορά μόνο το ένα από τα δύο διανύσματα εκκίνησης.

Για την επαλήθευση του μοντέλου δοκιμάζουμε τις αποκρίσεις του σε 3 διαφορετικά σήματα διαταραχής.

1η δοκιμή επαλήθευσης

Για το λειτουργικό σημείο από το οποίο προήλθαν οι αποκρίσεις της γεννήτριας που χρησιμοποιήθηκαν στην αναγνώριση συστήματος, συγκρίνονται οι αποκρίσεις του συστήματος και του μοντέλου, όταν και στα δύο εφαρμοστεί το ίδιο σήμα διαταραχής, που είναι ένα σήμα παλμών με περίοδο $2s$ και πλάτους 20% της ονομαστικής τιμής της εισόδου. Η είσοδος και οι αποκρίσεις μοντέλου και συστήματος απεικονίζονται στις γραφικές παραστάσεις της ακόλουθης εικόνας:



Εικόνα 28: Αποτελέσματα της αναγνώρισης στο σημείο λειτουργίας $P=0.8 \text{ pu}$, $Q=0 \text{ pu}$, $V=0.98 \text{ pu}$, όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα παλμών

Τα μέτρα αξιολόγησης του μοντέλου παίρνουν τις τιμές:

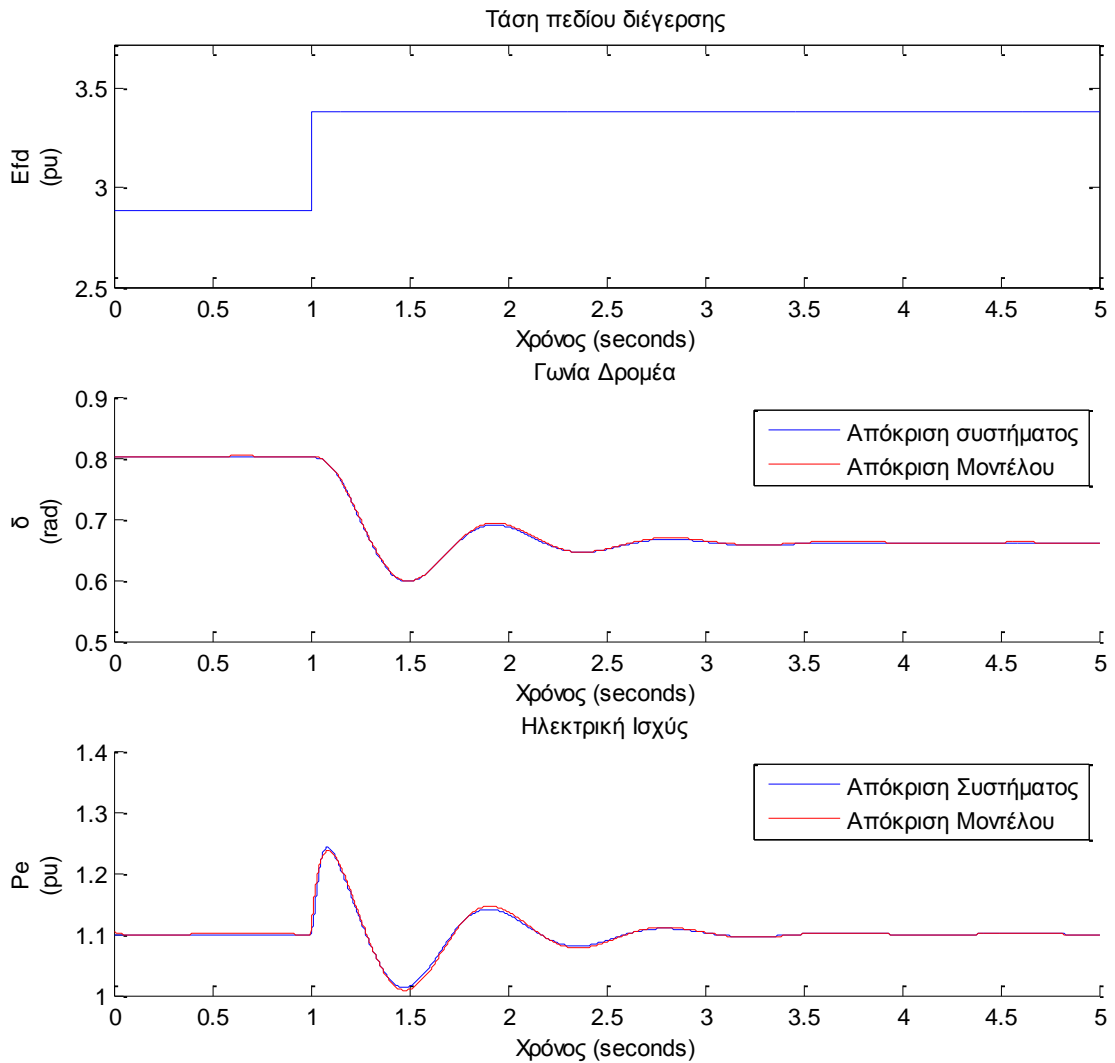
$$\begin{aligned}
 fit_{\delta}(\%) &= 98.68 \\
 fit_{P_e}(\%) &= 91.73 \\
 FPE_{\delta} &= 2.2547 \cdot 10^{-6} \\
 FPE_{P_e} &= 1.5162 \cdot 10^{-5} \\
 P_{Ree\delta} &= 100\%, P_{ReeP_e} = 100\%
 \end{aligned}$$

Στόχος των επόμενων δοκιμών είναι να δείξουν αν το μοντέλο μπορεί να καλύψει τις βασικές μη γραμμικότητες του συστήματος. Για αυτό εξετάζεται η απόδοση του σε ένα διαφορετικό σημείο λειτουργίας:

$$P = 1.1 \text{ pu}, Q = 0.4 \text{ pu}, V = 1.02 \text{ pu}$$

2η δοκιμή επαλήθευσης

Στην είσοδο του συστήματος και του μοντέλου εφαρμόζουμε την ίδια βηματική συνάρτηση με πλάτος 0.5 pu. Οι αποκρίσεις τους απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα:



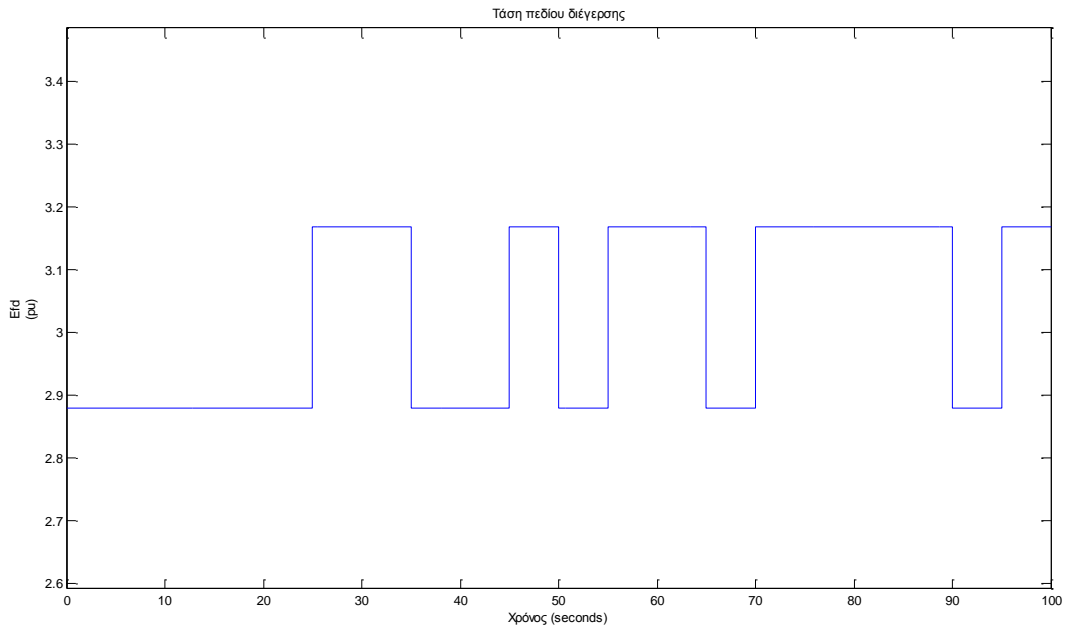
Εικόνα 29: Αποτελέσματα της αναγνώρισης στο σημείο λειτουργίας $P=1.1$ pu, $Q=0.4$ pu, $V=1.02$ pu, όταν εφαρμόζεται στην είσοδο μια βηματική συνάρτηση

Τα μέτρα αξιολόγησης του μοντέλου παίρνουν τις τιμές:

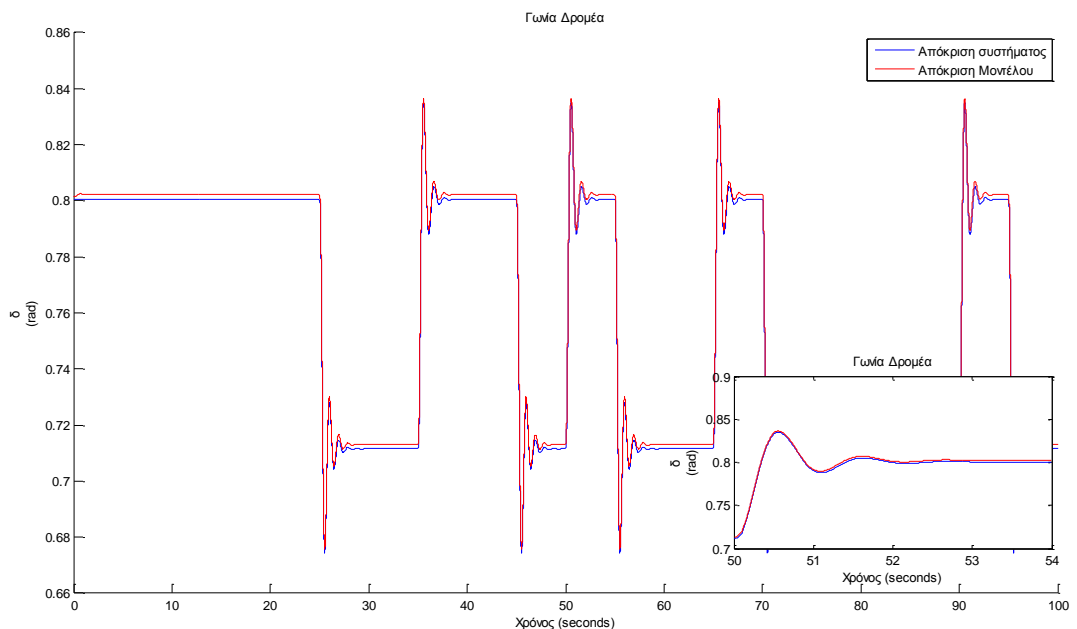
$$\begin{aligned} fit_{\delta}(\%) &= 90.57 \\ fit_{P_e}(\%) &= 90.70 \\ FPE_{\delta} &= 2.1131 \cdot 10^{-6} \\ FPE_{P_e} &= 3.9481 \cdot 10^{-7} \\ P_{Ree\delta} &= 100\%, P_{ReeP_e} = 100\% \end{aligned}$$

3η δοκιμή επαλήθευσης

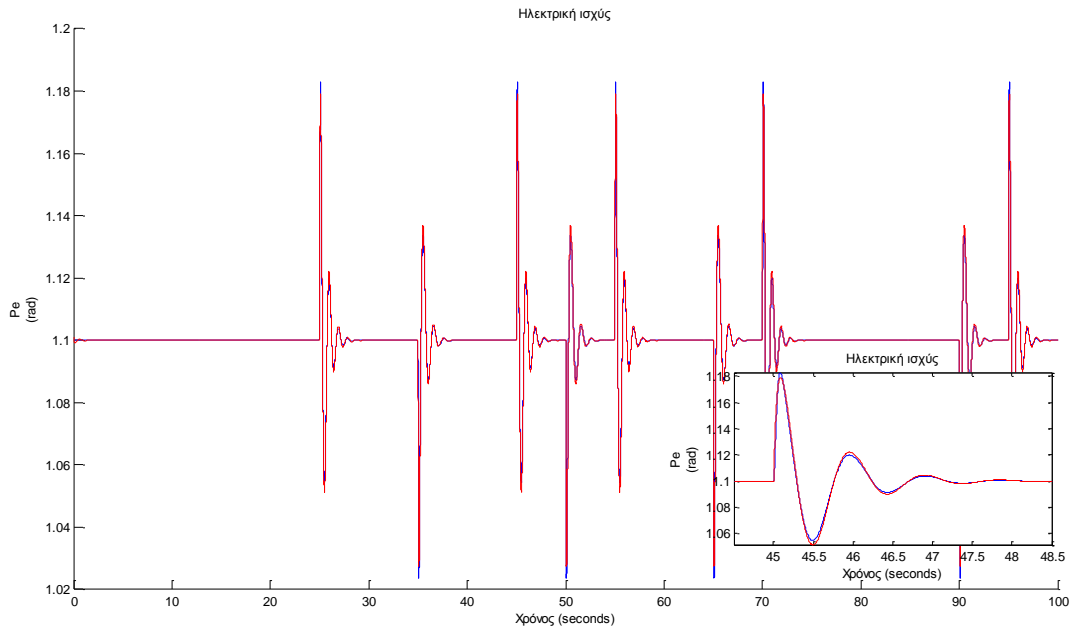
Για το νέο σημείο λειτουργίας, εφαρμόζουμε στην είσοδο του συστήματος και του μοντέλου το ίδιο σήμα PRBS που χρησιμοποιήθηκε για την αναγνώριση. Το σήμα εισόδου και οι αποκρίσεις συστήματος και μοντέλου απεικονίζονται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 30: Σήμα εισόδου PRBS στο σημείο λειτουργίας $P=1.1$ pu, $Q=0.4$ pu, $V=1.02$ pu



Εικόνα 31: Η πρώτη απόκριση (γωνία δ) στο σημείο λειτουργίας $P=1.1$ pu, $Q=0.4$ pu, $V=1.02$ pu, όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα PRBS



Εικόνα 32: Η δεύτερη απόκριση (P_e) στο σημείο λειτουργίας $P=1.1$ pu, $Q=0.4$ pu, $V=1.02$ pu, όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα PRBS

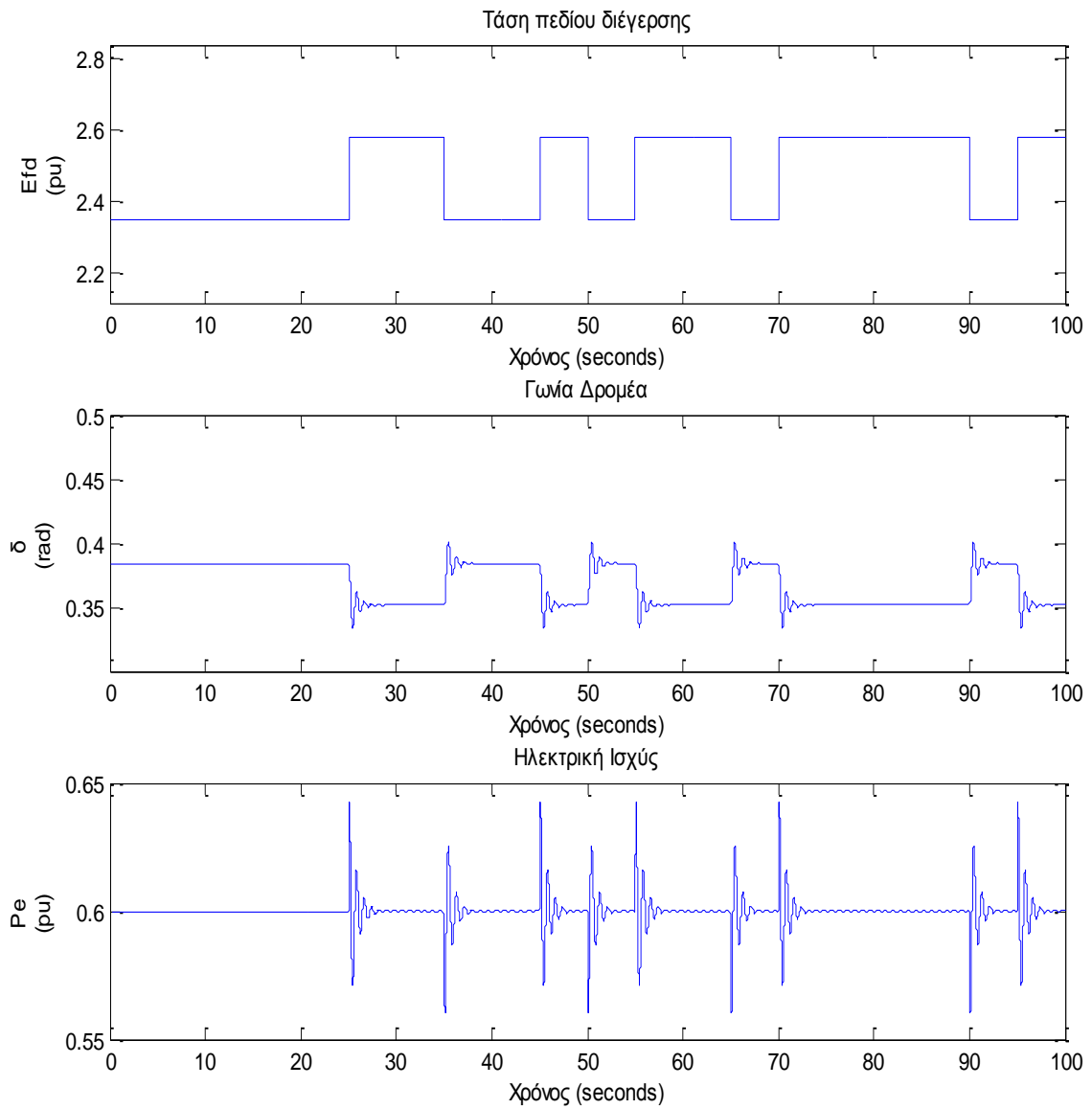
Τα μέτρα αξιολόγησης του μοντέλου παίρνουν τις τιμές:

$$\begin{aligned}
 fit_{\delta}(\%) &= 96.36 \\
 fit_{P_e}(\%) &= 90.68 \\
 FPE_{\delta} &= 2.7136 \cdot 10^{-6} \\
 FPE_{P_e} &= 9.9858 \cdot 10^{-7} \\
 P_{Ree\delta} &= 100\%, \quad P_{ReeP_e} = 100\%
 \end{aligned}$$

Παρόλο που τα σφάλματα για τις παραμέτρους x'_d και T'_{d0} είναι πολύ μεγάλα, το μοντέλο μπορεί σε μεγάλο βαθμό να ακολουθήσει τις αποκρίσεις του συστήματος σε όλες τις δοκιμές.

4.5.2. Αναγνώριση γεννήτριας από πολλά σημεία λειτουργίας

Στο πραγματικό σύστημα, για να ξεπεραστεί η επίδραση του θορύβου και στην παρούσα εργασία λόγω της μη γραμμικότητας των μοντέλου που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των δεδομένων απόκρισης, η διαδικασία της αναγνώρισης πρέπει να διεξαχθεί για περισσότερα από ένα σημεία λειτουργίας. Τα μεταβατικά φαινόμενα που παρατηρούνται στις αποκρίσεις της γεννήτριας σε ένα σήμα διαταραχής μπορεί να είναι πολύ διαφορετικά για διαφορετικά σημεία λειτουργίας, όπως διαπιστώνεται από τη σύγκριση των εικόνων 19 και 33.



Εικόνα 33: Δεδομένα προσομοίωσης από το μη γραμμικό μοντέλο 5ης τάξης στο σημείο λειτουργίας $P=0.6$ pu, $Q=0.53$ pu, $V=1.22$ pu (PRBS 10%)

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα από την αναγνώριση συστήματος με δεδομένα από τα ακόλουθα διαφορετικά σημεία λειτουργίας:

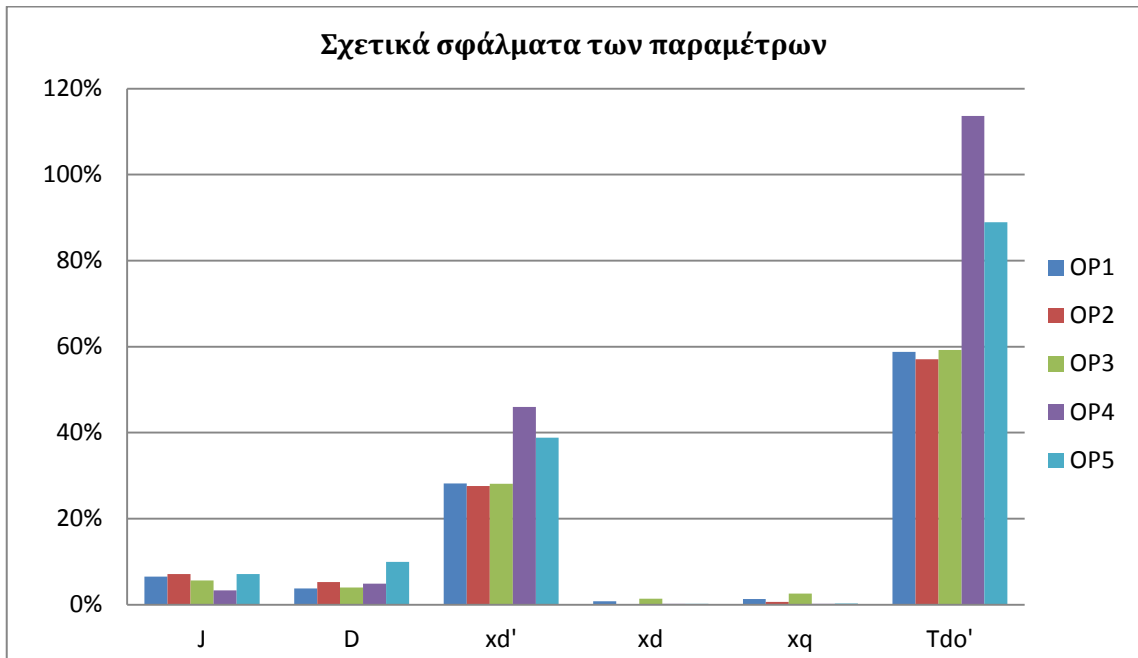
$OP1: P = 0.8$ pu,	$Q = 0$ pu,	$V = 0.98$ pu
$OP2: P = 1.2$ pu,	$Q = 0.15$ pu,	$V = 0.9$ pu
$OP3: P = 0.9$ pu,	$Q = 0.1$ pu,	$V = 0.98$ pu
$OP4: P = 0.6$ pu,	$Q = 0.53$ pu,	$V = 1.22$ pu
$OP5: P = 1.2$ pu,	$Q = 0.72$ pu,	$V = 1.31$ pu

Στην είσοδο εφαρμόζεται σήμα PRBS με πλάτος 10% της ονομαστικής τιμής της εισόδου.

Πίνακας 10: Αποτελέσματα της αναγνώρισης από πέντε διαφορετικά σημεία λειτουργίας (Είσοδος PRBS 10%)

Parameters	Range	Simulation Parameters	Identified Parameters				
			OP 1	OP 2	OP 3	OP 4	OP5
$J(pu)$	[0.0095-0.03]	0.0252	0.0268	0.0270	0.0266	0.0260	0.0270
$D(pu)$	[0.001-0.1]	0.050	0.0519	0.0526	0.0520	0.0524	0.0550
$x'_d(pu)$	[0.1-0.6]	0.568	0.4077	0.4115	0.4083	0.3069	0.3475
$x_d(pu)$	[1.5-3.0]	2.072	2.0887	2.0750	2.1001	2.0675	2.0762
$x_q(pu)$	[1.5-3.0]	1.559	1.5387	1.5497	1.5190	1.5620	1.5545
$T'_{do}(s)$	[0.008-0.3]	0.1310	0.2080	0.2057	0.2086	0.2799	0.2474
Iterations			20	15	15	19	18
$fit_{\delta}(\%)$			99.5090	99.4285	99.4224	99.2765	98.7964
$fit_{Pe}(\%)$			91.4552	91.2433	91.7998	92.8721	91.7694
LossFunction			$3.552 \cdot 10^{-14}$	$2.239 \cdot 10^{-13}$	$5.360 \cdot 10^{-14}$	$2.658 \cdot 10^{-15}$	$8.973 \cdot 10^{-14}$
FPE			$3.552 \cdot 10^{-14}$	$2.240 \cdot 10^{-13}$	$5.360 \cdot 10^{-14}$	$2.658 \cdot 10^{-15}$	$8.974 \cdot 10^{-14}$
$P_{Ree\delta}$			100%	100%	100%	100%	100%
P_{ReePe}			100%	100%	100%	100%	100%

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται τα σχετικά σφάλματα των παραμέτρων, που έχουν προκύψει από την αναγνώριση συστήματος σε κάθε ένα από τα πέντε σημεία λειτουργίας. Διαπιστώνεται ότι στα διαφορετικά σημεία λειτουργίας, επιτυγχάνεται πιο ακριβής προσδιορισμός διαφορετικών παραμέτρων. Για παράδειγμα, ενώ για OP4 και OP5, τα σφάλματα στον υπολογισμό των παραμέτρων x'_d και T'_{do} είναι ακόμη μεγαλύτερα από τα άλλα σημεία, ο προσδιορισμός των παραμέτρων x_d και x_q είναι πολύ ακριβής. Επιπλέον, παρατηρείται η ευαισθησία ιδιαίτερα των παραμέτρων x'_d και T'_{do} στα διαφορετικά σημεία λειτουργίας.



Εικόνα 34: Σχετικά σφάλματα για διαφορετικά σημεία λειτουργίας (Είσοδος PRBS 10%)

Για την εξαγωγή του μοντέλου της γεννήτριας, υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών των παραμέτρων που έχουν υπολογιστεί από τα διαφορετικά σημεία λειτουργίας. Οι τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν και τα σχετικά σφάλματα φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 11: Παράμετροι μοντέλου από τη διαδικασία αναγνώρισης σε πολλά σημεία λειτουργίας (Είσοδος PRBS 10%)

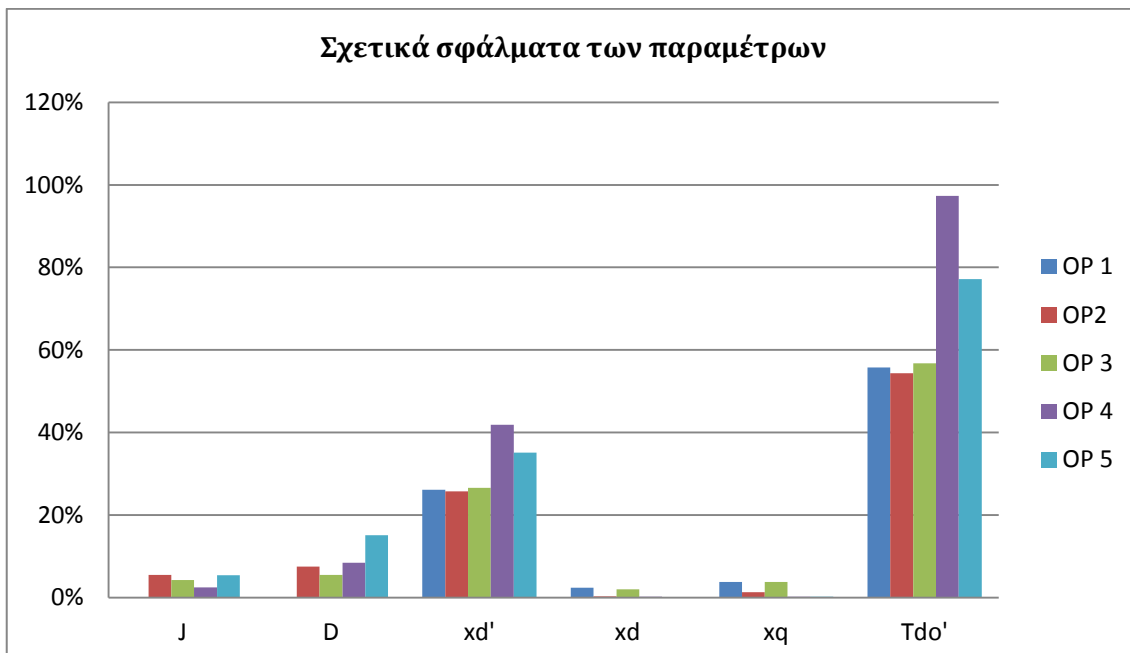
Parameters	Range	Simulation Parameters	Identified Parameters	Relative Errors (%)
$J(pu)$	[0.0095-0.03]	0.0252	0.0267	5.95
$D(pu)$	[0.001-0.1]	0.050	0.0528	5.60
$x'_d(pu)$	[0.1-0.6]	0.568	0.3764	33.73
$x_d(pu)$	[1.5-3.0]	2.072	2.0815	0.46
$x_q(pu)$	[1.5-3.0]	1.559	1.5448	0.91
$T'_{do}(s)$	[0.008-0.3]	0.1310	0.2299	75.50

Επαναλαμβάνεται η διαδικασία της αναγνώρισης, όταν στην είσοδο εφαρμόζεται ένα σήμα PRBS πλάτους 20%, με σκοπό να περιοριστούν οι διακυμάνσεις στον υπολογισμό των παραμέτρων για τα διαφορετικά σημεία λειτουργίας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 12: Αποτελέσματα της αναγνώρισης από πέντε διαφορετικά σημεία λειτουργίας (Είσοδος PRBS 20%)

Parameters	Range	Simulation Parameters	Identified Parameters				
			OP 1	OP 2	OP 3	OP 4	OP5
$J(pu)$	[0.0095-0.03]	0.0252	0.0262	0.0266	0.0263	0.0258	0.0266
$D(pu)$	[0.001-0.1]	0.050	0.0522	0.0538	0.0528	0.0543	0.0576
$x'_d(pu)$	[0.1-0.6]	0.568	0.4196	0.4216	0.4169	0.3302	0.3684
$x_d(pu)$	[1.5-3.0]	2.072	2.1222	2.0787	2.1140	2.0669	2.0754
$x_q(pu)$	[1.5-3.0]	1.559	1.5000	1.5388	1.5000	1.5626	1.5555
$T'_{do}(s)$	[0.008-0.3]	0.1310	0.2041	0.2022	0.2053	0.2585	0.2321
Iterations			17	16	20	22	18
$fit_{\delta}(\%)$			99.4536	99.2837	99.4597	99.2268	98.7896
$fit_{pe}(\%)$			92.2813	91.8528	92.2524	92.7663	91.6844
LossFunction			$4.141 \cdot 10^{-13}$	$3.404 \cdot 10^{-12}$	$4.913 \cdot 10^{-13}$	$3.950 \cdot 10^{-14}$	$1.165 \cdot 10^{-12}$
FPE			$4.141 \cdot 10^{-13}$	$3.404 \cdot 10^{-12}$	$4.913 \cdot 10^{-13}$	$3.951 \cdot 10^{-14}$	$1.165 \cdot 10^{-12}$
$P_{Ree\delta}$			100%	100%	100%	100%	100%
P_{ReePe}			100%	100%	100%	100%	100%

Τα σχετικά σφάλματα των παραμέτρων που αντιστοιχούν στα παραπάνω αποτελέσματα απεικονίζονται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 35: Σχετικά σφάλματα για διαφορετικά σημεία λειτουργίας (Είσοδος PRBS 20%)

Λόγω της μεγαλύτερης εφαρμοζόμενης διαταραχής, τα μεταβατικά φαινόμενα στις αποκρίσεις είναι πιο έντονα και οι διακυμάνσεις στον υπολογισμό των μεταβατικών παραμέτρων μειώνονται. Υπολογίζεται ξανά ο μέσος όρος των τιμών των παραμέτρων που έχουν προκύψει από τα διαφορετικά σημεία λειτουργίας. Οι τιμές των παραμέτρων και τα σχετικά σφάλματα φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 13: Παράμετροι μοντέλου από τη διαδικασία αναγνώρισης σε πολλά σημεία λειτουργίας (Είσοδος PRBS 20%)

Parameters	Range	Simulation Parameters	Identified Parameters	Relative Errors (%)
$J(pu)$	[0.0095-0.03]	0.0252	0.0263	4.37
$D(pu)$	[0.001-0.1]	0.050	0.0541	8.20
$x'_d(pu)$	[0.1-0.6]	0.568	0.3913	31.11
$x_d(pu)$	[1.5-3.0]	2.072	2.0914	0.94
$x_q(pu)$	[1.5-3.0]	1.559	1.5314	1.77
$T'_{do}(s)$	[0.008-0.3]	0.1310	0.2204	68.24

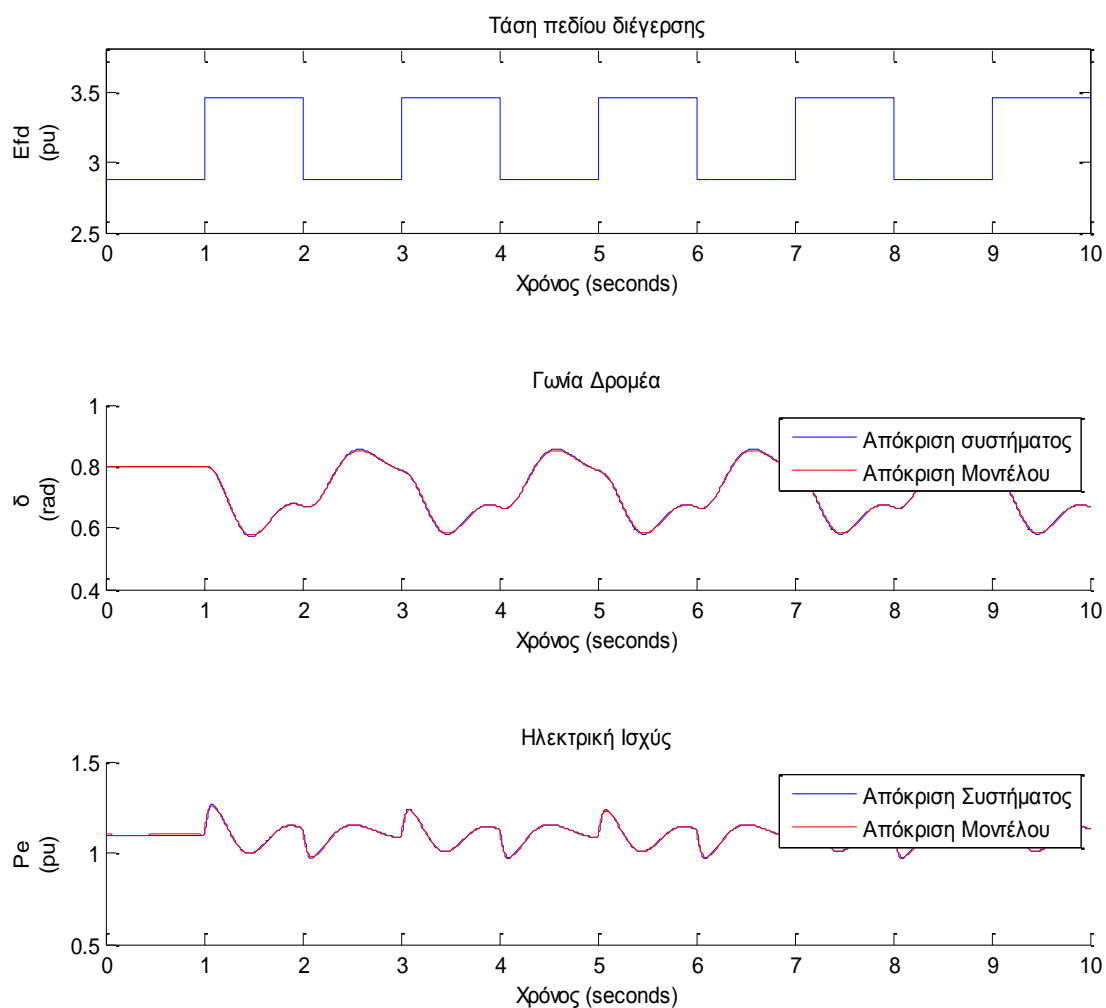
Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των δοκιμών επαλήθευσης που παρατίθενται στη συνέχεια, τα $fit(\%)$ αυξάνονται παρόλο που τα σχετικά λάθη ορισμένων παραμέτρων όπως οι x'_d και T'_{do} αυξάνονται ακόμη περισσότερο όταν η διαδικασία της αναγνώρισης επιχειρείται σε πολλά σημεία. Αυτό συμβαίνει γιατί επιτυγχάνεται ακριβέστερος υπολογισμός των παραμέτρων x_d και x_q , που είναι οι καθοριστικής σημασίας παράμετροι για τις αποκρίσεις της γεννήτριας.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πινάκων 11 και 13, παρατηρούμε ότι τα σχετικά σφάλματα των μεταβατικών παραμέτρων μειώνονται με την αύξηση του πλάτους της διαταραχής που εφαρμόζεται στην είσοδο, ωστόσο λόγω του ότι τα σχετικά σφάλματα των παραμέτρων x_d και x_q αυξάνονται, τα $fit_\delta(\%)$ και $fit_{pe}(\%)$ στις δοκιμές επαλήθευσης του μοντέλου του πίνακα 13 είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα του μοντέλου του πίνακα 11, οπότε στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των δοκιμών επαλήθευσης για το μοντέλο του πίνακα 11.

Για την επαλήθευση του μοντέλου επαναλαμβάνονται οι ίδιες δοκιμές για σημείο λειτουργίας, στο οποίο οι αποκρίσεις της γεννήτριας δεν χρησιμοποιήθηκαν για την αναγνώριση συστήματος. Επιλέγεται ξανά το σημείο:

$$P = 1.1 pu, \quad Q = 0.4 pu, \quad V = 1.02 pu$$

1η δοκιμή επαλήθευσης

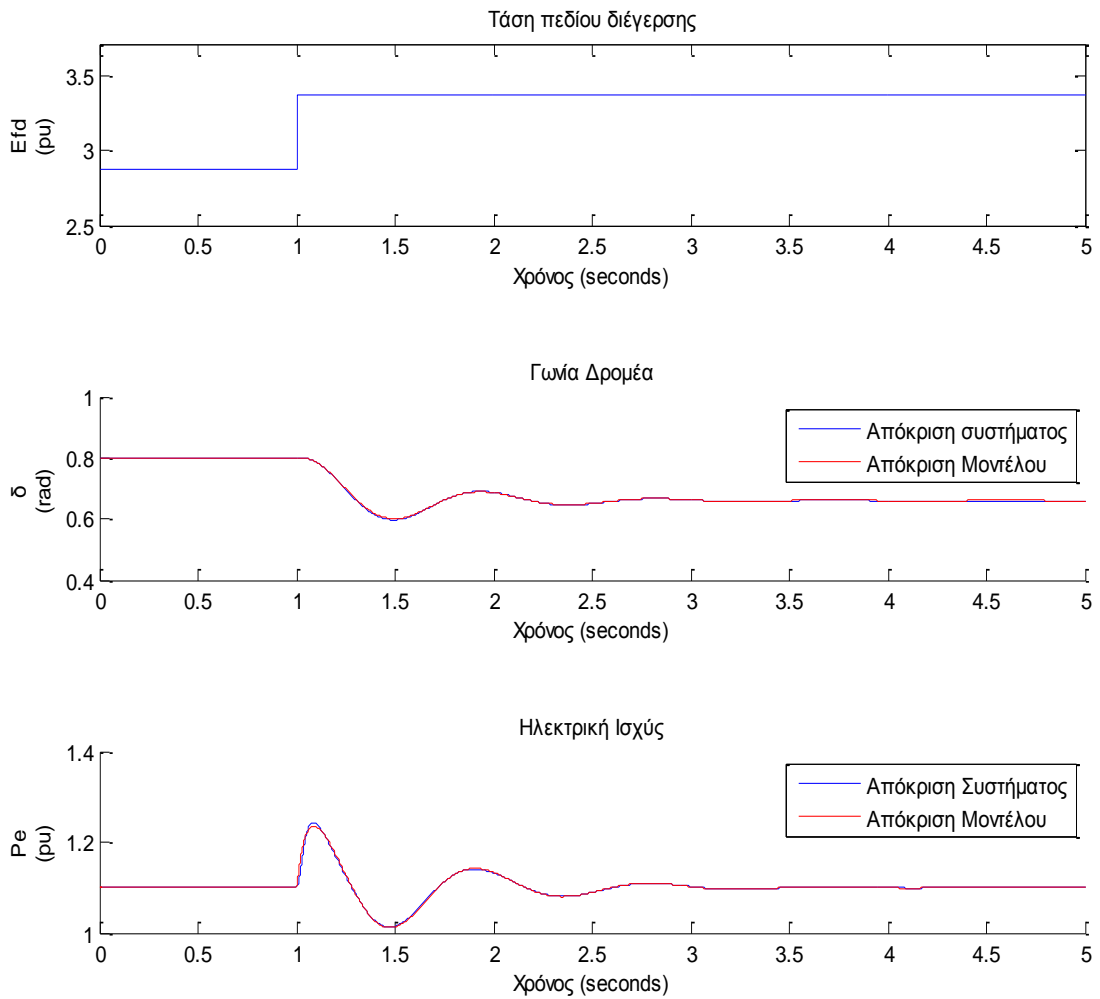


Εικόνα 36: Αποτελέσματα της αναγνώρισης (για την προσέγγιση του μέσου όρου), όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα παλμών

Τα μέτρα αξιολόγησης του μοντέλου παίρνουν τις τιμές:

$$\begin{aligned} fit_{\delta}(\%) &= 97.09 \\ fit_{Pe}(\%) &= 91.18 \\ FPE_{\delta} &= 6.7970 \cdot 10^{-6} \\ FPE_{Pe} &= 2.9369 \cdot 10^{-5} \\ P_{Ree\delta} &= 100\%, P_{ReePe} = 100\% \end{aligned}$$

2η δοκιμή επαλήθευσης

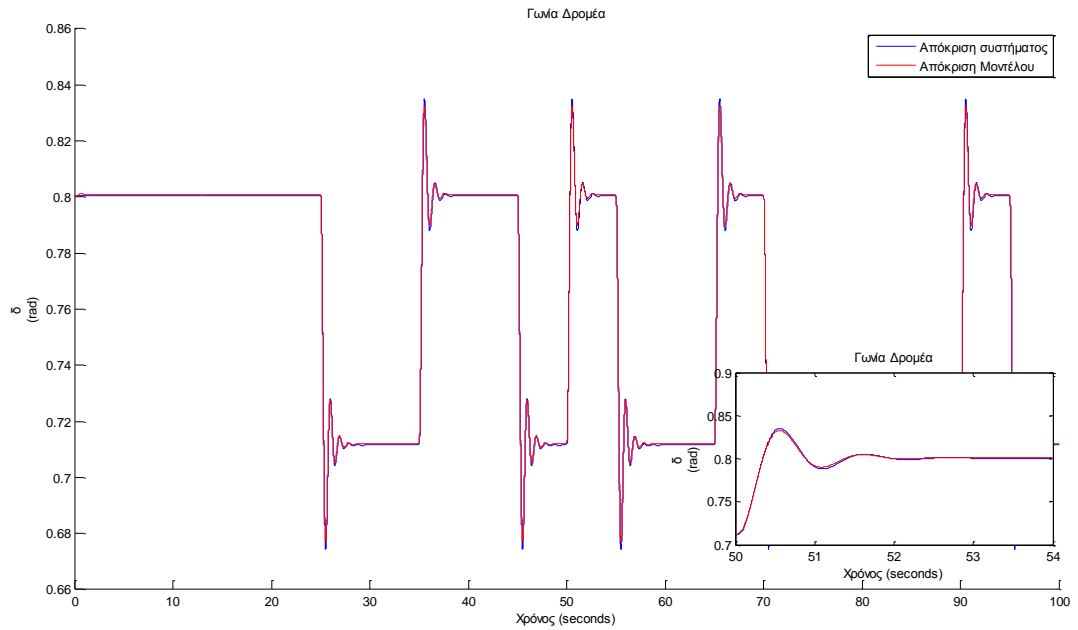


Εικόνα 37: Αποτελέσματα της αναγνώρισης (για την προσέγγιση του μέσου όρου), όταν εφαρμόζεται στην είσοδο μια βηματική συνάρτηση

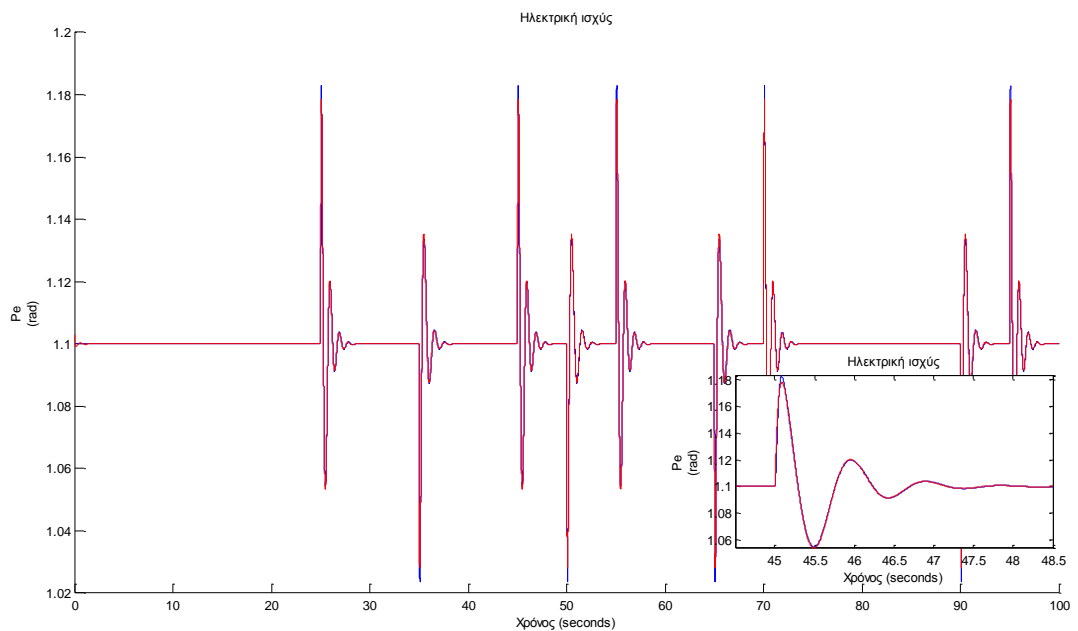
Τα μέτρα αξιολόγησης του μοντέλου παίρνουν τις τιμές:

$$\begin{aligned} fit_{\delta}(\%) &= 96.95 \\ fit_{P_e}(\%) &= 92.95 \\ FPE_{\delta} &= 2.2069 \cdot 10^{-7} \\ FPE_{P_e} &= 2.2898 \cdot 10^{-7} \\ P_{Ree\delta} &= 100\%, P_{ReeP_e} = 100\% \end{aligned}$$

3η δοκιμή επαλήθευσης



Εικόνα 38: Η πρώτη απόκριση (γωνία δ), όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα PRBS (για την προσέγγιση του μέσου όρου)



Εικόνα 39: Η δεύτερη απόκριση (P_e), όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα PRBS (για την προσέγγιση του μέσου όρου)

Τα μέτρα αξιολόγησης του μοντέλου παίρνουν τις τιμές:

$$\begin{aligned}
 fit_{\delta}(\%) &= 98.52 \\
 fit_{pe}(\%) &= 92.28 \\
 FPE_{\delta} &= 4.4706 \cdot 10^{-7} \\
 FPE_{pe} &= 6.8385 \cdot 10^{-7} \\
 P_{Ree\delta} &= 100\%, P_{Reepe} = 100\%
 \end{aligned}$$

4.6. Εφαρμογή της διαδικασίας για τον προσδιορισμό περισσότερων παραμέτρων

Στην ενότητα, αυτή εξετάζεται η ευρωστία του αλγόριθμου TRRN όσον αφορά τον προσδιορισμό ενός μεγαλύτερου διανύσματος παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας ως αποκρίσεις της γεννήτριας τα δεδομένα εξόδου του μη γραμμικού μοντέλου πέμπτης τάξης και χρησιμοποιώντας το ίδιας τάξης μοντέλο με άγνωστες παραμέτρους, επαναλαμβάνεται η διαδικασία της αναγνώρισης με τη μέθοδο PEM και ένα τυχαίο αρχικό διάνυσμα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 14: Εκτίμηση περισσότερων παραμέτρων, με δεδομένα από το μη γραμμικό μοντέλο 5ης τάξης

Parameters	Range	Simulation Parameters	Initial Parameters	Identified Parameters	Relative Errors (%)
$J(pu)$	[0.0095-0.03]	0.0252	0.01	0.0252	0
$D(pu)$	[0.001-0.1]	0.050	0.01	0.0500	0
$x_d(pu)$	[1.5-3.0]	2.072	1.7	2.0720	0
$x'_d(pu)$	[0.1-0.6]	0.568	0.35	0.5682	0.04
$x''_d(pu)$	[0.1-0.3]	0.12	0.22	0.1199	0.04
$x_q(pu)$	[1.0-3.0]	1.559	1.7	1.5590	0
$x''_q(pu)$	[0.1-1.0]	0.12	0.5	0.1836	52.96
$T'_{do}(s)$	[0.008-0.3]	0.1310	0.03	0.1309	0.04
$T''_{do}(s)$	[0.01-0.3]	0.0681	0.015	0.0682	0.09
$T''_{qo}(s)$	[0.01-0.3]	0.01	0.15	0.0105	4.54
$fit_{\delta}(\%)$				99.99	
$fit_{pe}(\%)$				99.99	
$LossFunction$				$2.3812 \cdot 10^{-29}$	
FPE				$2.3817 \cdot 10^{-29}$	
$P_{Ree\delta}$				100%	
P_{Reepe}				100%	

Παρατηρούμε ότι οι περισσότερες παράμετροι υπολογίζονται με μεγάλη ακρίβεια. Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς χρησιμοποιείται το ίδιο μοντέλο για την προσομοίωση των αποκρίσεων και για τη μοντελοποίηση του συστήματος. Εξαιρέση αποτελεί η υπομεταβατική αντίδραση στον άξονα q και η αντίστοιχη χρονική σταθερά.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα, όταν οι αποκρίσεις της γεννήτριας είναι θορυβώδεις, με προσθήκη λευκού γκαουσιανού θορύβου ($SNR = 70$).

Πίνακας 15: Εκτίμηση περισσότερων παραμέτρων, με δεδομένα από το μη γραμμικό μοντέλο 5ης τάξης με προσθήκη θορύβου

Parameters	Range	Simulation Parameters	Initial Parameters	Identified Parameters	Relative Errors (%)
$J(pu)$	[0.0095-0.03]	0.0252	0.01	0.0255	0.99
$D(pu)$	[0.001-0.1]	0.050	0.01	0.0523	4.59
$x_d(pu)$	[1.5-3.0]	2.072	1.7	2.0849	0.62
$x'_d(pu)$	[0.1-0.6]	0.568	0.35	0.4197	26.10
$x''_d(pu)$	[0.1-0.3]	0.12	0.22	0.1621	35.08
$x_q(pu)$	[1.0-3.0]	1.559	1.7	1.5434	1
$x''_q(pu)$	[0.1-1.0]	0.12	0.5	1.0000	733
$T'_{do}(s)$	[0.008-0.3]	0.1310	0.03	0.1453	10.94
$T''_{do}(s)$	[0.01-0.3]	0.0681	0.015	0.0520	23.71
$T''_{qo}(s)$	[0.01-0.3]	0.01	0.15	0.0271	171.30

Όπως φαίνεται, η επίδραση του θορύβου είναι καθοριστική στον υπολογισμό των παραμέτρων, καθώς τα σχετικά σφάλματα στον υπολογισμό των μεταβατικών και υπομεταβατικών παραμέτρων είναι πολύ μεγάλα. Όπως αναμένεται, όσο αυξάνεται ο αριθμός των προς υπολογισμό παραμέτρων, η παρουσία θορύβου δημιουργεί περισσότερες δυσκολίες στον υπολογισμό. Η υπομεταβατική αντίδραση στον άξονα q και η υπομεταβατική χρονική σταθερά στον ίδιο άξονα παραμένουν οι παράμετροι με τα μεγαλύτερα σφάλματα.

4.7. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων της διαδικασίας

Διαπιστώνονται τα εξής κρίσιμα σημεία της παραπάνω διερεύνησης:

- Η επιλογή του αρχικού διανύσματος παραμέτρων είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολλές δοκιμές, για αυτό η διαδικασία που προτείνεται μέχρι τώρα στην παρούσα εργασία θα εξυπηρετούσε για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της γεννήτριας, όταν υπάρχει από πριν κάποια σχετική γνώση για τις τιμές των παραμέτρων αυτών.
- Λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των τυλιγμάτων απόσβεσης στις αποκρίσεις της γεννήτριας και χρησιμοποιώντας για τον προσδιορισμό των παραμέτρων ένα απλούστερο μοντέλο που δεν τις λαμβάνει υπόψη, είναι λογικό η εκτίμηση των μεταβατικών παραμέτρων να μην είναι ακριβής. Ωστόσο, η διαδικασία κρίνεται επιτυχημένη καθώς το μοντέλο μπορεί να προβλέψει σε μεγάλο βαθμό τις αποκρίσεις της γεννήτριας σε μεταβατικά φαινόμενα.

Έτσι, η προηγηθείσα ανάλυση δείχνει πώς μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιητική πρόβλεψη των αποκρίσεων της γεννήτριας από ένα μοντέλο, που έχει προσδιοριστεί με τη βοήθεια μιας μεθόδου τοπικής βελτιστοποίησης, η οποία συγκλίνει σε ένα "καλό" τοπικό ελάχιστο από ένα κατάλληλα επιλεγμένο αρχικό διάνυσμα παραμέτρων. Στο επόμενο κεφάλαιο, επιχειρείται η εφαρμογή μιας μεθόδου ολικής βελτιστοποίησης, με σκοπό των ακριβέστερο προσδιορισμό των παραμέτρων και την αποφυγή της χρονοβόρας διερεύνησης για την επιλογή του κατάλληλου αρχικού διανύσματος παραμέτρων.

Πριν από αυτό, αξίζει να αναφερθεί πως η διερεύνηση αυτή μπορεί να αποφευχθεί με την εφαρμογή της μεθόδου για πολλά διαφορετικά σημεία. Για το σκοπό αυτό, δοκιμάστηκε η μέθοδος βελτιστοποίησης πολλαπλής εκκίνησης (Multistart), η οποία υπάρχει υλοποιημένη στο Global Optimization Toolbox της Matlab. Ουσιαστικά με τη μέθοδο αυτή, ένας αλγόριθμος τοπικής βελτιστοποίησης εφαρμόζεται σε μια σειρά από τυχαία αρχικά διανύσματα παραμέτρων και συγκλίνει κάθε φορά σε κάποιο τοπικό ελάχιστο. Καθολικό ελάχιστο θεωρείται το ελάχιστο με την μικρότερη τιμή της συνάρτησης απωλειών.

Η μέθοδος αυτή είχε ως αποτέλεσμα την εύρεση τοπικών ελαχίστων που αντιστοιχούν σε ποσοστά ταύτισης των αποκρίσεων των αντίστοιχων μοντέλων και συστήματος μικρότερα από αυτά που προέκυψαν με τη χρήση του αλγορίθμου TRRN, καθώς χρησιμοποιήθηκαν αλγόριθμοι διαφορετικοί από τον TRRN, που δεν απαιτούν τη μαθηματική διατύπωση της κλίσης της συνάρτησης απωλειών, που είναι δύσκολη για τη συγκεκριμένη συνάρτηση. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή είναι πολύ χρονοβόρα.

5. Εφαρμογή της Προσομοιωμένης Ανόπτησης στην αναγνώριση της γεννήτριας diesel

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το μεγαλύτερο μειονέκτημα της αναγνώρισης της γεννήτριας diesel που βασίζεται σε μεθόδους τοπικής βελτιστοποίησης είναι η εύρεση του κατάλληλου αρχικού διανύσματος παραμέτρων από το οποίο θα εκκινήσει η μέθοδος, ώστε να συγκλίνει σε ένα "καλό" τοπικό ελάχιστο. Η μέθοδος που προτείνεται στο κεφάλαιο αυτό στόχο έχει την αναίρεση του μειονεκτήματος αυτού.

5.1. Αλγόριθμος Προσομοιωμένης Ανόπτησης

Ο χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος Ανόπτησης μπορεί να βρεθεί στην αναφορά [19]. Περιλαμβάνει δύο στοιχεία που εξαρτώνται από τον αριθμό της επανάληψης όσο η θερμοκρασία μειώνεται. Το πρώτο είναι το μέγεθος του βήματος Δx από τη μία προτεινόμενη λύση στην επόμενη. Αυτό δημιουργείται παράγοντας ένα τυχαίο διάνυσμα y που έχει ομοιόμορφη κατανομή $U[-1,+1]$ και έχει το ίδιο μέγεθος με το διάνυσμα παραμέτρων x και πολλαπλασιάζοντας τον όρο $\mu^{-1}(y)$ με το διάνυσμα $(u-l)$ που προκύπτει ως η διαφορά ανάμεσα στο άνω όριο u και στο κάτω όριο l του διανύσματος παραμέτρων x . Ο κανόνας μ^{-1}

$$g_{\mu}^{-1}(y) = \frac{(1+\mu)^{|y|}-1}{\mu} \text{sign}(y) \quad \text{για } |y| \leq 1$$

χρησιμοποιεί μια παράμετρο μ που αυξάνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mu = 10^{100(k/k_{max})^q} \quad \text{όπου } q > 0: \text{ ο συντελεστής απόσβεσης}$$

όσο αυξάνεται και ο αριθμός των επαναλήψεων k , φτάνοντας την τιμή $\mu = 10^{100}$ στην τελευταία επανάληψη $k = k_{max}$. Αξίζει να αναφερθεί ότι:

- ο συντελεστής απόσβεσης παίρνει μικρές/μεγάλες τιμές για αργή/γρήγορη απόσβεση
- η τιμή της συνάρτησης του κανόνα μ^{-1} μειώνεται για $|y| \leq 1$ όσο το μ αυξάνεται

Το δεύτερο στοιχείο του αλγορίθμου που εξαρτάται από τον αριθμό της επανάληψης είναι η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί ένα βήμα Δx το οποίο θα έχει ως αποτέλεσμα η αλλαγή της τιμής της συνάρτησης απωλειών να είναι θετική ($\Delta f > 0$). Αυτή η πιθανότητα δίνεται από τη σχέση:

$$p(\text{αποδοχής του βήματος } \Delta x) = \exp\left(-\left(\frac{k}{k_{max}}\right)^q \frac{\Delta f}{|f(x)|\varepsilon_f}\right) \quad \text{όπου } \Delta f > 0$$

και παραμένει μεγάλη (e^{-1}) για $|\Delta f/f(x)| = \varepsilon_f$ στην τελευταία επανάληψη $k = k_{max}$.

Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί ένα βήμα διαφυγής από το τοπικό ελάχιστο και να βρεθεί το ολικό ελάχιστο με το ρίσκο της αύξησης της τιμής της συνάρτησης απωλειών κατά την ποσότητα $\Delta f = |f(x)|_{\varepsilon_f}$ είναι ακόμα υψηλή [19].

Πριν από τον καθορισμό της συνάρτησης πιθανότητας και της συνάρτησης που παράγει τις νέες προς αποδοχή ή προς απόρριψη λύσεις, επιβάλλεται να καθοριστεί η συνάρτηση απωλειών, της οποίας το ολικό ελάχιστο ψάχνει η μέθοδος της προσομοιωμένης ανόπτωσης. Ως συνάρτηση επιλέγεται η ίδια με αυτήν που χρησιμοποιείται στη μέθοδο PEM και δίνεται από τη σχέση:

$$LossFunction = \det\left(\frac{1}{N}E^T E\right)$$

όπου E είναι ο πίνακας των σφαλμάτων πρόβλεψης στις διακριτές χρονικές στιγμές που γίνεται η δειγματοληψία και N ο αριθμός των δειγμάτων. Ουσιαστικά, λόγω του ότι το μοντέλο που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της σύγχρονης γεννήτριας δεν περιλαμβάνει ρητή μοντελοποίηση θορύβου, το σφάλμα πρόβλεψης ταυτίζεται με το σφάλμα προσομοίωσης του μοντέλου. Για κάθε διάνυσμα λύσης που γεννάται από τη συνάρτηση, αρχικοποιούνται οι καταστάσεις του μη γραμμικού μοντέλου χώρου κατάστασης, προσομοιώνονται οι αποκρίσεις του στο σήμα διαταραχής που εφαρμόστηκε και στο "πραγματικό" σύστημα και υπολογίζεται το αντίστοιχο σφάλμα και ακολούθως η τιμή της συνάρτησης απωλειών.

Ανάλογα με τη διαφορά των τιμών της συνάρτησης αυτής μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων καθώς και με τη θερμοκρασία, με τον τρόπο που έχει ήδη περιγραφεί, εξελίσσεται η διαδικασία, η οποία τερματίζεται όταν η θερμοκρασία γίνει μηδενική και όταν ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού. Το κριτήριο τερματισμού που χρησιμοποιείται είναι εμπειρικό και προέκυψε από την παρατήρηση των τιμών της συνάρτησης απωλειών για τις οποίες η μέθοδος PEM έδινε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Τελευταίο στοιχείο που πρέπει να καθοριστεί στον παραπάνω αλγόριθμο είναι η αρχική τιμή της θερμοκρασίας. Για το σκοπό αυτό απαιτείται διερεύνηση, καθώς η αρχική θερμοκρασία αποτελεί τον συμβιβασμό μεταξύ οικουμενικότητας και τοπικότητας της λύσης. Αν επιλεγεί πολύ υψηλή, η σύγκλιση είναι πολύ αργή, ενώ αν επιλεγεί πολύ χαμηλή, ο αλγόριθμος περιορίζεται από νωρίς στη γειτονιά γύρω από το αρχικό σημείο. Ανάλογα με την ακρίβεια που επιδιώκεται, επιλέγεται αντίστοιχα και η αρχική θερμοκρασία στις εκτελέσεις.

5.2. Αποτελέσματα Προσομοιωμένης Ανόπτωσης

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται ως αποκρίσεις της γεννήτριας είναι τα ίδια που χρησιμοποιήθηκαν και στην αναγνώριση της γεννήτριας με μεθόδους τοπικής βελτιστοποίησης.

Στον επόμενο πίνακα, παρατίθενται τα αποτελέσματα από δέκα εκτελέσεις του αλγορίθμου της Προσομοιωμένης Ανόπτησης με αρχικό διάνυσμα παραμέτρων το διάνυσμα:

$$x_0 = [0.0249, 0.0021, 0.1335, 2.5420, 2.8753, 0.0218]$$

Επιλέγεται το διάνυσμα αυτό καθώς, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η εφαρμοζόμενη μέθοδος τοπικής βελτιστοποίησης δεν μπορούσε να εκκινήσει από αυτό. Οι αποκρίσεις της γεννήτριας προέρχονται από το μη γραμμικό μοντέλο τρίτης τάξης.

Λόγω του ότι η Προσομοιωμένη Ανόπτηση είναι μια στοχαστική μέθοδος βελτιστοποίησης, είναι απαραίτητο ο αλγόριθμος να εκτελεστεί αρκετές φορές. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε αρχική θερμοκρασία 24 και σε λίγες επαναλήψεις ανά θερμοκρασία, ώστε η εκτέλεση να είναι σύντομη χρονικά.

Πίνακας 16: Αποτελέσματα της Προσομοιωμένης Ανόπτησης για δεδομένα από το μη γραμμικό μοντέλο 3ης τάξης

Parameters	Simulation Parameters	Identified Parameters									
		Simulated Annealing									
$J(pu)$	0.0252	0.0270	0.0272	0.0262	0.0191	0.0300	0.0273	0.0272	0.0267	0.0300	0.0300
$D(pu)$	0.050	0.0695	0.0336	0.0444	0.1000	0.0842	0.0530	0.0541	0.0480	0.0294	0.0577
$x'_d(pu)$	0.568	0.4671	0.3711	0.4844	0.4480	0.6000	0.5713	0.4600	0.4737	0.3090	0.3519
$x_d(pu)$	2.072	1.7923	2.0842	2.0303	1.5998	2.0513	2.0445	1.7896	2.0057	1.8491	1.6236
$x_q(pu)$	1.559	2.0974	1.5439	1.6138	3	1.5864	1.5946	2.1076	1.6495	1.9467	2.8626
$T'_{do}(s)$	0.1310	0.1832	0.2038	0.1612	0.2208	0.0201	0.1278	0.1659	0.1560	0.2440	0.1910
$fit_\delta(\%)$		92.32	98.06	99.13	84.63	96.15	98.11	93.83	98.56	95.75	90.88
$fit_{pe}(\%)$		83.33	90.74	95.58	54.95	63.29	90.85	83.47	96.82	79.27	74.49

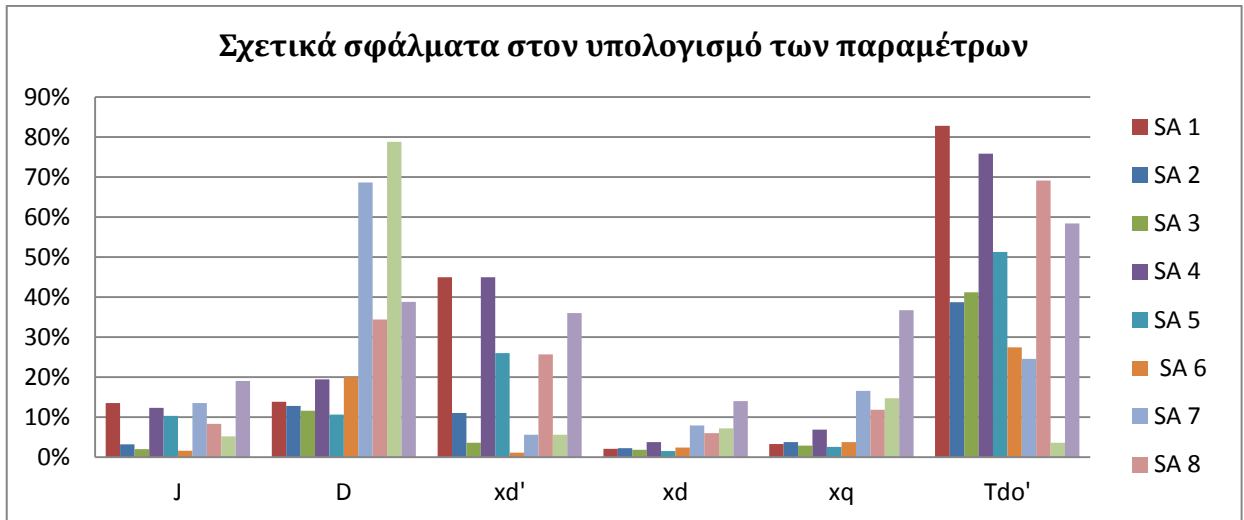
Διαπιστώνεται ότι επιτυγχάνεται ακριβής προσδιορισμός των παραμέτρων σε κάποιες εκτελέσεις, όμως λόγω της τυχαιότητας της μεθόδου τα αποτελέσματα μπορεί να είναι αρκετά διαφορετικά από εκτέλεση σε εκτέλεση. Ωστόσο, με πολλές εκτελέσεις αποκτάται μια ικανοποιητική εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων, χωρίς να απαιτείται καμιά προηγούμενη γνώση για αυτές.

Στον ακόλουθο πίνακα, παρατίθενται τα αποτελέσματα της Προσομοιωμένης Ανόπτησης στο πιο ρεαλιστικό πρόβλημα, όπου οι αποκρίσεις της γεννήτριας αποτελούν τα δεδομένα εξόδου του μη γραμμικού μοντέλου 5ης τάξης.

Πίνακας 17: Αποτελέσματα της Προσομοιωμένης Ανόπτησης, για δεδομένα από το μη γραμμικό μοντέλο 5ης τάξης

Parameters	Simulation Parameters	Identified Parameters									
		Simulated Annealing									
$J(pu)$	0.0252	0.0286	0.0260	0.0247	0.0283	0.0278	0.0256	0.0286	0.0273	0.0239	0.0300
$D(pu)$	0.050	0.0431	0.0564	0.0558	0.0597	0.0553	0.0600	0.0843	0.0672	0.0894	0.0694
$x'_d(pu)$	0.568	0.3129	0.5053	0.5475	0.3126	0.4202	0.5617	0.6000	0.4224	0.6000	0.3635
$x_d(pu)$	2.072	2.1152	2.1190	2.1105	1.9942	2.0410	2.1225	1.9077	1.9476	1.9225	1.7819
$x_q(pu)$	1.559	1.5080	1.5008	1.5136	1.6660	1.5992	1.5000	1.8176	1.7438	1.7883	2.1307
$T'_{do}(s)$	0.1310	0.2394	0.1817	0.1850	0.2303	0.1982	0.1669	0.0988	0.2215	0.1357	0.2075
LossFunction		1.214· 10 ⁻¹²	1.506· 10 ⁻¹²	5.892· 10 ⁻¹³	4.991· 10 ⁻¹²	1.224· 10 ⁻¹³	2.665· 10 ⁻¹³	1.568· 10 ⁻¹¹	1.360· 10 ⁻¹¹	2.7409· 10 ⁻¹¹	4.613· 10 ⁻¹¹
$fit_{\delta}(\%)$		98.52	97.87	98.65	97.13	99.31	99.04	96.67	95.95	94.74	94.12
$fit_{p_e}(\%)$		88.38	90.23	90.31	88.72	89.01	88.58	73.20	87.67	78.07	80.67

Η εικόνα των σχετικών σφαλμάτων στις διαφορετικές εκτελέσεις καταδεικνύει την τυχαιότητα που εμπεριέχει η μέθοδος.



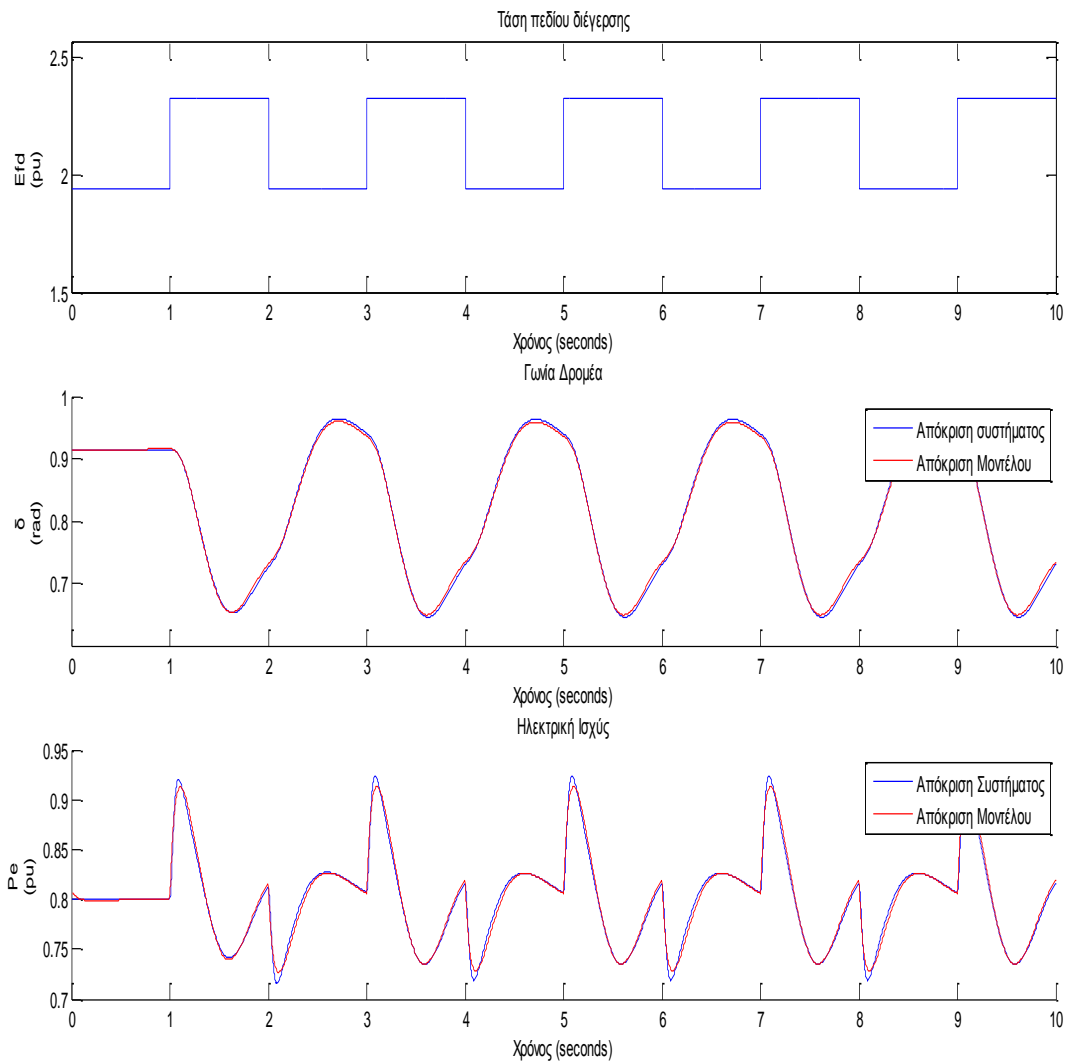
Εικόνα 40: Σχετικά σφάλματα στον υπολογισμό των παραμέτρων με τη μέθοδο SA

Από τον παραπάνω πίνακα, επιλέγεται ένα από τα διανύσματα παραμέτρων που αντιστοιχούν σε υψηλά ποσοστά ταύτισης των αποκρίσεων του μοντέλου και του συστήματος και διεξάγονται οι δοκιμές επαλήθευσης. Στις ακόλουθες γραφικές, απεικονίζονται τα αποτελέσματα της επαλήθευσης του μοντέλου με παραμέτρους

$$J = 0.0247 pu, D = 0.0558 pu, x'_d = 0.5475 pu, x_d = 2.1105 pu, x_q = 1.5136 pu, T'_{do} = 0.1850 pu$$

Όπως διαπιστώνεται, το μοντέλο που προσδιορίστηκε με τη μέθοδο της Προσομοιωμένης Ανόπτησης δεν μπορεί να προβλέψει τις αποκρίσεις του πραγματικού συστήματος με την ίδια ακρίβεια με τον αλγόριθμο τοπικής βελτιστοποίησης, αλλά η πρόβλεψη είναι ικανοποιητική καθώς το μοντέλο μπορεί να ακολουθήσει τη μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος. Τα σφάλματα στον υπολογισμό των παραμέτρων J και D οδηγούν στη μικρή χρονική διαφορά μεταξύ των αποκρίσεων μοντέλου και συστήματος [12].

1η δοκιμή επαλήθευσης



Εικόνα 41: Αποτελέσματα της αναγνώρισης με SA στο σημείο λειτουργίας $P=0.8$ pu, $Q=0$ pu, $V=0.98$ pu, όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα παλμών

Τα μέτρα αξιολόγησης του μοντέλου παίρνουν τις τιμές:

$$fit_{\delta}(\%) = 96.52$$

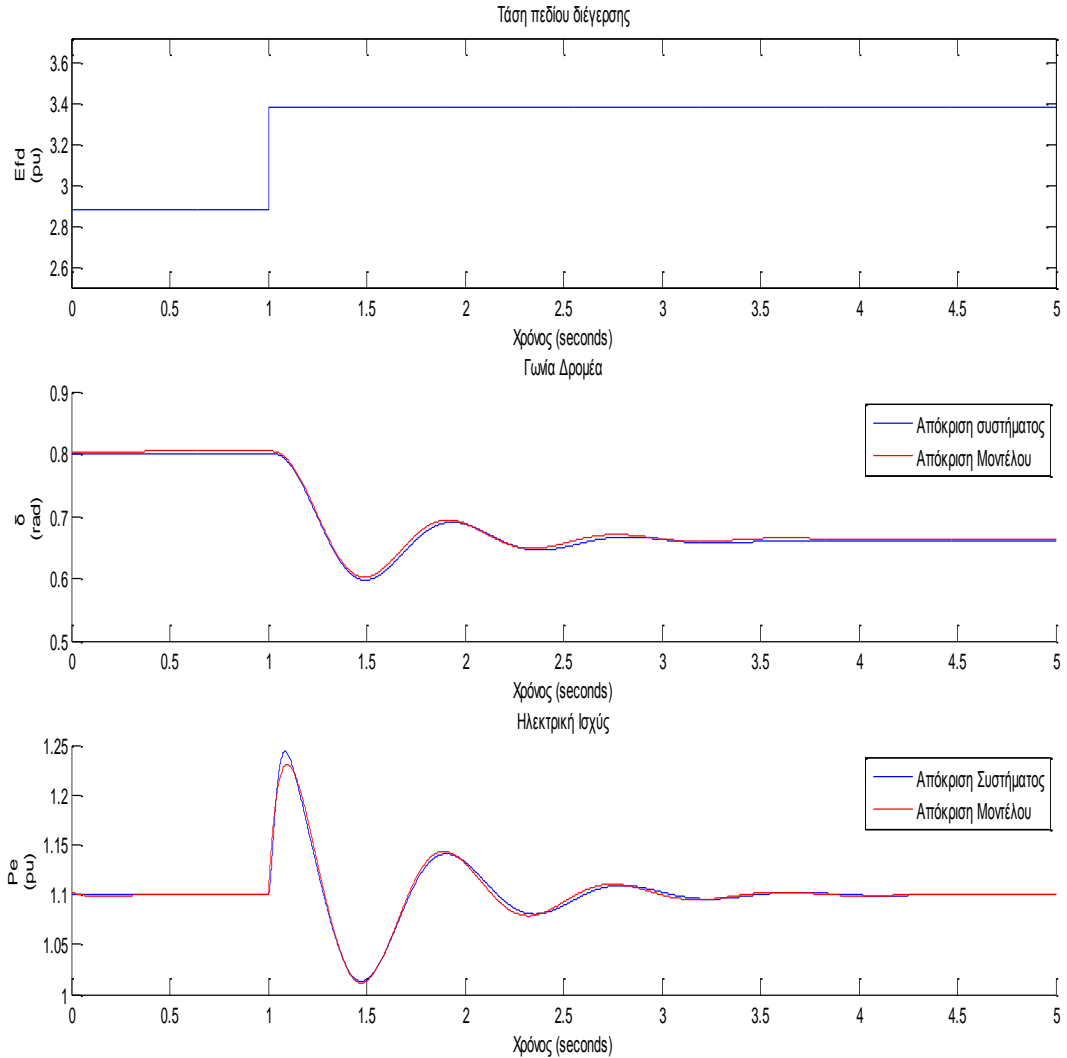
$$fit_{P_e}(\%) = 89.90$$

$$FPE_{\delta} = 1.5824 \cdot 10^{-5}$$

$$FPE_{P_e} = 2.2612 \cdot 10^{-5}$$

$$P_{Ree\delta} = 100\%, P_{ReeP_e} = 100\%$$

2η δοκιμή επαλήθευσης



Εικόνα 42: Αποτελέσματα της αναγνώρισης με SA στο σημείο λειτουργίας $P=1.1$ pu, $Q=0.4$ pu, $V=1.02$ pu, όταν στην είσοδο εφαρμόζεται μια βηματική συνάρτηση

Τα μέτρα αξιολόγησης του μοντέλου παίρνουν τις τιμές:

$$fit_{\delta}(\%) = 78.04$$

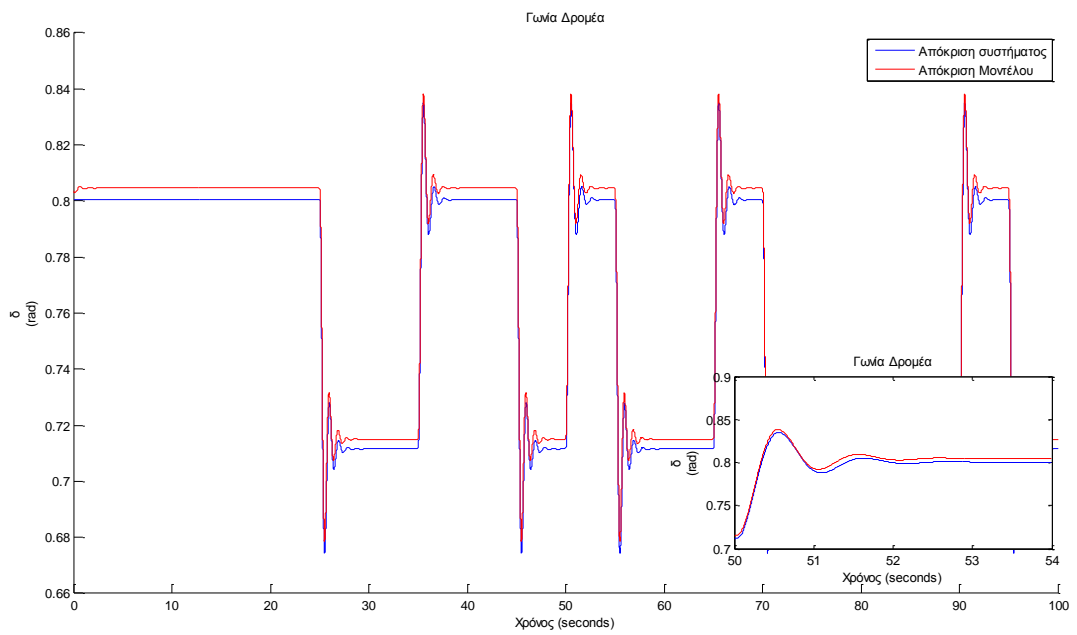
$$fit_{P_e}(\%) = 90.41$$

$$FPE_{\delta} = 1.1464 \cdot 10^{-5}$$

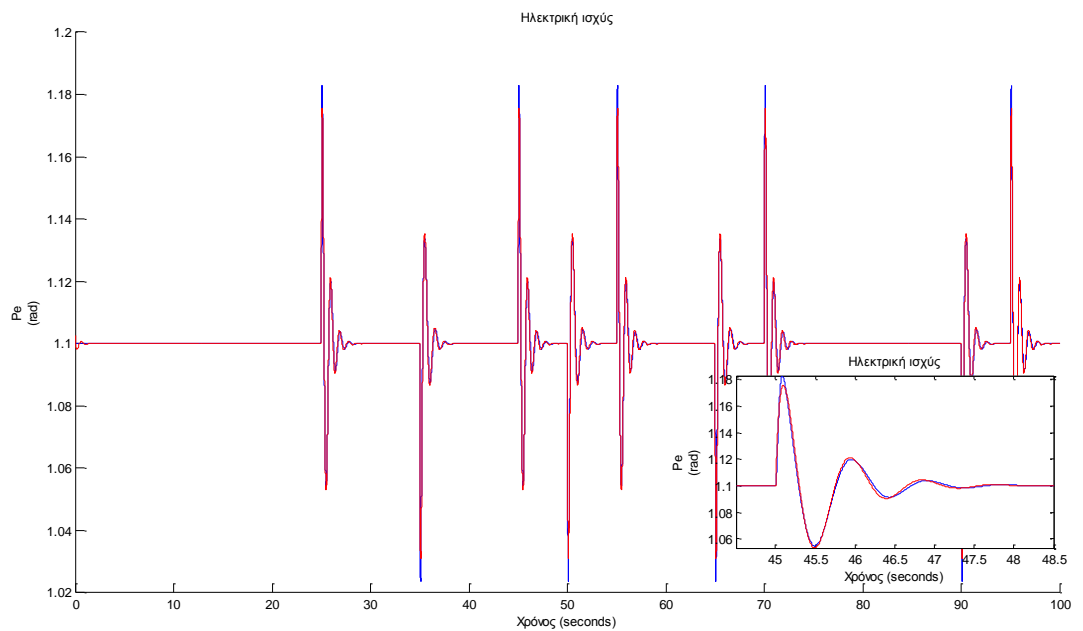
$$FPE_{P_e} = 4.2026 \cdot 10^{-7}$$

$$P_{Ree\delta} = 100\%, P_{ReeP_e} = 100\%$$

3η δοκιμή επαλήθευσης



Εικόνα 43: Η πρώτη απόκριση (γωνία δ) στο σημείο λειτουργίας $P=1.1$ pu, $Q=0.4$ pu, $V=1.02$ pu, όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα PRBS (SA)



Εικόνα 44: Η δεύτερη απόκριση (P_e) στο σημείο λειτουργίας $P=1.1$ pu, $Q=0.4$ pu, $V=1.02$ pu, όταν εφαρμόζεται στην είσοδο ένα σήμα PRBS (SA)

Τα μέτρα αξιολόγησης του μοντέλου παίρνουν τις τιμές:

$$\begin{aligned}fit_{\delta}(\%) &= 91.40 \\fit_{Pe}(\%) &= 89.85 \\FPE_{\delta} &= 1.5123 \cdot 10^{-5} \\FPE_{Pe} &= 1.1833 \cdot 10^{-6} \\P_{Ree\delta} &= 100\%, P_{ReePe} = 100\%\end{aligned}$$

5.3. Συνδυασμός της μεθόδου Προσομοιωμένης Ανόπτωσης με μια μέθοδο τοπικής βελτιστοποίησης

Όπως παρατηρήθηκε, η μέθοδος Προσομοιωμένης Ανόπτωσης, με τις ρυθμίσεις που έγιναν για την αρχική θερμοκρασία και τον αριθμό των επαναλήψεων που αντιστοιχεί σε κάθε θερμοκρασία, επιτυγχάνει γρήγορη σύγκλιση σε μια ικανοποιητική λύση, που όμως υστερεί σε ακρίβεια από τη λύση που δίνει ο αλγόριθμος τοπικής βελτιστοποίησης. Για τον συγκερασμό των πλεονεκτημάτων των δύο μεθόδων, επιχειρείται ο συνδυασμός τους. Πιο συγκεκριμένα, η Προσομοιωμένη Ανόπτωση βρίσκει με ταχύτητα μια προσεγγιστική λύση από την οποία εκκινεί ο αλγόριθμος τοπικής βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα είναι αυτά στα οποία οδηγεί ο αλγόριθμος τοπικής βελτιστοποίησης, αποφεύγοντας τη διερεύνηση για την επιλογή κατάλληλου αρχικού διανύσματος. Η μέθοδος PEM χρειάζεται πολύ λιγότερο χρόνο και λιγότερες επαναλήψεις για να συγκλίνει στην τελική λύση. Υπάρχει περίπτωση η μέθοδος PEM να μη δώσει καλύτερα αποτελέσματα, όταν η μέθοδος Προσομοιωμένης Ανόπτωσης έχει επιτύχει τη σύγκλιση σε κάποιο τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης απωλειών.

6. Συμπεράσματα και Δυνατότητες Επέκτασης

Η αναγνώριση της σύγχρονης γεννήτριας είναι ένα ζήτημα που έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα τον τελευταίο αιώνα. Παρότι η σύγχρονη γεννήτρια αποτελεί μια παλιά τεχνολογία, αποτελεί ακόμα και σήμερα αναπόσπαστο τμήμα των σύγχρονων ηλεκτρικών δικτύων και η γνώση των παραμέτρων της και η πρόβλεψη της δυναμικής της συμπεριφοράς είναι αναγκαία για τον αποτελεσματικό έλεγχο και συντονισμό της λειτουργίας τους.

Με τα χρόνια έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για την αναγνώριση της γεννήτριας, που χρησιμοποιούν κάποια από τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης που αναφέρθηκαν στην θεωρία. Η μέθοδος που προτάθηκε στην εργασία αυτή ακολουθεί την τεχνική του γκρίζου κουτιού, καθώς στην διαδικασία που ακολουθείται το μόνο που θεωρείται γνωστό για το πραγματικό σύστημα είναι οι αποκρίσεις του, δηλαδή τα αποτελέσματα μέτρησης της γωνίας δ και της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος P_e σε διάστημα 100 δευτερολέπτων.

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από τρία βασικά σημεία:

- Τον χρόνο δειγματοληψίας των αποκρίσεων: Αν αυτός δεν είναι αρκετά μικρός, η διαδικασία μπορεί να αποτύχει καθώς τα δείγματα δε δίνουν μια κατατοπιστική εικόνα της δυναμικής συμπεριφοράς της γεννήτριας.
- Τον χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο βελτιστοποίησης: Γενικά, για κάθε διαφορετικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, μπορεί να θεωρηθεί πιο αποτελεσματικός ένας διαφορετικός αλγόριθμος. Με δοκιμές διαπιστώθηκε ότι ο αλγόριθμος Trust-Region Reflective Newton είναι πιο αποτελεσματικός
- Το αρχικό σημείο εκκίνησης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης: Αυτός είναι και ο πιο καθοριστικός παράγοντας για την έκβαση της μεθόδου. Η μέθοδος πολλαπλών δοκιμών είναι η προσέγγιση που εφαρμόστηκε αρχικά ως απλούστερη, με βασικό μειονέκτημα τις μεγάλες απαιτήσεις της σε χρόνο.

Αν οι παραπάνω παράγοντες ρυθμιστούν σωστά, η εφαρμοζόμενη μέθοδος μπορεί να οδηγήσει σε ακριβή αποτελέσματα. Ακόμα και για θορυβώδεις αποκρίσεις, μια σωστή προσέγγιση των τιμών των παραμέτρων είναι δυνατή. Χρησιμοποιώντας το ανώτερης τάξης μοντέλο για την παραγωγή των αποκρίσεων, ο προσδιορισμός των παραμέτρων είναι λιγότερο ακριβής, αλλά και πάλι το μοντέλο μπορεί να ακολουθήσει τη δυναμική συμπεριφορά του πραγματικού συστήματος. Από την εφαρμογή της μεθόδου σε πολλά σημεία λειτουργίας, διαπιστώνεται η ευαισθησία του υπολογισμού των μεταβατικών παραμέτρων σε διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες. Ακόμα και για μεγαλύτερο πλάτος διαταραχής, ο υπολογισμός των παραμέτρων παρουσιάζει διακυμάνσεις.

Τέλος, παρατηρείται πως και σε περιπτώσεις που τα σφάλματα στον υπολογισμό των μεταβατικών παραμέτρων είναι μεγάλα, η περιγραφή των μεταβατικών φαινομένων από το μοντέλο είναι ακριβής. Το μοντέλο που προκύπτει έχει την ικανότητα γενίκευσης, δηλαδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή των μεταβατικών φαινομένων σε διαφορετικά σημεία λειτουργίας. Δεν είναι γνωστό κατά πόσο αυτό είναι δυνατόν για πραγματικές αποκρίσεις της γεννήτριας, στις οποίες υπεισέρχεται το φαινόμενο του μαγνητικού κορεσμού.

Από την εφαρμογή της μεθόδου, κάνοντας χρήση του μοντέλου 5ης τάξης για τη μοντελοποίηση της γεννήτριας, συμπεραίνεται ότι η μέθοδος μπορεί να είναι το ίδιο αποτελεσματική για τον προσδιορισμό μεγαλύτερου αριθμού παραμέτρων. Η επίδραση του θορύβου όμως στην περίπτωση αυτή είναι καταλυτική και δημιουργεί προβλήματα στον υπολογισμό των παραμέτρων.

Τέλος, όσον αφορά τη μέθοδο της Προσομοιωμένης Ανόπτησης, διαπιστώνεται ότι ανάλογα με τη ρύθμιση της αρχικής θερμοκρασίας και του αριθμού των επαναλήψεων σε κάθε θερμοκρασία, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ή μικρότερη ακρίβεια στον υπολογισμό των παραμέτρων και ο χρόνος για τον τερματισμό της διαδικασίας μπορεί να είναι διαφορετικά. Ωστόσο, η μέθοδος υστερεί σε ακρίβεια σε σχέση με τη μέθοδο PEM και για τη σωστή εκτίμηση των παραμέτρων, περισσότερες από μια εκτελέσεις είναι απαραίτητες.

Όταν η προηγηθείσα ανάλυση εφαρμοστεί με πραγματικές αποκρίσεις της γεννήτριας, τα αποτελέσματα σίγουρα θα είναι διαφορετικά, λόγω διαφόρων παραγόντων που έχουν αναφερθεί όπως ο μαγνητικός κορεσμός, ο θόρυβος στις μετρήσεις και τα μεταβατικά φαινόμενα του στάτη της μηχανής, που αγνοούνται πλήρως από τα μη γραμμικά μοντέλα 5ης και 3ης τάξης. Για την εφαρμογή της ανάλυσης θα πρέπει να προηγηθεί η επεξεργασία των αποκρίσεων της γεννήτριας. Αν για τη μοντελοποίηση της γεννήτριας χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο 5ης ή 3ης τάξης, από τις αποκρίσεις της γεννήτριας θα πρέπει να εξαλειφθεί η συνιστώσα που αναπαριστά τα μεταβατικά φαινόμενα του στάτη. Αλλιώς για τη μοντελοποίηση της γεννήτριας θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο 7ης τάξης που μπορεί να περιγράψει τα φαινόμενα αυτά. Επίσης, οι πραγματικές αποκρίσεις θα πρέπει να φιλτραριστούν για την αφαίρεση του θορύβου. Αυτά θα μπορούσαν να αποτελέσουν το αντικείμενο μιας μελλοντικής εργασίας. Επίσης, η ανάλυση θα μπορούσε να επεκταθεί θεωρώντας τη γεννήτρια ως μέρος ενός δικτύου με πολλές μηχανές.

7. Βιβλιογραφία

1. Νεοεμφανιζόμενα ηλεκτρικά συστήματα: Μικροδίκτυα. Άρθρο του Θεοφάνη Αραβανή
2. University of Cyprus, Department of Electrical and Computer Engineering. HMY 445/681 Εισαγωγή στη Διεσπαρμένη Παραγωγή
3. Prabha Kundur. Power System Stability and Control. 1st Edition
4. Krause P. Analysis of Electrical Machinery. J.Willey & Sons. 1995
5. Πάντος Σωτήρης. Μελέτη και υλοποίηση σε μC Μοντέλου Νευρωνικού δικτύου για τον έλεγχο ηλεκτρικών μηχανών
6. Lennart Ljung. Prediction Error Estimation Methods
7. Oliver Nelles. Nonlinear System Identification. From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models
8. Identification using Prediction Error Methods
9. Qianqian Fang. Distinctions Between Levenberg-Marquardt method and Tikhonov regularization
10. Μαριάννα Σ. Αποστολοπούλου. Μαθηματικές Μέθοδοι Βελτιστοποίησης Προβλημάτων Μεγάλης Κλίμακας
11. Ανδρέας Ευστρατιάδης. Χρήστος Μακρόπουλος. Τοπικές και ολικές τεχνικές βελτιστοποίησης. Σημειώσεις στα πλαίσια του μαθήματος: Βελτιστοποίηση συστημάτων υδατικών πόρων-Υδροπληροφορική
12. M. Dehghami. S.K.Y. Nikravesh. Nonlinear state space model identification of synchronous generators
13. Xiaofeng Wan. Electrical Power Systems and Computers. Selected Papers from the 2011 International Conference on Electric and Electronics (EEIC 2011) in Nanchang, China on June 2011
14. Frank Vanden Berghen. Levenberg-Marquardt algorithms vs Trust Region algorithms

15. Z.Gallehdari, M.Deighani and S. K. Y. Nikraves. Online State Space Model Parameter Estimation in Synchronous Machines
16. <http://www.mathworks.com/help/optim/ug/equation-solving-algorithms.html>
17. Zhijun Li and Lijuan Cui. The Building and Analyzing of the Fifth-Order Model of the Synchronous Generator in Stand-Alone Infinite System
18. Paul Annus, Raul Land, Mart Min and Jaan Qjarand. Simple Signals for System Identification
19. Won Y. Yang, Wenwu Cao, Tae-Sang Chung, and John Morris. Applied Numerical Methods Using Matlab
20. <http://www.mathworks.com/help/ident/ug/model-quality-metrics.html>
21. Ρέζου Ελένη. Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς μέσω συναρτήσεων συσχέτισης
22. <http://www.allaboutenergy.gr>
23. <http://www.econews.gr/2013/10/21/ape-dialeipousa-paragogi-106925/>
24. M.Karrari, IEEE and O.P. Malik, Life Fellow, IEEE. Identification of Physical Parameters of a Synchronous Generator From Online Measurements
25. Κατσαρός Γεώργιος. Μοντελοποίηση και δυναμική ανάλυση μικροδικτύου. Διπλωματική Εργασία.
26. Αναστασία Βελώνη, Τμήμα Η.Υ.Σ. Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, Ενότητα: Ψηφιακά Σ.Α.Ε: Περιγραφή στο Χώρο Κατάστασης