



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Πιθανοτική ροή φορτίου με περιορισμούς

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Α. Παπαθανασίου

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Πιθανοτική ροή φορτίου με περιορισμούς

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Α. Παπαθανασίου

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....

Ν. Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ..Π

.....

Σ. Παπαθανασίου

Αν. Καθηγητής Ε.Μ..Π.

.....

Π. Γεωργιλάκης

Επικ. Καθηγητής Ε.Μ..Π.

Ηλίας Α. Παπαθανασίου

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

Copyright © Ηλίας Παπαθανασίου, 2015

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια λόγω της ραγδαίας διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατέστη επιτακτική ανάγκη η πρόβλεψη της λειτουργίας του δικτύου καθώς και ο έλεγχός του με σκοπό την λειτουργία του μέσα στα επιθυμητά όρια.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι η υλοποίηση της πιθανοτικής ροής φορτίου και στη συνέχεια η υλοποίηση μιας σειράς αλγορίθμων ,όπως θα παρουσιαστούν αργότερα, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα παραβίασης των ορίων της τάσης των ζυγών. Το περιβάλλον στο οποίο θα γίνει η υλοποίηση αυτή είναι το προγραμματιστικό περιβάλλον της matlab ενώ έχει χρησιμοποιηθεί και το πακέτο matpower .

Συνοπτικά σ' αυτή την διπλωματική αναπτύσσεται η θεωρία της πιθανοτικής ροής φορτίου δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην επίλυση της με αναλυτικές μεθόδους όπως είναι αυτή της γραμμικοποίησης και συνέλιξης που θα χρησιμοποιηθεί σε μεγαλύτερο βαθμό. Στη συνέχεια (αφού βρεθούν οι αρχικές κατανομές τάσεων στους ζυγούς) θα χρησιμοποιηθούν τρεις τεχνικές ελέγχου ώστε να φέρουμε τους ζυγούς μέσα στα επιθυμητά όρια τους. Αυτές οι τεχνικές είναι οι εξής: Μεικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP), έλεγχος τάσης με ανάλυση ευαισθησίας και βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization).Ως έλεγχοι σε αυτές τις μεθόδους χρησιμοποιούνται οι τάσεις γεννητριών και τα βήματα των πυκνωτών. Οι τεχνικές αυτές θα εφαρμοστούν πάνω στα πρότυπα δίκτυα 9,30,57 και 118 ζυγών της IEEE. Στο τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την εφαρμογή των μεθόδων.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:

Πιθανοτική ροή φορτίου, μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός, βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων, ρύθμιση τάσης, ανάλυση ευαισθησίας

ABSTRACT

During the last years, due to the rapid penetration of renewable energy sources on the power grid, it has become imperative for the well-functioning of the power grid to provide adequate methods for forecasting the state of the grid and maintaining its function under the specified limits.

Aim of this thesis is the implementation of probabilistic load flow and then the implementation of a series of algorithms, as will be shown later, so that the voltage violation probability at the buses of the system would be minimized. For the programming of the aforementioned methods we use the environment of matlab and we also make use of the packet matpower.

Briefly in this thesis we develop the theory of probabilistic load flow giving emphasis to the solution with analytical methods such as linearization and convolution which we use to a greater extent. Then (after finding the initial voltage distributions at the buses) we will use three control techniques to bring the buses' voltage within the desired limits. These techniques are: Mixed Integer Linear Programming (MILP), voltage regulation with sensitivity analysis and particle swarm optimization (PSO). The control variables would be the generators' voltage and the capacitor units' steps. The techniques will be applied on the 9,30,57 and 118 standard cases of IEEE. Finally the presentation of the results will take place.

KEYWORDS:

Probabilistic Power Flow, Mixed Integer Linear Programming, Particle Swarm Optimization, Voltage Control, Sensitivity Analysis

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014-2015 στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η πιθανοτική προσομοίωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η εφαρμογή τεχνικών για τη διατήρηση της λειτουργίας του συστήματος μέσα στα προκαθορισμένα όρια.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Ν. Χατζηαργυρίου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον Δημήτρη Τράκα, για τη βοήθεια, την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας. Τέλος δεν θα ήθελα να ξεχάσω την οικογένεια μου για την βοήθεια τόσο υλική όσο και πνευματική που μου προσέφερε όχι μόνο κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου αλλά και κυρίως κατά τη διάρκεια ολόκληρης της φοίτησης μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

Ηλίας Α. Παπαθανασίου

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΕΝΑ Σ.Η.Ε.	1
1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ.....	2
1.1.1 Ιστορική Ανάπτυξη του Θέματος.....	4
1.2 ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	7
1.2.1 Μελέτες Ροών Φορτίου	7
1.2.2 Σκοπός της Πιθανοτικής Ροής Φορτίου	8
1.2.3 Πρακτικές Εφαρμογές της Μεθόδου.....	11
1.3 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	12
1.4 ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΥΝΕΛΙΞΗΣ.....	15
1.4.1 Αλγόριθμος συνέλιξης διακριτών κατανομών	17
1.4.2 Συνέλιξη κανονικών κατανομών.....	18
1.4.3 Εκτέλεση πιθανοτικής ροής φορτίου με κανονικές κατανομές.....	20
1.5 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	31
2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	32
2.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΜΕΙΚΤΟΥ ΑΚΕΡΑΙΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ	61
3.1 Περιγραφή της μεθόδου	62
3.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	92
4.1 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ PSO.....	93
4.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ PSO.....	97
4.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	124
5.1 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	125
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	128

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΕΝΑ Σ.Η.Ε.

1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ

Η πιθανοτική ροή φορτίου μπορεί να οριστεί ως μία μέθοδος επίλυσης προβλημάτων ροής φορτίου που λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα και τη στατιστική φύση των δεδομένων μεγεθών, δηλαδή των φορτίων και της παραγωγής, και υπολογίζει τα άγνωστα μεγέθη ως τυχαίες μεταβλητές με μία μέση τιμή, τυπική απόκλιση και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Είναι ένας τρόπος υπολογισμού όλων των πιθανών καταστάσεων του συστήματος, που αντιστοιχούν σε όλες τις δυνατές στατιστικές μεταβολές των φορτίων και της παραγωγής μέσω μίας μόνο ανάλυσης ροής φορτίου.

Η αβεβαιότητα των φορτίων οφείλεται κυρίως στην αβεβαιότητα των στατιστικών δεδομένων και στην αβεβαιότητα να προσαρμοστεί τελείως στα στατιστικά δεδομένα η αναλυτική συνάρτηση που χρησιμοποιείται κατά την πρόβλεψη. Η αβεβαιότητα της παραγωγής μπορεί να οφείλεται είτε σε προβλεπόμενους παράγοντες όπως λόγω χειρισμού ή συντήρησης είτε σε απρόβλεπτους παράγοντες όπως λόγω βλάβης. Σε περιπτώσεις ανανεώσιμων πηγών πρωτογενούς ενέργειας η αβεβαιότητα οφείλεται στη στοχαστική φύση των καιρικών συνθηκών, όπως για παράδειγμα η αβεβαιότητα της παραγωγής μιας ανεμογεννήτριας οφείλεται στην αβεβαιότητα της ταχύτητας του ανέμου. Ο βαθμός αβεβαιότητας αυξάνεται όσο απομακρύνεται η χρονική στιγμή της πρόβλεψης από τη χρονική στιγμή της μέτρησης. Κατά τη χρονική στιγμή της μέτρησης η αβεβαιότητα των φορτίων και της παραγωγής οφείλεται αποκλειστικά στο σφάλμα μέτρησης.

Σύμφωνα με την ντετερμινιστική μέθοδο, η επίλυση ροών φορτίου απαιτεί συγκεκριμένες τιμές δεδομένων και τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται (διάνυσμα κατάστασης) αντιστοιχούν αποκλειστικά στο συγκεκριμένο σύστημα δεδομένων (διάνυσμα εισόδου και διάνυσμα ελέγχου). Κάθε αλλαγή των δεδομένων απαιτεί καινούρια επίλυση για τον υπολογισμό της νέας κατάστασης. Για να ληφθούν υπόψη όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί μεταβολής των φορτίων και της παραγωγής απαιτείται η επίλυση υπερβολικά μεγάλου πλήθους ντετερμινιστικών ροών φορτίου.

Για συστήματα με N ζυγούς και k μόνο διαφορετικές τιμές φορτίων σε κάθε ζυγο απαιτείται η επίλυση k^N ροών φορτίου, π.χ. σε ένα σύστημα $N=100$ ζυγών και $k=4$ διαφορετικών τιμών φορτίου σε κάθε ζυγό απαιτούνται $4^{100} \approx 10^{60}$ ροές φορτίου. Η

εκτίμηση τόσο μεγάλου πλήθους αποτελεσμάτων ροής φορτίου για την εύρεση της μέσης τιμής, της τυπικής απόκλισης και τον σχεδιασμό της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των ζητούμενων μεγεθών είναι πρακτικά αδύνατη.

Στην πιθανοτική ανάλυση ροής φορτίου, ως δεδομένα θεωρούνται οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των φορτίων και της παραγωγής στο σύστημα και ζητείται ο υπολογισμός των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας του μέτρου και των γωνιών των τάσεων, των ενεργών και άεργων ροών ισχύος στις γραμμές του δικτύου, των απωλειών κ.λ.π. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος της πιθανοτικής ροής φορτίου μπορεί να είναι αναλυτικές, αριθμητικές ή συνδυασμός και των δύο. Οι αριθμητικοί μέθοδοι έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι απλές και εφαρμόζονται χωρίς καμία παραδοχή, ενώ οι αναλυτικές επειδή χρησιμοποιούν πιο σύνθετη μοντελοποίηση συνήθως απαιτούν να γίνουν σοβαρές παραδοχές και απλοποιήσεις που έχουν επίδραση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Στην διπλωματική αυτή εργασία θα χρησιμοποιηθεί μια αναλυτική μέθοδος για την επίλυση της πιθανοτικής ροής φορτίου. Η βασική παραδοχή που γίνεται σε αυτή την αναλυτική μέθοδο είναι η γραμμικότητα των εξισώσεων ροής φορτίου γύρω από κάποιο συγκεκριμένο λειτουργικό σημείο, συνήθως γύρω από την αναμενόμενη τιμή. Η παραδοχή αυτή οδηγεί σε αποτελέσματα ικανοποιητικής ακρίβειας μόνο για την περιοχή γύρω από το συγκεκριμένο λειτουργικό σημείο. Όσο αυξάνεται η αβεβαιότητα των δεδομένων, ή όσο εντονότερη είναι η μη γραμμικότητα των εξισώσεων τόσο η μοντελοποίηση της αναλυτικής μεθόδου γίνεται πολυπλοκότερη για να διατηρηθεί ικανοποιητική η ακρίβεια των αποτελεσμάτων ιδιαίτερα στα άκρα των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας. Η θεώρηση εξαρτημένων μεταβλητών, η γραμμικοποίηση σε διαφορετικά λειτουργικά σημεία, η μεταβλητή τοπολογία δικτύου και η οικονομική κατανομή των γεννητριών του συστήματος είναι προβλήματα που καθιστούν την μοντελοποίηση ακόμη πιο δυσχερή και πολύπλοκη. Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί να εφαρμοστεί ένας συνδυασμός αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων για να ενσωματώσει κατά το δυνατόν τα πλεονεκτήματα και των δύο μεθόδων και να δώσει αποτελέσματα με ικανοποιητική ακρίβεια και ταχύτητα ταυτόχρονα.

1.1.1 Ιστορική Ανάπτυξη του Θέματος

Η πιθανοτική ή στοχαστική θεώρηση μόνιμων και μεταβατικών καταστάσεων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας έχει εφαρμοστεί σχετικά πρόσφατα σε προβλήματα ροής φορτίου και βρίσκεται σε εξέλιξη στην αντιμετώπιση προβλημάτων εκτίμησης καταστάσεως, βραχυκυκλωμάτων, ιεράρχησης διαταραχών, υπολογισμού κόστους παραγωγής κλπ.

Η πρώτη επιτυχημένη προσπάθεια αντιμετώπισης του προβλήματος ροής φορτίου με πιθανοτικό τρόπο γίνεται το 1973 από τη Barbara Borkowska. Η μέθοδος βασίζεται στη D.C. ανάλυση ροής φορτίου και τα δεδομένα δίνονται με τη μορφή συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας για τα φορτία και την παραγωγή κάθε ζυγού. Οι συναρτήσεις αυτές είναι η κανονική, η διωνυμική και η διακριτή κατανομή. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε υπολογίζει τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της πραγματικής ροής οποιασδήποτε γραμμής, και του ισοζυγίου ισχύος στο ζυγό αναφοράς του συστήματος. Η βασική υπόθεση που διατυπώνεται για την εφαρμογή συνελκτικών τεχνικών είναι η ανεξαρτησία των τυχαίων μεταβλητών του προβλήματος.

Το 1974 διατυπώνεται από τους Allan, Borkowska και Grigg η ίδια διατύπωση της πιθανοτικής μεθόδου αλλά με περισσότερη έμφαση στις πρακτικές εφαρμογές της. Πραγματοποιείται εκτεταμένη ανάλυση των αποτελεσμάτων ενός συστήματος 15 ζυγών για να φανεί η τεράστια διαφορά πληροφοριών που αποκτώνται με την πιθανοτική ροή φορτίου σε σχέση με την ντετερμινιστική ανάλυση.

Το 1975 οι Dopazo, Klitin και Sasson αναπτύσσουν με διαφορετικό τρόπο τη στοχαστική ροή φορτίου, όπως την ονόμασαν, χρησιμοποιώντας για τους υπολογισμούς τον πίνακα συμμεταβλητότητας που είχε εφαρμοστεί με αποδοτικό τρόπο στο πρόβλημα εκτίμησης κατάστασης. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο Κεντρικό Οριακό Θεώρημα και θεωρεί ότι οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των τυχαίων μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση ροής φορτίου ακολουθούν κανονική κατανομή. Έτσι τα δεδομένα και τα αποτελέσματα αντιπροσωπεύονται μόνο από την αναμενόμενη τιμή και την τυπική απόκλισή τους. Επίσης, στη ίδια διατύπωση παρουσιάζεται μία μέθοδος "περιοριστικών περιοχών", για την αντιμετώπιση του γεγονότος ότι το συνολικό φορτίο

ή η παραγωγή σε ένα σύστημα είναι γνωστά με περισσότερη ακρίβεια από εκείνη που αντιστοιχεί στην απλή υπόθεση της ανεξαρτησίας των τυχαίων μεταβλητών.

Οι Heydt και Katz το 1975 αναπτύσσουν με στατιστικό τρόπο τη θεωρία των συνδεδεμένων συστημάτων. Η αβεβαιότητα των φορτίων σε συνδυασμό με την πιθανή μη διαθεσιμότητα των μονάδων παραγωγής προκαλούν αβεβαιότητα ως προς το μέγεθος της αλληλεπίδρασης με τα γειτονικά συστήματα. Στη διατύπωση αυτή γίνεται η υπόθεση ότι οι γραμμικοί περιορισμοί της παραγωγής που θεωρούνται, ακολουθούν κανονική κατανομή και χρησιμοποιείται επίλυση με γραμμικό προγραμματισμό.

Το 1976 διατυπώνεται από τους Allan και Shakarchi μία επέκταση της πιθανοτικής D.C. ροής φορτίου σύμφωνα με τη βασική θεμελίωση της Borkowska. Η μέθοδος χρησιμοποιεί δύο ισοδύναμες μεταξύ τους μορφές γραμμικοποίησης των εξισώσεων ροής φορτίου και τα δεδομένα είναι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας πραγματικών και αέργων φορτίων και παραγωγής στους ζυγούς. Ο αλγόριθμος είναι σε θέση να υπολογίζει τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των πραγματικών και αέργων ροών ισχύος, των τάσεων και των αέργων εγχύσεων. Για την πραγματοποίηση των συνελίξεων εφαρμόζονται οι αριθμητικές τεχνικές που δημοσιεύονται τον ίδιο χρόνο.

Τον επόμενο χρόνο, 1977, διατυπώνονται δύο ακόμη μορφές γραμμικοποίησης των εξισώσεων ροής φορτίου από τους Allan και Shakarchi. Οι εξισώσεις γραμμικοποιούνται γύρω από την περιοχή της αναμενόμενης τιμής των δεδομένων και είναι περισσότερο ακριβείς από τις σχέσεις των προηγούμενων γραμμικοποιήσεων γιατί βασίζονται σε λιγότερες υποθέσεις. Η τέταρτη γραμμικοποίηση μάλιστα δεν θεωρεί απόξευξη μεταξύ πραγματικής και άεργου ισχύος.

Το 1977 επίσης, οι ίδιοι συγγραφείς δημοσιεύουν τις εργασίες τους σχετικά με τον τρόπο που μπορεί να υπολογιστεί και να συμπεριληφθεί στην ανάλυση της πιθανοτικής A.C. ροής φορτίου η υπόθεση της γραμμικής θετικής ή αρνητικής εξάρτησης των εγχύσεων ισχύος ενός συστήματος. Στην ανάλυση που ακολουθεί υπογραμμίζεται η επίδραση της εξάρτησης μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών στην τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων και στο Σχήμα των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας. Η δημοσίευση αυτή αποτελεί επέκταση της εργασίας που προηγήθηκε από

τους Allan, Grigg, Newey και Simmons, για την εφαρμογή ολικής ή μερικής συσχέτισης μεταξύ των δεδομένων τυχαίων μεταβλητών στην πιθανοτική D.C. ανάλυση. Το μοντέλο πιθανοτικής ροής φορτίου με χρήση εξαρτημένων τυχαίων μεταβλητών μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη λειτουργική ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και στη βραχυπρόθεσμη λήψη αποφάσεων, όπου η υπόθεση της ανεξαρτησίας μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών δεν ισχύει.

Για την πιθανότητα απώλειας γραμμής και γενικότερα μεταβολής στην τοπολογία του συστήματος προτείνονται δύο διατυπώσεις, μία από τον Aboytes το 1977 και η άλλη από τους Allan, Grigg και Prato-Garciato 1978. Η τελική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ροής σε κάποιο στοιχείο του δικτύου, δίνεται ως άθροισμα με διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας όλων των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας των ροών που αντιστοιχούν σε κάθε μία τοπολογία του συστήματος που αναλύεται. Η πρώτη διατύπωση παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία επισημαίνονται από τους Leite da Silva, Allan, Soares και Arienti. Αυτά είναι :α) η υπόθεση ότι το άθροισμα όλων των θεωρούμενων τοπολογιών είναι μονάδα, πράγμα που οδηγεί σε εξωπραγματικά αποτελέσματα σε περιπτώσεις όπου το γινόμενο του αριθμού των στοιχείων επί την αβεβαιότητα του κάθε στοιχείου πλησιάζει τη μονάδα, και β) το γεγονός ότι χρησιμοποιείται η υπόθεση της κανονικής κατανομής των αποτελεσμάτων. Στη δεύτερη διατύπωση έχει θεωρηθεί και ορισμένος αριθμός πιθανών διαταραχών δευτέρας τάξεως.

Το 1980 μελετάται από τον Armando Martins Leite da Silva, η αποδοτικότητα υπολογισμού σε χρόνο, μνήμη, ακρίβεια και απλότητα των πιθανοτικών μεθόδων. Διερευνούνται αναλυτικά με χρήση της μη γραμμικής και της γραμμικοποιημένης μεθόδου Monte Carlo, που βασίζεται στην ανάλυση και αξιολόγηση μεγάλου πλήθους ροών φορτίου, όλες οι προτεινόμενες πιθανοτικές μέθοδοι και διαπιστώνεται η επίδραση της μη γραμμικότητας των εξισώσεων ροής φορτίου στα αποτελέσματα. Αποδεικνύεται έτσι η ανακρίβεια της υπόθεσης ότι οι άγνωστες τυχαίες μεταβλητές ακολουθούν κανονική κατανομή. Παράλληλα, προτείνεται μία νέα μέθοδος ροής φορτίου που παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιεί γραμμικοποιημένα πρότυπα λαμβάνει υπόψη την επίδραση της μη γραμμικότητας των εξισώσεων και δημοσιεύεται το 1981. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη δυνατότητα μεταβολής του σημείου γραμμικοποίησης των εξισώσεων έτσι

ώστε να υπολογίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια τα άκρα των υπολογιζόμενων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας. Χρησιμοποιείται επίσης ένας καινούριος αλγόριθμος για την πραγματοποίηση των συνελίξεων, ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier (F.F.T) που εκμεταλλεύεται ορισμένες ιδιότητες των εκθετικών συναρτήσεων και ανάγει τη συνέλιξη σε περιορισμένο πολλαπλασιασμό διακριτών τομών στο πεδίο της συχνότητας. Η τεχνική αυτή αποδεικνύεται ότι είναι πολύ πιο γρήγορη και πιο ακριβής από την τεχνική της συμβατικής συνέλιξης που βασίζεται στις ιδιότητες του μετασχηματισμού Laplace.

Το 1984 οι A.M. Leite da Silva, Arienti και Allan τελειοποιούν τη πιθανοτική μέθοδο ροής φορτίου που θεωρεί εξάρτηση μεταξύ των δεδομένων εγχύσεων των ζυγών για την εφαρμογή της σε προβλήματα ισοζυγίου ισχύος στο σύστημα, λαμβάνοντας υπόψη οικονομικούς και λειτουργικούς περιορισμούς.

Τέλος το 1985 οι A.M. Leite da Silva, Allan, Soares και Arienti, επεκτείνουν τη διατύπωση των Allan, Grigg και Garcia για τη μεταβλητή τοπολογία του δικτύου έτσι ώστε να εφαρμόζεται στην πιθανοτική A.C. ανάλυση.

1.2 ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

1.2.1 Μελέτες Ροών Φορτίου

Προσδιορισμός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η προμήθεια της πραγματικής και άεργου ισχύος που απαιτείται από τα διάφορα συνδεδεμένα στο σύστημα φορτία. Επίσης, η συχνότητα και η τάση στους διάφορους ζυγούς πρέπει να διατηρούνται μέσα σε καθορισμένα όρια κατά τη μεταβολή των φορτίων.

Η ανάλυση ροών φορτίου έχει σα σκοπό τον υπολογισμό των αγνώστων τάσεων των ζυγών και των ροών ισχύος στις γραμμές του δικτύου για ένα δεδομένο σύστημα παραγωγής, τάσεων γεννητριών και φορτίων.

Οι μελέτες ροών φορτίου είναι από τις πιο βασικές μελέτες σε ένα δίκτυο όχι μόνο για τη διατήρηση των ορίων λειτουργίας, αλλά και για το σχεδιασμό ενός

καινούριου συστήματος ή επέκτασης του υπάρχοντος συστήματος παραγωγής και μεταφοράς.

Επειδή κατά τη διάρκεια της ημέρας τα φορτία μεταβάλλονται συνεχώς, συχνά απαιτείται καινούριος υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος από κάθε γεννήτρια. Μετά την επιλογή της πιο οικονομικής λειτουργίας των γεννητριών του συστήματος, ελέγχονται οι περιορισμοί λειτουργίας και η ικανοποίηση των εξισώσεων ροής φορτίου.

Η απώλεια μιας γραμμής ή μιας μονάδας παραγωγής, ειδικά για τις σύγχρονες μονάδες μεγάλης ισχύος, μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στη ροή ισχύος κάθε γραμμής. Χρειάζεται έτσι, μελέτη ροών φορτίου για ενδεχόμενες διαταραχές.

Για τις μελέτες αυτές έχουν αναπτυχθεί αρκετοί ακριβείς και αποδοτικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι εφαρμόζουν μεθόδους όπως η Gauss-Seidel, η Newton- Raphson ή η ταχεία αποζευγμένη. Επίσης έχουν αναπτυχθεί και αλγόριθμοι που εφαρμόζουν προσεγγιστικές μεθόδους, όπως η D.C. ροή φορτίου, η οποία επιτρέπει μια γρήγορη πρώτη εκτίμηση των πραγματικών ροών ισχύος. Η όλη θεωρία και επίλυση των εξισώσεων ροών φορτίου έχει αναπτυχθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία.

1.2.2 Σκοπός της Πιθανοτικής Ροής Φορτίου

Για να ληφθούν υπόψη όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί μεταβολής των φορτίων και της παραγωγής χρειάζεται η επίλυση υπερβολικά μεγάλου πλήθους ντετερμινιστικών ροών φορτίου. Για συστήματα με N ζυγούς και K διαφορετικές τιμές φορτίων σε κάθε ζυγό απαιτούνται K^N ροές φορτίου. Για να δώσουμε μια τάξη μεγέθους:

Αν $N=10$ και $K=2$ τότε έχουμε $2^{10} \approx 10^3$ ροές φορτίου

Αν $N=10$ και $K=4$ τότε έχουμε $4^{10} \approx 10^6$ ροές φορτίου

Αν $N=100$ και $K=2$ τότε έχουμε $2^{100} \approx 10^{30}$ ροές φορτίου

Αν $N=100$ και $K=4$ τότε έχουμε $4^{100} \approx 10^{60}$ ροές φορτίου

Η εκτίμηση τόσο μεγάλου πλήθους αποτελεσμάτων ροής φορτίου για την εύρεση της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης ή το σχεδιασμό της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των ροών στις γραμμές είναι πρακτικά αδύνατη. Έτσι, γίνεται επιλογή ενός περιορισμένου αριθμού μεταβολών φορτίου, που περιλαμβάνει τις αναμενόμενες τιμές, τις ακραίες τιμές και τυχόν αυθαίρετες ενδιάμεσες τιμές φορτίων. Η επιλογή αυτή βασίζεται στην πείρα του μηχανικού και γι' αυτό η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που εξάγονται είναι υποκειμενική και μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες αποφάσεις.

Αντίθετα, η πιθανοτική ροή φορτίου λαμβάνει υπόψη όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταβολών των φορτίων και της παραγωγής με μία μόνο επίλυση. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη στατιστική θεώρηση των φορτίων και της παραγωγής των οποίων τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας θεωρεί δεδομένες. Σκοπός της πιθανοτικής ροής φορτίου είναι ο υπολογισμός της μέσης τιμής, της τυπικής απόκλισης και της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των αγνώστων μεγεθών. Τα αποτελέσματα αυτά αποτελούν τη σύνθεση όλων των πιθανών αποτελεσμάτων που αντιστοιχούν στα δεδομένα, και δίνουν απάντηση σε πολλά πρακτικά προβλήματα.

A) Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Τα βασικά πλεονεκτήματα της πιθανοτικής μεθόδου είναι :

- Το αυξημένο πλήθος πληροφοριών που αποκομίζονται για την ικανοποιητική λειτουργία ή τον σχεδιασμό του συστήματος.
- Η εύκολη εκτίμηση των αποτελεσμάτων.
- Η δυνατότητα απεικόνισης των επιθυμητών συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας με γραφικές παραστάσεις.
- Η δυνατότητα εξαγωγής των ντετερμινιστικών αποτελεσμάτων μέσω της πιθανοτικής μεθόδου.

Τα μειονεκτήματα και οι δυσκολίες που παρουσιάζει είναι :

- Η αναγκαία γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροής φορτίου γύρω από κάποιο σημείο που απέχει πολύ ή λίγο από το λειτουργικό σημείο του συστήματος. Τα αποτελέσματα είναι περισσότερο ακριβή γύρω από αυτό το σημείο και λιγότερο ακριβή όσο απομακρύνονται από αυτό.
- Η αύξηση του αριθμού των δεδομένων σε σχέση με τη ντετερμινιστική μέθοδο και η δυσκολία προσδιορισμού τους με στατιστικές παραμέτρους.
- Το μεγάλο πλήθος σημείων που συνιστά τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των αγνώστων μεγεθών και καθιστά αναγκαία τη χρησιμοποίηση αριθμητικής μεθόδου για την παράστασή τους.

B) Διατύπωση του προβλήματος

Η γενική διατύπωση του προβλήματος πιθανοτικής ροής φορτίου είναι η εξής[9] :

Δίνονται :

- Η τοπολογία του δικτύου N-ζυγών, (M ζυγοί φορτίου) L-γραμμών, T-μετασχηματιστών και οι παράμετροι των στοιχείων του: αντιστάσεις γραμμών R_{ij} , επαγωγικές ή χωρητικές αντιδράσεις γραμμών X_{ij} , λήψεις μετασχηματιστών t. Η πιθανότητα αυτών των στοιχείων είναι μονάδα.
- R_1 συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας των πραγματικών εγχύσεων στους ζυγούς του δικτύου ($R_1 \geq N$).
- R_2 συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας των άεργων εγχύσεων στους ζυγούς φορτίου (PQ) του δικτύου ($R_2 \geq M$).

Προσδιορίζονται :

- Η μέση τιμή και τυπική απόκλιση των πραγματικών και άεργων εγχύσεων, των πραγματικών και άεργων ροών ισχύος στις γραμμές και στα στοιχεία αντισταθμίσεως, των τάσεων στους ζυγούς φορτίου (PQ) και των γωνιών.
- Η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του ισοζυγίου της ισχύος στο σύστημα.

- Οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των γωνιών, των τάσεων των πραγματικών και άεργων ροών ισχύος.
- Οι συντελεστές ευαισθησίας των γραμμών.

1.2.3 Πρακτικές Εφαρμογές της Μεθόδου

A. Η μορφή των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας που προσδιορίζονται από μία πιθανοτική ροή φορτίου παρέχει της ακόλουθες πληροφορίες :

- i. Ποια είναι η πιο πιθανή τιμή ροής φορτίου σε μία γραμμή ή τάσεως σε ένα ζυγό PQ. Η τιμή αυτή μπορεί να διαφέρει από την αναμενόμενη τιμή λόγω της μη κανονικής μορφής της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας.
- ii. Ποια είναι η πιθανότητα να ξεπεράσει η ροή μιας γραμμής το όριο αντοχής της ή η πιθανότητα να κυμαίνεται η τιμή της σε κάποιο διάστημα γύρω από μία ορισμένη τιμή.
- iii. Ποια είναι η πιθανότητα να μην ικανοποιούνται οι περιορισμοί της τάσεως σε κάποιο ζυγό.
- iv. Ποια είναι η πρακτικά δυνατή έκταση τιμών των τάσεων ή της ροής ισχύος ώστε να γίνει κατάλληλη επιλογή του αριθμού, της ικανότητας και της τοπολογίας των γραμμών ενός συστήματος.
- v. Ποιο ποσοστό από όλες τις δυνατές τιμές της ροής σε κάποια γραμμή βρίσκεται στην οικονομικά επιθυμητή περιοχή τιμών.

B. Ο προσδιορισμός της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας του ισοζυγίου της ισχύος στο σύστημα επιτυγχάνεται αφού είναι γνωστές όλες οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας της παραγωγής και των φορτίων. Το ισοζύγιο ισχύος είναι ανεξάρτητο από τις παραμέτρους των στοιχείων του δικτύου και την τοπολογία. Από τη γραφική παράσταση αυτής της συνάρτησης εξάγεται η πιθανότητα να υπάρχει πλεόνασμα ή έλλειμμα ισχύος στο σύστημα με αποτέλεσμα την ποσοτική εκτίμηση της ικανότητας του συστήματος να καλύψει τη συνολική ζήτηση. Η πληροφορία αυτή μπορεί να φανεί χρήσιμη για τον προσδιορισμό του αριθμού και της ικανότητας των εφεδρειών που θα χρησιμοποιηθούν.

C. Για να επιτευχθεί ο υπολογισμός των αγνώστων μεγεθών στην πιθανοτική ροή φορτίου απαιτείται πρώτα η εξαγωγή ενός διανύσματος συντελεστών ευαισθησίας που καθορίζει πόσο επηρεάζεται το συγκεκριμένο μέγεθος από τη μεταβολή της πραγματικής ή άεργου εγχύσεως σε κάθε ζυγό ξεχωριστά. Οι συντελεστές αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ανάλυση της ευαισθησίας του συστήματος ή στην επιλογή του καταλληλότερου χειρισμού των μεταβλητών ελέγχου και διαταραχής για την επαναφορά του συστήματος στα προκαθορισμένα όρια ασφαλείας.

1.3 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το πρόβλημα της ροής φορτίου μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από δύο συστήματα μη γραμμικών εξισώσεων της μορφής[7]:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{g}(\mathbf{X}) \quad (1.3.1)$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{h}(\mathbf{X}) \quad (1.3.2)$$

όπου:

\mathbf{Y}	το διάνυσμα εισόδου
\mathbf{X}	το διάνυσμα κατάστασης
\mathbf{Z}	το διάνυσμα εξόδου
και g, h	μη γραμμικές διανυσματικές συναρτήσεις

Το διάνυσμα \mathbf{Y} αντιπροσωπεύει τις ενεργές εγχύσεις σε όλους τους ζυγούς (PQ και PV), εκτός του ζυγού αναφοράς και τις άεργες εγχύσεις στους ζυγούς φορτίου (PQ), το διάνυσμα \mathbf{X} αντιπροσωπεύει το μέτρο των τάσεων και τις γωνίες των τάσεων και τέλος το διάνυσμα \mathbf{Z} αντιπροσωπεύει όλα τα μεγέθη που μπορούν να υπολογιστούν από το διάνυσμα κατάστασης, όπως ενεργές και άεργες ροές ισχύος, απώλειες κ.λ.π.. Σε αυτή την διπλωματική θα επικεντρωθούμε στο Διάνυσμα \mathbf{X} .

Στο στάδιο αυτό, λόγω των φυσικών δυσκολιών του προβλήματος είναι απαραίτητο να γίνουν ορισμένες παραδοχές[1]:

- Οι τυχαίες μεταβλητές θεωρούνται ανεξάρτητες μεταξύ τους.
- Η τοπολογία του δικτύου θεωρείται σταθερή (με πιθανότητα μονάδα).
- Οι συναρτήσεις g και h πρέπει να γραμμικοποιηθούν γύρω από κάποιο λειτουργικό σημείο, συνήθως την αναμενόμενη τιμή.

Αν Y_0 είναι η αναμενόμενη τιμή του διανύσματος των δεδομένων εγχύσεων ισχύος Y και το διάνυσμα κατάστασης X_0 τέτοιο ώστε να ικανοποιεί την διανυσματική εξίσωση:

$$Y_0 = g(X_0) \quad (1.3.3)$$

τότε το διάνυσμα X μπορεί να προκύψει από την επίλυση μιας ντετερμινιστικής ροής φορτίου όπου τα δεδομένα είναι οι αναμενόμενες τιμές των στοιχείων του διανύσματος Y . Το διάνυσμα X_0 είναι μια εκτίμηση της αναμενόμενης τιμής του τυχαίου διανύσματος X (εδώ χρησιμοποιείται η τιμή αυτού που προκύπτει από εκτέλεση της ροής φορτίου χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές του διανύσματος Y)

Η γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροής φορτίου (1.3.1) γύρω από το σημείο (X_0, Y_0) , δηλαδή γύρω από την αναμενόμενη τιμή [8], δίνει:

$$Y = g(X_0) + J(X - X_0) \quad (1.3.4)$$

όπου:

$$J = \left. \frac{\partial g}{\partial X} \right|_{X = X_0} \quad \text{η Ιακωβιανή της } g \text{ στο σημείο } X_0$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (1.3.3) στην (1.3.4) και λύνοντας ως προς X προκύπτει η εξής εξίσωση [16]:

$$X = X_0 + J^{-1}(Y - Y_0) \quad (1.3.5)$$

Μία επιπλέον απλοποίηση της εξίσωσης (1.3.5) μπορεί να επιτευχθεί εάν θεωρήσουμε ότι η μήτρα J^{-1} είναι μπλοκ διαγώνια. Δηλαδή ότι οι γωνίες των τάσεων δεν επηρεάζονται από την άεργο ισχύ και το μέτρο των τάσεων δεν επηρεάζεται από την ενεργό ισχύ.

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} D\theta/DP & 0 \\ 0 & DV/DQ \end{bmatrix} \quad (1.3.6)$$

Επιλέγοντας να απλοποιήσουμε περισσότερο τα πράγματα και δεδομένου ότι σ' αυτή τη διπλωματική γίνεται χρήση μόνο των στοιχείων της τάσης των ζυγών PQ μπορούμε να γράψουμε (κάνοντας κατάχρηση ελαφρώς του συμβολισμού):

$$V = V_0 + DV/DQ (Q - Q_0) \quad (1.3.7)$$

όπου :

V :	η μεταβλητή του διανύσματος των τάσεων στους ζυγούς PQ
V₀ :	αναμενόμενη τιμή του διανύσματος τάσεων
DV/DQ :	Ευαισθησία τάσης προς άεργο ισχύ
Q :	η μεταβλητή του διανύσματος των έργων ισχύων στους ζυγούς PQ
Q₀ :	αναμενόμενη τιμή έργου ισχύος

Εκτελώντας τους πολλαπλασιασμούς στην σχέση (1.3.7) φτάνουμε στη σχέση:

$$V = V_0 - DV/DQ * Q_0 + DV/DQ * Q \quad (1.3.8)$$

Θέτοντας επιπλέον:

$$A = DV/DQ \quad (1.3.9)$$

$$B = V_0 - A * Q_0 \quad (1.3.10)$$

Η σχέση (1.3.8) μετασχηματίζεται στην εξής:

$$V = A * Q + B \quad (1.3.11)$$

Η σχέση (1.3.11) δηλώνει ότι η τυχαία μεταβλητή V είναι γραμμικός συνδυασμός των τυχαίων μεταβλητών Q και μίας σταθεράς B . Όπως είναι γνωστό από τη θεωρία των πιθανοτήτων και της στατιστικής [1], αν μια μεταβλητή είναι γραμμικός συνδυασμός n άλλων ανεξάρτητων μεταβλητών τότε ακολουθεί την κατανομή που προκύπτει σαν συνέλιξη των κατανομών των n ανεξάρτητων μεταβλητών αυτών.

1.4 ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΥΝΕΛΙΞΗΣ

Οι προηγούμενες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας συνελίσσονται σύμφωνα με τον αλγόριθμο που παρουσιάζεται στην συνέχεια και βάσει του μαθηματικού υπόβαθρου που μπορεί να βρει κανείς και στη βιβλιογραφία που βρίσκεται στο τέλος της διπλωματικής. Όπου κρίνεται σκόπιμο κάποια πράγματα θα επαναλαμβάνονται.

Το τυχαίο διάνυσμα Q αποτελείται από συνεχείς και διακριτές (ή διακριτοποιημένες) κατανομές που αντιπροσωπεύουν την αβεβαιότητα των φορτίων. Η συμβατική μέθοδος για την πραγματοποίηση της συνέλιξης στηρίζεται στον μετασχηματισμό Laplace ή στον FFT [5] και υπολογίζει δύο ισοδύναμες κατανομές μία για όλες τις συνεχείς κατανομές και μία για όλες τις διακριτές, και κατόπιν συνελίσει τις δύο αυτές κατανομές μεταξύ τους για τον υπολογισμό της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των ζητούμενων τυχαίων μεταβλητών.

Η ισοδύναμη κανονική κατανομή μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από τις αναμενόμενες τιμές και τις τυπικές αποκλίσεις όλων των κανονικών κατανομών:

Αν:

$$f_1 = N(\mu_1, \sigma_1) \quad (1.4.1)$$

$$f_2 = N(\mu_2, \sigma_2) \quad (1.4.2)$$

και η ζητούμενη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f_n = a_1 f_1 * a_2 f_2 \quad (1.4.3)$$

όπου:

* νοείται ως το σύμβολο της συνέλιξης

Αποδεικνύεται πως:

$$f_n = N(\mu_n, \sigma_n) \quad (1.4.4)$$

όπου:

$$\mu_n = a_1 \mu_1 + a_2 \mu_2 \quad \text{και} \quad \sigma_n = \sqrt{(a_1 \sigma_1)^2 + (a_2 \sigma_2)^2} \quad (1.4.5)$$

Στη συνέχεια θα αποδείξουμε αυτή την πρόταση αναλυτικά αλλά και υπολογιστικά στο περιβάλλον του matlab. Όμως πρώτα θα παρουσιάσουμε τον αλγόριθμο που χρησιμοποιούμε για την πιθανοτική ροή φορτίου των διακριτών σ.π.π [4] και θα τον επαληθεύσουμε βάσει του λήμματος για τις κανονικές κατανομές. Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί λοιπόν είναι η εξής:

- παρουσίαση του αλγόριθμου για τις διακριτές ή διακριτοποιημένες κατανομές
- απόδειξη της σχέσης για την συνέλιξη μεταξύ κανονικών κατανομών
- διακριτοποίηση των κανονικών κατανομών και εκτέλεση πιθανοτικής ροής φορτίου στο δίκτυο 9 της IEEE βάσει των δυο αυτών μεθόδων. (Τα αποτελέσματα θα πρέπει να συμπίπτουν ικανοποιητικά).

1.4.1 Αλγόριθμος συνέλιξης διακριτών κατανομών

Αυτό που θα αποσαφηνίσουμε περαιτέρω είναι το τρίτο βήμα που αφορά την γραμμική παρεμβολή που γίνεται σ' αυτό. Είναι πιθανό το διάνυσμα που περιέχει τα στοιχεία της κ-οστης σ.π.π. να περιέχει τιμές οι οποίες να "πέφτουν ανάμεσα" στις τιμές της αποθηκευμένης σ.π.π. με την οποία πρόκειται να συνελιχθεί. Είναι λοιπόν απαραίτητο να εκτελέσουμε κάποιο είδος παρεμβολής στις τιμές αυτές έτσι ώστε να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε τις νέες τιμές για την εκτέλεση της συνέλιξης. Σ' αυτή την διπλωματική χρησιμοποιούμε την μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής. Έστω λοιπόν H_{\max} η μεγαλύτερη τιμή της σ.π.π. και αντίστοιχα H_{\min} η μικρότερη τιμή αυτής της σ.π.π. Επίσης ας υποθέσουμε ότι δειγματοληπτούμε έτσι ώστε να έχουμε n δείγματα και πως πριν από την παρεμβολή έχουμε μια τιμή H με πλάτος a στο διάστημα $(\kappa, \kappa+1)$ όπου $\kappa, \kappa+1$ οι τιμές που θέλουμε να υπάρξουν στην σ.π.π. ώστε να μπορέσουμε να κάνουμε την πράξη της συνέλιξης. Ποιο θα πρέπει να είναι το ύψος αυτών των νέων τιμών;

Το πλάτος a της τιμής H θα πρέπει να διαμοιραστεί αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση από τα σημεία κ και $\kappa+1$. Δηλαδή :

$$d = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{n - 1} \quad (1.4.6)$$

d_1 : η απόσταση από το σημείο κ

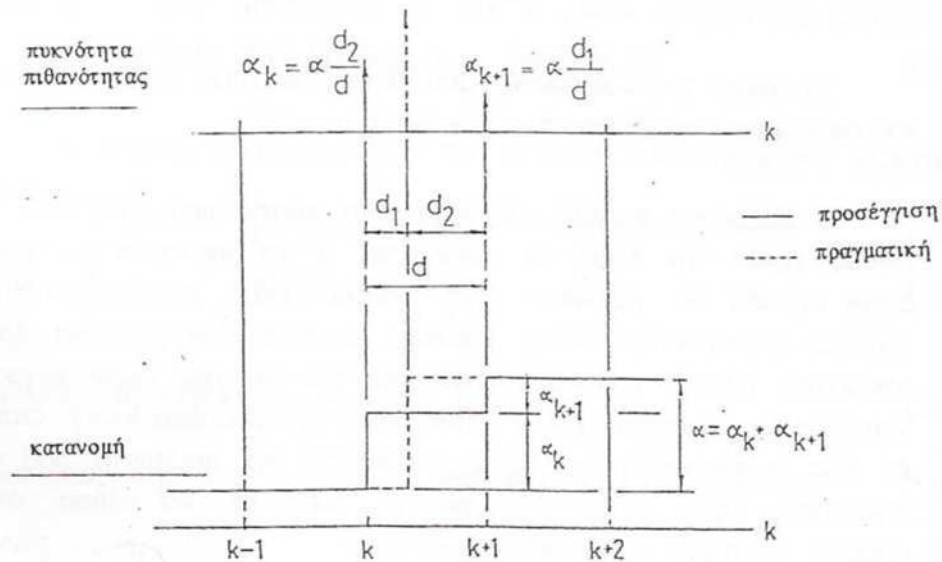
d_2 : η απόσταση από το σημείο $\kappa+1$

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν:

$$\alpha_{\kappa} = \alpha * \frac{d_2}{d} \quad (1.4.7)$$

$$\alpha_{\kappa+1} = \alpha * \frac{d_1}{d} \quad (1.4.8)$$

Πιο παραστατικά αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1.4.1 που ακολουθεί.



Σχήμα 1.4.1: Διαμοιρασμός μιας διακεκριμένης τιμής

1.4.2 Συνέλιξη κανονικών κατανομών

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αποδείξουμε τις σχέσεις (1.4.4) που αφορούν τις κανονικές κατανομές. Η απόδειξη θα γίνει για δυο τυχαίες ανεξάρτητες μεταβλητές που ακολουθούν την κανονική κατανομή αλλά η γενίκευση της για n τυχαίες ανεξάρτητες μεταβλητές προκύπτει εύκολα με τον ίδιο τρόπο.

Έστω λοιπόν δυο τυχαίες μεταβλητές X_1 και X_2 με μέση τιμή και τυπική απόκλιση (μ_1, σ_1) και (μ_2, σ_2) αντίστοιχα. Οι δύο αυτές τυχαίες μεταβλητές ακολουθούν κανονική κατανομή και θέλουμε να βρούμε την κατανομή που ακολουθεί η τ.μ. X_n η οποία είναι το άθροισμά τους.

Έχουμε λοιπόν:

$$X_n = X_1 + X_2 \quad (1.4.9)$$

Επειδή οι X_1 και X_2 είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους η σ.π.π. της X_n θα δίνεται από την συνέλιξη των σ.π.π. των X_1 και X_2 . Δηλαδή:

$$Y_n = N(\mu_1, \sigma_1) * N(\mu_2, \sigma_2) \quad (1.4.10)$$

αφού:

$$X_1 \rightarrow N(\mu_1, \sigma_1) \quad \text{και} \quad X_2 \rightarrow N(\mu_2, \sigma_2)$$

παίρνοντας το μετασχηματισμό Fourier και των δύο μερών της σχέσης (1.4.10) έχουμε:

$$f(Y_n) = f(N(\mu_1, \sigma_1))f(N(\mu_2, \sigma_2)) \quad (1.4.11)$$

Γνωρίζουμε επίσης ότι ο μετασχηματισμός Fourier μιας κανονικής κατανομής είναι μία κανονική κατανομή δηλαδή στην απλούστερη περίπτωση:

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2*\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \rightarrow e^{-\frac{\omega^2}{2\sigma^2}} \quad (1.4.12)$$

Για να γενικεύσουμε σε οποιαδήποτε κανονική κατανομή θα πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν και την μέση τιμή δηλαδή να βρούμε τον μετασχηματισμό fourier της γενικευμένης κανονικής κατανομής $\frac{1}{\sigma\sqrt{2*\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$. Για αυτό θα εκμεταλλευτούμε την ιδιότητα

μετατόπισης χρόνου του μετασχηματισμού Fourier δηλαδή $x(t - t_0) = e^{-j\omega t_0} * X(\omega)$.

Έτσι:

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2*\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \rightarrow e^{-j\omega\mu} * e^{-\frac{\omega^2}{2\sigma^2}} \quad (1.4.13)$$

οπότε σύμφωνα με (1.4.10) και (1.4.11):

$$f(Y_n) = e^{-j\omega(\mu_1+\mu_2)} * e^{-\frac{\omega^2}{2}*(\sigma_1^2+\sigma_2^2)} \quad (1.4.14)$$

παίρνοντας τον αντίστροφο Fourier της παραπάνω σχέσης και χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της δυαδικότητας και της μετατόπισης χρόνου έχουμε:

$$Y_n = \frac{1}{\sqrt{2 * \pi * \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}} * e^{-\frac{(x-(\mu_1+\mu_2))^2}{2*\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_2^2}}} \quad (1.4.15)$$

Συγκρίνοντας κανείς την παραπάνω σχέση με την σχέση για την κανονική κατανομή καταλήγει στο $\mu_n=\mu_1+\mu_2$ και $\sigma_n=\sqrt{(\sigma_1)^2 + (\sigma_2)^2}$. Η επέκταση για σχέση της μορφής

$X_n = X_1 + X_2$ προκύπτει εύκολα αν αναλογιστεί κανείς ότι $E(aX)=aE(X)$ και

$\sigma(aX)=\sqrt{a^2} * \sigma(X)$.

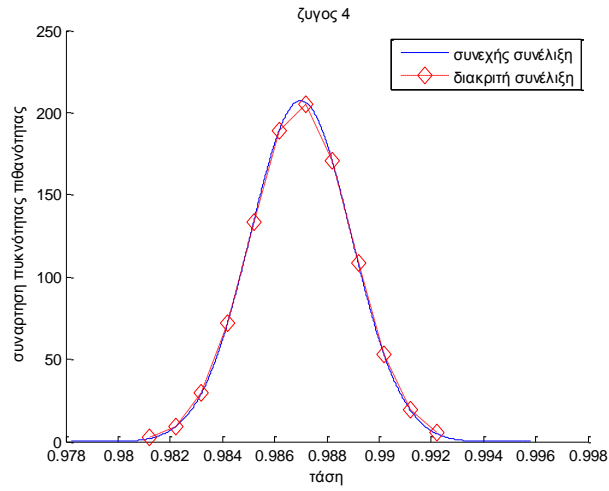
1.4.3 Εκτέλεση πιθανοτικής ροής φορτίου με κανονικές κατανομές

Τα δύο παραπάνω στάδια έθεσαν το θεωρητικό κομμάτι για την εκτέλεση αυτού του σταδίου το οποίο έχει να κάνει με την εκτέλεση της πιθανοτικής ροής φορτίου. Το ζητούμενο λοιπόν είναι να εκτελεστούν δύο πιθανοτικές ροές φορτίου στο δίκτυο 9 ζυγών της IEEE θεωρώντας όλες τις σ.π.π. κανονικές κατανομές :

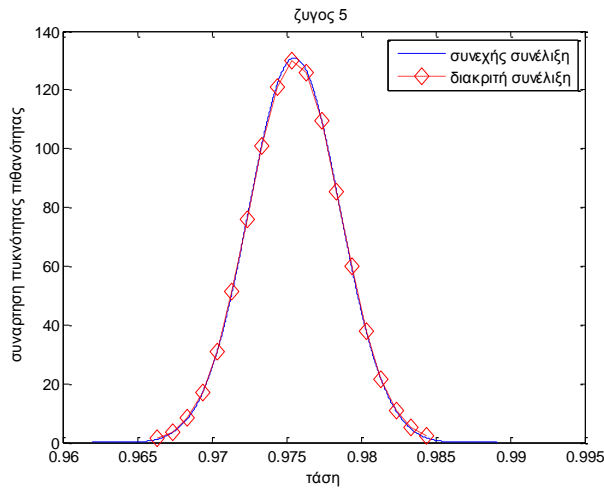
- Στην πρώτη πιθανοτική ροή φορτίου θα χρησιμοποιήσουμε το λήμμα για τις κανονικές κατανομές που αποδείξαμε στο δεύτερο στάδιο λαμβάνοντας υπ' όψιν και τις ευαισθησίες που δίνονται από το πίνακα DV/DQ.
- Στην δεύτερη πιθανοτική ροή φορτίου θα διακριτοποιήσουμε τις κανονικές κατανομές και θα εφαρμόσουμε τη μέθοδο που περιγράφηκε στο πρώτο στάδιο για τις διακριτές ή διακριτοποιημένες κατανομές.

Σκοπός αυτής της προσομοίωσης είναι να διαπιστωθεί η σωστή λειτουργία της υπολογιστικής μεθόδου για την εύρεση της συνέλιξης. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου για συνέλιξη διακριτών κατανομών (υπολογιστική μέθοδος) πρέπει να έχουν μικρές διαφορές με την μέθοδο που ως βασικό της πυρήνα έχει το λήμμα που αποδείξαμε πιο πριν.

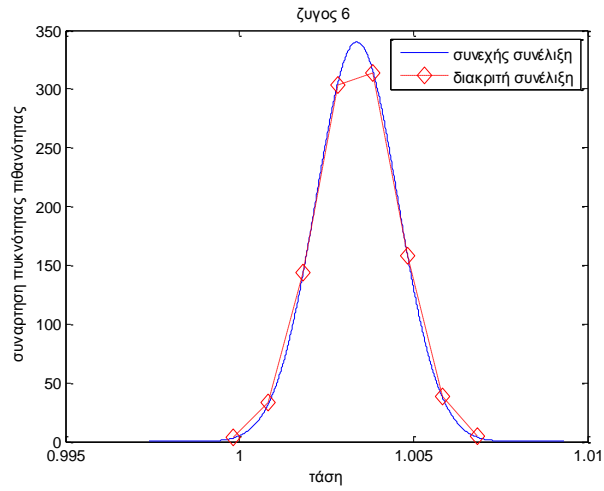
Παρακάτω ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις των σ.π.π. των 6 ζυγών PQ του πρότυπου δικτύου 9 της IEEE.



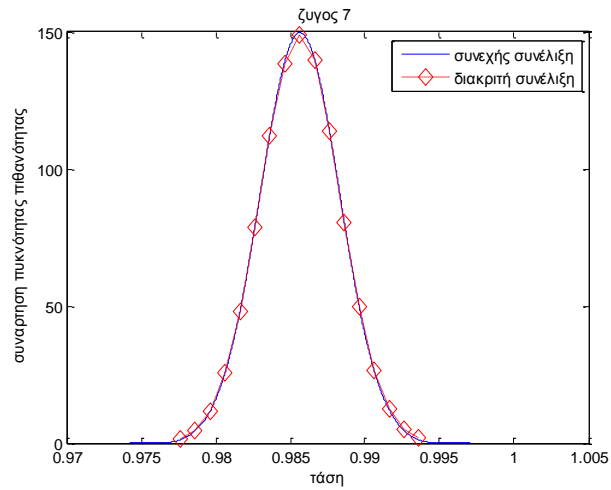
Σχήμα 1.4.2: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 4



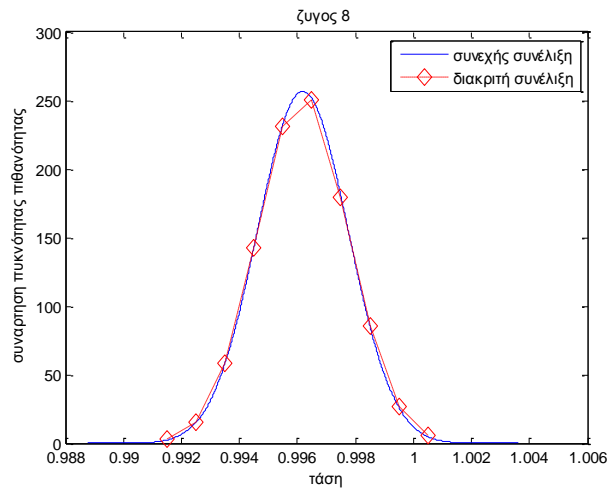
Σχήμα 1.4.3: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 5



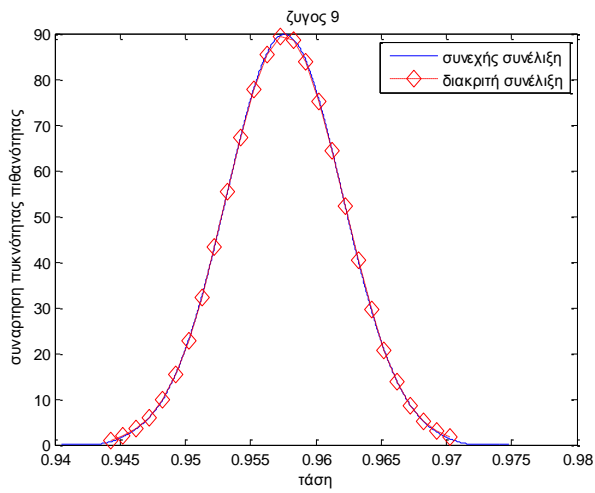
Σχήμα 1.4.4: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 6



Σχήμα 1.4.5: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 7

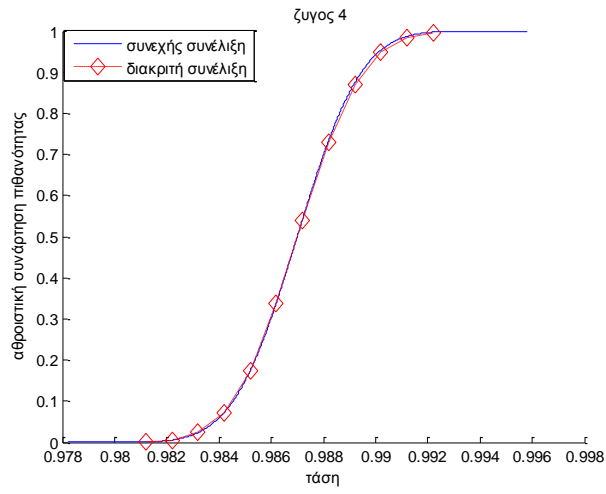


Σχήμα 1.4.6: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 8

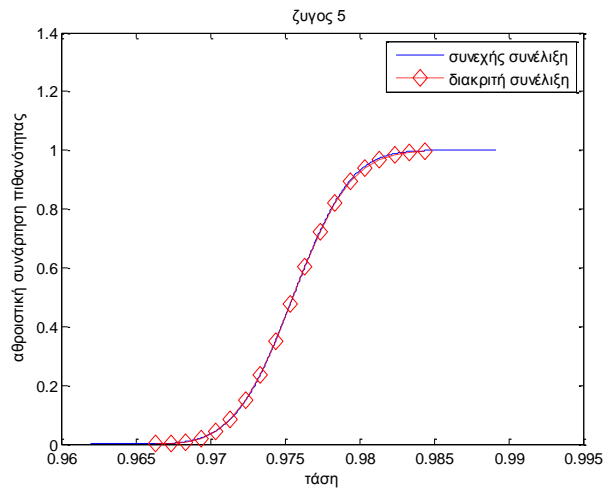


Σχήμα 1.4.7: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 9

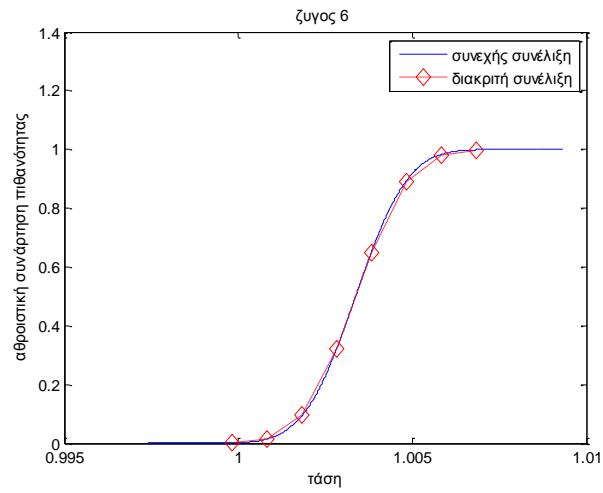
Δίνονται επίσης και οι αθροιστικές συναρτήσεις πιθανότητας των ζυγών PQ (για καλύτερη εποπτεία) του πρότυπου δικτύου 9 της IEEE .



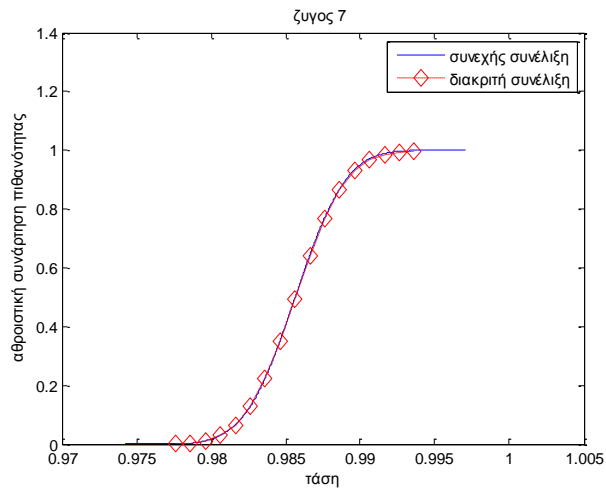
Σχήμα 1.4.8: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 4



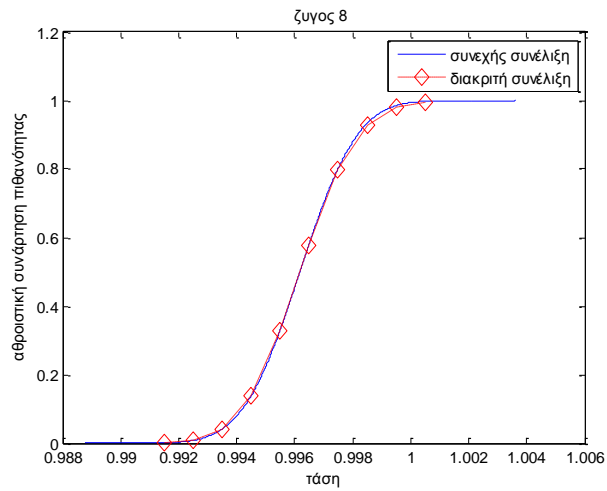
Σχήμα 1.4.9: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 5



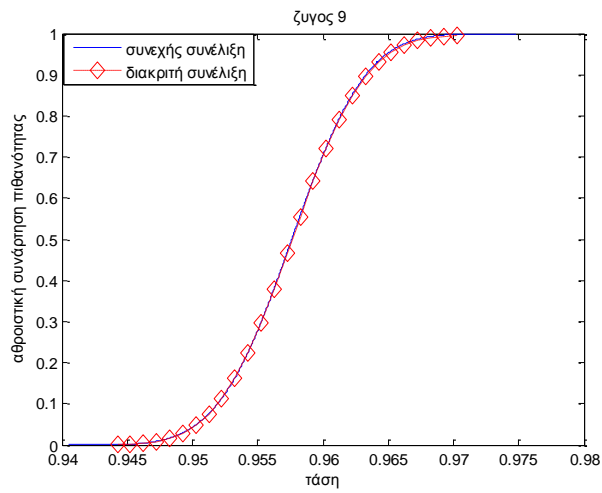
Σχήμα 1.4.10: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 6



Σχήμα 1.4.11: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 7



Σχήμα 1.4.12: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 8



Σχήμα 1.4.13: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 9

Όπως φαίνεται λοιπόν και από τα σχήματα η υπολογιστική μέθοδος που υποδείξαμε για την συνέλιξη διακριτών σ.π.π. παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

1.5 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Για να εμφανίζεται πιθανότητα παραβίασης των ορίων της τάσης αυξάνεται το φορτίο ζήτησης κατά ένα ποσοστό του βασικού σεναρίου. Ως βασικό σενάριο θεωρείται το σενάριο που δίνεται από τα πρότυπα δίκτυα της IEEE στα οποία και εφαρμόζονται οι προτεινόμενες μέθοδοι της παρούσας εργασίας. Παρακάτω δίνεται η αύξηση φορτίου κάθε δικτύου καθώς και οι πιθανότητες παραβίασης των ορίων της τάσης μετά την προαναφερθείσα αύξηση του φορτίου

Δίκτυο 9 ζυγών της IEEE

Στο δίκτυο 9 ζυγών της IEEE πραγματοποιείται αύξηση φορτίου 30% του βασικού σεναρίου. Προκύπτουν λοιπόν τα εξής:

Πίνακας 1.5.1: Πιθανότητα παραβίασης ορίων δικτύου 9 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Πιθανότητα παραβίασης κάτω ορίου	Πιθανότητα παραβίασης άνω ορίου
5	0,150	0
9	1	0

Δίκτυο 30 ζυγών της IEEE

Στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE πραγματοποιείται αύξηση φορτίου 40% του βασικού σεναρίου. Προκύπτουν λοιπόν τα εξής

Πίνακας 1.5.2: Πιθανότητα παραβίασης ορίων δικτύου 30 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Πιθανότητα παραβίασης κάτω ορίου	Πιθανότητα παραβίασης άνω ορίου
6	0,153217800600430	0
7	0,996981749871161	0
8	1	0

19	0,309319374156924	0
28	0,0491817144936202	0

Δίκτυο 57 ζυγών της IEEE

Στο δίκτυο 57 ζυγών της IEEE πραγματοποιείται αύξηση φορτίου 10% του βασικού σεναρίου. Προκύπτουν λοιπόν τα εξής:

Πίνακας 1.5.3: Πιθανότητα παραβίασης ορίων δικτύου 57 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Πιθανότητα παραβίασης κάτω ορίου	Πιθανότητα παραβίασης άνω ορίου
20	0,157947267744299	0
25	0,0110911929731797	0
26	1	0
30	1	0
31	1	0
32	1	0
33	1	0
34	1	0
35	0,922962688426538	0
40	0,000275640456091836	0
42	0,494790025667254	0
46	0	0,672197523166990
56	0,308402001768329	0
57	0,897966509944989	0

Δίκτυο 118 ζυγών της IEEE

Στο δίκτυο 118 ζυγών της IEEE πραγματοποιείται αύξηση φορτίου 10% του βασικού σεναρίου. Προκύπτουν λοιπόν τα εξής:

Πίνακας 1.5.4: Πιθανότητα παραβίασης ορίων δικτύου 118 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Πιθανότητα παραβίασης κάτω ορίου	Πιθανότητα παραβίασης άνω ορίου
21	0,00165871859497170	0
53	1	0
118	1	0

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί σ' αυτό το κεφάλαιο για τον έλεγχο της τάσης του δικτύου είναι η μέθοδος της ανάλυσης ευαισθησίας. Παρακάτω θα περιγράψουμε αυτή τη μέθοδο και θα παρέχουμε και ένα διάγραμμα ροής. Αξίζει να αναφερθεί ότι για όλες τις μεθόδους που θα χρησιμοποιήσουμε η αντιστάθμιση άεργης ισχύος που θα προσφέρουμε στο σύστημα έτσι ώστε να μπορέσουμε να κάνουμε διόρθωση τάσης και να το επαναφέρουμε μέσα στα επιτρεπτά όρια του (0.95,1.05) θα δίνεται είτε από μεταβολή της τάσης των γεννητριών του συστήματος είτε από έγχυση άεργου ισχύος από συστοιχίες πυκνωτών[3],[14],[15].

Εκτελώντας λοιπόν μια πιθανοτική ροή φορτίου και βρίσκοντας τις σ.π.π. των ζυγών PQ βρίσκουμε ποιός ζυγός παρουσιάζει την μεγαλύτερη πιθανότητα παραβιάζει τα επιτρεπτά όρια τάσης. Η εύρεση του ζυγού με την μεγαλύτερη πιθανότητα να παραβιάσει τα όρια βρίσκεται εξάγοντας από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας (c.d.f.) και παρατηρώντας τις τιμές που αυτή παίρνει για $V=0.95$ και $V=1.05$. Κάνοντας λοιπόν μια σύγκριση των τιμών $F(0.95)$ και $1-F(1.05)$ όλων των ζυγών PQ μπορεί κανείς να βρει που υπάρχει η μεγαλύτερη πιθανότητα υπότασης ή υπέρτασης αντίστοιχα στο δίκτυο. Επειδή εμείς υπερφορτίζουμε το δίκτυο περιμένουμε ότι θα έχουμε υπόταση σε κάποιους ζυγούς.

Μετά την εύρεση του ζυγού με τη μεγαλύτερη πιθανότητα παραβίαση των ορίων τάσης πρέπει να αποφασιστεί ποιές κινήσεις θα πρέπει να γίνουν ώστε ο ζυγός αυτός να επανέλθει στα επιθυμητά όρια λειτουργίας. Για τους ζυγούς PQ οι οποίοι έχουν συστοιχίες πυκνωτών μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον πίνακα ευαισθησιών DV/DQ . Γνωρίζοντας πόσο πρέπει να μεταβάλουμε την τάση στον ζυγό όπου έχουμε παραβίαση ορίων βρίσκουμε από την μήτρα DV/DQ [17] την συστοιχία των πυκνωτών που έχει την μεγαλύτερη ευαισθησία ως προς αυτόν τον ζυγό και διαιρούμε την ζητούμενη μεταβολή της τάσης δια της ευαισθησίας αυτής ώστε να βρούμε την ισχύ που πρέπει να εγχύσουν στο δίκτυο οι πυκνωτές.

Πιο παραστατικά αν i ο ζυγός με τη μεγαλύτερη πιθανότητα παραβίασης και j ο ζυγός ο οποίος αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη ευαισθησία της σειράς i του πίνακα DV/DQ τότε η αναγκαία εγχερόμενη ισχύς από τη συστοιχία των πυκνωτών του ζυγού j είναι:

$$\Delta Q = \frac{\Delta V}{[DV/DQ]_{i,j}} \quad (2.1.1)$$

όπου

$[DV/DQ]_{i,j}$ είναι το στοιχείο i,j του πίνακα DV/DQ

Για διόρθωση τάσης με μεταβολή τάσης των γεννητριών θα πρέπει να βρούμε τον πίνακα S_{LV} με τις ευαισθησίες των ζυγών PQ ως προς την τάση των γεννητριών. Θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο ταχεία αποζευγμένη (Fast Decoupled) έτσι ώστε να καταλήξουμε στον πίνακα S_{LV} . Έχουμε λοιπόν:

$$[\Delta Q/\Delta V] = [B] * [\Delta V] \quad (2.1.2)$$

όπου $[B]$ είναι το φανταστικό μέρος του πίνακα αγωγιμοτήτων

Στη συνέχεια θα διαχωρίσουμε τους ζυγούς PV από τους PQ και έτσι ο πίνακας B θα μπορέσει να υποδιαιρεθεί σε 4 υποπίνακες:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_G/V_G \\ \Delta Q_L/V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{GG} & B_{GL} \\ B_{LG} & B_{LL} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta V_G \\ \Delta V_L \end{bmatrix} \quad (2.1.3)$$

όπου ΔQ_G και ΔV_G αντιστοιχούν στην μεταβολή της άεργου ισχύος και της τάσης στους ζυγούς PV ενώ ΔQ_L και ΔV_L αντιστοιχούν στη μεταβολή της άεργου ισχύος και της τάσης των ζυγών PQ. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όταν μεταβάλουμε την τάση στις γεννήτριες του συστήματος η άεργος ισχύς που απαιτούν τα φορτία δεν αλλάζει δηλαδή $\Delta Q_L = 0$. Έτσι η σχέση (2.1.3) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_G/V_G \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{GG} & B_{GL} \\ B_{LG} & B_{LL} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta V_G \\ \Delta V_L \end{bmatrix} \quad (2.1.4)$$

Από την σχέση (2.1.4) μπορούν να προκύψουν δυο πολύ χρήσιμες μήτρες: η μήτρα S_{LV} η οποία ήταν από την αρχή ζητούμενη αλλά και η μήτρα S_{QV} η οποία εμπεριέχει τις ευαισθησίες της παραγόμενης άεργου από της γεννήτριες ως προς την τάση των γεννητριών.

Πιο συγκεκριμένα από την δεύτερη σειρά του πίνακα της σχέσης (2.1.4) έχουμε:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{LG} * \Delta \mathbf{V}_G + \mathbf{B}_{LL} * \Delta \mathbf{V}_L &= 0 \\ \Delta \mathbf{V}_L &= -\mathbf{B}_{LL}^{-1} * \mathbf{B}_{LG} * \Delta \mathbf{V}_G \end{aligned} \quad (2.1.5)$$

οπότε μπορούμε βάσει της (2.1.5) να ορίσουμε τη μήτρα S_{LV} ως εξής:

$$\mathbf{S}_{LV} = -\mathbf{B}_{LL}^{-1} * \mathbf{B}_{LG} \quad (2.1.6)$$

Επίσης εκτελώντας της πράξεις στην πρώτη σειρά της μήτρας (2.1.4) έχουμε:

$$\Delta \mathbf{Q}_G / \mathbf{V}_G = \mathbf{B}_{GG} * \Delta \mathbf{V}_G + \mathbf{B}_{GL} * \Delta \mathbf{V}_L \quad (2.1.7)$$

αντικαθιστώντας στη σχέση (2.1.7) τη σχέση (2.1.5) προκύπτει:

$$\Delta \mathbf{Q}_G / \mathbf{V}_G = (\mathbf{B}_{GG} - \mathbf{B}_{GL} \mathbf{B}_{LL}^{-1} \mathbf{B}_{LG}) * \Delta \mathbf{V}_G \quad (2.1.8)$$

οπότε η μήτρα S_{QV} προκύπτει ως εξής:

$$\mathbf{S}_{QV} = \text{diag}(\mathbf{V}_G) * (\mathbf{B}_{GG} - \mathbf{B}_{GL} \mathbf{B}_{LL}^{-1} \mathbf{B}_{LG}) \quad (2.1.9)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μήτρα S_{QV} μας είναι ιδιαίτερα χρήσιμη ώστε να μπορούμε να ελέγξουμε αν μια μεταβολή της τάσης στις γεννήτριες θα προκαλέσει αύξηση της παραγόμενης άεργου ισχύος πάνω από το όριο της γεννήτριας οπότε και πρέπει να μην συμβεί τελικά.

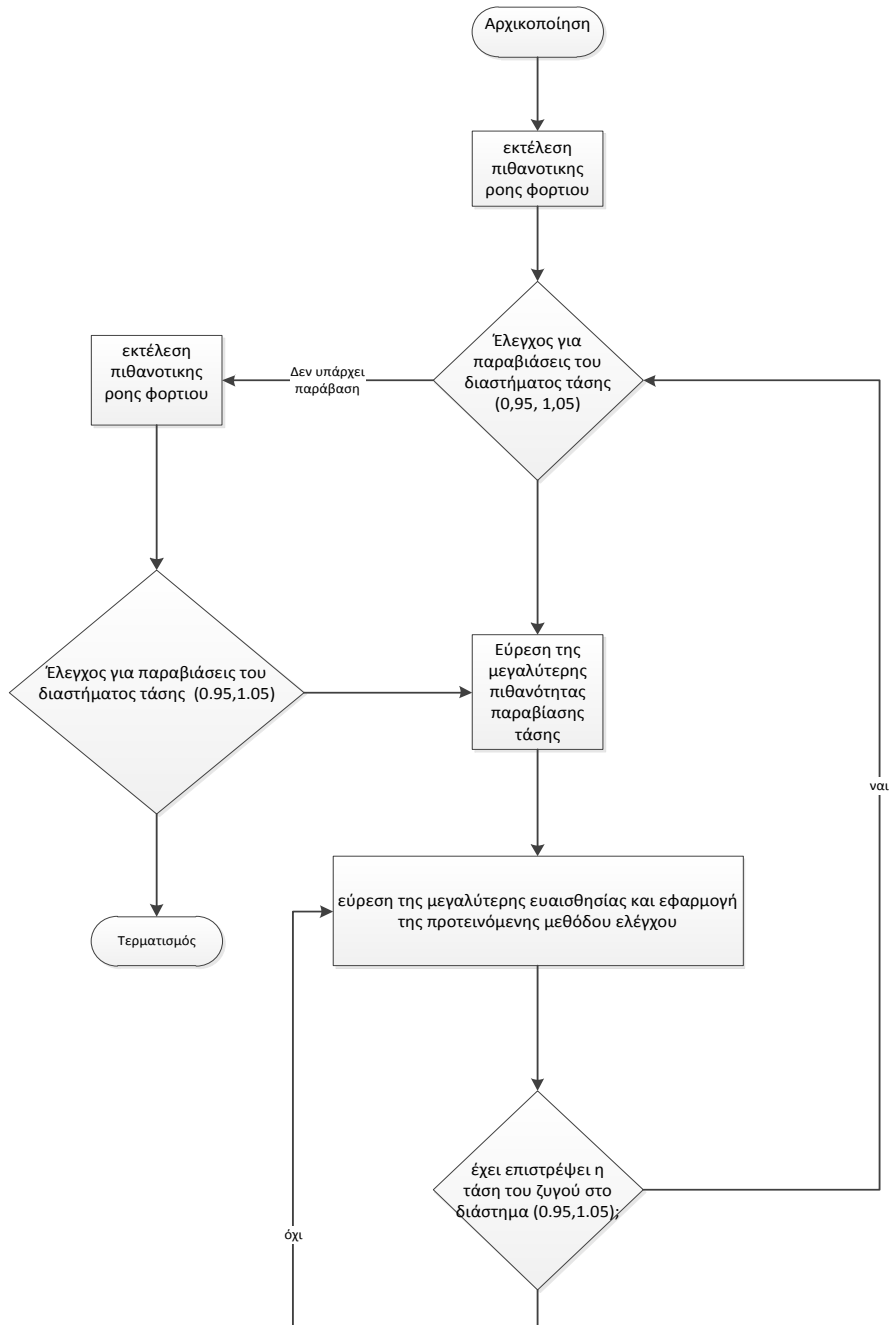
Τέλος επειδή έχουμε δύο τρόπους να εγχύσουμε άεργο ισχύ στο δίκτυο (μέσω των γεννητριών ή μέσω των πυκνωτών), θα πρέπει να περιγράψουμε ένα κανόνα που να υπαγορεύει πιο από τα δύο μέσα εγχύσεως ισχύος θα χρησιμοποιήσουμε κάθε φορά. Υπάρχουν δύο κανόνες. Ο πρώτος είναι να δώσουμε προτεραιότητα στις γεννήτριες και στην περίπτωση που οι έλεγχοι των γεννητριών αδυνατούν να εξαλείψουν την πιθανότητα παραβίαση των ορίων της τάσης να χρησιμοποιήσουμε τις συστοιχίες πυκνωτών. Ο δεύτερος τρόπος είναι να εξαγάγουμε από τον πίνακα S_{LV} τον πίνακα $\Delta V_L/\Delta Q_G$ δηλαδή τον πίνακα των ευαισθησιών των τάσεων των ζυγών PQ ως προς τις εγχεόμενες άεργες ισχύεις των γεννητριών. Ο πίνακας DV_L/DQ_G προκύπτει ως εξής:

$$\Delta V_L/\Delta Q_G = S_{LV} * S_{QV}^{-1} \quad (2.1.10)$$

Έχοντας λοιπόν τον πίνακα $\Delta V_L/\Delta Q_G$ και τον πίνακα DV/DQ που περιέχει τις ευαισθησίες των τάσεων των ζυγών PQ ως προς τις συστοιχίες πυκνωτών είναι εύκολο να συγκρίνουμε τις ευαισθησίες ως προς τον ζυγό π.χ. i που παραβιάζει τα όρια και να επιλέξουμε την μεγαλύτερη ευαισθησία.

Αξίζει να αναφερθεί ότι αν η μέθοδος αδυνατεί να βρει λύση εντός των αρχικών επιτρεπτών ορίων, χαλαρώνονται τα όρια και επιχειρείται εκ νέου να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα παραβίασης των νέων ορίων της τάσης χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο.

Στο Σχήμα 2.1.1 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής της μεθόδου που ακολουθείται για ρύθμιση τάσης σ' αυτό το κεφάλαιο.



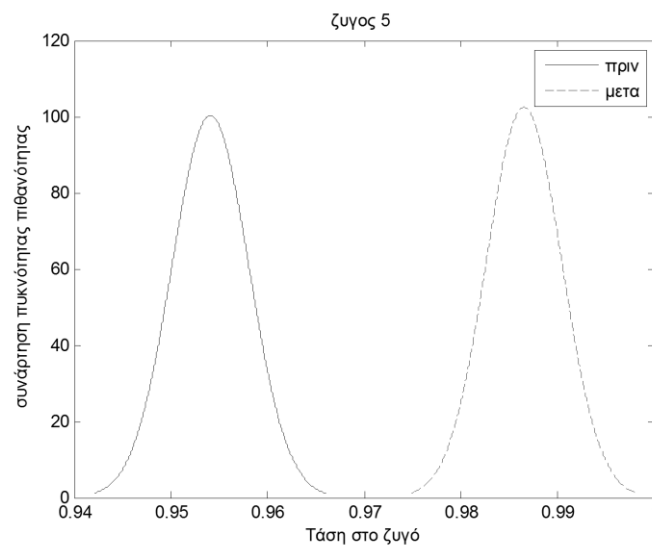
Σχήμα 2.1.2: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ρύθμισης τάσης με την μέθοδο ανάλυσης ευαισθησίας

2.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

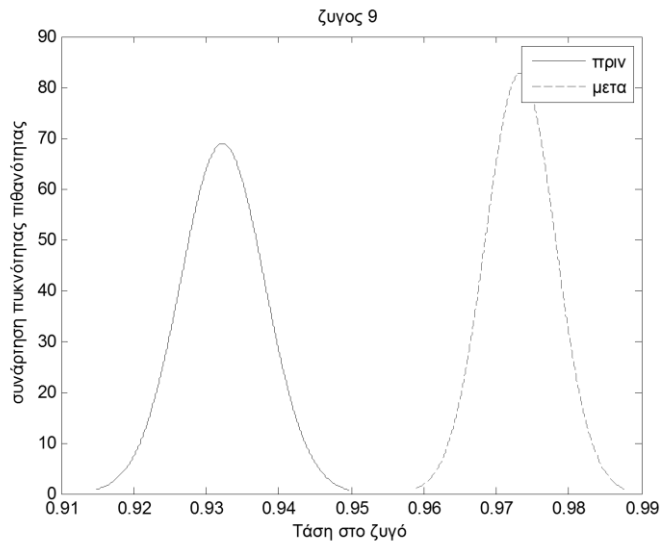
Ο έλεγχος τάσης με την μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας χρησιμοποιήθηκε σε 4 δίκτυα της IEEE πιο συγκεκριμένα στα δίκτυα 9,30, 57 και 118 ζυγών. Παρακάτω δίνονται η αύξηση φορτίου που επιβλήθηκε στο κάθε δίκτυο ώστε να εμφανίζεται πιθανότητα παραβίασης των ορίων της τάσης και η σ.π.π. και α.σ.π. (αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας) των τάσεων κάθε ζυγού που παραβίασε κάποιο όριο πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου.

Δίκτυο 9 ζυγών της IEEE

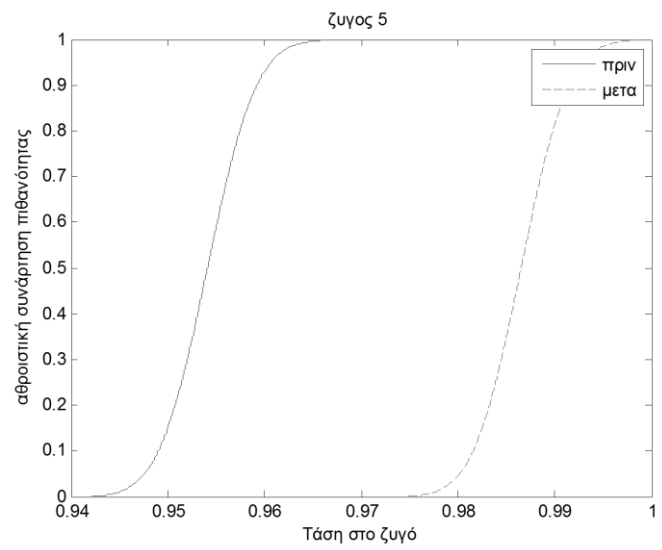
Παρακάτω φαίνονται οι σ.π.π. και οι α.σ.π. των τάσεων του δικτύου 9_ζυγών της IEEE. Στο δίκτυο 9 ζυγών της IEEE πραγματοποιείται αύξηση φορτίου 30% του βασικού σεναρίου.



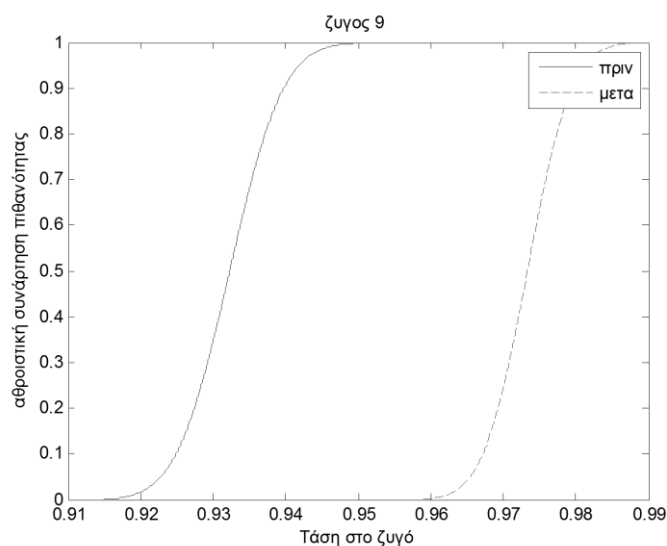
Σχήμα 2.2.1: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 5



Σχήμα 2.2.2: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 9



Σχήμα 2.2.3: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 5



Σχήμα 2.2.4: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 9

Όπως φαίνεται από τις σ.π.π. και τις α.σ.π. οι 5 και 9 παραβιάζουν τα επιτρεπτά όρια της τάσης χωρίς την εφαρμογή ελέγχων.. Χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο καταφέραμε να τους επαναφέρουμε στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας. Οι έλεγχοι που έγιναν φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Γεννήτριες

Πίνακας 2.2.1: Τάσεις γεννητριών στο δίκτυο 9 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Αρχική τιμή τάσης (α.μ)	Τελική τιμή τάσης (α.μ)	Μεταβολή τιμής τάσης (α.μ)
2	1	1,05	0,050
3	1	1,05	0,050

Συστοιχίες Πυκνωτών

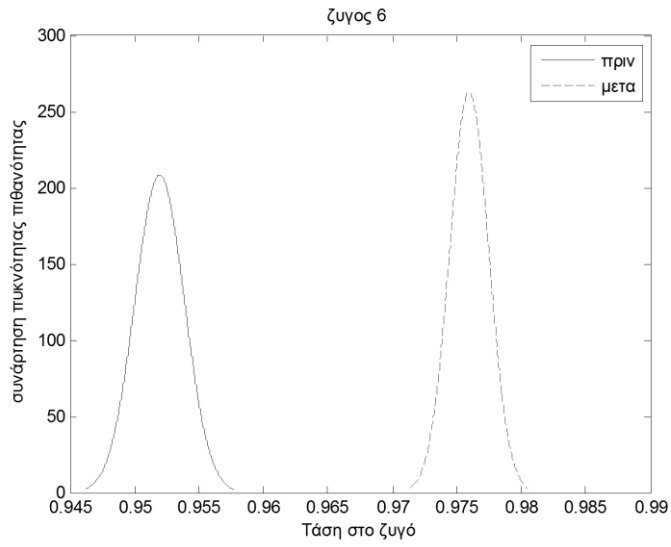
Η αντιστάθμιση γίνεται με συστοιχίες πυκνωτών με μέγιστο αριθμό βημάτων 24 και εγγεόμενη άεργη ισχύ ανά βήμα 0,5 MVar.

Πίνακας 2.2.2: Εγγεόμενη άεργος ισχύς πυκνωτών στο δίκτυο 9 ζυγών της IEEE

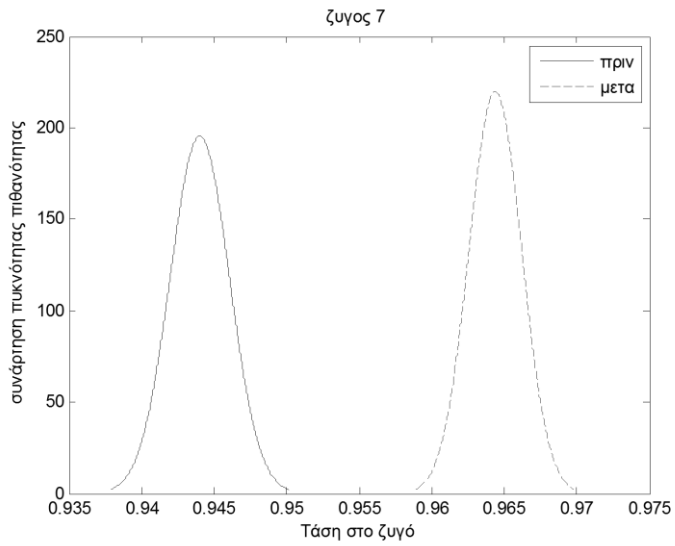
ζυγός	Βήματα των πυκνωτών	Εγγεόμενη ισχύς (MVar)
5	3	1,5
9	24	12

Δίκτυο 30 ζυγών της IEEE

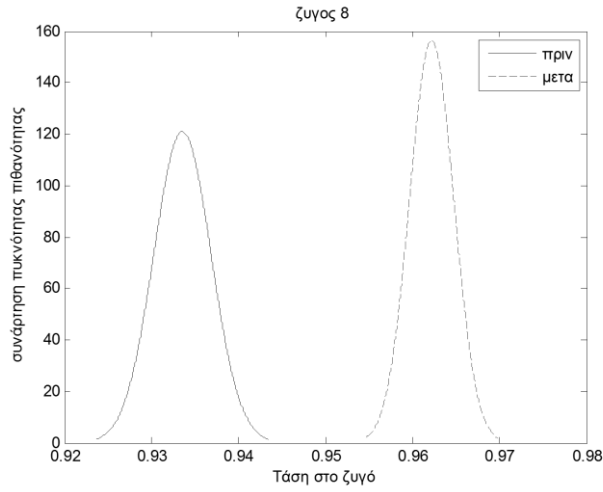
Παρακάτω φαίνονται οι σ.π.π. και οι α.σ.π. των τάσεων του δικτύου 30 ζυγών της IEEE. Στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE πραγματοποιείται αύξηση φορτίου 40% του βασικού σεναρίου.



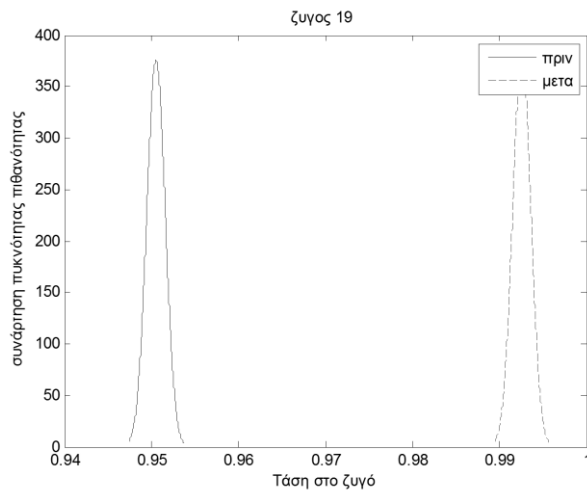
Σχήμα 2.2.5: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 6



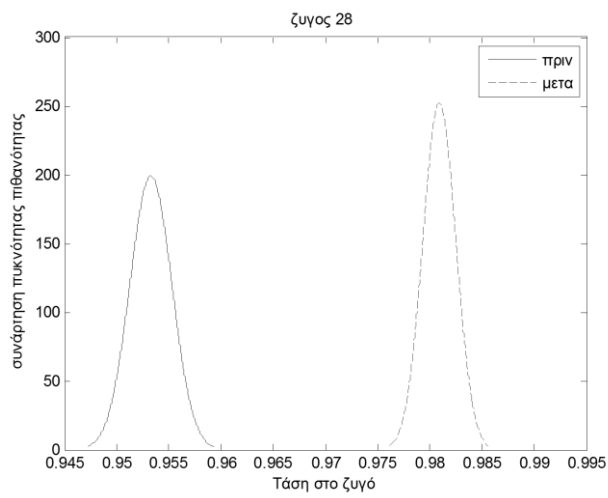
Σχήμα 2.2.6: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 7



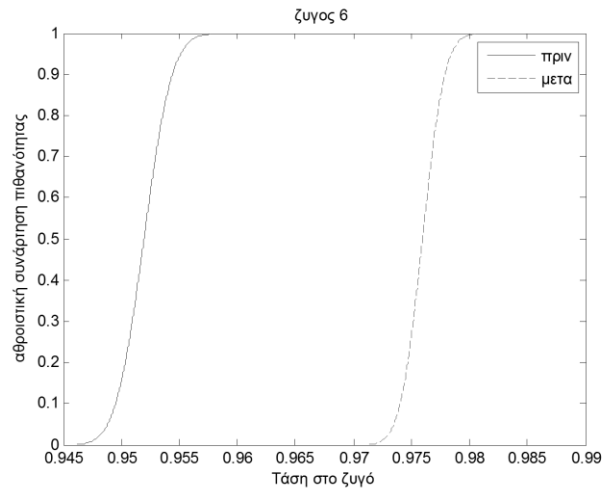
Σχήμα 2.2.7: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 8



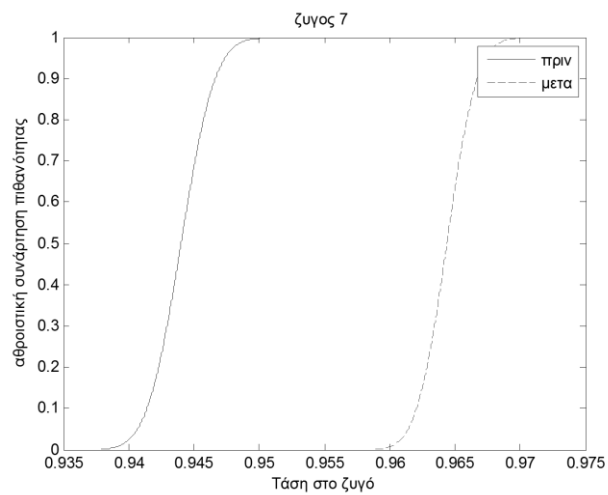
Σχήμα 2.2.8: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 19



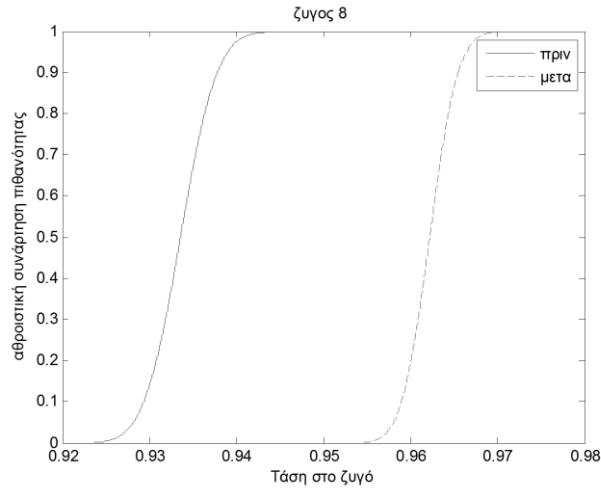
Σχήμα 2.2.9: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 28



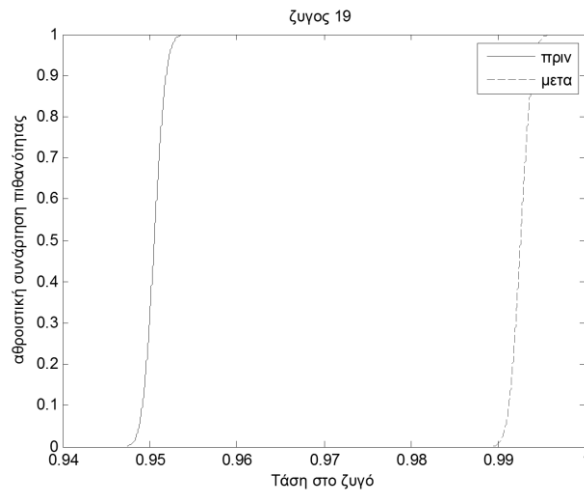
Σχήμα 2.2.10: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 6



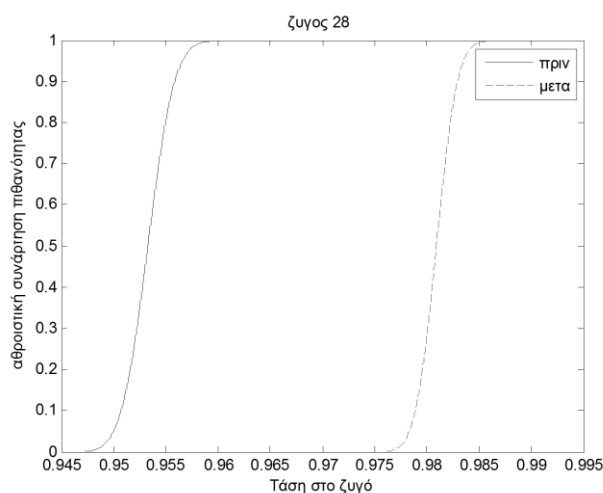
Σχήμα 2.2.11: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 7



Σχήμα 2.2.12: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 8



Σχήμα 2.2.13: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 19



Σχήμα 2.2.14: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 28

Όπως φαίνεται από τις σ.π.π. και τις α.σ.π. οι ζυγοί 6,7,8,19,28 παραβιάζουν τα επιτρεπτά όρια της τάσης χωρίς την εφαρμογή ελέγχων.. Χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο καταφέραμε να τους επαναφέρουμε στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας. Οι έλεγχοι που έγιναν φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Γεννήτριες

Πίνακας 2.2.3: Τάσεις γεννητριών στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Αρχική τιμή τάσης (α.μ)	Τελική τιμή τάσης (α.μ)	Μεταβολή τιμής τάσης (α.μ)
13	1	1,05	0,050
22	1	1,05	0,050
23	1	1,05	0,050
27	1	1,05	0,050

Συστοιχίες Πυκνωτών

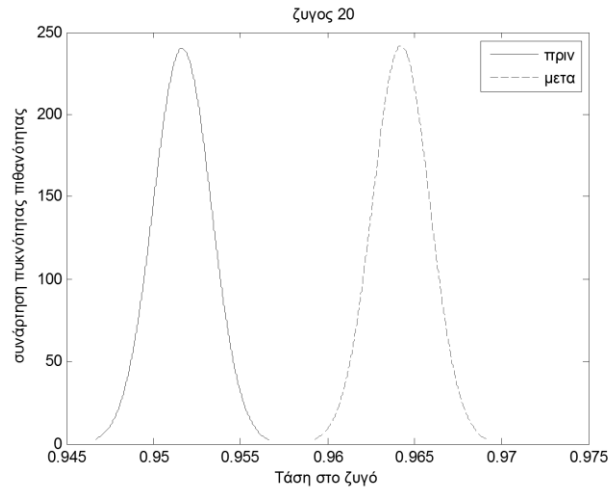
Η αντιστάθμιση γίνεται με συστοιχίες πυκνωτών με μέγιστο αριθμό βημάτων 24 και εγγεόμενη άεργη ισχύ ανά βήμα 0,5 MVar.

Πίνακας 2.2.4: Εγγεόμενη άεργος ισχύς πυκνωτών στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE

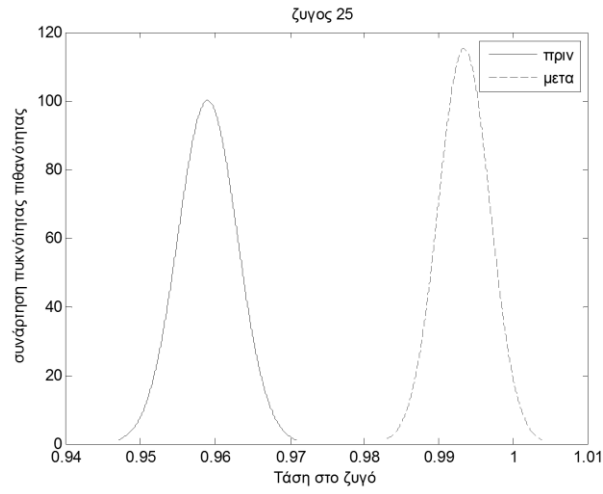
Ζυγός	Βήματα των πυκνωτών	Εγγεόμενη ισχύς (MVar)
8	20	10

Δίκτυο 57 ζυγών της IEEE

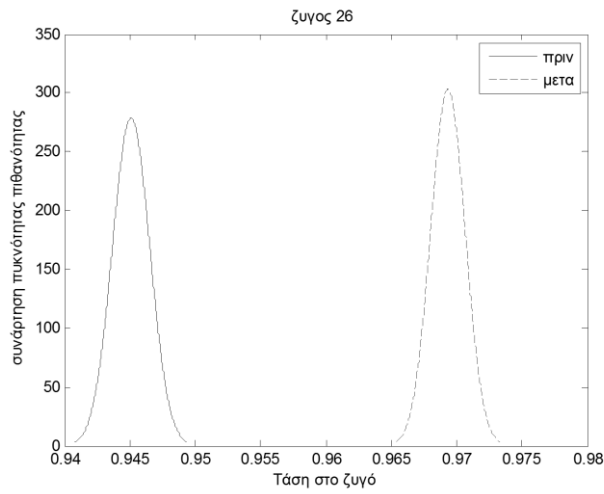
Παρακάτω φαίνονται οι σ.π.π. και οι α.σ.π. των τάσεων του δικτύου 57 ζυγών της IEEE. Στο δίκτυο 57 ζυγών της IEEE πραγματοποιείται αύξηση φορτίου 10% του βασικού σεναρίου.



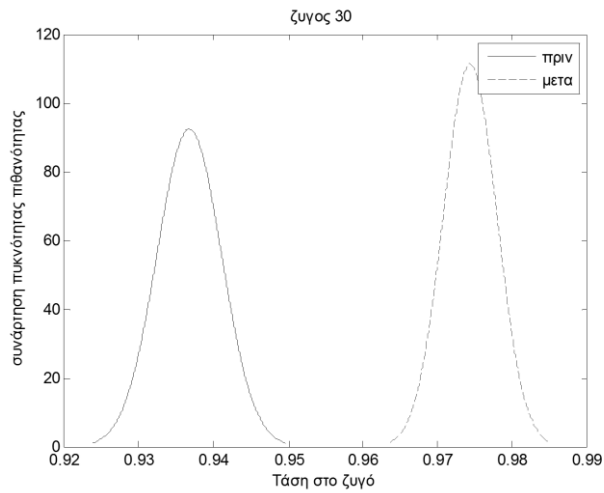
Σχήμα 2.2.15: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 20



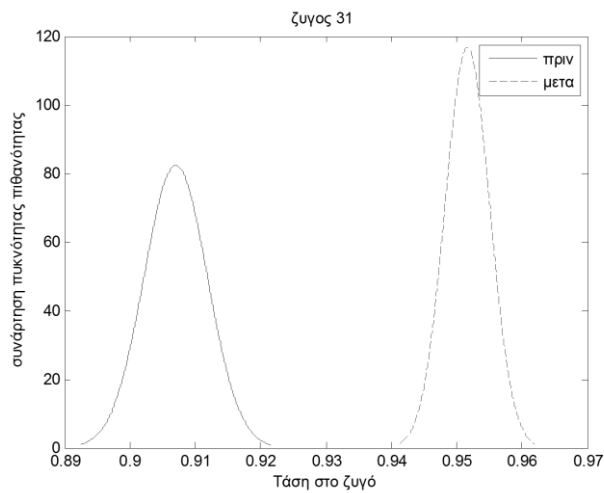
Σχήμα 2.2.16: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 25



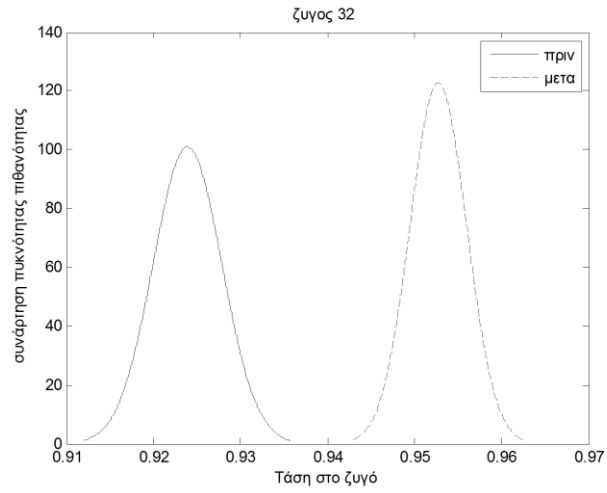
Σχήμα 2.2.17: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 26



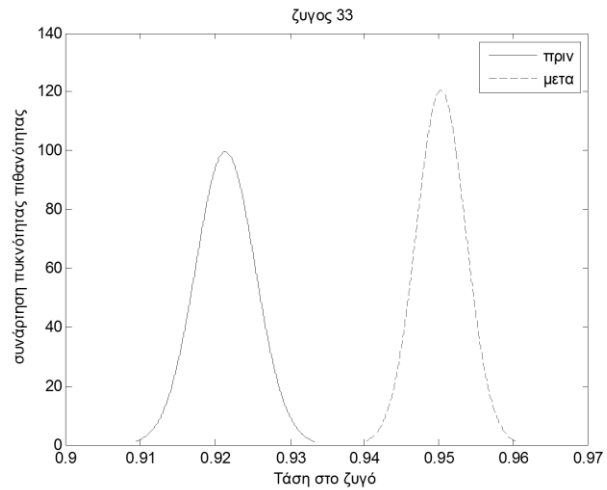
Σχήμα 2.2.18: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 30



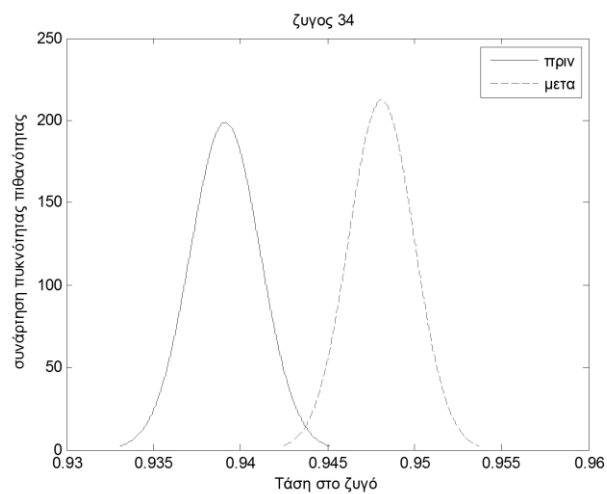
Σχήμα 2.2.19: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 31



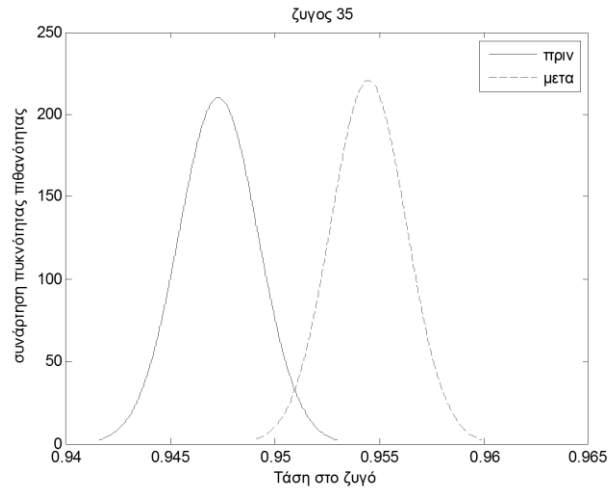
Σχήμα 2.2.20: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 32



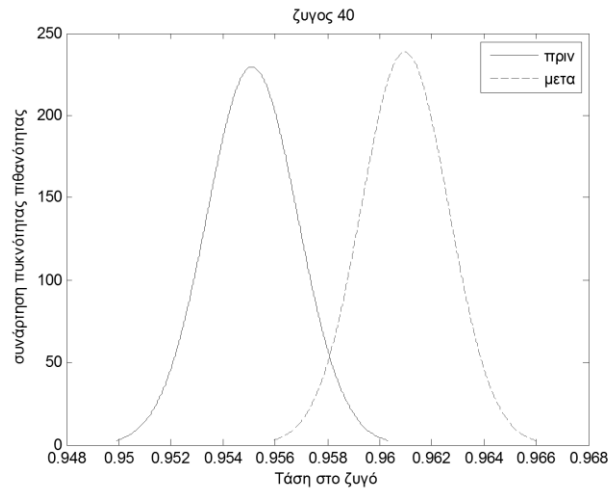
Σχήμα 2.2.21: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 33



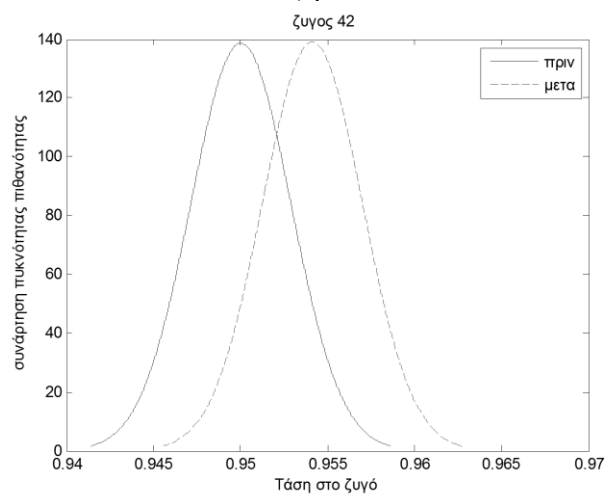
Σχήμα 2.2.22: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 34



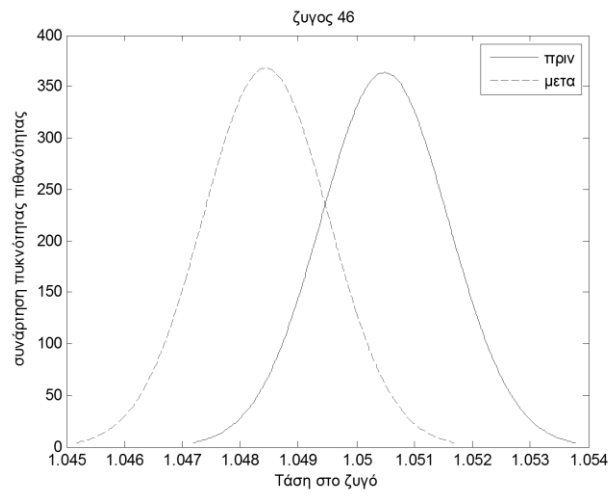
Σχήμα 2.2.23: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 35



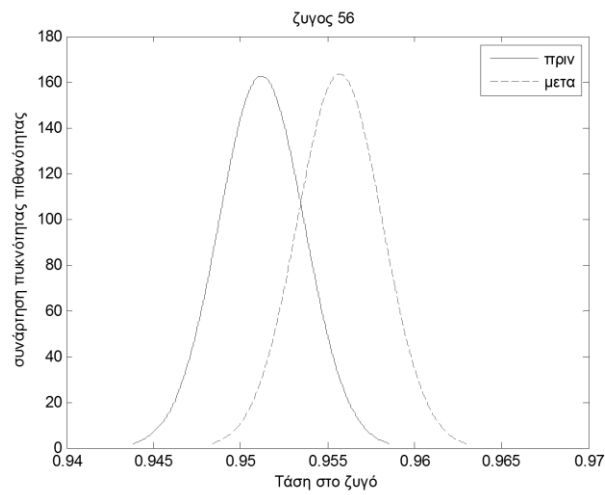
Σχήμα 2.2.24: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 40



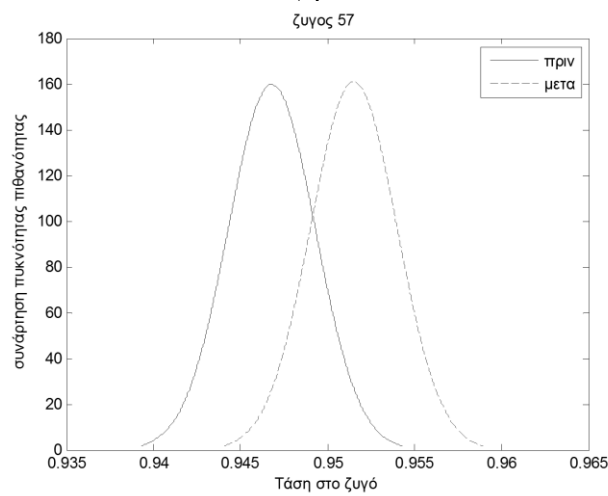
Σχήμα 2.2.25: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 42



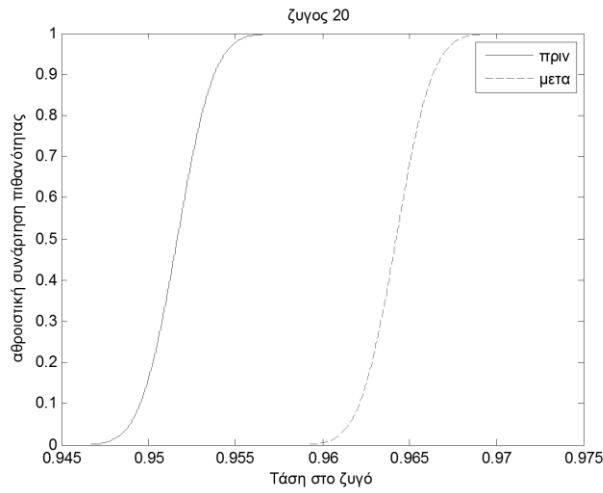
Σχήμα 2.2.26: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 46



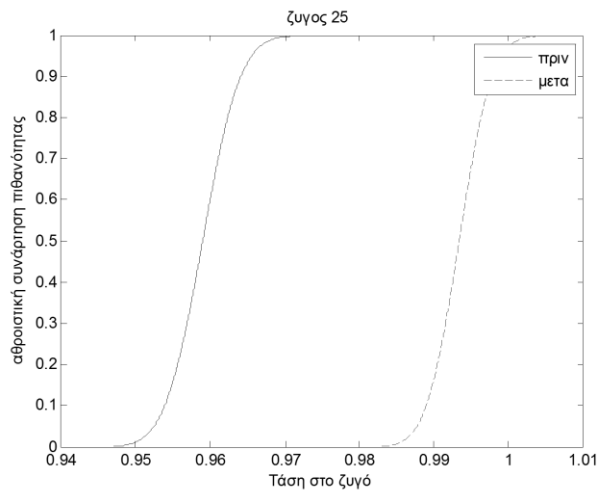
Σχήμα 2.2.27: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 56



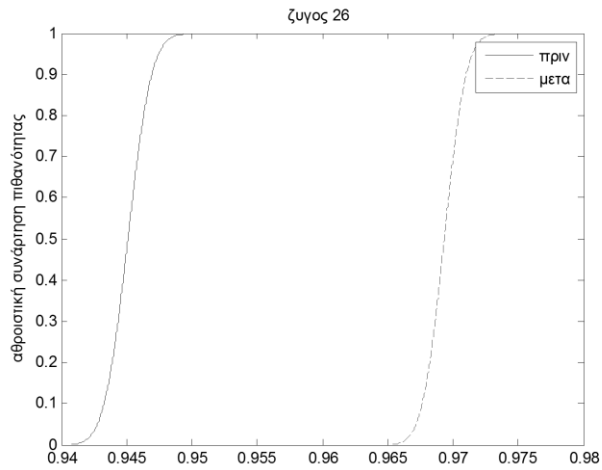
Σχήμα 2.2.28: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 57



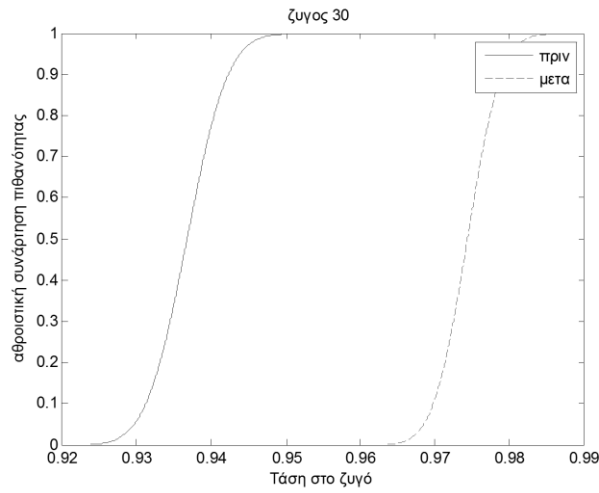
Σχήμα 2.2.29: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 20



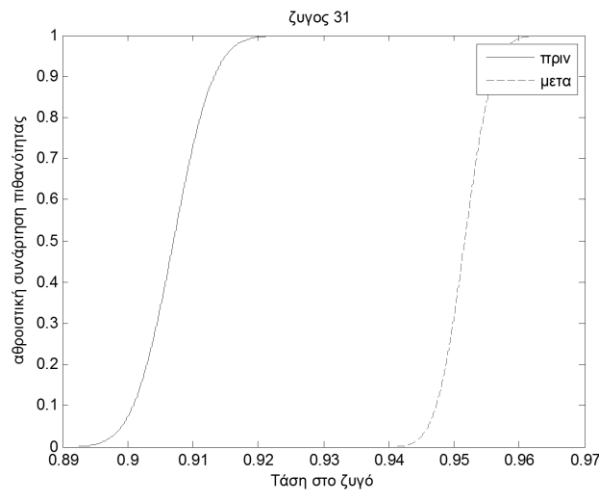
Σχήμα 2.2.30: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 25



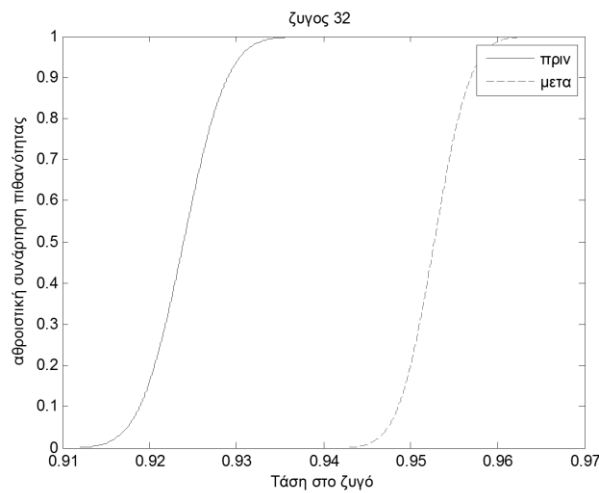
Σχήμα 2.2.31: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 26



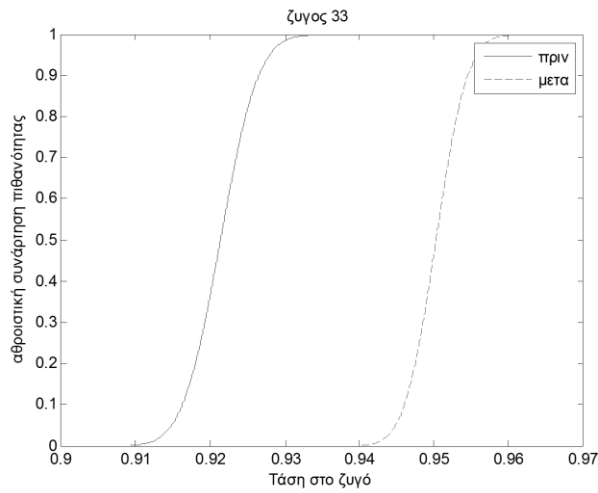
Σχήμα 2.2.32: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 30



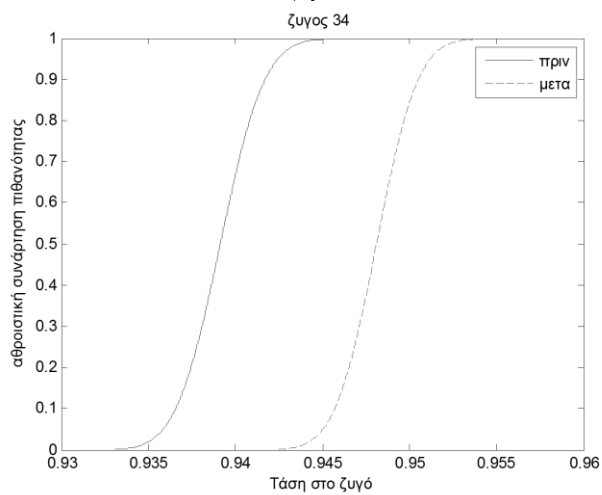
Σχήμα 2.2.33: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 31



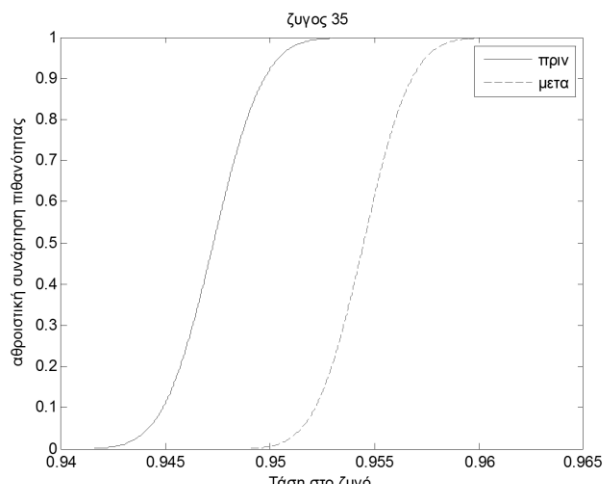
Σχήμα 2.2.34: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 32



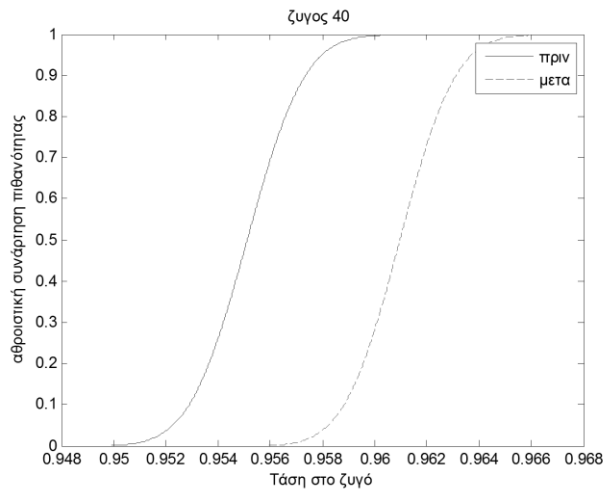
Σχήμα 2.2.35: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 33



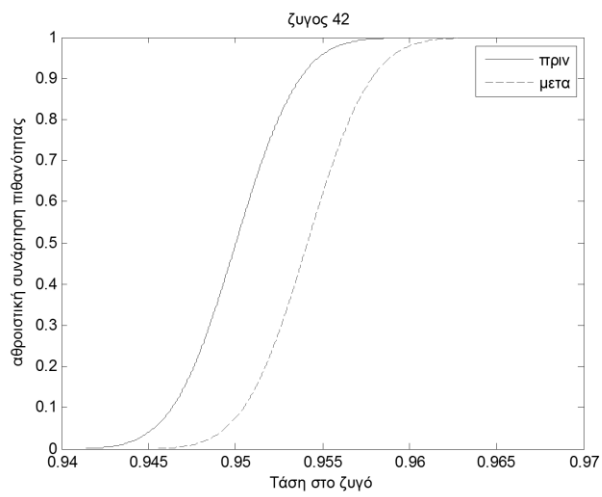
Σχήμα 2.2.36: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 34



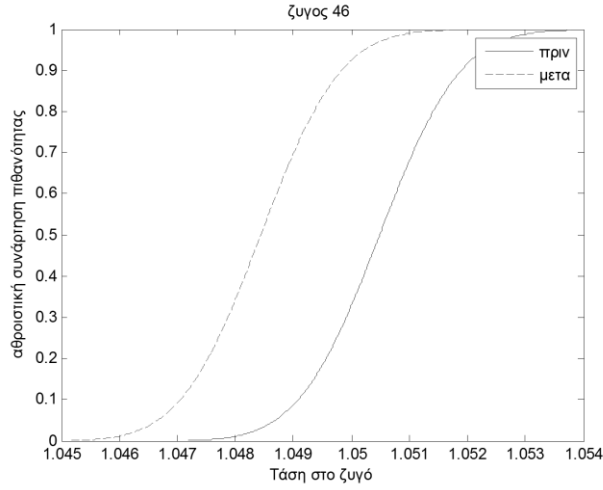
Σχήμα 2.2.37: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 35



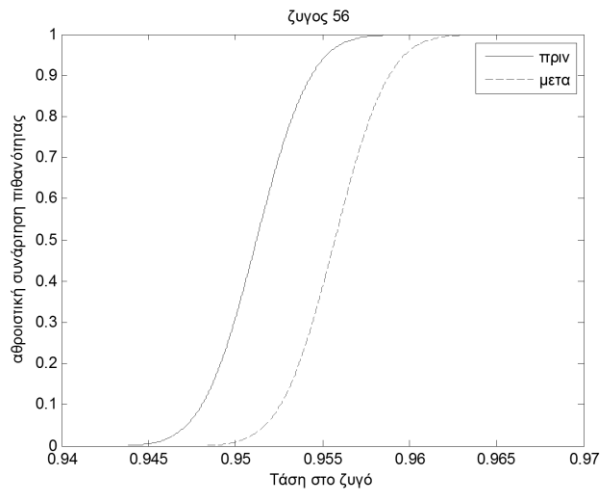
Σχήμα 2.2.38: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 40



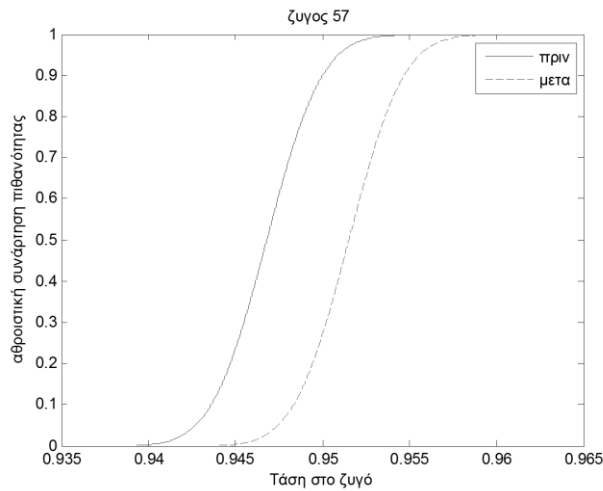
Σχήμα 2.2.39: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 42



Σχήμα 2.2.40: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 46



Σχήμα 2.2.41: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 56



Σχήμα 2.2.42: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 57

Όπως φαίνεται από τις σ.π.π. και τις α.σ.π. οι ζυγοί 20,25,26,30, 31, 32, 33, 34, 35,40,42,56,57 παραβιάζουν τα επιτρεπτά όρια της τάσης χωρίς την εφαρμογή ελέγχων. Χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο δεν καταφέραμε να τους επαναφέρουμε στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας. Σε σχέση μάλιστα με τις άλλες μεθόδους που θα αναπτύξουμε στα επόμενα εδώ έχουμε τα χειρότερα αποτελέσματα. Όλες οι τάσεις βρίσκονται στο διάστημα (0.94,1.065). Οι ρυθμίσεις που έγιναν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Γεννητριες

Πίνακας 2.2.5: Τάσεις γεννητριών στο δίκτυο 57 ζυγών της IEEE

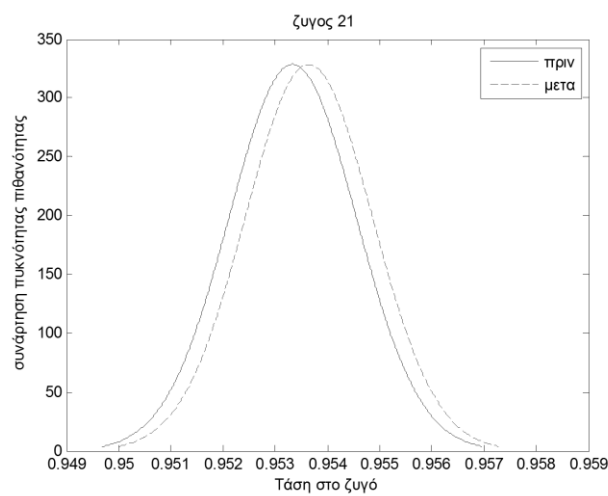
Ζυγός	Αρχική τιμή τάσης (α.μ)	Τελική τιμή τάσης (α.μ)	Μεταβολή τιμής τάσης (α.μ)
2	1,0100	1,0125	0,0025
3	0,9850	1,0098	0,0248
6	0,9800	0,9996	0,0196
8	1,0050	1,065	0,0600
12	1,0150	0,9634	-0,0516

Συστοιχίες Πυκνωτών:

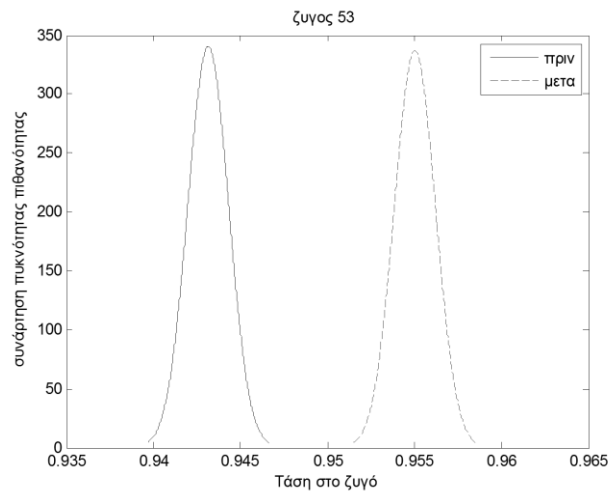
Η αντιστάθμιση γίνεται με συστοιχίες πυκνωτών με μέγιστο αριθμό βημάτων 24 και εγχεόμενη άεργη ισχύ ανά βήμα 0,5 MVar. Στη συσγκεκριμένη περίπτωση δεν προτάθηκε από τη μέθοδο αντιστάθμιση πυκνωτών.

Δίκτυο 118 ζυγών της IEEE

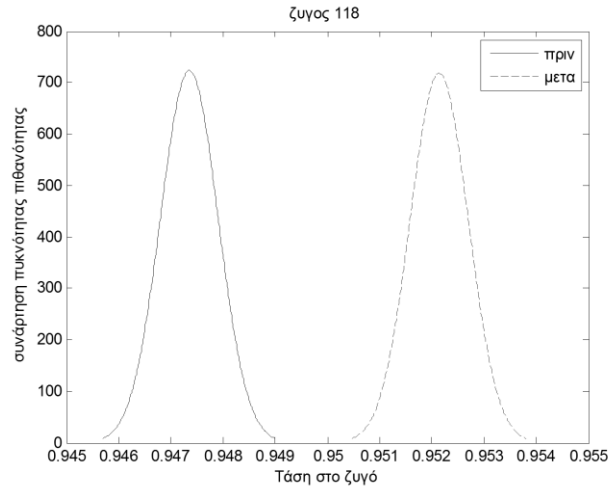
Παρακάτω φαίνονται οι σ.π.π. και οι α.σ.π. των τάσεων του δικτύου 118 ζυγών της IEEE. Στο δίκτυο 118 ζυγών της IEEE πραγματοποιείται αύξηση φορτίου 10% του βασικού σεναρίου.



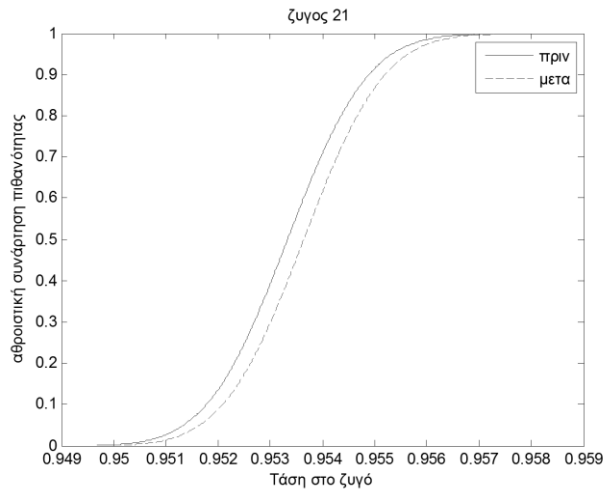
Σχήμα 2.2.43: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 21



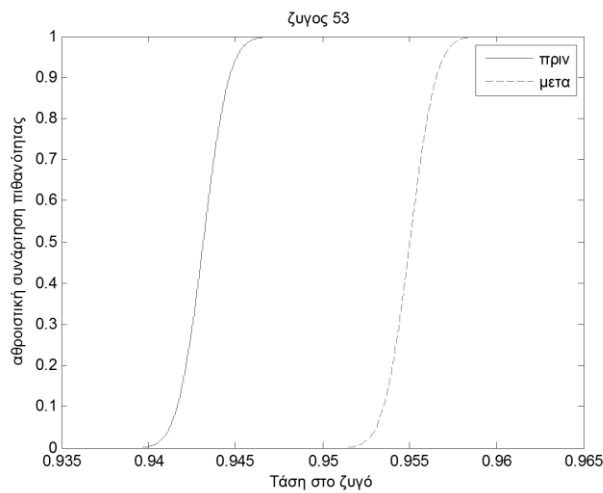
Σχήμα 2.2.44: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 53



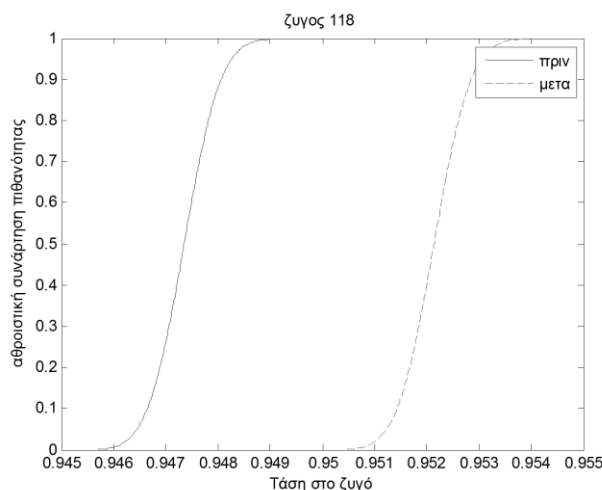
Σχήμα 2.2.45: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 118



Σχήμα 2.2.46: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 21



Σχήμα 2.2.47: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 53



Σχήμα 2.2.48: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 118

Όπως φαίνεται από τις σ.π.π. και τις α.σ.π. οι ζυγοί 21,53,118 παραβιάζουν τα επιτρεπτά όρια της τάσης χωρίς την εφαρμογή ελέγχων.. Χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο καταφέραμε να τους επαναφέρουμε στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας. Οι έλεγχοι που έγιναν φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Γεννητριες

Πίνακας 2.2.6: Τάσεις γεννητριών στο δίκτυο 118 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Αρχική τιμή τάσης (α.μ)	Μεταβολή τιμής τάσης (α.μ)	Τελική τιμή τάσης (α.μ)
1	0,998	0,052	1,05
10	0,990	0,060	1,05
19	0,992	0,0005	0,9925
54	0,952	0,014	0,9664
74	0,958	0,003	0,961
76	0,943	0,010	0,953

Συστοιχίες Πυκνωτών

Για την διόρθωση της τάσης στους τρεις ζυγούς που ήταν εκτός ορίων δεν χρησιμοποιήθηκε αντιστάθμιση με συστοιχίες πυκνωτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΜΕΙΚΤΟΥ ΑΚΕΡΑΙΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ (MILP)

3.1 Περιγραφή της μεθόδου

Ο μικτός ακεραίος γραμμικός προγραμματισμός είναι μια μέθοδος επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται κατά κόρον όταν στις μεταβλητές του προβλήματος συμπεριλαμβάνονται μεταβλητές που παίρνουν ακέραιες και συνεχείς τιμές[10]. Κάθε πρόβλημα μικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού χωρίζεται στα εξής μέρη, η μοντελοποίηση των οποίων αλλάζει βέβαια από πρόβλημα σε πρόβλημα:

- Αντικειμενική συνάρτηση. Η συνάρτηση που θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε ή να μεγιστοποιήσουμε.
- Περιορισμοί. Οι περιορισμοί που υπάρχουν για τις μεταβλητές του κάθε προβλήματος. Μέσα σ' αυτούς τους περιορισμούς στο μικτό ακεραίο γραμμικό προγραμματισμό είναι και το γεγονός ότι κάποιες μεταβλητές παίρνουν ακέραιες μόνο τιμές.

Τόσο η αντικειμενική συνάρτηση όσο και οι περιορισμοί του εκάστοτε προβλήματος οφείλουν να είναι γραμμικές σχέσεις.

Μοντελοποίηση του προβλήματος:

Θα παρουσιάσουμε την μοντελοποίηση του προβλήματος για την εύρεση των λιγότερων μέσων αντιστάθμισης που χρειάζονται για να επαναφέρουμε το ΣΗΕ στην ομαλή κατάσταση λειτουργίας. Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι δίνουμε προτεραιότητα στην ένταξη των γεννητριών έναντι των συστοιχιών των πυκνωτών. Στα παρακάτω θα βασιστούμε και σ' αυτά που έχουμε παρουσιάσει στο κεφάλαιο 2 αυτής της

διπλωματικής οπότε αν κάτι δεν παρουσιάζεται εδώ με όλη του την λεπτομέρεια ο αναγνώστης καλείται να ανατρέξει στο κεφάλαιο αυτό.

Κατ' αρχήν λοιπόν θα πρέπει να οριστεί το διάνυσμα των μεταβλητών του προβλήματος. Το διάνυσμα αυτό επιλέχθηκε να αποτελείται από τις τάσεις των γεννητριών (συνεχείς τιμές) των ζυγών PV και τα βήματα των πυκνωτών (ακέραιες τιμές) στους ζυγούς PQ που έχουμε επιλέξει. Δηλαδή:

$$x = \begin{bmatrix} \Delta V_{gen} \\ Cap_{step} \end{bmatrix} \quad (3.1.1)$$

Στην συνέχεια θα ορίσουμε την αντικειμενική συνάρτηση που θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε [11]. Μία λογική επιλογή είναι η εξής:

$$f = [w_1 * diag(S_{QV}) | w_2 * Qcap_{step(pu)}] \quad (3.1.2)$$

όπου:

$diag(S_{QV})$: το διάνυσμα που έχει σαν στοιχεία τα στοιχεία τις διαγωνίου του πίνακα S_{QV} .

$Qcap_{step(pu)}$: η ανά μονάδα τιμή της εγχεόμενης άεργου ισχύος που επιφέρει η μοναδιαία αύξηση του βήματος ενός πυκνωτή.

w_1, w_2 : Τα βάρη που εισάγουμε στην αντικειμενική συνάρτηση.

Αφού σκοπός μας είναι να δίνουμε προτεραιότητα στις γεννήτριες έναντι των πυκνωτών θα πρέπει να θέσουμε $w_1 < w_2$ έτσι ώστε η αντικειμενική συνάρτησή μας να αυξάνεται περισσότερο όταν αναγκάζεται να χρησιμοποιήσει κάποια συστοιχία πυκνωτών για να διορθώσει την τάση.

Το πιο περίπλοκο κομμάτι αφορά τους περιορισμούς. Θα αναφερθούμε πρώτα στους περιορισμούς και θα προσπαθήσουμε περιγραφικά στην αρχή και μετά αναλυτικά να τους παρουσιάσουμε. Κατ' αρχάς οι περιορισμοί οι οποίοι έχουμε είναι οι εξής:

- Περιορισμοί για τις τάσεις των ζυγών PQ. Θέλουμε η σ.π.π. της τάσης των ζυγών PQ να είναι μέσα στα όρια (0.95,1.05).
- Περιορισμοί στην παραγωγή άεργου από τις γεννήτριες.
- Περιορισμοί για την μεταβολή της τάσης στους ζυγούς PV. Αυτοί οι περιορισμοί προέρχονται από το γεγονός ότι η τάση των γεννητριών μπορεί να φτάσει μόνο μέχρι το 1,05 της ονομαστικής της τιμής.
- Περιορισμοί στα βήματα των πυκνωτών. Το βήμα κάθε συστοιχίας πυκνωτών πρέπει να είναι από 0 έως το μέγιστο βήμα που αντιστοιχεί στην μέγιστη εγγεόμενη ισχύ από τον πυκνωτή.

Οι τελευταίες δύο μορφές περιορισμών δεν χρειάζονται περαιτέρω επεξήγηση για την υλοποίησή τους. Για τις δύο πρώτες παρόλα αυτά θα πρέπει να επεκταθούμε λίγο παραπάνω.

Στον μικτό ακέραιο προγραμματισμό οι περιορισμοί παίρνουν την μορφή: $Ax \leq b$. Για τους περιορισμούς τάσεις στους ζυγούς PQ λοιπόν έχουμε [18]:

$$\begin{bmatrix} V_{PQconstraints} \\ -V_{PQconstraints} \end{bmatrix} * x \leq \begin{bmatrix} DVhigh \\ -DVlow \end{bmatrix} \quad (3.1.3)$$

όπου :

- DV_{high} :** Το διάνυσμα που περιέχει την διαφορά της μεγαλύτερης τιμής της τάσης του εκάστοτε ζυγού PQ από το 1,05 α.μ.
- DV_{low} :** Το διάνυσμα που περιέχει την διαφορά της μικρότερης τιμής της τάσης του εκάστοτε ζυγού PQ από το 0,95 α.μ.

Ο πίνακας $V_{PQconstraints}$ σχηματίζεται ως εξής:

$$V_{PQconstraints} = [\Delta V_L / \Delta V_G \mid Q_{cap_{step(pu)}} * DV / DQ] \quad (3.1.4)$$

όπου:

- $\Delta V_L / \Delta Q_G$:** Ο πίνακας των ευαισθησιών των τάσεων των ζυγών PQ από τις τάσεις των γεννητριών όπως δίνεται από τη σχέση (2.1.9).
- DV / DQ :** Ο πίνακας των ευαισθησιών μόνο όμως για τους ζυγούς PQ που διαθέτουν συστοιχίες πυκνωτών.

Αυτό που μας μένει ακόμα να διατυπώσουμε είναι οι περιορισμοί για την παραγόμενη άεργο ισχύ των γεννητριών οι οποίοι παίρνουν την μορφή:

$$[S_{QV} \quad 0] * x \leq [DQ_{max}] \quad (3.1.5)$$

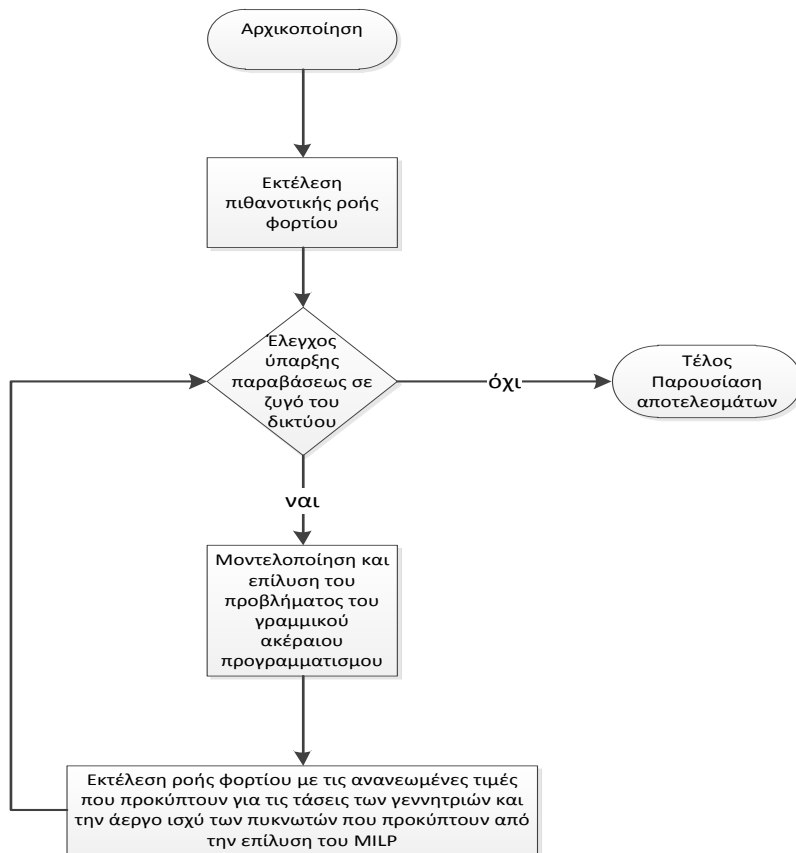
όπου:

- S_{QV} :** Η ευαισθησία της παραγόμενης άεργου ισχύος των γεννητριών ως προς την τάση τους όπως δίνεται και απ' τον τύπο (2.1.9).
- DQ_{max} :** Η διαφορά της προσφερόμενης άεργου ισχύος που υπολογίζεται από τη ροή φορτίου από τη μέγιστη άεργο ισχύ που μπορεί να προσφέρει η γεννήτρια.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν τα παραπάνω και φέρνοντας τα στη μορφή:

$$\begin{aligned} & \text{minimize } f*x \\ & \text{subject to } A*x \leq b \end{aligned}$$

έχουμε μοντελοποιήσει το πρόβλημα του μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού που θέλουμε να λύσουμε. Ο αλγόριθμος ελέγχου παρουσιάζεται ως διάγραμμα ροής στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1.1: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ρύθμισης τάσης με την μέθοδο του μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού

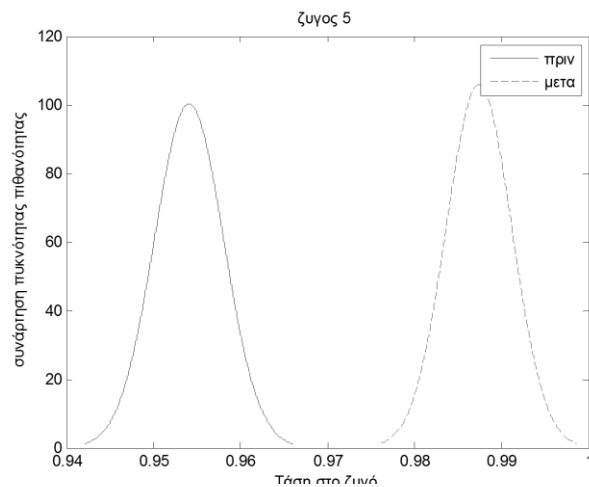
Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο αν η μέθοδος αδυνατεί να βρει λύση εντός των αρχικών επιτρεπτών ορίων, χαλαρώνονται τα όρια με ένα σταθερό βήμα (0,0025 α.μ.) μέχρι να βρεθεί λύση από τον αλγόριθμο MILP. Σε κάθε επανάληψη χαλαρώνονται τα άνω και τα κάτω όρια διαδοχικά. Σε περίπτωση που βρεθεί λύση και ένα από τα δύο όρια (άνω και κάτω) παρουσιάζει μεγαλύτερη χαλάρωση εφαρμόζεται αντίθετη χαλάρωση ορίων και επιλέγεται η λύση με την μικρότερη πιθανότητα παραβίασης τάσης. Κάθε φορά η πιθανότητα παραβίασης τάσης ελέγχεται βάσει των προκαθορισμένων ορίων (0,95, 1,05).

3.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

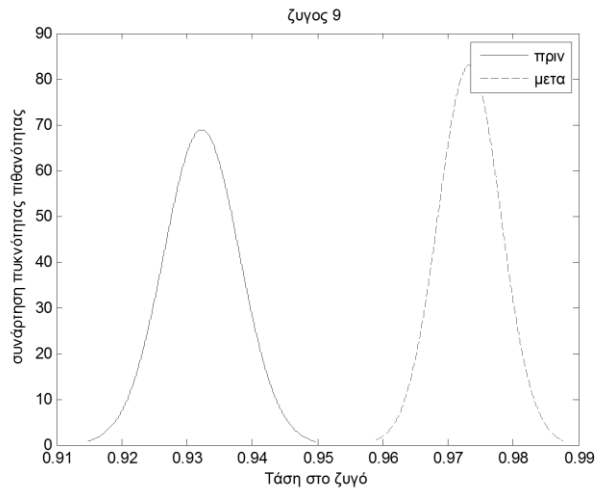
Η μέθοδος που περιγράφηκε παραπάνω χρησιμοποιήθηκε σε 4 πρότυπα δίκτυα της IEEE πιο συγκεκριμένα στα δίκτυα 9, 30, 57 και 118 ζυγών της IEEE. Παρακάτω δίνονται η αύξηση του φορτίου που επιβλήθηκε στο κάθε δίκτυο και η σ.π.π και α.σ.π. της τάσης κάθε ζυγού που παραβίασε κάποιο όριο πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου.

Δίκτυο 9 ζυγών της IEEE

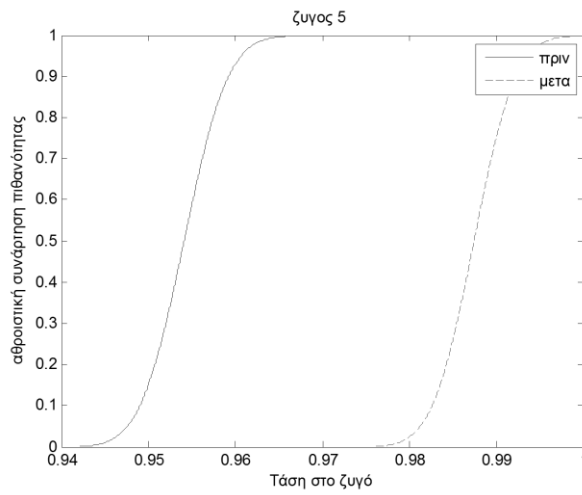
Παρακάτω φαίνονται οι σ.π.π. και οι α.σ.π. των τάσεων του δικτύου 9 ζυγών της IEEE. Στο δίκτυο 9 ζυγών της IEEE πραγματοποιείται αύξηση φορτίου 30% του βασικού σεναρίου.



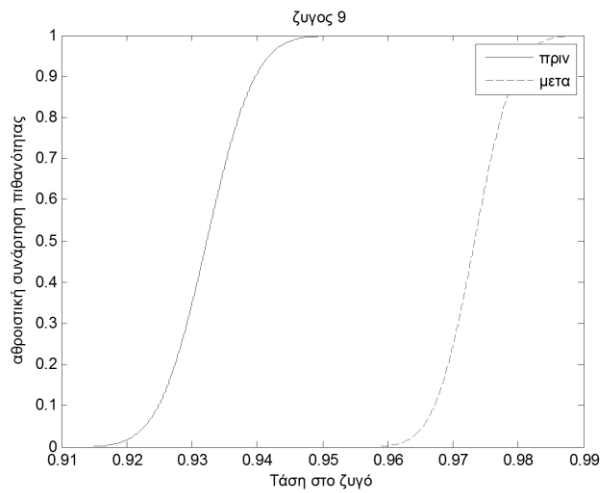
Σχήμα 3.2.1: : Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 5



Σχήμα 3.2.2: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 9



Σχήμα 3.2.3: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 5



Σχήμα 3.2.4: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 9

Όπως φαίνεται από τις σ.π.π. και τις α.σ.π. οι 5 και 9 παραβιάζουν τα επιτρεπτά όρια της τάσης χωρίς την εφαρμογή ελέγχων. Χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο καταφέραμε να τους επαναφέρουμε στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας. Οι έλεγχοι που έγιναν φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Γεννήτριες

Πίνακας 3.2.1: Τάσεις γεννητριών στο δίκτυο 9 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Αρχική τιμή τάσης (α.μ)	Τελική τιμή τάσης (α.μ)	Μεταβολή τιμής τάσης (α.μ)
2	1	1,05	0,0500
3	1	1,0498	0,0498

Συστοιχίες Πυκνωτών

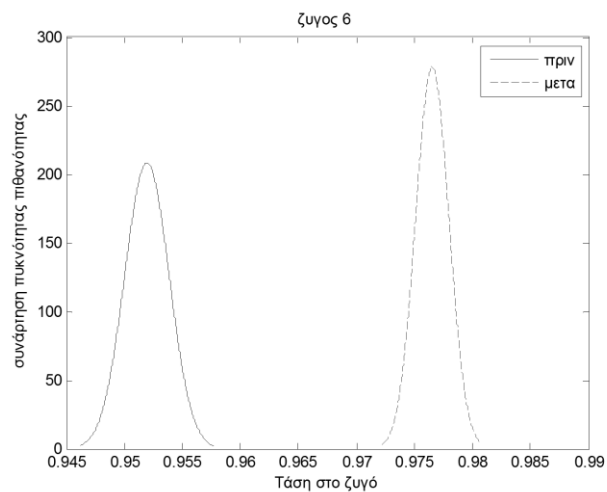
Η αντιστάθμιση γίνεται με συστοιχίες πυκνωτών με μέγιστο αριθμό βημάτων 24 και εγγεόμενη άεργη ισχύ ανά βήμα 0,5 MVar.

Πίνακας 3.2.2: Εγγεόμενη άεργος ισχύς πυκνωτών στο δίκτυο 9 ζυγών της IEEE

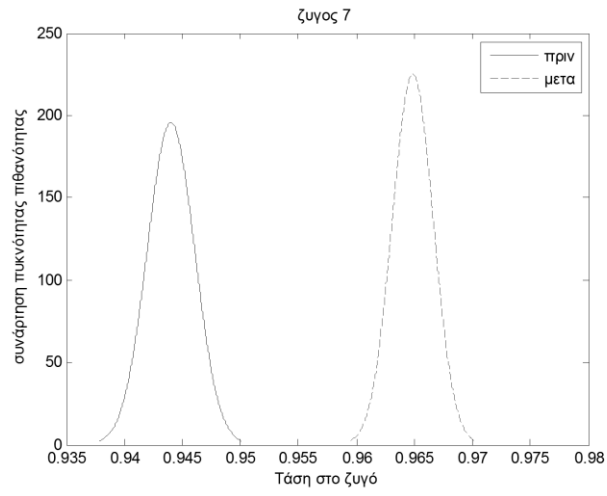
Ζυγός	Βήματα των πυκνωτών	Εγγεόμενη ισχύς (MVA _r)
5	3	1,5
9	24	12

Δίκτυο 30 ζυγών της IEEE

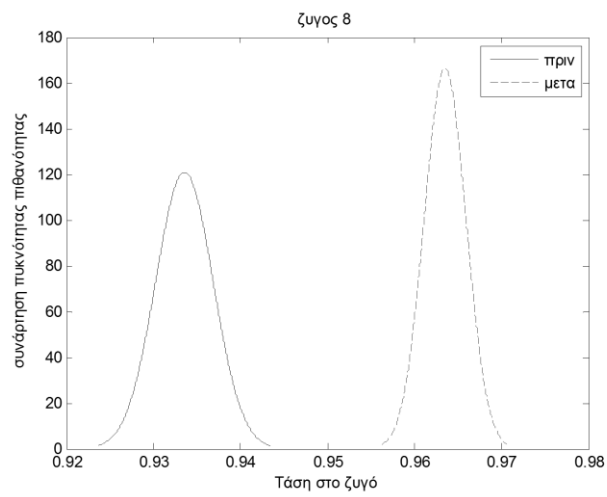
Παρακάτω φαίνονται οι σ.π.π. και οι α.σ.π. των τάσεων του δικτύου 30 ζυγών της IEEE. Στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE πραγματοποιείται αύξηση φορτίου 40% του βασικού σεναρίου.



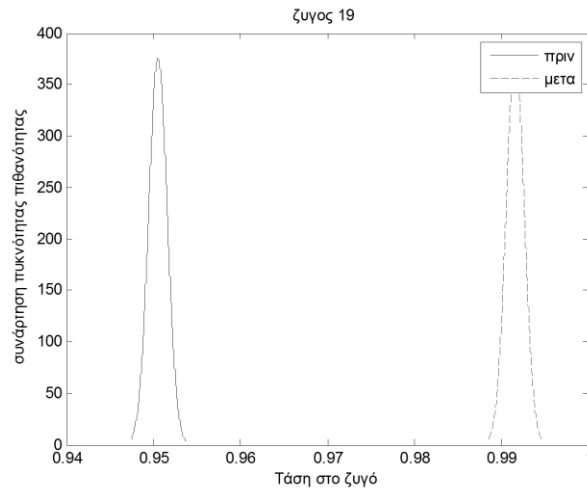
Σχήμα 3.2.5: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 6



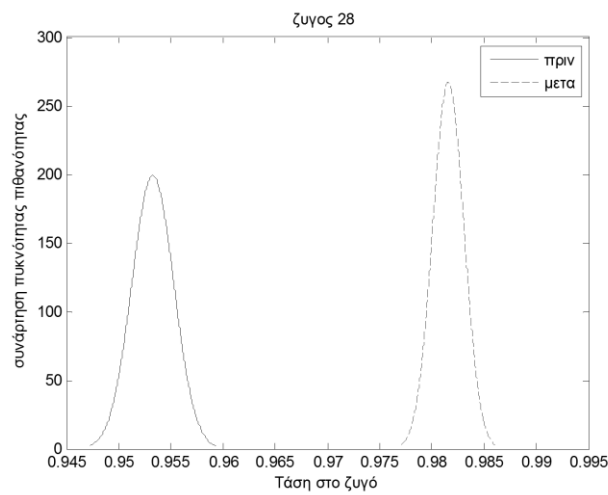
Σχήμα 3.2.6: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 7



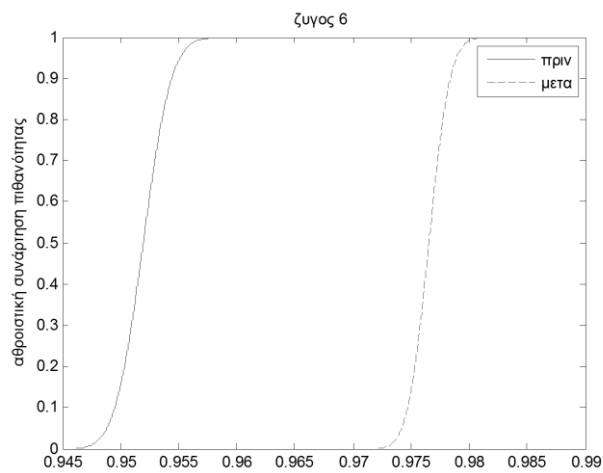
Σχήμα 3.2.7: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 8



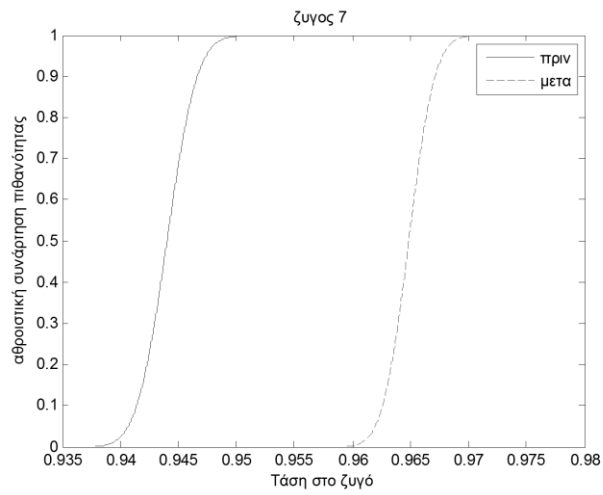
Σχήμα 3.2.8: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 19



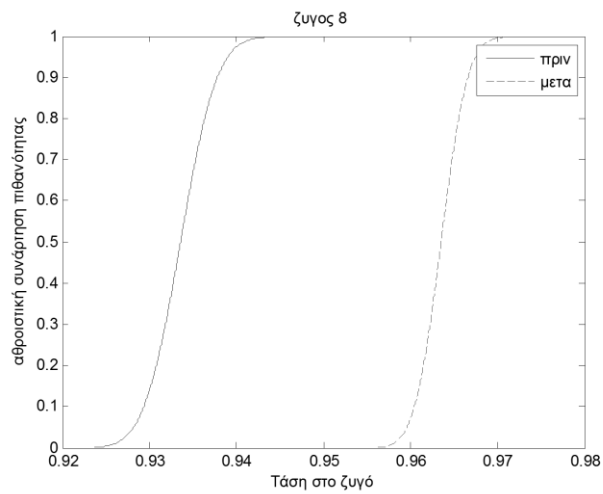
Σχήμα 3.2.9: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 28



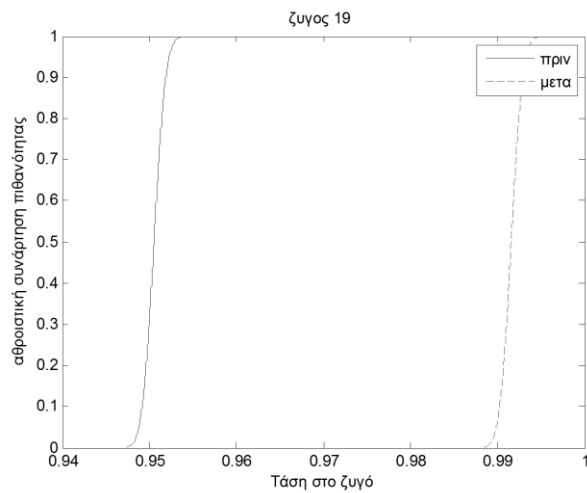
Σχήμα 3.2.10: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 6



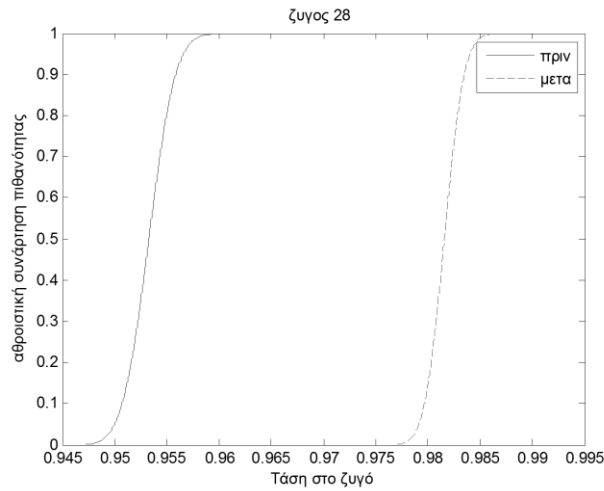
Σχήμα 3.2.11: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 7



Σχήμα 3.2.12: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 8



Σχήμα 3.2.13: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 19



Σχήμα 3.2.14: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 28

Όπως φαίνεται από τις σ.π.π. και τις α.σ.π. οι ζυγοί 6,7,8,19 ,28 παραβιάζουν τα επιτρεπτά όρια της τάσης χωρίς την εφαρμογή ελέγχων. Χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο καταφέραμε να τους επαναφέρουμε στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας. Οι έλεγχοι που έγιναν φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Γεννήτριες

Πίνακας 3.2.3: Τάσεις γεννητριών στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Αρχική τιμή τάσης (α.μ)	Τελική τιμή τάσης (α.μ)	Μεταβολή τιμής τάσης (α.μ)
13	1	1,0371	0.0371
22	1	1,05	0,0500
23	1	1,05	0,0500
27	1	1,05	0,0500

Συστοιχίες Πυκνωτών

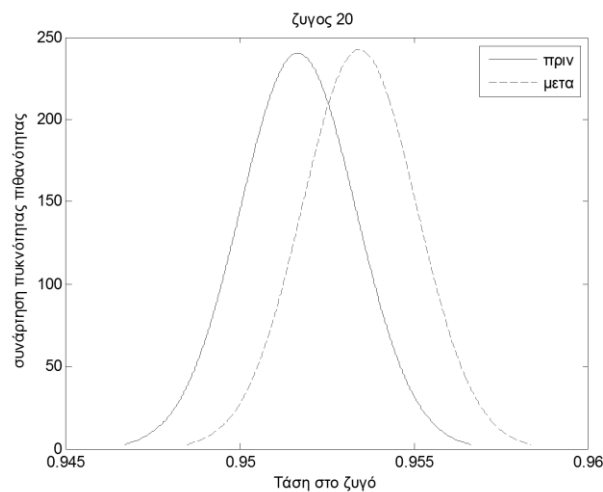
Η αντιστάθμιση γίνεται με συστοιχίες πυκνωτών με μέγιστο αριθμό βημάτων 24 και εγχεόμενη άεργη ισχύ ανά βήμα 0,5 MVA_r.

Πίνακας 3.2.4: Εγχεόμενη άεργος ισχύς πυκνωτών στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE

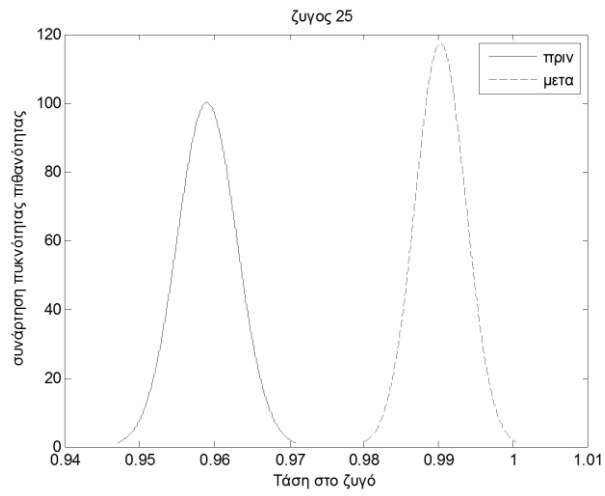
Ζυγός	Βήματα των πυκνωτών	Εγχεόμενη ισχύς (MVA _r)
8	24	12
16	5	2,5

Δίκτυο 57 ζυγών της IEEE

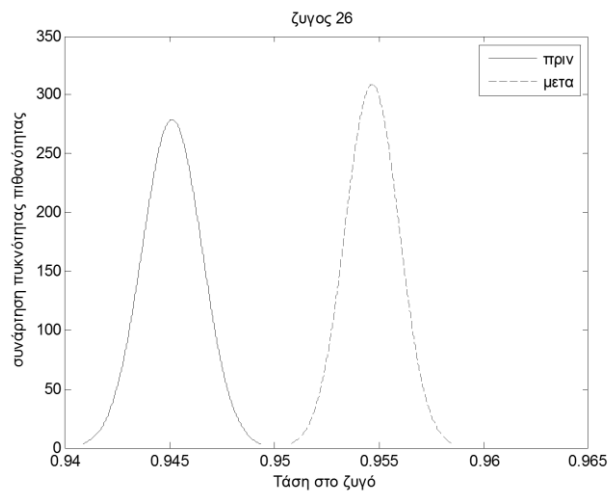
Παρακάτω φαίνονται οι σ.π.π. και οι α.σ.π. των τάσεων του δικτύου 57 ζυγών της IEEE. Στο δίκτυο 57 ζυγών της IEEE πραγματοποιείται αύξηση φορτίου 10% του βασικού σεναρίου.



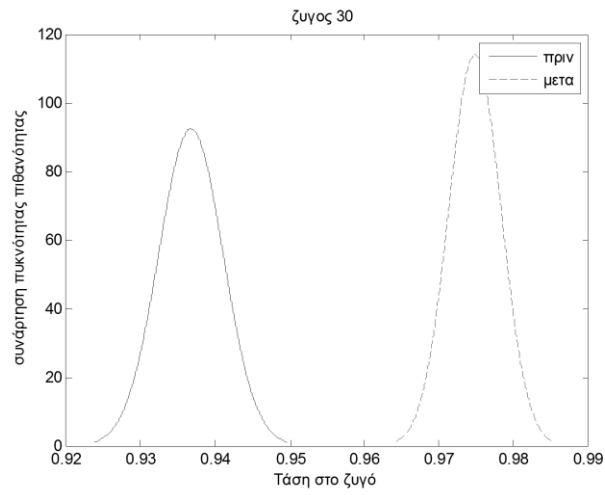
Σχήμα 3.2.15: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 20



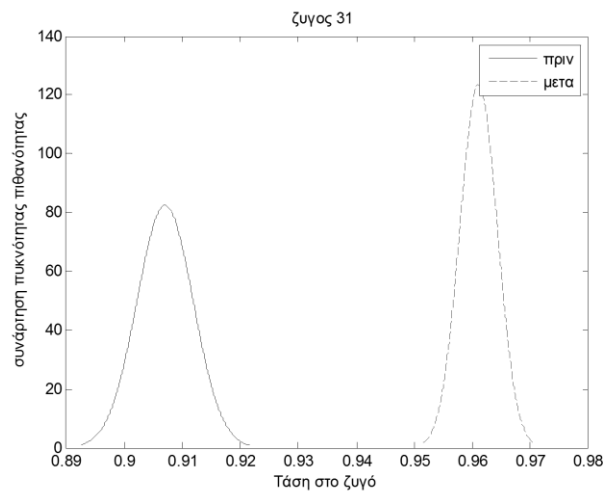
Σχήμα 3.2.16: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 25



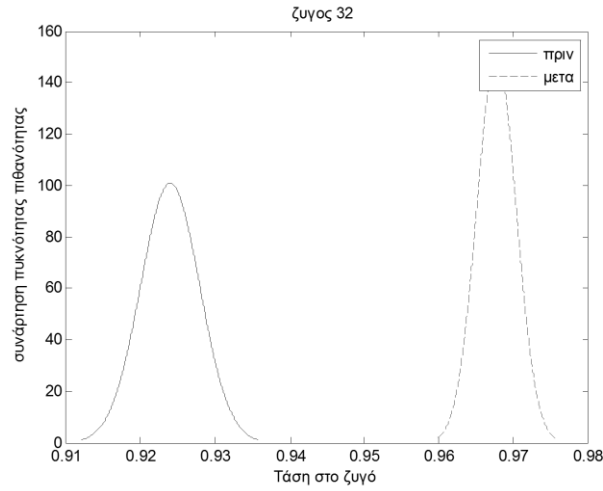
Σχήμα 3.2.17: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 26



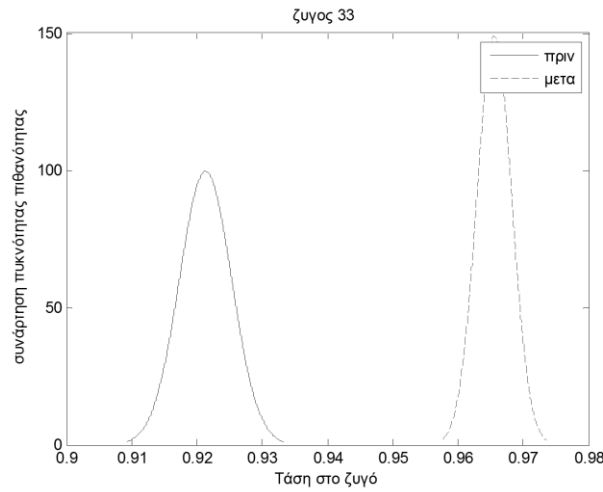
Σχήμα 3.2.18: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 30



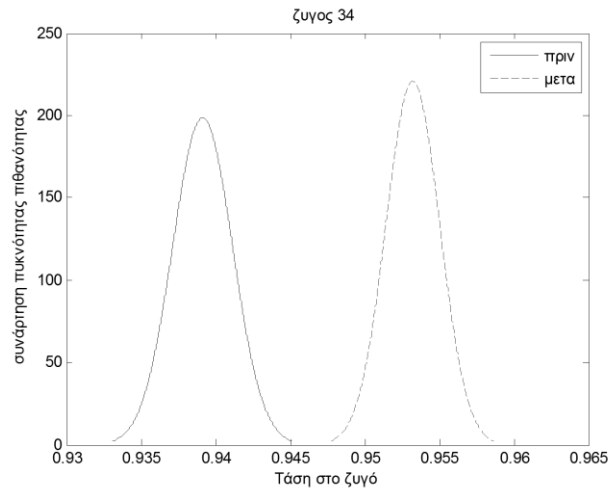
Σχήμα 3.2.19: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 31



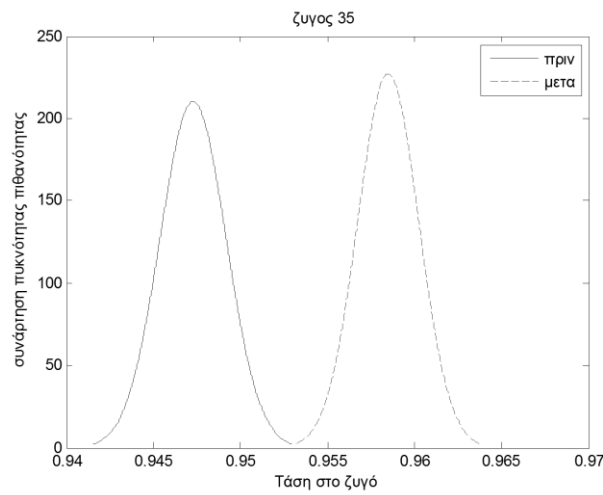
Σχήμα 3.2.20 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 32



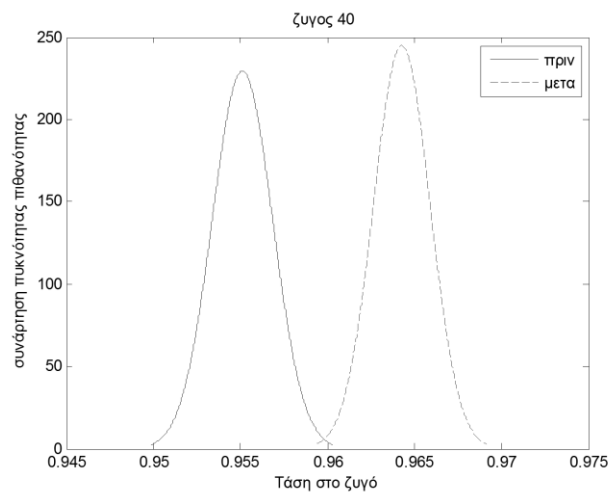
Σχήμα 3.2.21 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 33



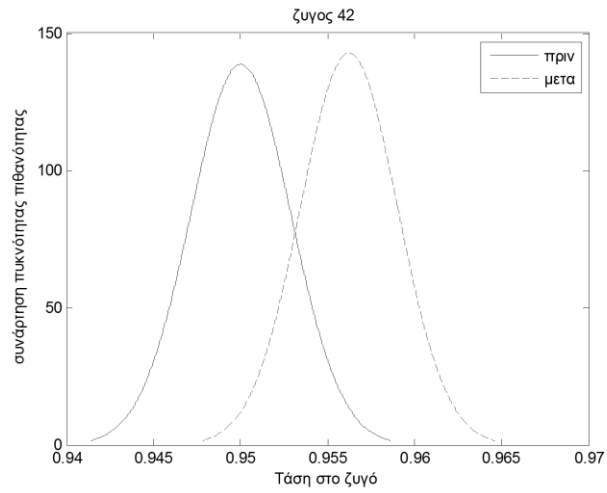
Σχήμα 3.2.22: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 34



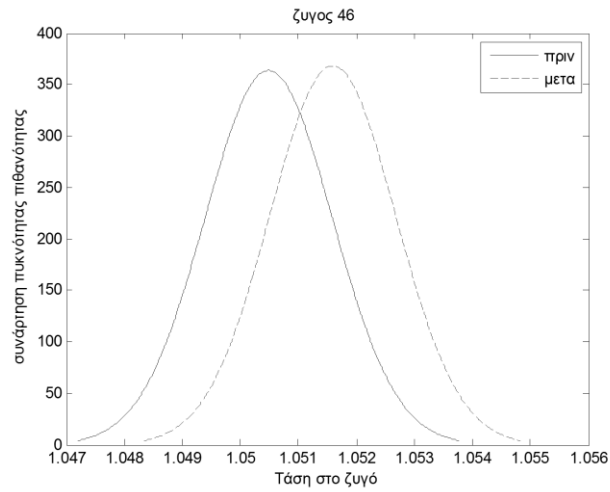
Σχήμα 3.2.23 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 35



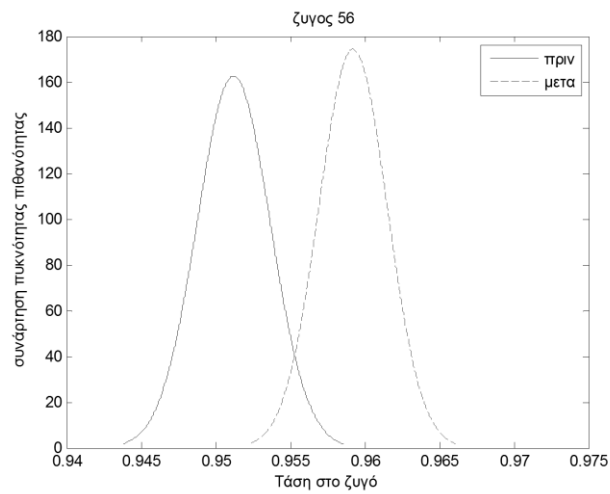
Σχήμα 3.2.24 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 40



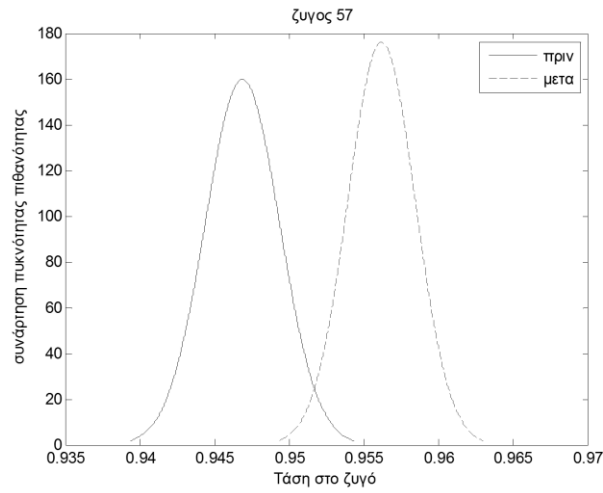
Σχήμα 3.2.25 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 42



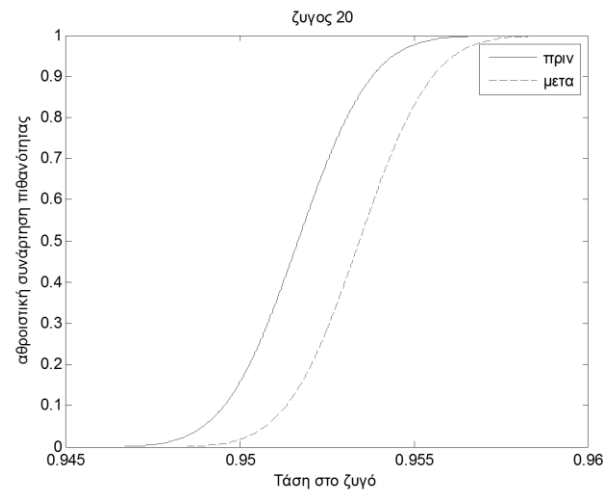
Σχήμα 3.2.26 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 46



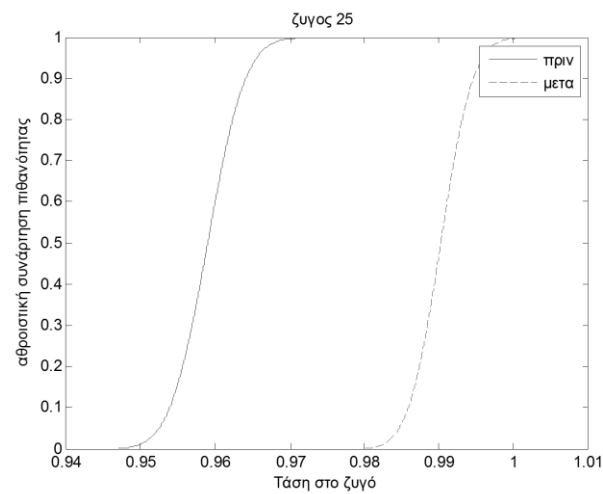
Σχήμα 3.2.27 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 56



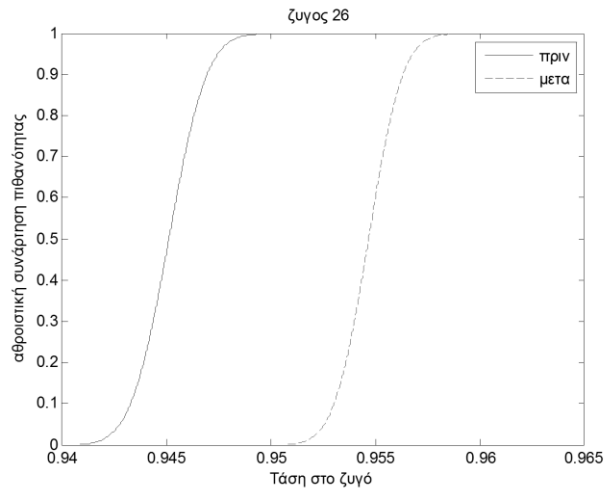
Σχήμα 3.2.28 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 57



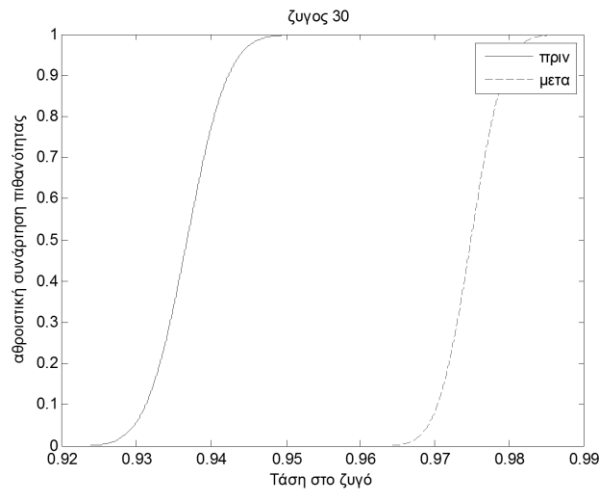
Σχήμα 3.2.29: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 20



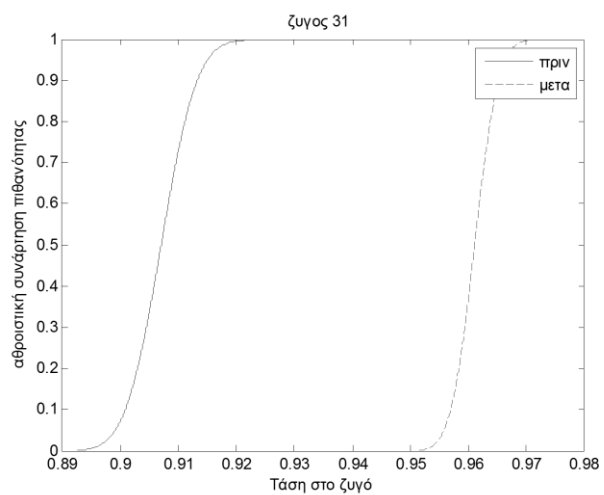
Σχήμα 3.2.30: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 25



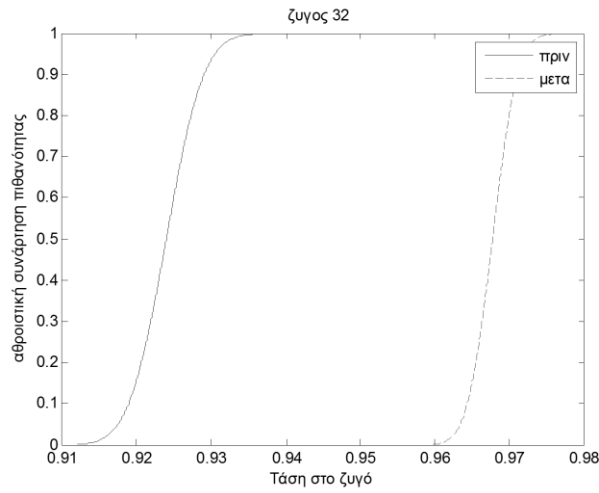
Σχήμα 3.2.31: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 26



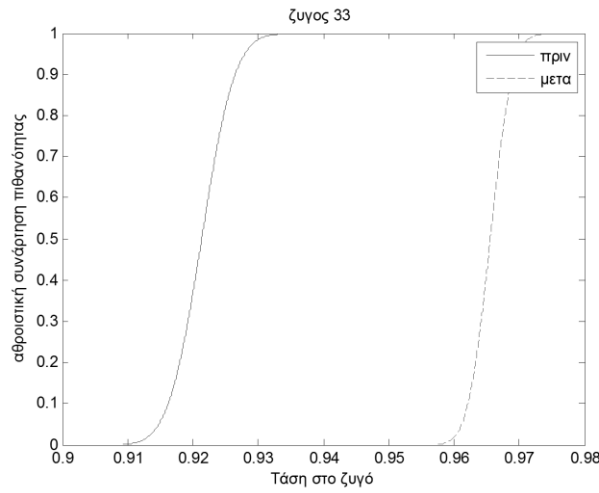
Σχήμα 3.2.32: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 30



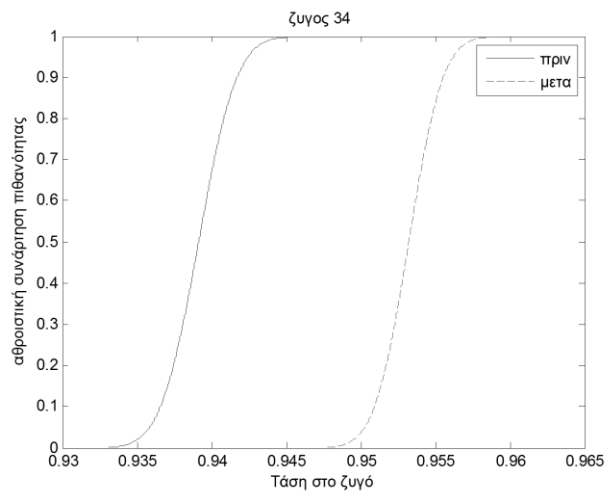
Σχήμα 3.2.33: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 31



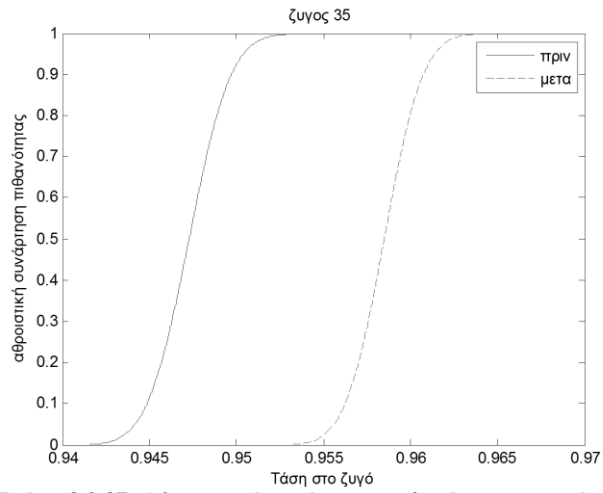
Σχήμα 3.2.34: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 32



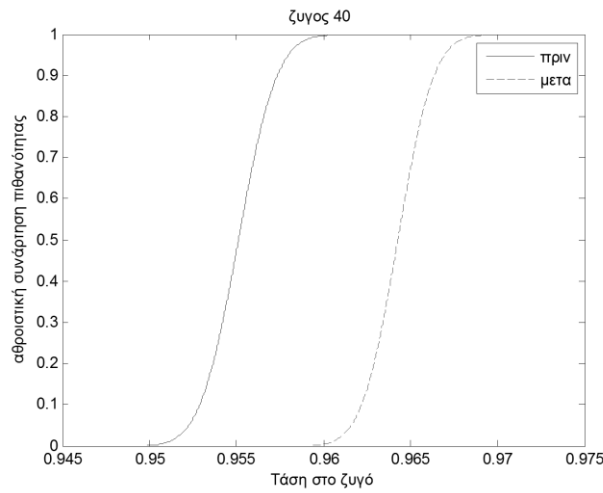
Σχήμα 3.2.35: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 33



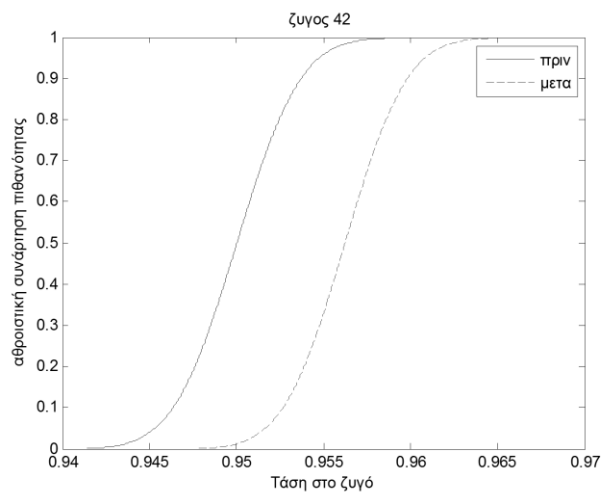
Σχήμα 3.2.36: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 34



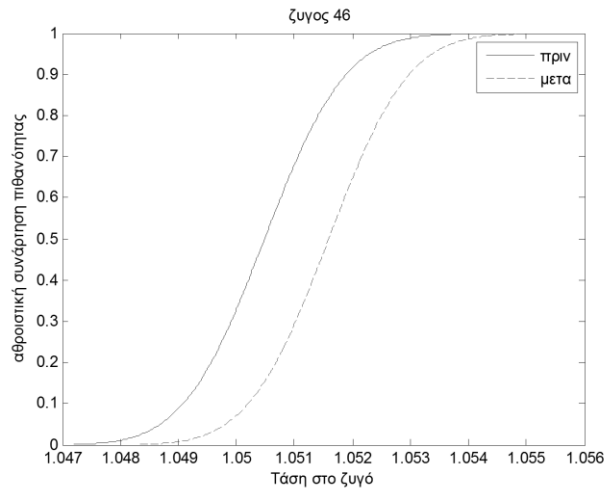
Σχήμα 3.2.37: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 35



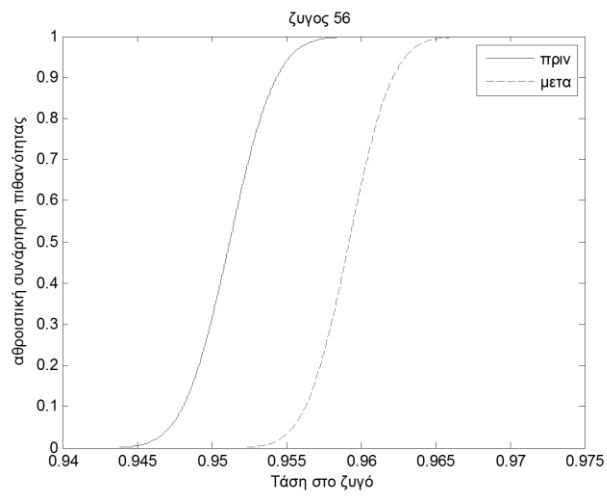
Σχήμα 3.2.38: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 40



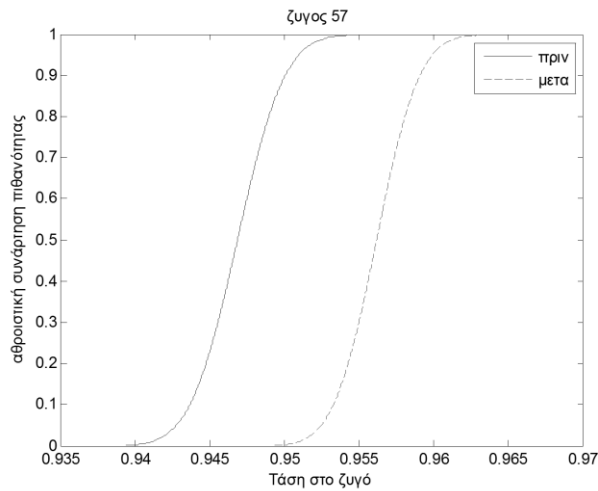
Σχήμα 3.2.39: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 42



Σχήμα 3.2.40: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 46



Σχήμα 3.2.41: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 56



Σχήμα 3.2.42: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 57

Όπως φαίνεται από τις σ.π.π. και τις α.σ.π. οι ζυγοί 20,25,26,30, 31, 32, 33, 34, 35,40,42,56,57 παραβιάζουν τα επιτρεπτά όρια της τάσης χωρίς την εφαρμογή ελέγχων. Χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο δεν καταφέραμε να τους επαναφέρουμε στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας. Οι ζυγοί βρίσκονται μέσα στο διάστημα (0.9475,1.0550). Οι ρυθμίσεις που έγιναν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Γεννητριες

Πίνακας 3.2.5: Τάσεις γεννητριών στο δίκτυο 57 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Αρχική τιμή τάσης (α.μ)	Τελική τιμή τάσης (α.μ)	Μεταβολή τιμής τάσης (α.μ)
2	1,010	1,0021	-0,0079
3	0,985	0,979	-0,0060
6	0,980	0,9858	0,0058
8	1,005	1,0046	-0,0004

Συστοιχίες Πυκνωτών:

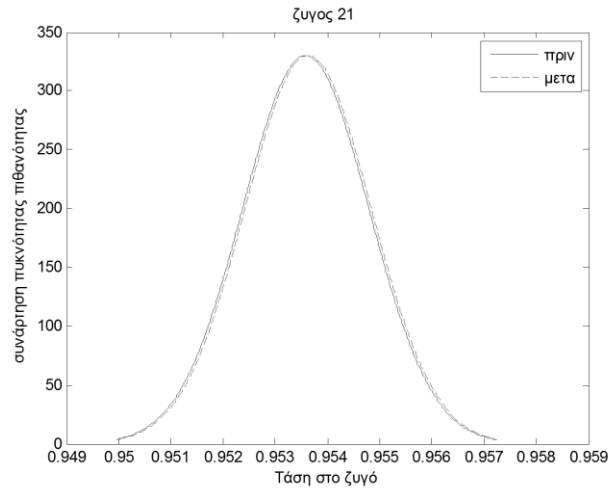
Η αντιστάθμιση γίνεται με συστοιχίες πυκνωτών με μέγιστο αριθμό βημάτων 24 και εγχεόμενη άεργη ισχύ ανά βήμα 0,5 MVA_r.

Πίνακας 3.2.6: Εγχεόμενη άεργος ισχύς πυκνωτών στο δίκτυο 57 ζυγών της IEEE

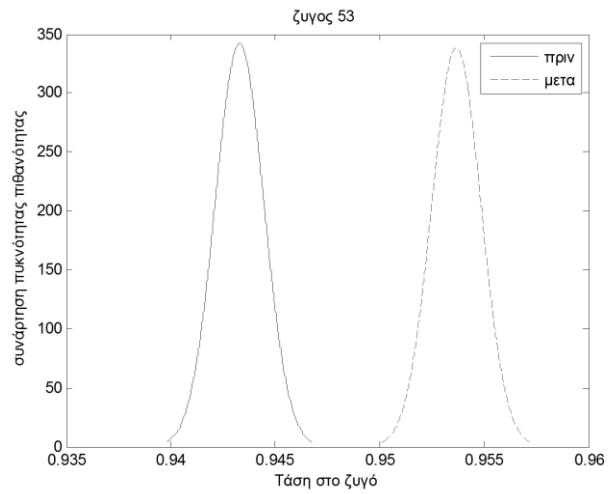
Ζυγός	Βήματα των πυκνωτών	Εγχεόμενη ισχύς (MVA _r)
31	8	4
32	1	0,5
33	2	1
34	1	0,5
56	1	0,5
57	1	0,5

Δίκτυο 118 ζυγών της IEEE

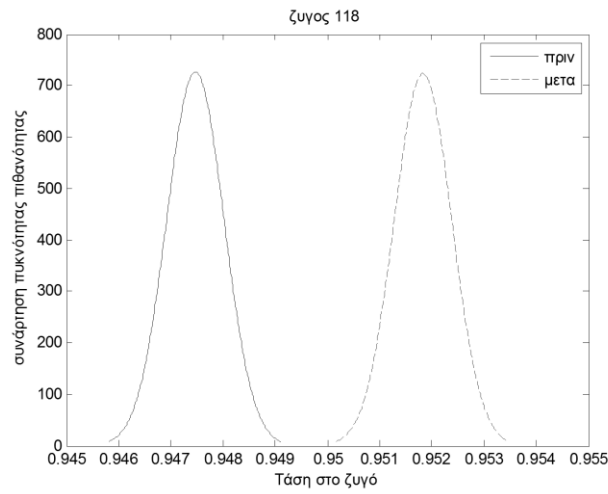
Παρακάτω φαίνονται οι σ.π.π. και οι α.σ.π. των τάσεων του δικτύου 118 ζυγών της IEEE. Στο δίκτυο 118 ζυγών της IEEE πραγματοποιείται αύξηση φορτίου 10% του βασικού σεναρίου.



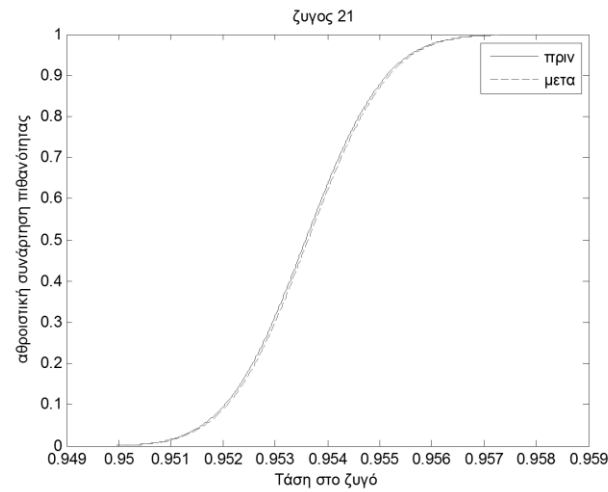
Σχήμα 3.2.43 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 21



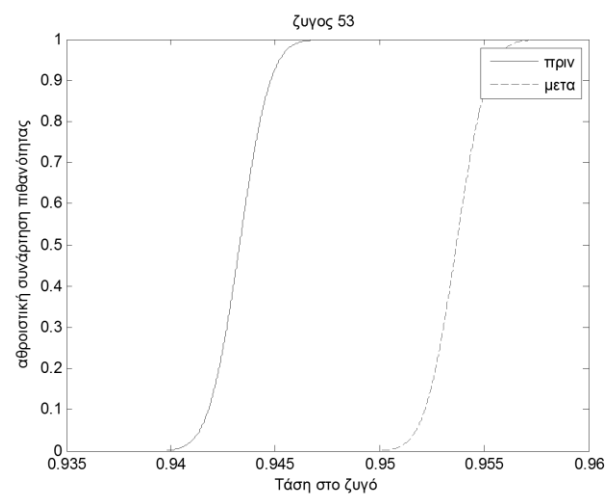
Σχήμα 3.2.44 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 53



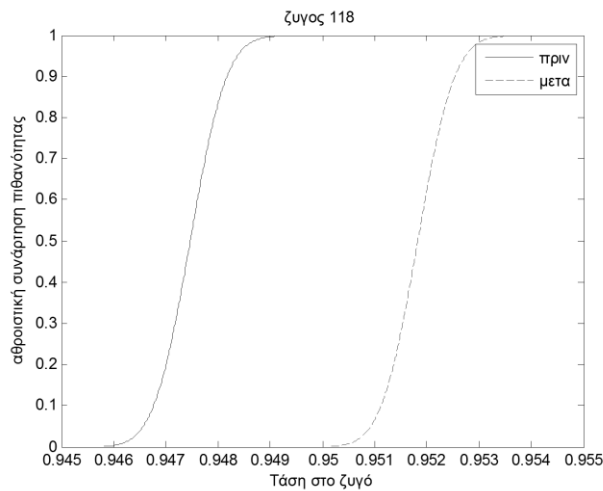
Σχήμα 3.2.45 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 118



Σχήμα 3.2.46: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 21



Σχήμα 3.2.47: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 53



Σχήμα 3.2.48: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 118

Όπως φαίνεται από τις σ.π.π. και τις α.σ.π. οι ζυγοί 21,53,118 παραβιάζουν τα επιτρεπτά όρια της τάσης χωρίς την εφαρμογή ελέγχων. Χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο καταφέραμε να τους επαναφέρουμε στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας. Οι έλεγχοι που έγιναν φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Γεννητριες

Πίνακας 3.2.7: Τάσεις γεννητριών στο δίκτυο 118 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Αρχική τιμή τάσης (α.μ)	Τελική τιμή τάσης (α.μ)	Μεταβολή τιμής τάσης (α.μ)
24	1,050	1,050205	0,000205
54	0,952	0,96461	0,01261
55	0,954	0,960678	0,006678
56	0,985	0,993749	0,008749
74	0,958	0,959173	0,001173
76	0,943	0,950318	0,007318

Συστοιχίες Πυκνωτών

Για την διόρθωση της τάσης στους τρεις ζυγούς που ήταν εκτός ορίων δεν χρησιμοποιήθηκε αντιστάθμιση με συστοιχίες πυκνωτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

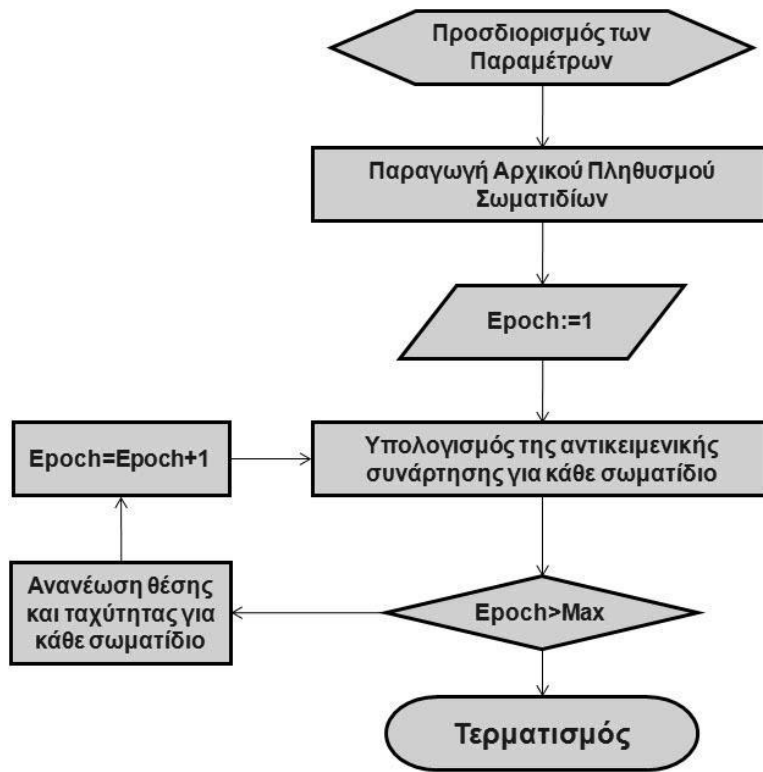
ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (PSO)

4.1 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ PSO

Ο αλγόριθμος της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization-PSO) είναι ένας στοχαστικός εξελικτικός υπολογιστικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε το 1995 από τους James Kennedy and Russel C. Eberhart για να μοντελοποιήσει τον τρόπο με τον οποίο ένα σμήνος πουλιών ή ψαριών αναζητά τροφή. Ο αλγόριθμος αρχικοποιείται παράγοντας τυχαία ένα πληθυσμό K μελών (particles) $\{k = 1, 2, 3, \dots, K\}$, τα οποία σχηματίζουν ένα σμήνος (swarm) και αντιπροσωπεύουν υποψήφιες λύσεις για το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Τα μέλη του σμήνους λειτουργούν τόσο μεμονωμένα όσο και συνδυαστικά, ώστε εκμεταλλευόμενα την πληροφορία που δέχονται από τις ανακαλύψεις και προηγούμενες εμπειρίες του κάθε μέλους κατά τη διάρκεια της αναζήτησης να φθάσουν στην τροφή με τον βέλτιστο και ταχύτερο τρόπο. Το ίδιο ακριβώς επιδιώκει και ο αλγόριθμος PSO. Κάθε μεμονωμένο μέλος της ομάδας καθοδηγείται προς τη βέλτιστη λύση έχοντας ως οδηγό δύο παράγοντες:

1. Έναν στοχαστικά ζυγισμένο μέσο όρο των προηγούμενων καλύτερων λύσεων του ίδιου και
2. Έναν στοχαστικά ζυγισμένο μέσο όρο των προηγούμενων καλύτερων λύσεων των υπόλοιπων μελών.

Το Σχήμα 4.1.1 δίνει το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου.



Σχήμα 4.1.1: Διάγραμμα ροής της μεθόδου PSO

Ο σκοπός του αλγορίθμου όταν εφαρμόζεται σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι να βρει μια λύση X^* μέσα από ένα σύνολο $X \subseteq \mathcal{R}^d$ τέτοια ώστε $X^* = \arg \min_{x \in X} f(x)$, προκειμένου π.χ. για πρόβλημα ελαχιστοποίησης, όπου $f(x)$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Η διαδικασία διαρθρώνεται στην παρακάτω ακολουθία βημάτων

1. Παράγεται ένας πληθυσμός N μελών (particles) ομοιόμορφα κατανεμημένος στο X , όπως δείχνουν οι εξισώσεις (4.1.1) και (4.1.2)

$$x_i^{(0)} = x_{\min} + rand(x_{\max} - x_{\min}) \quad (4.1.1)$$

$$u_i^{(t)} = \frac{x_{\min} + rand(x_{\max} - x_{\min})}{\Delta t} \quad (4.1.2)$$

όπου $x_i^{(t)}$, $u_i^{(t)}$, είναι η θέση και η ταχύτητα του μέλους i κατά την επανάληψη t και ορίζονται αντίστοιχα ως $x_i^{(t)} = [x_{i,1}^{(t)} \cdots x_{i,d}^{(t)}]$ και $u_i^{(t)} = [u_{i,1}^{(t)} \cdots u_{i,d}^{(t)}]$, x_{\min} και x_{\max} είναι τα διανύσματα των ανώτερων και κατώτερων τιμών αντίστοιχα.

2. Οι θέσεις κάθε μέλους αξιολογούνται ανάλογα με την αντικειμενική συνάρτηση $f(x)$ και κάθε μέλος καταγράφει την καλύτερη θέση από την οποία έχει περάσει (τοπικό βέλτιστο, $pbest_i$) και την καλύτερη θέση ανάμεσα σε όλα τα μέλη του σμήνους (ολικό βέλτιστο, $gbest$).

$$pbest_i = (pbest_{i,1} \ pbest_{i,2} \ \dots \ pbest_{i,d}) \quad (4.1.3)$$

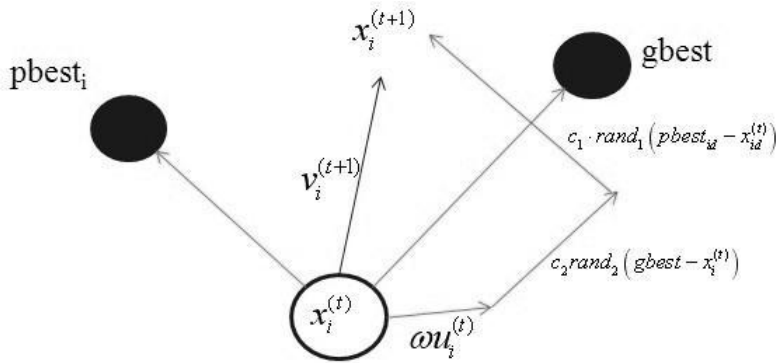
$$gbest = (gbest_1 \ gbest_2 \ \dots \ gbest_d) \quad (4.1.4)$$

Το ολικό βέλτιστο γνωστοποιείται σε όλα τα μέλη και ανανεώνεται αμέσως όταν βρίσκεται μια νέα βέλτιστη θέση.

3. Η θέση και η ταχύτητα των μελών ανανεώνεται σύμφωνα με τις εξισώσεις

$$u_i^{(t+1)} = \omega u_i^{(t)} + c_1 \cdot rand_1 (pbest_i - x_i^{(t)}) + c_2 rand_2 (gbest - x_i^{(t)}) \quad (4.1.5)$$

Όπου ω είναι μια σταθερά αδράνειας που περιγράφει την τάση του εκάστοτε μέλους να ταξιδεύει κατά μήκος της ίδιας διεύθυνσης με αυτήν στην οποία ταξίδευε στο προηγούμενο βήμα. Μια μεγάλη τιμή αδράνειας επιτρέπει αναζήτηση σε ένα μεγάλο εύρος της περιοχής επίλυσης ενώ μια μικρή τιμή απεικονίζει τοπική αναζήτηση. Οι συντελεστές c_1 , c_2 είναι σταθερές που δείχνουν την έλξη που δέχεται το μέλος του σμήνους προς τη θέση με τη βέλτιστη λύση που έχει ποτέ επισκεφθεί το ίδιο και τη συνολική βέλτιστη λύση που έχει ποτέ βρεθεί για όλο το σμήνος αντίστοιχα. Αν η νέα θέση του μέλους παρουσιάζει καλύτερη λύση από τη βέλτιστη θέση στην οποία μέχρι εκείνη τη στιγμή είχε το ίδιο βρεθεί τότε η τρέχουσα θέση του χαρακτηρίζεται ως η μεμονωμένα βέλτιστη θέση. Τέλος, στην εξίσωση (1), ως r_1 και r_2 συμβολίζονται ομοιόμορφα διανεμημένοι στο διάστημα $[0, 1]$ τυχαίοι αριθμητικοί συντελεστές. Το 4.1.2 δείχνει σχηματικά τη διαδικασία ανανέωσης.



Σχήμα 4.1.2 Ανανέωση Θέσης και ταχύτητας των μελών

Πρέπει να σημειωθεί ότι η επαναληπτική διαδικασία των εξισώσεων (4.1.5) και (4.1.6) μπορεί να οδηγήσει σε υποψήφιες λύσεις οι οποίες δεν είναι χωρικά αποδεκτές, δηλαδή κάποιο μέλος του σμήνους να βρεθεί εκτός της περιοχής επίλυσης. Σε αυτήν την περίπτωση, η θέση του μέλους διορθώνεται με την “χειροκίνητη” τοποθέτησή του πίσω στην αποδεκτή περιοχή επίλυσης. Κατά την επαναληπτική αυτή διαδικασία βελτιώνεται σταδιακά η καταλληλότητα της καλύτερης λύσης gbest.

4. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα 2 μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια τερματισμού. Στα κριτήρια τερματισμού συνήθως συμπεριλαμβάνεται η μέγιστη αλλαγή στην επίδοση η οποία πρέπει να υπερβαίνει ένα όριο ανοχής μέσα σε έναν ορισμένο αριθμό επαναλήψεων για να συνεχιστεί η διαδικασία όπως δείχνει η εξίσωση

$$|f(gbest^{(t)}) - f(gbest^{(t-q)})| \leq \varepsilon \quad (4.1.6)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να τροποποιηθεί για να συμπεριλάβει τους περιορισμούς, θέτοντας ποινές όταν αυτοί παραβιάζονται όπως δείχνει η εξίσωση (4.1.8).

$$f(x) = f(x) + \sum_{i=1}^{N_{con}} r_i \quad (4.1.7)$$

Κατά την επαναληπτική διαδικασία βελτιώνεται η επίδοση των λύσεων. Ωστόσο ο αλγόριθμος PSO είναι μια μετα-ευριστική μέθοδος και δεν εγγυάται την εύρεση ολικού βέλτιστου.

4.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ PSO

Θα περιγράψουμε λοιπόν την αντικειμενική συνάρτηση που θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε με την μέθοδο PSO [6] και για την ευκολότερη κατανόηση της θα παράσχουμε και ένα διάγραμμα ροής (Σχήμα 4.2.1) .

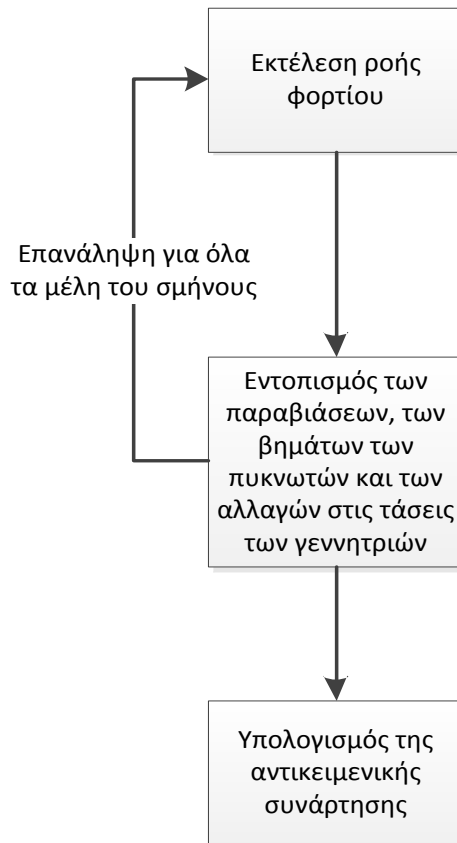
Σύμφωνα με το Σχήμα 4 που παρουσιάζεται παρακάτω για κάθε μέλος τους σμήνους εκτελούμε πιθανοτική ροή φορτίου και βρίσκουμε την πιθανότητα τυχόν παραβιάσεων του διαστήματος (0.95,1.05) της τάσης. Επίσης σημειώνουμε τα βήματα των πυκνωτών και τις αλλαγές στις τάσεις των γεννητριών που μας έχει προτείνει για το συγκεκριμένο μέλος του σμήνους η μέθοδος. Επαναλαμβάνουμε για όλα τα μέλη του σμήνους. Τέλος υπολογίζουμε τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε μέλος του σμήνους χωριστά. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε η εξής αντικειμενική συνάρτηση:

$$F = c_1 * (DVlow^2 + DVhigh^2) + c_2 * \Delta Cap_step^2 + c_3 * \Delta V_G^2 \quad (4.2.1)$$

όπου:

ΔCap_step:	η μεταβολή στα βήματα των πυκνωτών
ΔV_G:	η μεταβολή στην τάση των γεννητριών
c_1, c_2, c_3:	σταθερές

Βάσει των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε σωματίδιο η μέθοδος PSO θα μας προμηθεύσει τις επόμενες θέσεις του σμήνους για την επόμενη επανάληψη. Η διαδικασία συνεχίζεται επαναληπτικά μέχρι να επαληθευθεί το κριτήριο σύγκλισης που έχουμε επιλέξει.



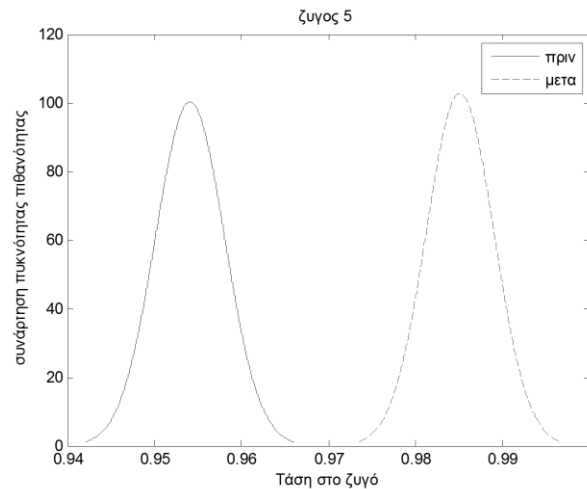
Σχήμα 4.2.1: Διάγραμμα ροής της μεθόδου ρύθμισης τάσης με χρήση του αλγορίθμου PSO

4.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

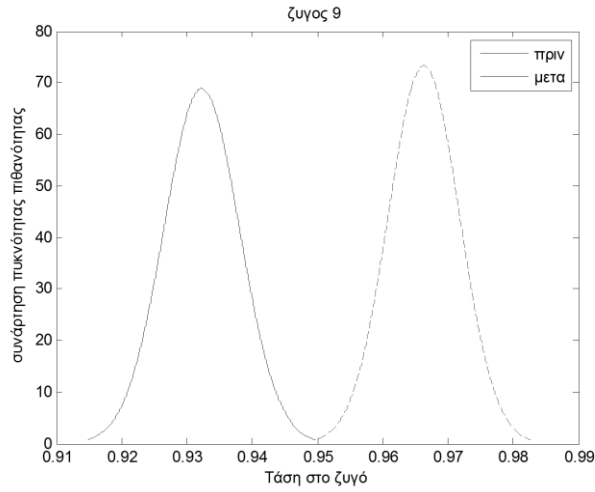
Η μέθοδος που περιγράψαμε παραπάνω χρησιμοποιήθηκε σε 4 δίκτυα της IEEE πιο συγκεκριμένα στα δίκτυα 9,30,57,118 ζυγών της IEEE. Παρακάτω δίνονται η υπερφόρτιση που επιβλήθηκε από εμάς στο κάθε δίκτυο και η σ.π.π κάθε ζυγού που παραβίασε κάποιο όριο πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου.

Δίκτυο 9

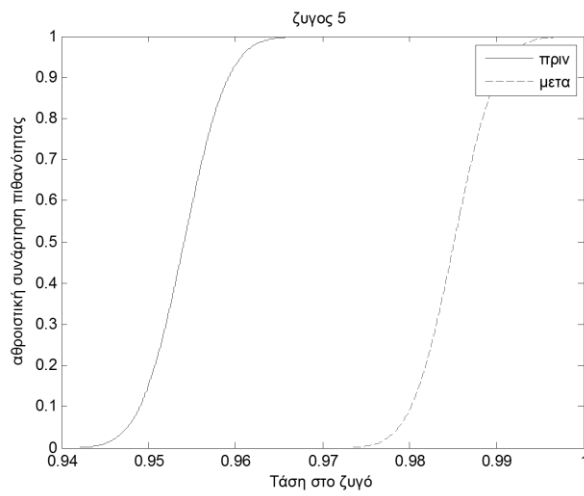
Παρακάτω φαίνονται οι σ.π.π. και οι α.σ.π. των τάσεων του δικτύου 9 της IEEE. Στο δίκτυο 9 ζυγών της IEEE πραγματοποιείται αύξηση φορτίου 30% του βασικού σεναρίου.



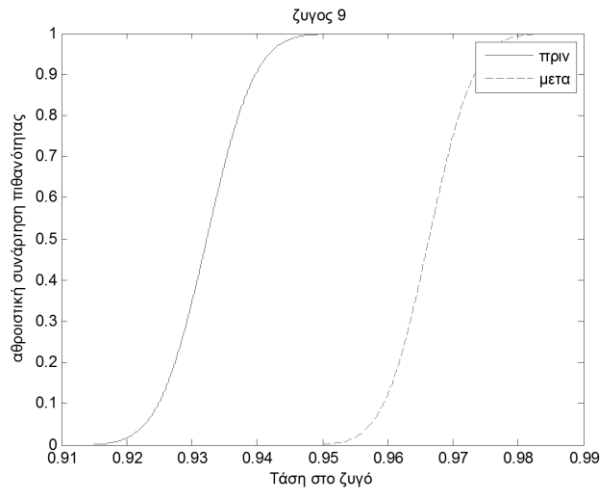
Σχήμα 4.3.1 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 5



Σχήμα 4.3.2 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 9



Σχήμα 4.3.3: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 5



Σχήμα 4.3.4: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 9

Όπως φαίνεται από τις σ.π.π. και τις α.σ.π. οι 5 και 9 παραβιάζουν τα επιτρεπτά όρια της τάσης χωρίς την εφαρμογή ελέγχων. Χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο καταφέραμε να τους επαναφέρουμε στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας. Οι έλεγχοι που έγιναν φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Γεννήτριες

Πίνακας 4.3.1: Τάσεις γεννητριών στο δίκτυο 9 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Αρχική τιμή τάσης (α.μ)	Τελική τιμή τάσης (α.μ)	Μεταβολή τιμής τάσης (α.μ)
2	1	1,05	0,050
3	1	1,05	0,050

Συστοιχίες Πυκνωτών

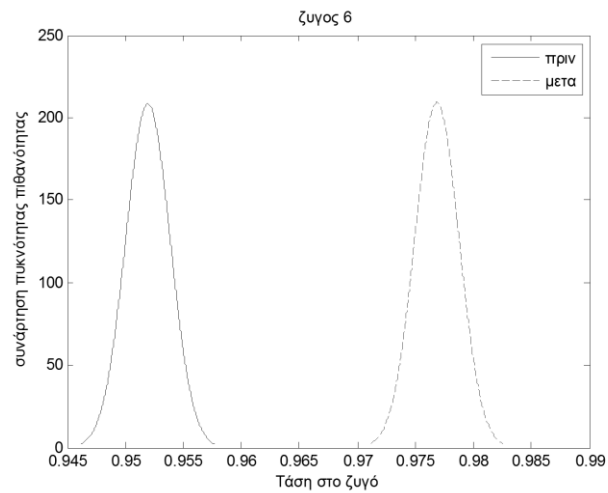
Η αντιστάθμιση γίνεται με συστοιχίες πυκνωτών με μέγιστο αριθμό βημάτων 24 και εγγεόμενη άεργη ισχύ ανά βήμα 0,5 MVAr.

Πίνακας 4.3.2: Εγγεόμενη άεργος ισχύς πυκνωτών στο δίκτυο 9 ζυγών της IEEE

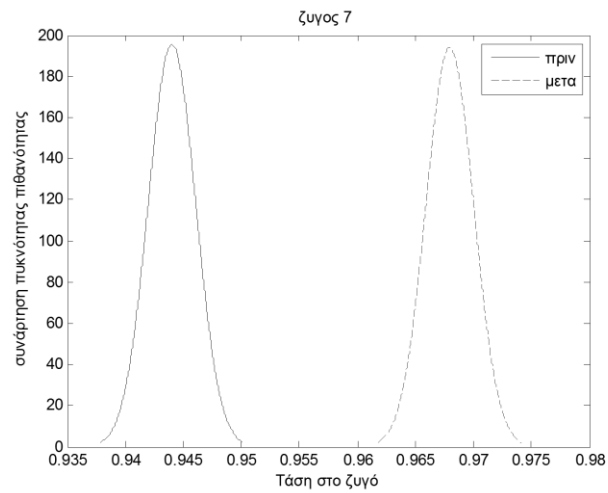
Ζυγός	Βήματα των πυκνωτών	Εγγεόμενη ισχύς (MVAr)
5	2	1
7	2	1
9	9	4,5

Δίκτυο 30

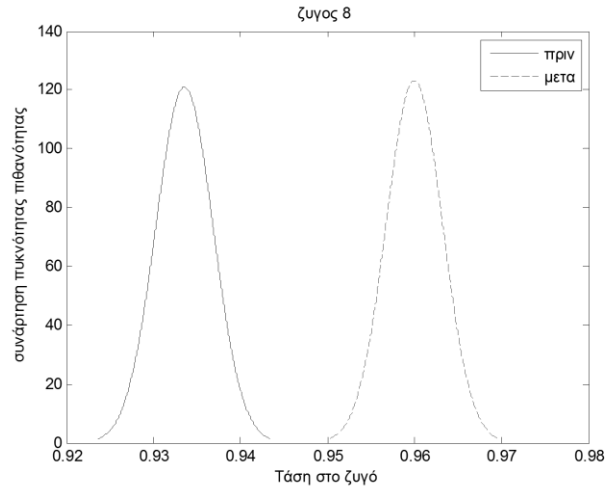
Παρακάτω φαίνονται οι σ.π.π. και οι α.σ.π. των τάσεων του δικτύου 30 της IEEE. Στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE πραγματοποιείται αύξηση φορτίου 40% του βασικού σεναρίου.



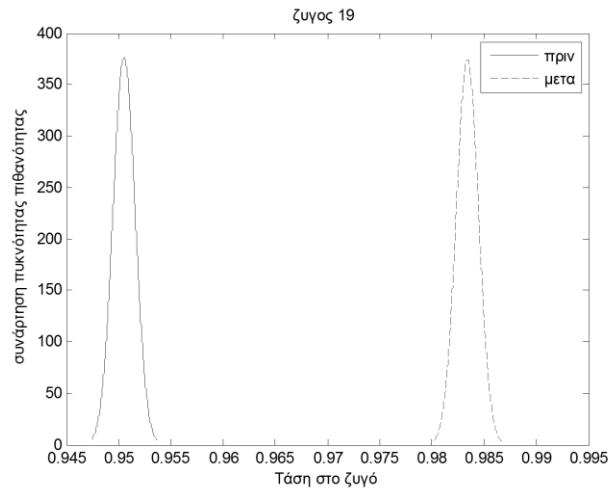
Σχήμα 4.3.5 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 6



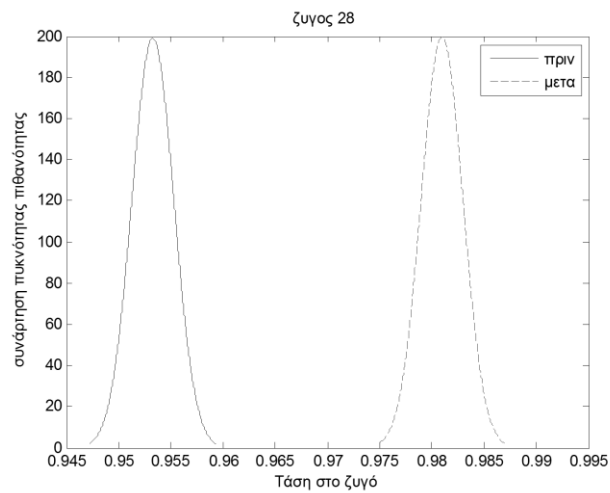
Σχήμα 4.3.6 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 7



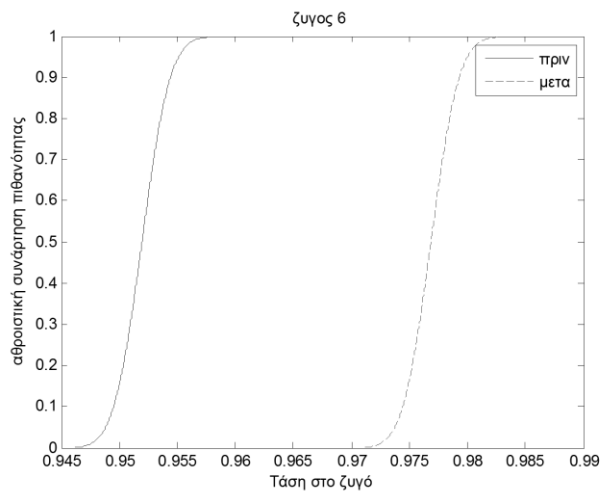
Σχήμα 4.3.7 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 8



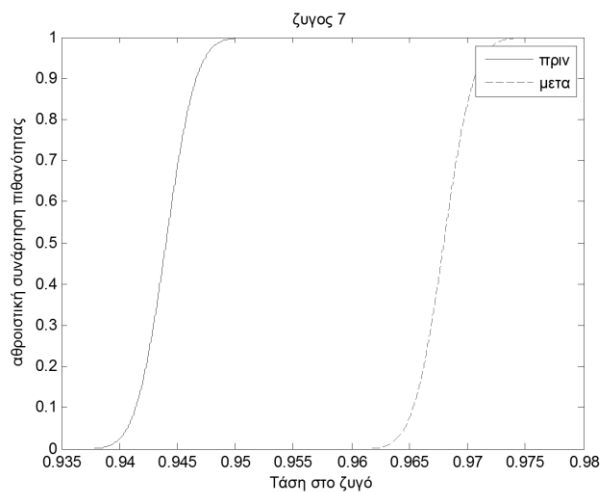
Σχήμα 4.3.8 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 19



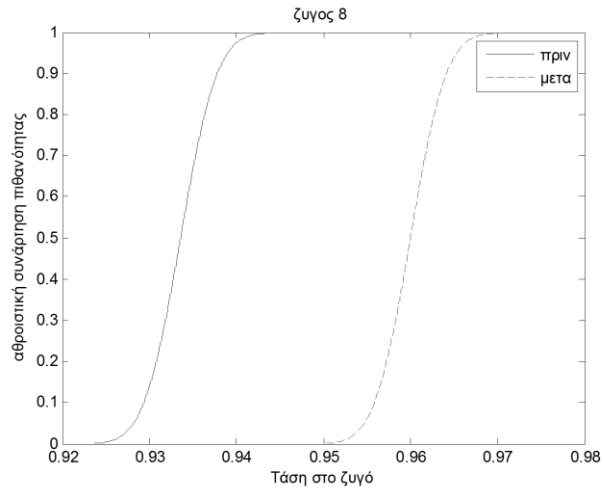
Σχήμα 4.3.9 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 28



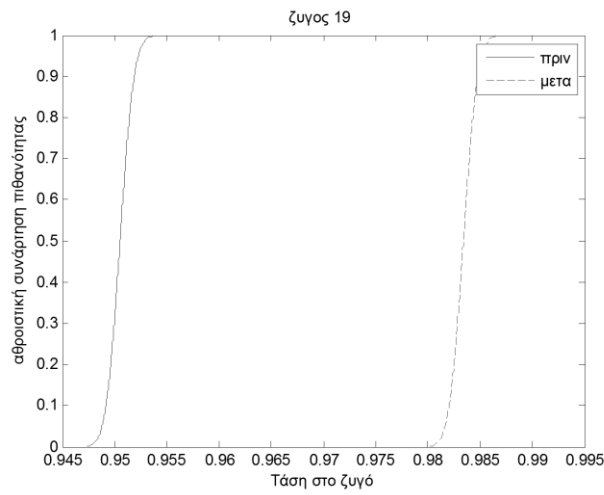
Σχήμα 4.3.10: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 6



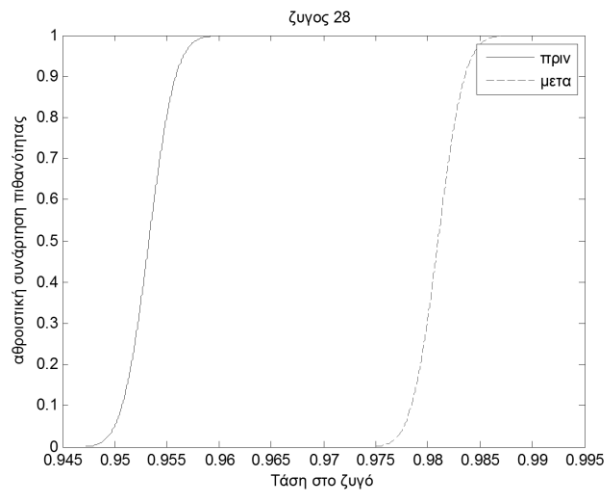
Σχήμα 4.3.11: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 7



Σχήμα 4.3.12: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 8



Σχήμα 4.3.13: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 19



Σχήμα 4.3.14: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 28

Όπως φαίνεται από τις σ.π.π. και τις α.σ.π. οι ζυγοί 6,7,8,19 ,28 παραβιάζουν τα επιτρεπτά όρια της τάσης χωρίς την εφαρμογή ελέγχων. Χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο καταφέραμε να τους επαναφέρουμε στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας. Οι έλεγχοι που έγιναν φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Γεννήτριες

Πίνακας 4.3.3: Τάσεις γεννητριών στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Αρχική τιμή τάσης (α.μ)	Τελική τιμή τάσης (α.μ)	Μεταβολή τιμής τάσης (α.μ)
2	1	1,05	0,050
22	1	1,05	0,050
23	1	1,05	0,050
27	1	1,05	0,050

Συστοιχίες Πυκνωτών

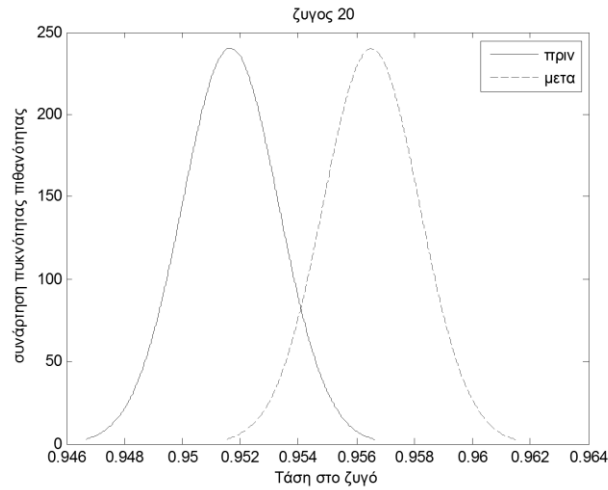
Η αντιστάθμιση γίνεται με συστοιχίες πυκνωτών με μέγιστο αριθμό βημάτων 24 και εγχεόμενη άεργη ισχύ ανά βήμα 0,5 MVar.

Πίνακας 4.3.4: Εγχεόμενη άεργος ισχύς πυκνωτών στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE

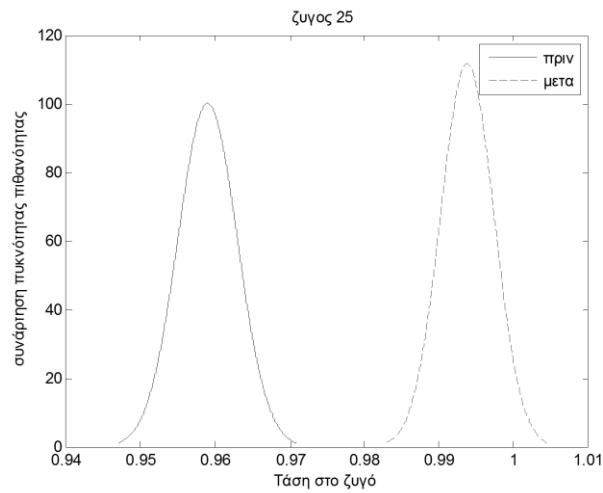
Ζυγός	Βήματα των πυκνωτών	Εγχεόμενη ισχύς (MVar)
8	3	1,5
16	1	0,5

Δίκτυο 57 ζυγών της IEEE

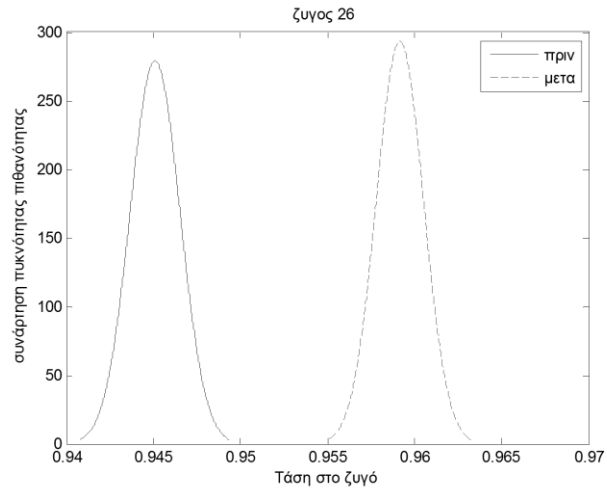
Παρακάτω φαίνονται οι σ.π.π. του δικτύου 57 ζυγών της IEEE. Στο δίκτυο 57 ζυγών της IEEE πραγματοποιείται αύξηση φορτίου 10% του βασικού σεναρίου.



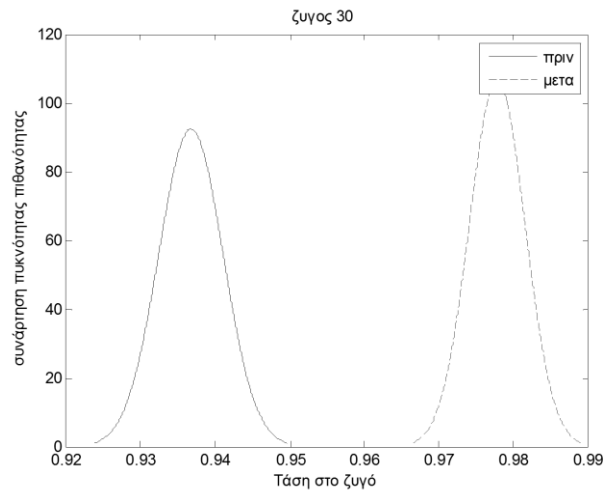
Σχήμα 4.3.15 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 20



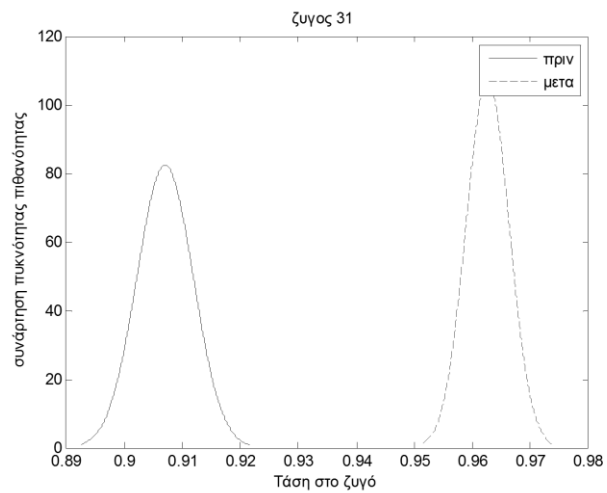
Σχήμα 4.3.16 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 25



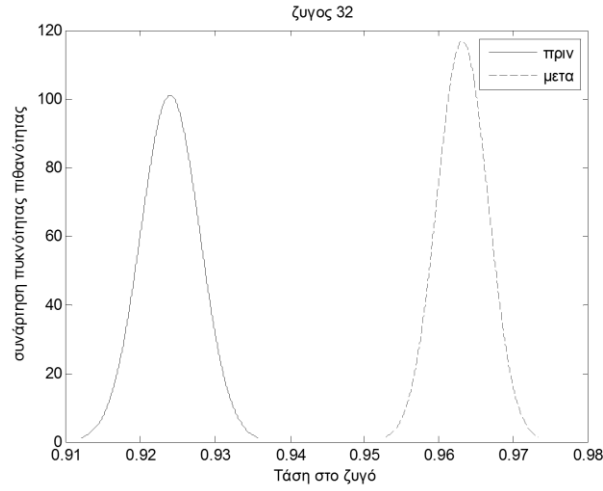
Σχήμα 4.3.17 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 26



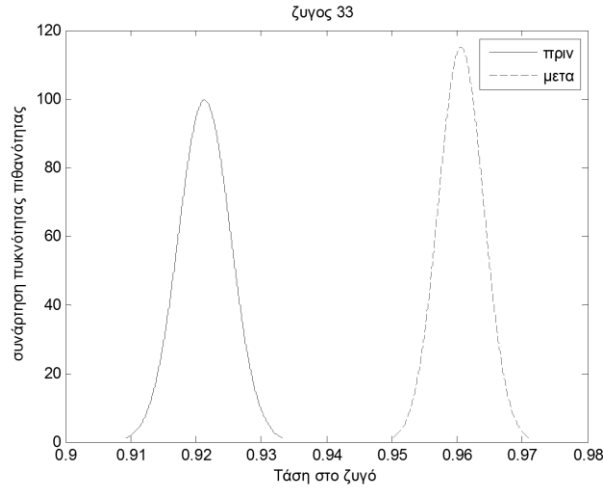
Σχήμα 4.3.18 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 30



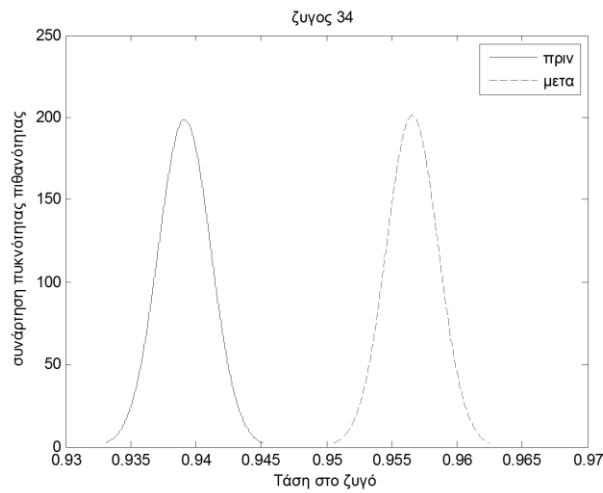
Σχήμα 4.3.19 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 31



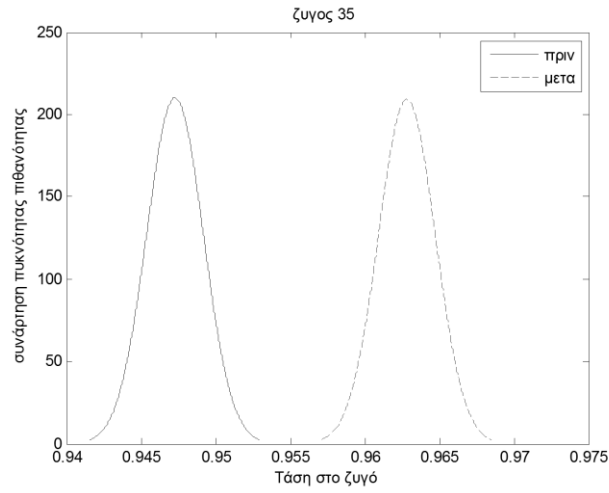
Σχήμα 4.3.20 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 32



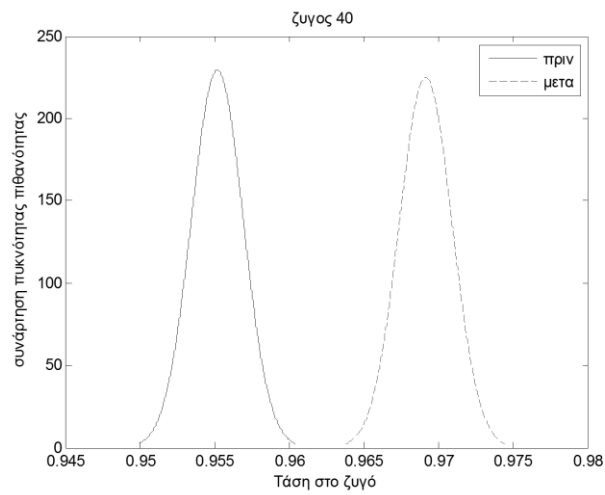
Σχήμα 4.3.21 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 33



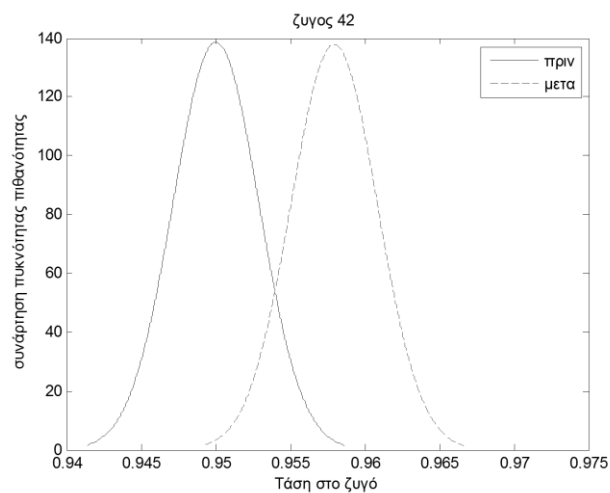
Σχήμα 4.3.22 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 34



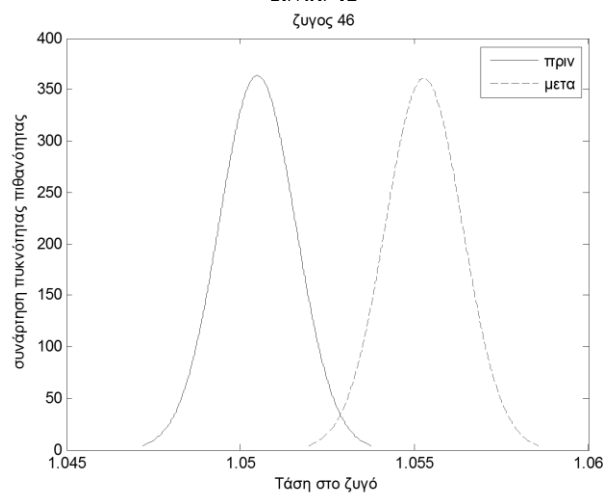
Σχήμα 4.3.23 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 35



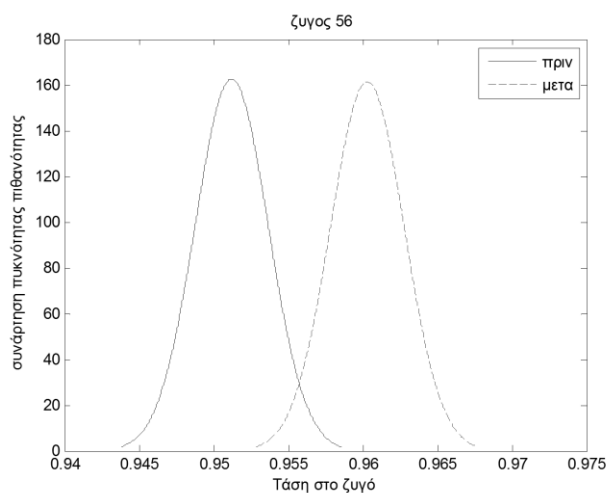
Σχήμα 4.3.24 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 40



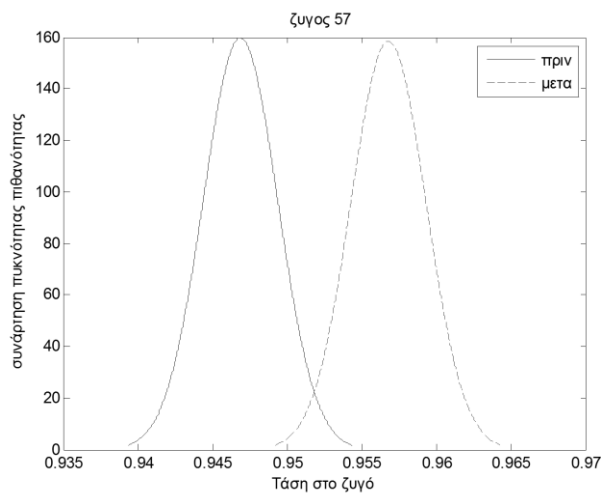
Σχήμα 4.3.25 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 42



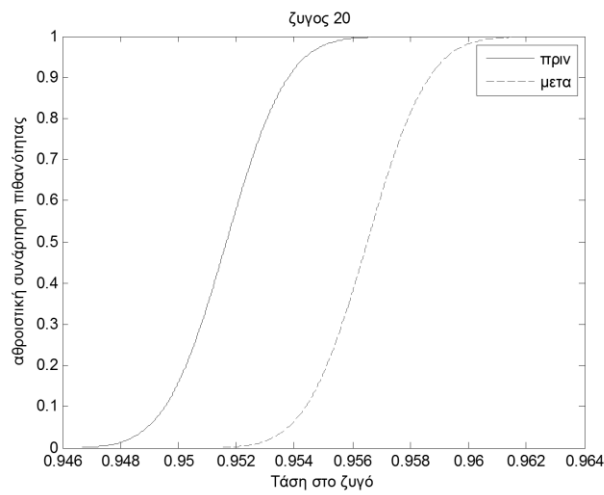
Σχήμα 4.3.26 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 46



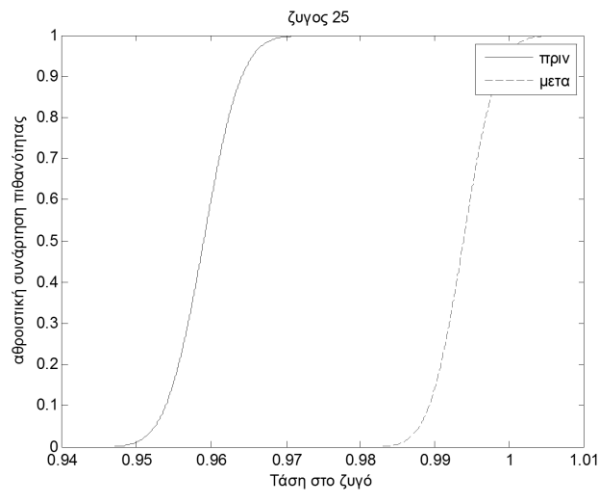
Σχήμα 4.3.27 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 56



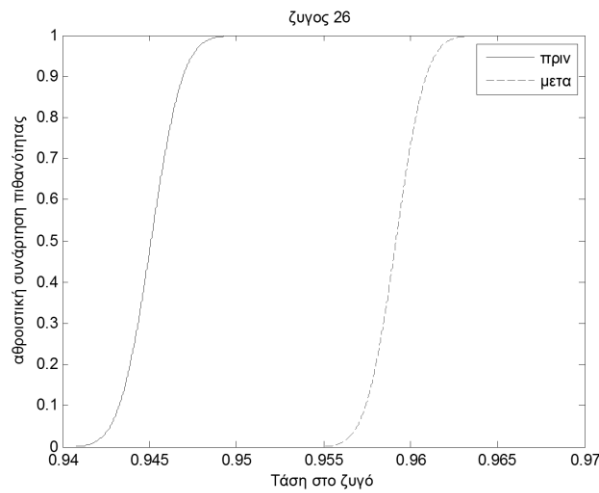
Σχήμα 4.3.28: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 57



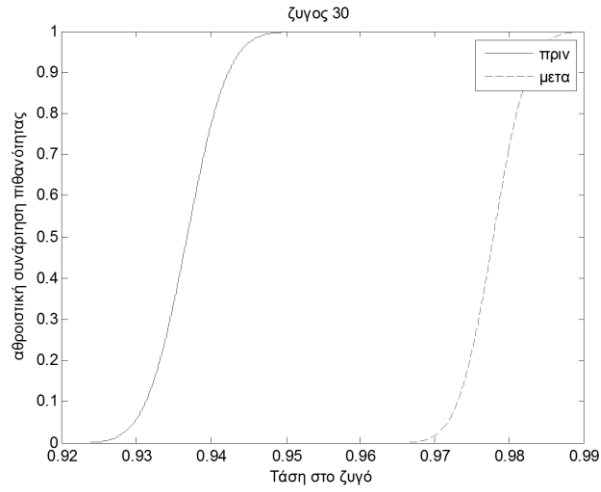
Σχήμα 4.3.29: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 20



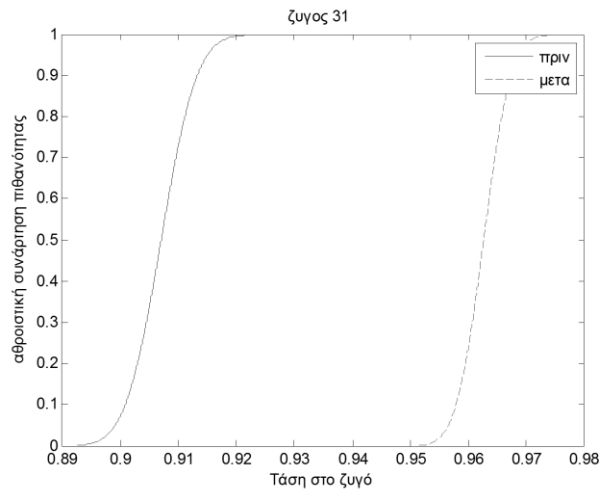
Σχήμα 4.3.30: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 25



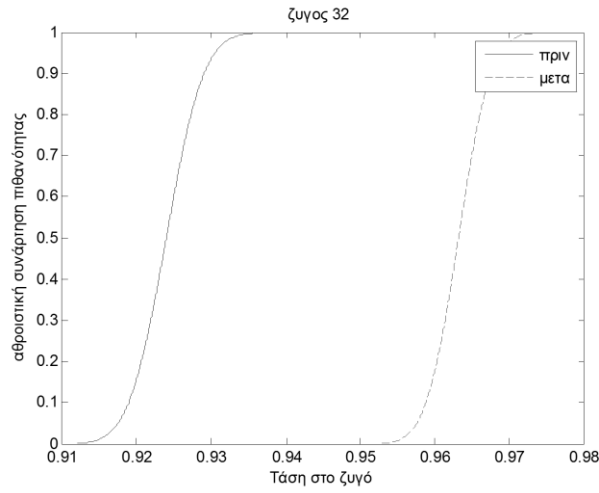
Σχήμα 4.3.31: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 26



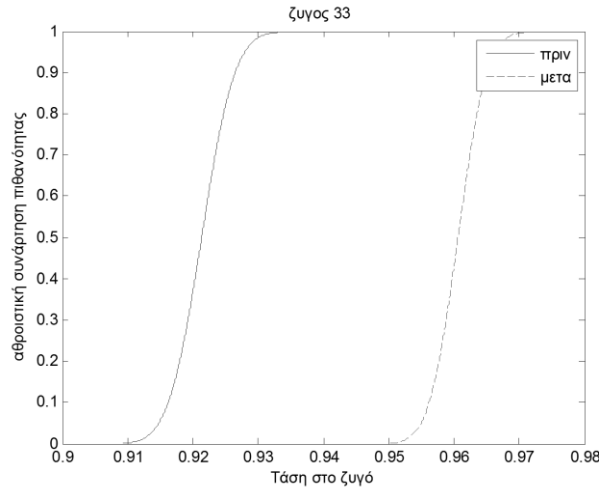
Σχήμα 4.3.32: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 30



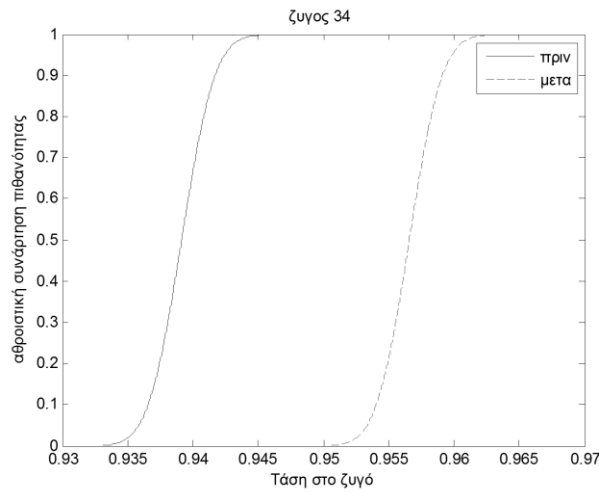
Σχήμα 4.3.33: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 31



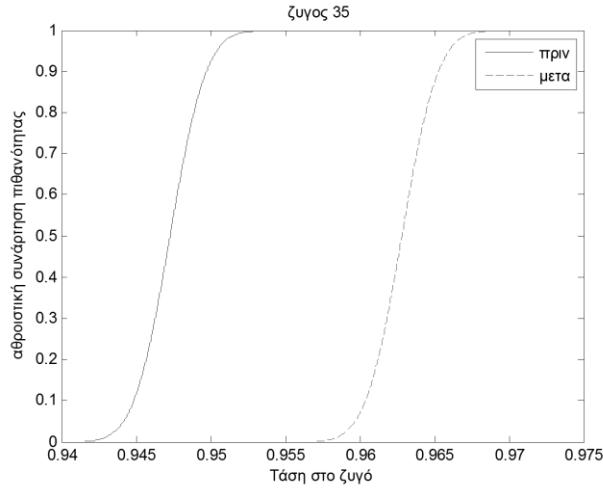
Σχήμα 4.3.34: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 32



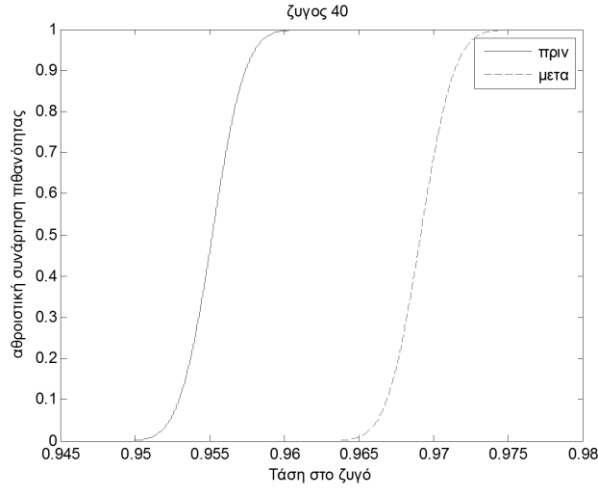
Σχήμα 4.3.35: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 33



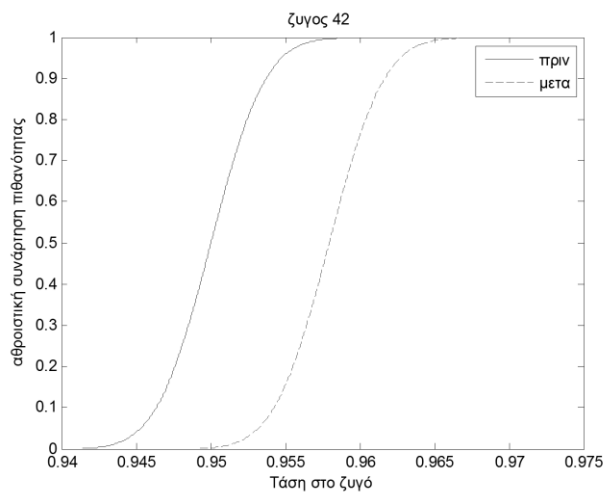
Σχήμα 4.3.36: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 34



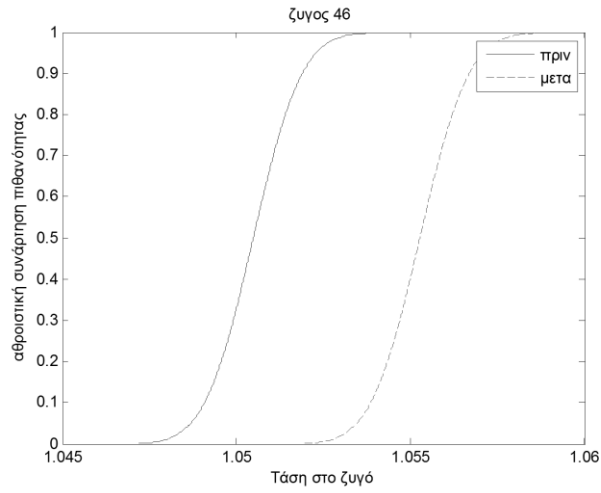
Σχήμα 4.3.37: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 35



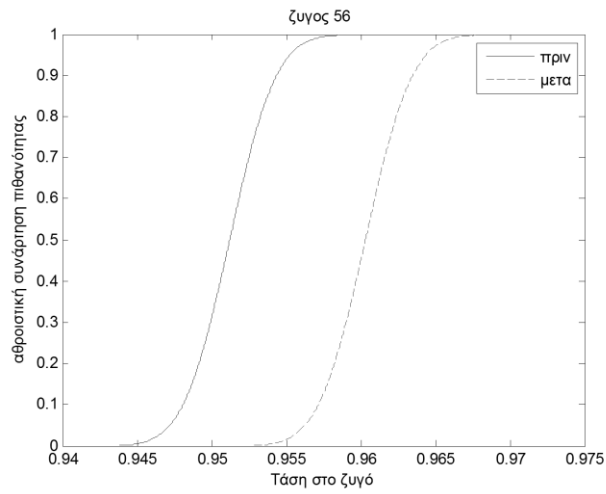
Σχήμα 4.3.38: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 40



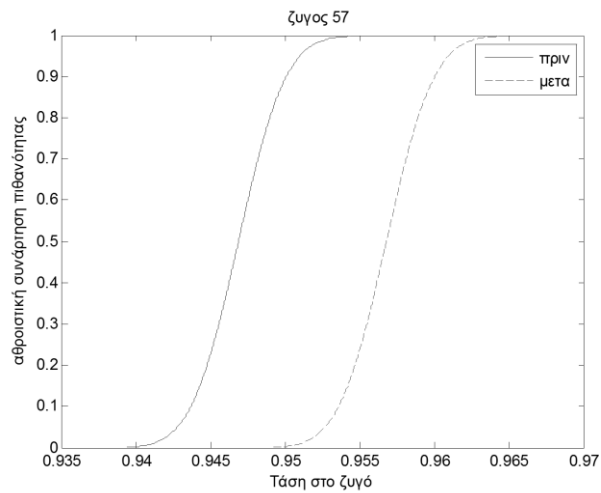
Σχήμα 4.3.39: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 42



Σχήμα 4.3.40: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 46



Σχήμα 4.3.41: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 56



Σχήμα 4.3.42: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 57

Όπως φαίνεται από τις σ.π.π. και τις α.σ.π. οι ζυγοί 20,25,26,30, 31, 32, 33, 34, 35,40,42,56,57 παραβιάζουν τα επιτρεπτά όρια της τάσης χωρίς την εφαρμογή ελέγχων. Χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο δεν καταφέραμε να τους επαναφέρουμε στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας οπότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν και άλλες μέθοδοι ρύθμισης τάση. Οι ρυθμίσεις που έγιναν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Γεννητριες

Πίνακας 4.3.5: Τάσεις γεννητριών στο δίκτυο 57 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Αρχική τιμή τάσης (α.μ)	Τελική τιμή τάσης (α.μ)	Μεταβολή τιμής τάσης (α.μ)
9	0,980	1,05	0,070

Συστοιχίες Πυκνωτών:

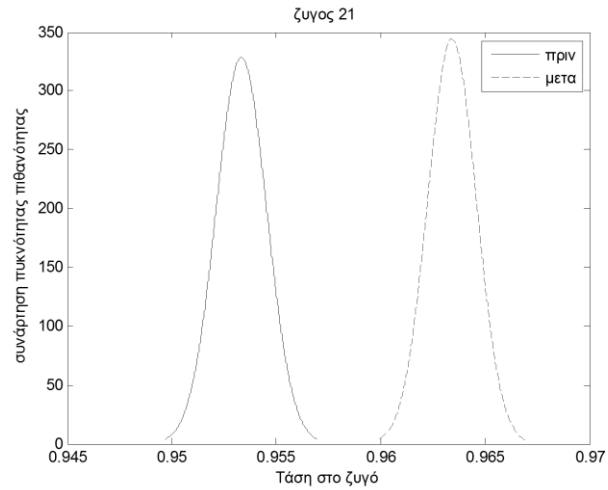
Η αντιστάθμιση γίνεται με συστοιχίες πυκνωτών με μέγιστο αριθμό βημάτων 24 και εγχεόμενη άεργη ισχύ ανά βήμα 0,5 MVar.

Πίνακας 4.3.6: Εγχεόμενη άεργος ισχύς πυκνωτών στο δίκτυο 57 ζυγών της IEEE

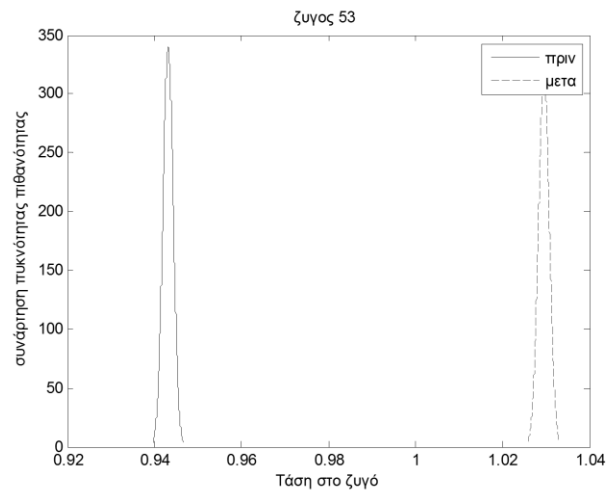
Ζυγός	Βήματα των πυκνωτών	Εγχεόμενη ισχύς (MVar)
4	13	6,5
5	21	10,5
13	12	6
16	9	4,5
17	12	6
29	15	7,5
31	9	4,5
37	6	3
55	4	2

Δίκτυο 118 ζυγών της IEEE

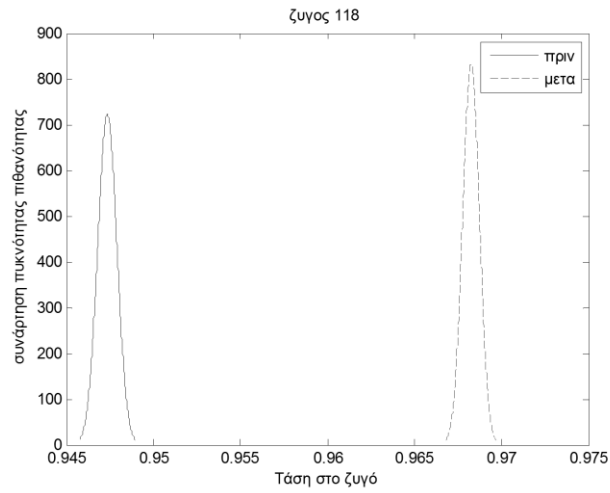
Παρακάτω φαίνονται οι σ.π.π. του δικτύου 118 ζυγών της IEEE. Στο δίκτυο 118 ζυγών της IEEE πραγματοποιείται αύξηση φορτίου 10% του βασικού σεναρίου.



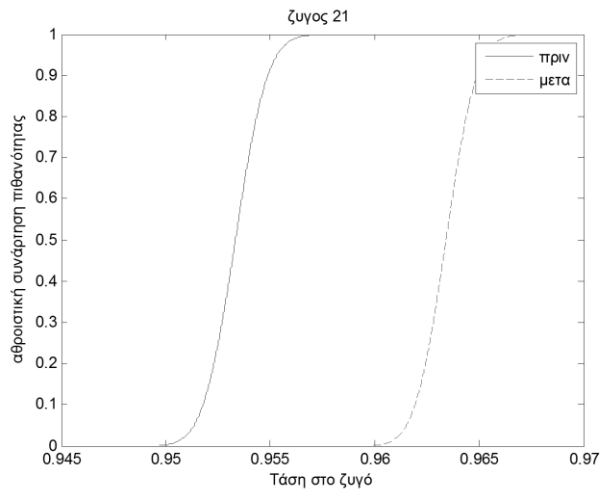
Σχήμα 4.3.43 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 21



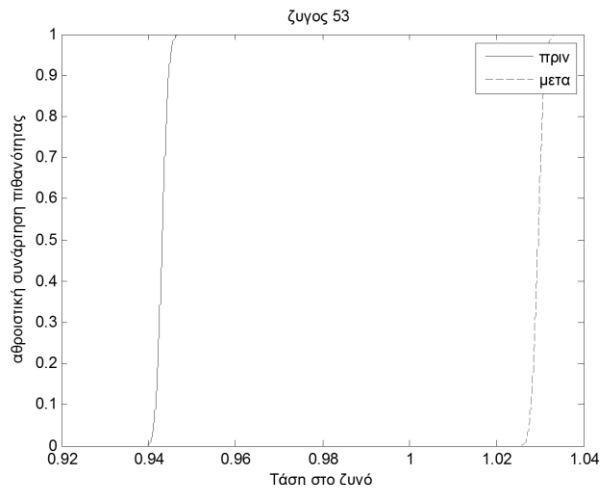
Σχήμα 4.3.44: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 53



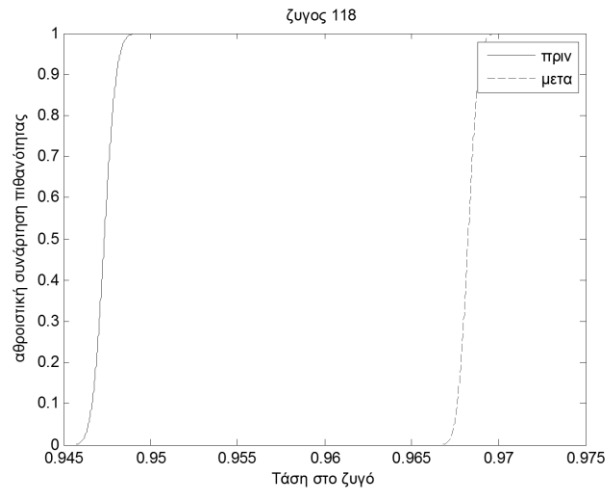
Σχήμα 4.3.45: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης του ζυγού 118



Σχήμα 4.3.46: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 21



Σχήμα 4.3.47: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 53



Σχήμα 4.3.48: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της τάσης του ζυγού 118

Όπως φαίνεται από τις σ.π.π. και τις α.σ.π. οι ζυγοί 21,53,118 παραβιάζουν τα επιτρεπτά όρια της τάσης χωρίς την εφαρμογή ελέγχων. Χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο καταφέραμε να τους επαναφέρουμε στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας. Οι έλεγχοι που έγιναν φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Γεννητριες**Πίνακας 4.3.7: Τάσεις γεννητριών στο δίκτυο 118 ζυγών της IEEE**

Ζυγός	Αρχική τιμή τάσης (α.μ)	Τελική τιμή τάσης (α.μ)	Μεταβολή τιμής τάσης (α.μ)
4	0,990	1,042	0,052
6	1,015	1,050	0,035
27	0,967	1,049	0,082
32	0,984	1,071	0,087
36	0,970	1,04	0,070
42	1,005	1,07	0,065
49	0,955	0,98	0,025
54	0,952	1,047	0,095
56	0,985	1,081	0,096
59	0,995	1,06	0,065
62	1,005	1,057	0,052
70	0,984	1,05	0,066
72	0,980	1,05	0,070
73	0,991	1,05	0,059
74	0,958	1,05	0,092
76	0,943	1,05	0,107
80	1,040	1,05	0,010
89	1,005	1,05	0,045
91	0,980	1,05	0,070
99	1,010	1,05	0,040
100	1,017	1,05	0,033
104	0,971	1,05	0,079
110	0,973	1,05	0,077
111	0,980	1,05	0,070
112	0,975	1,05	0,075
113	0,993	1,05	0,0570

Συστοιχίες Πυκνωτών

Η αντιστάθμιση γίνεται με συστοιχίες πυκνωτών με μέγιστο αριθμό βημάτων 24 και εγχεόμενη άεργη ισχύ ανά βήμα 0,5 MVAr.

Πίνακας 4.3.8: Εγγεόμενη άεργος ισχύς πυκνωτών στο δίκτυο 118 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Βήματα των πυκνωτών	Εγγεόμενη ισχύς (MVar)
3	4	2
13	2	1
21	1	0,5
33	4	2
44	2	1
47	2	1
52	4	2
82	3	1,5
95	3	1,5
98	4	2
106	2	1
118	7	3,5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός αυτής της διπλώματικής ήταν η εκτέλεση πιθανοτικής ροής φορτίου με περιορισμούς και η εύρεση των ελάχιστων ελέγχων ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα παραβίασης των ορίων της τάσης. Ως έλεγχοι στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν η μεταβολή της τάσης των γεννητριών και η έγχυση άεργου ισχύος από τους πυκνωτές. Η πιθανοτική ροή φορτίου έγινε με την μέθοδο της συνέλιξης και ο έλεγχος της τάσης επετεύχθη χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές μεθόδους.

Η μέθοδος έλεγχου τάσης με ανάλυση ευαισθησίας διακρίνεται για την απλότητα της και το γεγονός ότι ο αλγόριθμος της γίνεται εύκολα κατανοητός. Σε απλές περιπτώσεις επιτυγχάνει την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας παραβίασης των ορίων τάσης και μάλιστα γρήγορα. Αντίθετα σε πολύπλοκες περιπτώσεις όπως είναι αυτή του δικτύου 57 της IEEE υστερεί σε σχέση με τους υπόλοιπους δύο αλγορίθμους. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι κυρίως ότι δεν μπορεί να ισορροπήσει δύο αντικρουόμενα φαινόμενα: την ανάγκη να αυξηθεί η τάση σε κάποιους ζυγούς του συστήματος ενώ σε κάποιους άλλους θα πρέπει να μειωθεί. Έτσι αναγκαζόμαστε να χαλαρώσουμε πολύ τα όρια έτσι ώστε να βρούμε λύση για όλους τους ζυγούς μέσα σ' αυτά.

Η μέθοδος έλεγχου τάσης με την βοήθεια του γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού βασίζεται και αυτή κατά ένα μέρος της στην ανάλυση ευαισθησίας αλλά η χρησιμοποίηση του MILP σαν μαθηματικό εργαλείο για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων που προκύπτουν από το αρχικό πρόβλημα την κάνει πιο εύρωστη σαν μέθοδο. Συγκεκριμένα παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα στο δίκτυο 57 όπου η προηγούμενη μέθοδος αποτυγχάνει. Σαν αντιστάθμισμα όμως αυτής της ιδιότητας να είναι πιο εύρωστη από την προηγούμενη μέθοδο, η μέθοδος έλεγχου τάσης με την

βοήθεια του γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού είναι ελαφρώς πιο αργή και λιγότερο εύληπτη προς την λειτουργία της.

Όσον αφορά την μέθοδο τον έλεγχο τάσης με την μέθοδο σμήνους σωματιδίων η φιλοσοφία της μεθόδου είναι αρκετα διαφορετική καθώς δεν βασίζεται στην ανάλυση ευαισθησίας αλλά εκτελεί πολλές πιθανοτικές ροές φορτίου (όσες και τα σωματίδια κάθε φορά) συγκλίνοντας προς την λύση. Η εκτέλεση αυτών των πολλών πιθανοτικών ροών φορτίου επιβαρύνει τον αλγόριθμο με αποτέλεσμα να τον κάνει αισθητά πιο αργό από τους υπόλοιπους δύο. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι παράγει ελαφρώς διαφορετικά αποτελέσματα από τους άλλους δύο αλγορίθμους και αυτά κυρίως στα δίκτυα που έχουν πολλούς ζυγούς (δίκτυο 57 ζυγών IEEE, δίκτυο 118 ζυγών IEEE) . Αυτό εν μέρει μπορεί να αποδοθεί σε δύο παράγοντες : Πρώτον ότι η φιλοσοφία της ακολουθόμενης μεθόδου είναι διαφορετική από τις άλλες δύο. Δεύτερον ότι στα μεγάλα δίκτυα το πεδίο λύσεων (search space) είναι πολύ μεγαλύτερο οπότε μπορεί η PSO να ‘εγκλωβίζεται’ σε τοπικό ελάχιστο και να μην βρίσκει το ολικό.

Παρατηρήθηκε επίσης από όλες τις μεθόδους ανικανότητα να διατηρήσουν την τάση μέσα στα όρια για το δίκτυο 57. Η αιτία αυτού του φαινομένου έχει εξηγηθεί ήδη για τη μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας (έχει να κάνει με την απλότητα του αλγορίθμου αυτής της μεθόδου) αλλά για τις υπολοιπες δύο μεθόδους το πρόβλημα έγκειται στην αδυναμία των μέσων που διαθέτουμε για να αποκαταστήσουμε την τάση. Θα πρέπει λοιπόν να μεγαλώσει το διάνυσμα των μεταβλητών ελέγχου προσθέτοντας λ.χ. την δυνατότητα απόρριψης φορτίου και ελέγχου της τάσης μέσω ΣΑΤΥΦ.

Τέλος κλείνοντας θα πρέπει να ξανατονιστούν τα θετικά αποτελέσματα που είχαμε χρησιμοποιώντας αυτές τις τρεις μεθόδους για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας παραβίασης των ορίων της τάσης.. Αποτελέσματα που πιστοποιούν ότι αυτές οι μέθοδοι είναι κατάλληλες για τον έλεγχο της τάσης σε ένα δίκτυο ΣΗΕ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Athanasios Papoulis, S. Unnikrishna Pillai, "Probability, Random Variables and Stochastic Process." New York: McGraw-Hill Inc., Fourth Edition, 2001
- [2] Hatziargyriou, N.D.; Karakatsanis, T.S., "Probabilistic load flow for assessment of voltage instability," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-* , vol.145, no.2, pp.196,202, Mar 1998
- [3] Karakatsanis, T.S.; Hatziargyriou, N.D., "Probabilistic constrained load flow based on sensitivity analysis," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.9, no.4, pp.1853,1860, Nov 1994
- [4] Allan, R.N.; Leite da Silva, A.M.; Abu-Nasser, A.A.; Burchett, R.C., "Discrete Convolution in Power System Reliability," *Reliability, IEEE Transactions on* , vol.R-30, no.5, pp.452,456, Dec. 1981
- [5] Cooley, James W.; Lewis, Peter A.W.; Welch, Peter D., "The Fast Fourier Transform and Its Applications," *Education, IEEE Transactions on* , vol.12, no.1, pp.27,34, March 1969
- [6] Jia, Z.W.; Liu, J.; Xie, X.M., "Study on Secondary Voltage Control Based on Multi-agent Particle Swarm Optimization Algorithm," *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on* , vol., no., pp.1,5, 22-26 Oct. 2006
- [7] Kundur, P. (Prabha) Power system stability and control.
New York : McGraw-Hill, ©1994
- [8] B. Borkowska, "Probabilistic Load Flow," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS93, pp. 752-759, 1974
- [9] J. F. Dopazo, O. A. Klitin, and A. M. Sasson, "Stochastic load flows," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 94, pp. 299-309, 1975

- [10] Bronson, R., & Naadimuthu, G. (1997). *Schaum's outline of theory and problems of operations research*. New York: McGraw-Hill.
- [11] Saric, A.T.; Stanković, A.M., "A robust algorithm for Volt/Var control," *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES* , vol., no., pp.1,8, 15-18 March 2009
- [12] www.mathworks.com/matlabcentral
- [13] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez, and R. J. Thomas, "Matpower: SteadyState Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 1, pp. 12–19, Feb. 2011.
- [14] Islam, S.R.; Sutanto, D.; Muttaqi, K.M., "A decentralized multi-agent based voltage control for catastrophic disturbances in a power system," *Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE* , vol., no., pp.1,8, 6-11 Oct. 2013
- [15] Trakas, D.N.; Voumvoulakis, E.M.; Hatziargyriou, N.D., "Decentralized control of power system zones based on probabilistic constrained load flow," *Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2014*
- [16] Hatziargyriou, N.D.; Karakatsanis, T.S.; Lorentzou, M.I., "Voltage control settings to increase wind power based on probabilistic load flow," *Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2004 International Conference on* , vol., no., pp.737,741, 16-16 Sept. 2004
- [17] Hatziargyriou, N.D.; Karakatsanis, T.S., "Distribution system voltage and reactive power control based on probabilistic load flow analysis," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-* , vol.144, no.4, pp.363,369, Jul 1997
- [18] Hatziargyriou, N.D.; Karakatsanis, T.S.; Papadopoulos, M., "Probabilistic load flow in distribution systems containing dispersed wind power

generation," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.8, no.1, pp.159,165,
Feb 1993