



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

ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ DC ΔΙΚΤΥΑ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γελντά Μουεμίν

Επίβλεψη: Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



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

ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ DC ΔΙΚΤΥΑ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γελντά Μουεμίν

Επιβλεψη: Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Οκτώβριο 2016

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Σ. Παπαθανασίου
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Π. Γεωργιλάκης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

.....

ΓΕΛΝΤΑ ΜΟΥΕΜΙΝ

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

Copyright © Γελντά Μουεμίν, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η επίλυση του προβλήματος της πιθανοτικής ροής φορτίου σε δίκτυα συνεχούς ρεύματος με σκοπό την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας της παραγωγής στα δίκτυα, τα οποία προκαλούνται για παράδειγμα από τις αβεβαιότητες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αβεβαιότητα αυτή αντιμετωπίζεται με την χρήση κατανομών πιθανότητας, συγκεκριμένα στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση της κανονικής κατανομής.

Στην παρούσα εργασία, υλοποιήθηκε αλγόριθμος σε περιβάλλον MATLAB για τον υπολογισμό των τάσεων πάνω στους ζυγούς και την ροή ισχύος πάνω στους κλάδους. Αρχικά γίνεται θεωρητική ανάλυση της ροής φορτίου σε DC δίκτυα. Σε αυτό το σημείο γίνεται αναφορά επίσης στις μεθόδους επίλυσης ροής φορτίου σε DC δίκτυα. Οι μέθοδοι αυτοί είναι η μέθοδος Gauss-Seidel, η μέθοδος Newton-Raphson, και η μέθοδος Forward and Backward Sweep. Στη συνέχεια, γίνεται θεωρητική ανάλυση της πιθανοτικής ροής φορτίου σε DC δίκτυα καθώς επίσης και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται (αριθμητική και αναλυτική μέθοδος). Το πεδίο εφαρμογών της πιθανοτικής ροής φορτίου είναι επίσης ένα από τα θέματα που αναλύεται σε αυτό το κεφάλαιο. Επίσης, γίνεται διατύπωση του προβλήματος και ανάλυση της τεχνικής συνέλιξης. Στο τελευταίο κεφάλαιο, αρχικά γίνεται εφαρμογή της ανάλυσης ροής φορτίου σε DC δίκτυα με χρήση της μεθόδου Newton-Raphson και μετά γίνεται εφαρμογή της πιθανοτικής ροής φορτίου σε ενδεικτικά DC δίκτυα. Σε κάθε μια από τις δυο εφαρμογές υπολογίζεται η τάση στους ζυγούς και η ροή ισχύος πάνω στους κλάδους.

Οι αλγόριθμοι που υλοποιήθηκαν εφαρμόστηκαν σε δυο δίκτυα 7 και 15 ζυγών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στο τελευταίο κεφάλαιο.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Πιθανοτική ροή φορτίου σε DC δίκτυα, ακτινικά δίκτυα διανομής, ανάλυση ροών φορτίου σε DC δίκτυα, μέθοδος Gauss-Seidel, μέθοδος Newton-Raphson, μέθοδος Forward and Backward Sweep, HVDC συστήματα, LVDC συστήματα.

ABSTRACT

The current Diploma Thesis deals with Probabilistic Load Flow Analysis in Direct Current grids in order to face the generation uncertainty of the networks which caused for example by the uncertainties of renewable energy sources. This uncertainty is treated by using probability distributions, specifically in this Thesis normal distribution has used.

In the present Diploma Thesis, an algorithm was developed in MATLAB environment for calculating voltages at the buses and power flows at the branches. Initially load flow analysis in DC grids analyzed theoretically. At this point the methods used at load flow analysis in DC grids is mentioned. The methods are the Gauss-Seidel method, Newton-Raphson method and Forward and Backward Sweep method. Then, the probabilistic load flow in DC grids as well as the methods used (numerical and analytical method) theoretically analyzed. The field of applications of the probabilistic load flow is one of the issues discussed at this point. Also, the problem defined and the technique for convolution analyzed. In the last chapter, initially the application of load flow analysis in DC grids with the usage of the Newton-Raphson method and then the application of probabilistic load flow in indicative DC grids are examined. At each of the two applications the voltage of buses and the power flow of branches calculated.

The algorithms developed for the current Thesis were tested on two grids with 7 and 15 buses. The application results are presented in detail at the last chapter.

KEY WORDS

Probabilistic load flow in DC grids, radial distribution networks, load flow analysis in DC networks, Gauss-Seidel method, Newton-Raphson method, Forward and Backward Sweep method, HVDC systems, LVDC systems.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος υπό την επίβλεψη του κ. Ν. Χατζηαργυρίου, καθηγητής της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεση της διπλωματικής αυτής εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Βασίλη Κλεφτάκη, για την βοήθεια, την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Όλγα Βλαχοκυριάκου για την βοήθεια της πάνω στον αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για τη στήριξη και την βοήθεια που μου παρείχαν όλα τα χρόνια των σπουδών μου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω την φίλη μου Ξανθή Γιαταγάνα που με συμβουλεύει πάντα σε δύσκολες στιγμές. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την φίλη μου Ειρήνη Μπαρμπάτη που με έχει βοηθήσει πάρα πολύ με την σχόλη.

Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στους γονείς μου που με έχουν στήριξη στην κάθε μου προσπάθεια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Εισαγωγή	1
1.1.1	Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας	1
1.1.2	Δίκτυα συνεχούς ρεύματος	2
1.1.3	Ροή ισχύος σε DC δίκτυα	9
1.1.4	Ιστορική ανάπτυξη της πιθανοτικής ροής φορτίου	10
1.1.5	Πιθανοτική ροή φορτίου σε DC δίκτυα	14
1.2	Αντικείμενο της εργασίας	17
1.3	Δομή της εργασίας	17
1.4	Βιβλιογραφία	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:	ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ DC ΔΙΚΤΥΑ	21
2.1	Εισαγωγή	21
2.2	Μελέτη ροών φορτίου σε DC δίκτυα	23
2.2.1	Μεταβλητές συστήματος του DC δικτύου	23
2.2.2	Εξισώσεις ροών φορτίου του DC δικτύου	25
2.3	Μεθόδοι επίλυσης του προβλήματος ροής φορτίου σε DC δίκτυα	27
2.3.1	Η μέθοδος Gauss-Seidel βασισμένη στην επαναληπτική τεχνική	28
2.3.2	Η μέθοδος Newton-Raphson	30
2.3.3	Η μέθοδος Forward and Backward Sweep (FBS)	32
2.4	Βιβλιογραφία	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:	ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ DC ΔΙΚΤΥΑ	35
3.1	Σκοπός της Πιθανοτικής Ροής Φορτίου	35

3.2	Πληροφορίες που αποκτάμε από την εφαρμογή της μεθόδου	37
3.3	Πιθανές εφαρμογές της πιθανοτικής ροής φορτίου	39
3.4	Μέθοδοι επίλυσης της πιθανοτικής ροής φορτίου σε DC δίκτυα	41
3.5	Διατύπωση του προβλήματος	44
3.6	Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος	47
3.7	Τεχνική συνέλιξης	52
3.8	Βιβλιογραφία	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ 61

4.1	Εισαγωγή	61
4.2	Το σύστημα των 7 ζυγών	62
4.2.1	Σενάριο της ντετερμινιστικής ροής φορτίου στο δίκτυο των 7 ζυγών	63
4.2.2	Σενάριο της πιθανοτικής ροής φορτίου στο δίκτυο των 7 ζυγών	67
4.3	Το σύστημα των 15 ζυγών	76
4.3.1	Σενάριο της ντετερμινιστικής ροής φορτίου στο δίκτυο των 15 ζυγών	76
4.3.2	Σενάριο της πιθανοτικής ροής φορτίου στο δίκτυο των 15 ζυγών	82
4.4	Συμπεράσματα	93
4.5	Βιβλιογραφία	94

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ 95

A.1	Κατανομές πιθανότητας	95
A.1.1	Κανονική κατανομή	98
A.2	Βιβλιογραφία	100

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ 101

B.1	Γραμμικοποιήσεις εξισώσεων	101
B.1.1	Τάση στους ζυγούς	103

B.2	Βιβλιογραφία	104
-----	--------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ:	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ	105
---------------------	--------------------------------	------------

Γ.1	Ο αλγόριθμος για την ντετερμινιστική ροή φορτίου	105
-----	--	-----

Γ.2	Ο αλγόριθμος για την πιθανοτική ροή φορτίου	107
-----	---	-----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Ζυγός ενός Σ.Η.Ε.	23
Σχήμα 2.2: Ρεύμα και ισχύς ζυγού	24
Σχήμα 2.3: Τυπικό κομμάτι δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας	25
Σχήμα 2.4: Δίκτυο n ζυγών	27
Σχήμα 3.1: Τυπικό ακτινικό δίκτυο	47
Σχήμα 3.2: Διαμοιρασμός μιας διακριτής τιμής	58
Σχήμα 4.1: Το δίκτυο των 7 ζυγών	62
Σχήμα 4.2: Καταναλώσεις των ζυγών 3, 4 και 7 του δικτύου των 7 ζυγών	68
Σχήμα 4.3: Παραγωγές των ζυγών 5 και 7 του δικτύου των 7 ζυγών	69
Σχήμα 4.4: Τάσεις των ζυγών 2, 3, 4, 5, 6 και 7 από την πιθανοτική ροή φορτίου του δικτύου των 7 ζυγών	74
Σχήμα 4.5: Ροές ισχύος των κλάδων από την πιθανοτική ροή φορτίου του δικτύου των 7 ζυγών	75
Σχήμα 4.6: Το δίκτυο των 15 ζυγών	76
Σχήμα 4.7: Καταναλώσεις των ζυγών 3, 5, 6, 10, 12, 13, 14 και 15 του δικτύου των 15 ζυγών	84
Σχήμα 4.8: Παραγωγές των ζυγών 4, 7, 8 και 11 του δικτύου των 15 ζυγών	84
Σχήμα 4.9: Τάσεις των ζυγών 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 και 15 από την πιθανοτική ροή φορτίου του δικτύου των 15 ζυγών	92
Σχήμα 4.10: Ροές ισχύος των κλάδων από την πιθανοτική ροή φορτίου του δικτύου των 15 ζυγών	93
Σχήμα A.1: Κατανομή $N(\mu, \sigma^2)$	98
Σχήμα A.2: Κανονικές κατανομές ($\sigma_1 < \sigma_2$)	99

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Τιμές των καταναλώσεων-παραγωγών των ζυγών του δικτύου των 7 ζυγών	63
Πίνακας 4.2: Αντιστάσεις των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών	64
Πίνακας 4.3: Μήτρα αγωγιμοτήτων του δικτύου των 7 ζυγών	64
Πίνακας 4.4: DC τάσεις και DC εγχύσεις ισχύος εισόδου σε κάθε ζυγό του δικτύου των 7 ζυγών	64
Πίνακας 4.5: Τιμές των παραμέτρων slack, noslack, pol, tol, itmax του δικτύου των 7 ζυγών	65
Πίνακας 4.6: DC τάσεις και DC εγχύσεις ισχύος εξόδου σε κάθε ζυγό του δικτύου των 7 ζυγών	65
Πίνακας 4.7: Απώλειες ισχύος των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών	66
Πίνακας 4.8: Ροές ισχύος των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών	66
Πίνακας 4.9: Τιμές των καταναλώσεων-παραγωγών των ζυγών του δικτύου των 7 ζυγών	67
Πίνακας 4.10: Αντιστάσεις των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών	68
Πίνακας 4.11: Τάσεις των ζυγών από την ντετερμινιστική ροή φορτίου του δικτύου των 7 ζυγών	69
Πίνακας 4.12: Ισχύς των ζυγών από την ντετερμινιστική ροή φορτίου του δικτύου των 7 ζυγών	70
Πίνακας 4.13: Ροές ισχύος από τους αρχικούς ζυγούς των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών	70
Πίνακας 4.14: Ροές ισχύος στους καταλυτικούς ζυγούς των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών	71
Πίνακας 4.15: Απώλειες ισχύος των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών	71
Πίνακας 4.16: Αντιστάσεις των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών	71
Πίνακας 4.17: Διασυνδέσεις του κάθε κλάδου με τους κόμβους του δικτύου των 7 ζυγών	72
Πίνακας 4.18: Συνθέτες αντιστάσεις του δικτύου των 7 ζυγών	72
Πίνακας 4.19: Συντελεστής βαρύτητας των ενεργών εγχύσεων	

των ζυγών του δικτύου των 7 ζυγών	73
Πίνακας 4.20: Μέσες τιμές των τάσεων των ζυγών από την πιθανοτική ροή φορτίου του δικτύου των 7 ζυγών	73
Πίνακας 4.21: Ροές ισχύος των κλάδων από την πιθανοτική ροή φορτίου του δικτύου των 7 ζυγών	74
Πίνακας 4.22: Τιμές των καταναλώσεων-παραγωγών των ζυγών του δικτύου των 15 ζυγών	77
Πίνακας 4.23: Αντιστάσεις των κλάδων του δικτύου των 15 ζυγών	77
Πίνακας 4.24: Μήτρα αγωγιμοτήτων του δικτύου των 15 ζυγών	78
Πίνακας 4.25: DC τάσεις και DC εγχύσεις ισχύος εισόδου σε κάθε ζυγό του δικτύου των 15 ζυγών	79
Πίνακας 4.26: Τιμές των παραμέτρων slack, noslack, pol, tol, itmax του δικτύου των 15 ζυγών	79
Πίνακας 4.27: DC τάσεις και DC εγχύσεις ισχύος εξόδου σε κάθε ζυγό του δικτύου των 15 ζυγών	80
Πίνακας 4.28: Απώλειες ισχύος των κλάδων του δικτύου των 15 ζυγών	81
Πίνακας 4.29: Ροές ισχύος των κλάδων του δικτύου των 15 ζυγών	81
Πίνακας 4.30: Τιμές των καταναλώσεων-παραγωγών των ζυγών του δικτύου των 15 ζυγών	82
Πίνακας 4.31: Αντιστάσεις των κλάδων του δικτύου των 15 ζυγών	83
Πίνακας 4.32: Τάσεις των ζυγών από την ντετερμινιστική ροή φορτίου του δικτύου των 15 ζυγών	85
Πίνακας 4.33: Ισχύς των ζυγών από την ντετερμινιστική ροή φορτίου του δικτύου των 7 ζυγών	85
Πίνακας 4.34: Ροές ισχύος από τους αρχικούς ζυγούς των κλάδων του δικτύου των 15 ζυγών	86
Πίνακας 4.35: Ροές ισχύος στους καταλυτικούς ζυγούς των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών	87
Πίνακας 4.36: Απώλειες ισχύος των κλάδων του δικτύου των 15 ζυγών	87

Πίνακας 4.37: Αντιστάσεις των κλάδων του δικτύου των 15 ζυγών	88
Πίνακας 4.38: Διασυνδέσεις του κάθε κλάδου με τους κόμβους του δικτύου των 15 ζυγών	89
Πίνακας 4.39: Συνθέτες αντιστάσεις του δικτύου των 15 ζυγών	89
Πίνακας 4.40: Συντελεστής βαρύτητας των ενεργών εγχύσεων των ζυγών του δικτύου των 15 ζυγών	90
Πίνακας 4.41: Μέσες τιμές των τάσεων των ζυγών από την πιθανοτική ροή φορτίου του δικτύου των 15 ζυγών	91
Πίνακας 4.42: Ροές ισχύος των κλάδων από την πιθανοτική ροή φορτίου του δικτύου των 15 ζυγών	91

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και μέσων, τα οποία χρησιμεύουν στην εξυπηρέτηση των αναγκών ενός συνόλου καταναλωτών για ηλεκτρική ενέργεια. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας από άποψη εκτάσεως μπορούν να διακριθούν σε "Εθνικά Συστήματα", "Περιφερειακά Συστήματα" και "Ιδιωτικά Συστήματα" εφόσον αντίστοιχα καλύπτουν το σύνολο μιας χώρας, το σύνολο μιας γεωγραφικής περιοχής ή τις ανάγκες μεμονωμένου ιδιωτικού συγκροτήματος [1.1].

Ο προορισμός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε μια εξυπηρετούμενη περιοχή κατανάλωσης. Το σύστημα πρέπει να έχει μελετηθεί, να λειτουργεί σωστά και να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις [1.1]:

- Πρέπει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση.
- Η ζήτηση ισχύος μεταβάλλεται με το χρόνο, και το σύστημα πρέπει να μπορεί να ικανοποιεί αυτή τη συνεχώς μεταβαλλόμενη ζήτηση.

- Η παρεχόμενη ενέργεια πρέπει να ικανοποιεί ορισμένους όρους ποιότητας. Τρεις βασικοί παράγοντες που συνιστούν την ποιότητα αυτή είναι:
 - i. Σταθερή συχνότητα
 - ii. Σταθερή τάση
 - iii. Υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης
- Η ενέργεια πρέπει να παρέχεται με τα ελάχιστα οικονομικά και οικολογικά κόστη.

1.1.2 Δίκτυα συνεχούς ρεύματος

Λόγω της αυξανόμενης παρουσίας των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος ένα μεγάλο μέρος της παράγωγης της ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να μετατραπεί από AC σε DC για τελική χρήση. Τα δίκτυα συνεχούς ρεύματος βρίσκουν εφαρμογή σε μικροδίκτυα και σε έξυπνα δίκτυα, σε ηλεκτρονικά συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και σε υπερδίκτυα τα οποία είναι ειδικά για την ενσωμάτωση των ηπειρωτικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [1.5].

Πλεονεκτήματα του συνεχούς ρεύματος [1.3]:

- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και οι χρήστες τους εργάζονται ως επί το πλείστον σε DC.
- Μικρότερες απώλειες με τη μεταφορά στις υψηλές ισχύς (καλώδια HVDC).
- Λιγότερες μετατροπές σε υψηλότερες συχνότητες.
- Δυνατόν να μεταφέρει περισσότερη ισχύ πάνω από ένα καλώδιο ή γραμμή με την ίδια διατομή.
- Χωρίς άεργο ισχύ.
- Χωρίς πρόβληματα του συντελεστή ισχύος.
- Αξιόπιστη επικοινωνία των γραμμών ισχύος.
- Φορτία και εξαρτήματα με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.
- Χωρίς ισχύ βραχυκυκλώσης.
- Μειωμένη χρήση των πρώτων υλών.

Μειονεκτήματα του συνεχούς ρεύματος [1.3]:

- Ασφάλεια (ακόμη) δεν είναι προτυποποιημένη.
- Η μηχανική αλλαγή είναι δύσκολη.
- Προτυποποίηση μόνο για HVDC και όχι για LVDC.
- Δεν είναι ευρέως γνωστό.

Λαμβάνοντας υπόψη το δίκτυο στο σύνολο του, μπορεί κανείς να δει ότι το συνεχές ρεύμα είναι ήδη παρόν όπως το HVDC στο δίκτυο μεταφοράς και ότι το LVDC στο δίκτυο διανομής θα εφαρμοστεί στο μέλλον. Επίσης στο παρόν ηλεκτρικό δίκτυο, η DC ενέργεια χρησιμοποιείται κυρίως για τη μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις και σε υψηλές τάσεις. Στο μέλλον αναμένεται ότι η χρήση του HVDC στο δίκτυο μεταφοράς θα αυξηθεί.

Το συνεχές ρεύμα επίσης παίζει σημαντικό ρόλο στο δίκτυο διανομής. Στο τρέχον δίκτυο διανομής υπάρχουν λίγες πηγές, αλλά στο δίκτυο διανομής του μέλλοντος μεγάλο αριθμό ανανεώσιμων πηγών ενεργείας αναμένεται να συνδεθούν στις αστικές περιοχές.

Τέλος, γνωρίζοντας ότι σχεδόν όλα τα φορτία δουλεύουν με DC τάση και ότι όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενεργείας παράγουν DC ενέργεια (άμεσα ή έμμεσα) είναι λογικό να διανεμηθεί επίσης η ενέργεια μέσω ενός DC δικτύου διανομής για να αποφευχθούν οι AC/DC μετατροπές [1.3].

Εφαρμογές στα δίκτυα συνεχούς ρεύματος

Τα συστήματα συνεχούς ρεύματος βρίσκουν εφαρμογή στα HVDC και στα LVDC συστήματα. Παρακάτω αναλύονται αυτά τα συστήματα καθώς επίσης και τα πεδία εφαρμογών αυτών των δύο συστημάτων.

Συστήματα High voltage direct current (HVDC)

Η HVDC τεχνολογία έχει χαρακτηριστικά που την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική για ορισμένες εφαρμογές της μετάδοσης. Η HVDC μετάδοση είναι ευρέως αναγνωρισμένη ως η συμφέρουσα για την μετάδοση μεγάλων

ποσοτήτων ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, τις ασύγχρονες διασυνδέσεις, και για τις μακρές διασταυρώσεις υποβρύχιων καλωδίων. Ο αριθμός των HVDC έργων που έχουν παραδοθεί ή που είναι υπό εξέταση σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν αυξηθεί τα τελευταία χρόνια δείχνοντας τον ανανεωμένο ενδιαφέρον στην ώριμη αυτή τεχνολογία [1.6].

Οι εφαρμογές της HVDC μετάδοσης μπορούν να χωριστούν σε διάφορες βασικές κατηγορίες. Αν και ο λόγος για την επιλογή των HVDC είναι συχνά οικονομικός, αλλά μπορεί να υπάρχουν και άλλοι λόγοι για την επιλογή του. Το HVDC σύστημα μπορεί να είναι ο μόνος εφικτός τρόπος για τη διασύνδεση των δύο ασύγχρονων δικτύων, την μείωση των ρευμάτων του σφάλματος, την χρησιμοποίηση μακρών κυκλωμάτων υπόγειων καλωδίων, την αντιμετώπιση της συμφόρησης του δικτύου, την κοινοποίηση της χρησιμότητας της διασύνδεσης χωρίς την υποβάθμιση της αξιοπιστίας, και τον περιορισμό των περιβαλλοντικών ανησυχιών [1.6].

Τουλάχιστον οι ακόλουθες περιπτώσεις χρήσης μπορούν εύκολα να απαριθμηθούν για τα HVDC συστήματα [1.6]:

1. Μετάδοση μεγάλων ποσοτήτων ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις

Τα HVDC συστήματα μετάδοσης συχνά παρέχουν μια πιο οικονομική εναλλακτική λύση σε σχέση με τις εναλλασσόμενες μεταδόσεις για την μετάδοση μεγάλων ποσοτήτων ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις από απομακρυσμένες πηγές όπως υδροηλεκτρικές κατασκευές, σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυχείο, ή αιολικά πάρκα μεγάλης κλίμακας. Μεταφορές μεγάλης ποσότητας ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις είναι δυνατόν να γίνονται με λιγότερες γραμμές χρησιμοποιώντας HVDC συστήματα μεταφοράς.

2. Υπόγεια και υποβρύχια μετάδοση

Υπόγεια καλώδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις κοινοποιημένες διασυνδέσεις με τα άλλα δίκτυα χωρίς να επηρεάζουν την αξιοπιστία στις χρήσεις των κοινών δικτύων. Στα υπόγεια ή υποθαλάσσια καλωδιακά συστήματα υπάρχει σημαντική εξοικονόμηση κόστους στις εγκαταστάσεις καλωδίων και στις απωλεις κατά την χρήση της HVDC συστημάτων μεταφοράς. Ανάλογα με το επίπεδο ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί, οι

εξοικονομήσεις αυτές μπορούν να καλύψουν τα υψηλά κόστη των σταθμών μετατροπεία σε αποστάσεις 40 χιλιομέτρων και άνω.

3. Ασύγχρονα δίκτυα

Με τα HVDC συστήματα μετάδοσης, οι διασυνδέσεις μεταξύ ασύγχρονων δικτύων μπορούν να γίνουν πιο οικονομικές ή να γίνουν πιο αξιόπιστα συστήματα λειτουργίας. Η ασύγχρονη διασύνδεση επιτρέπει τις διασυνδέσεις του κοινού οφέλους παρέχοντας έναν μεσολαβητή μεταξύ των δύο συστημάτων. Αυτές οι διασυνδέσεις συχνά χρησιμοποιούν διαδοχικούς μετατροπείς χωρίς γραμμή μεταφοράς. Οι ασύγχρονες HVDC συνδέσεις ενεργούν ως ένα αποτελεσματικό «τείχος ασφαλείας» έναντι της διάδοσης των διακοπών με υπερχείλιση στο πέρασμα τους από το ένα δίκτυο σε ένα άλλο.

4. Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από υπεράκτιες εγκαταστάσεις

Αυτο-μεταγωγή, δυναμικός έλεγχος της τάσης και δυνατότητα επανεκκίνησης από ολική διακοπή επιτρέπουν τις συμπαγές VSC HVDC μεταφορές να λειτουργούν απομονωμένα φορτία σε νησιά ή υπεράκτιες πλατφόρμες παραγωγής πάνω σε μεγάλης απόστασης υπόγεια καλώδια. Αυτή η δυνατότητα μπορεί να μειώσει την ανάγκη για ακριβές τοπικές γεννήτριες ή να παρέχει ένα μέσο εγγύσης για τις υπεράκτιες παραγωγές όπως για παράδειγμα από ανεμογεννήτριες. Οι VSCs μπορούν να λειτουργήσουν σε μεταβλητές συχνότητες για αποτελεσματικότερη κίνηση μεγάλου συμπιεστή ή αντλίων φορτίων οι οποίες χρησιμοποιούν κινητήρες υψηλής τάσης.

5. Πολυτερματικά συστήματα

Τα περισσότερα HVDC συστήματα είναι για μετάδοση σημείου προς σημείο με ένα σταθμό μετατροπεία σε κάθε άκρο. Η χρήση των ενδιάμεσων σημείων συνδέσεων είναι σπάνιες. Η συμβατική HVDC μετάδοση χρησιμοποιεί την αντιστροφή πολικότητας της τάσης για να αντιστρέψει την κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος. Η αντιστροφή της πολικότητας δεν απαιτεί καμία ειδική διάταξη μεταγωγής για διτερματικό σύστημα όπου και οι δύο ακροδέκτες αντίστρεφουν την πολικότητα με δράση ελέγχου χωρίς την αντιστροφή της κατεύθυνσης του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι ειδικές DC-πλευράς ρυθμιστές μεταγωγής απαιτούνται για την αναστροφή της πολικότητας σε ένα πολυτερματικό σύστημα, ωστόσο, όπου μπορεί να είναι επιθυμητό να αντιστραφεί η κατεύθυνση του

ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα σημείο σύνδεσης διατηρώντας παράλληλα την ίδια κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος στα υπόλοιπα τερματικά. Για ένα διπολικό σύστημα αυτό μπορεί να γίνει με τη σύνδεση του μετατροπέα στον αντίθετο πόλο. Η VSC HVDC μεταφορά, όμως, αντιστρέφει το ηλεκτρικό ρεύμα μέσα από την αντιστροφή της κατεύθυνσης του ρεύματος παρά την πολικότητα της τάσης. Ως εκ τούτου, το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να αντιστραφεί σε ένα ενδιάμεσο σημείο σύνδεσης ανεξάρτητα από την κύρια κατεύθυνση της ροής του ρεύματος χωρίς την αντίστροφη της πολικότητας της τάσης.

6. Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αστικές περιοχές

Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για τις μεγάλες πόλεις εξαρτάται από την τοπική παραγωγή και την ικανότητα εισαγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τοπική παραγωγή συνήθως είναι παλαιότερη και λιγότερο αποδοτική απ'ότι οι νεότερες μονάδες που βρίσκονται μακριά. Συχνά, όμως, οι παλιοί, οι λιγότερο αποδοτικές μονάδες που βρίσκονται κοντά στο κέντρο της πόλης θα πρέπει να αποστέλλονται εκτός της παραγωγής επειδή πρέπει να χρησιμοποιούνται για παροχής τάσης ή αξιοπιστίας λόγω ανεπαρκούς μεταφοράς. Οι κανονισμοί της ποιότητας του αέρα μπορούν να περιορίσουν την διαθεσιμότητα των μονάδων αυτών. Οι νέες μεταδόσεις σε μεγάλες πόλεις είναι δύσκολο να τοποθετηθούν λόγω περιορισμών των διασυνδέσεων και τους περιορισμούς χρήσης της γης.

Τέλος, η χρήση της πιθανοτικής ροής φορτίου μπορεί να βοηθήσει στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Από τους ισχύς που υπολογίζεται από την πιθανοτική ροή φορτίου μπορεί να προσδιορισθεί ο τύπος των καλωδίων που πρέπει να χρησιμοποιηθεί στο δίκτυο.
- Στην περίπτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας η πιθανοτική ροή φορτίου μπορεί να βοηθήσει στην καταπολέμηση της αβεβαιότητας παραγωγής που προκαλείται από την αβεβαιότητα των καιρικών φαινομένων.

Συστήματα Low voltage direct current (LVDC)

LVDC είναι ένα θέμα το οποίο αναπτύσσει δίκτυα διανομής προς το έξυπνα δίκτυα και δημιουργεί νέες ευκαιρίες για την ανάπτυξη της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Η LVDC διανομή είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση για την ανάπτυξη, τα οφέλη των οποίων είναι μεταφορά μεγάλης ποσότητας ισχύος με χαμηλή τάση και βελτιώση της αξιοπιστίας και της ποιότητας της ισχύος. Επιπλέον, παρέχει ένα εύκολο σημείο σύνδεσης για την διασπαρμένη παράγωγη και τους χώρους αποθήκευσης της ενέργειας [1.7].

Τα πολυχρηστικά LVDC συστήματα έχουν χρησιμοποιηθεί ή προτείνονται να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές. Τουλάχιστον οι ακόλουθες έξι περιπτώσεις χρήσης μπορούν εύκολα να απαριθμηθούν για τα συστήματα διανομής LVDC [1.8]:

1. Στα δημόσια LVDC συστήματα

Το LVDC σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βελτιώσει την τεχνική και την οικονομική απόδοση της διανομής της χαμηλής τάσης και να αυξήσει την συνολική ασφάλεια της τροφοδοσίας. Παραδείγματα δημόσιων εφαρμογών είναι οι εγκαταστάσεις του δικτύου της χαμηλής τάσης διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και τα συστήματα του δημόσιου φωτισμού.

2. Κέντρα δεδομένων και τηλεπικοινωνιών, σταθμοί πομποδεκτών

Το LVDC σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της ενεργειακής και της οικονομικής απόδοσης των ηλεκτρικών συστημάτων προμηθεύοντας διακομιστές και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές τα οποία χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία και την αύξηση της αξιοπιστίας της μετάδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας.

3. Ηλεκτρικά οχήματα

Τα LVDC συστήματα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε κινητήρες και γίνονται γνωστή επίσης με τα ηλεκτρικά οχήματα. Μπαταρίες και πολλοί άλλοι αποθηκευτικοί χώροι ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να συνδεθούν κατευθείαν με την DC τάση. Το συνεχές ρεύμα επίσης χρησιμοποιείται για την γρήγορη φόρτιση των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα LVDC συστήματα με αποθηκευτικούς χώρους ηλεκτρικής ενέργειας εφαρμόζονται επίσης σε μικρά και μεσαία

ηλεκτρισμένα με ντίζελ θαλάσσια σκάφη αντί για τα LVAC για τη βελτίωση της ποιότητας της ισχύος, την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και την μείωση του κόστους.

4. Διασπαρμένη παραγωγή και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι παράγωγοι ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας είναι συχνά πηγές συνεχούς ρεύματος. Αντί της μετατροπής πάντα του DC που παράγεται σε AC, οι πηγές συνεχούς ρεύματος θα μπορούν να συνδεθούν στα DC δίκτυα με συσκευές με DC φορτία. Μια άλλη πτυχή είναι να συνδεθούν μερικοί παράγωγοι μικρής κλίμακας σε AC δίκτυα μέσω της ίδιας DC γραμμής. Και οι δύο αυτές λύσεις παρέχουν επίσης φυσικά σημεία σύζευξης για τις μπαταρίες επιτρέποντας την αποδοτική συγκομιδή των μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε γενικές γραμμές, η χρήση των DC δικτύων μειώνει την ποσότητα των μετατροπών των ηλεκτρονικών ισχύος σε σύγκριση με το παρόμοιο AC σύστημα και συνεπώς αυξάνει την ενεργειακή απόδοση και μειώνει το κόστος.

5. Βιομηχανικές εφαρμογές

Οι LVDC (και HVDC) γραμμές έχουν παραδοσιακά χρησιμοποιηθεί στον κλάδο της παράγωγης για τον εφοδιασμό των ηλεκτρικών κινητήρων. Η χρήση του συνεχούς ρεύματος μπορεί εύκολα να επεκταθεί, για παράδειγμα, στο φωτισμό των διαδρόμων και την γραμμή παραγωγής.

6. Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις των κτιρίων

Οι περισσότερες από τις σύγχρονες συσκευές τελικής χρήσης των μονοκατοικιών, των πολυκατοικιών, των εμπορικών κτηρίων και των γραφείων χρησιμοποιούν εσωτερικά συνεχές ρεύμα. Απώλειες στις εσωτερικές μετατροπές μπορούν να μειωθούν εάν οι συσκευές τροφοδοτούνται απευθείας με κατάλληλες DC τάσεις. Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και η μείωση του κόστους προβλέπονται ως αποτέλεσμα των LVDC συστημάτων, ειδικά όταν συνδυάζονται με τη use-case 4 (Use-case: είναι μια μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στην ανάλυση των συστημάτων για την αναγνώριση, την διευκρίνιση, και την οργάνωση των απαιτήσεων του συστήματος [1.10]).

Τέλος, η χρήση της πιθανοτικής ροής φορτίου μπορεί να βοηθήσει στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Σε ένα μικρό δίκτυο μέσω του ισχύ που υπολογίζετε από την πιθανοτική ροή φορτίου μπορεί να επιλεγεί ο μετατροπέας που θα χρησιμοποιηθεί στην μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές.
- Στην περίπτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας η πιθανοτική ροή φορτίου μπορεί να βοηθήσει στην καταπολέμηση της αβεβαιότητας παραγωγής που προκαλείται από την αβεβαιότητα των καιρικών φαινομένων.

1.1.3 Ροή ισχύος σε DC δίκτυα

Η ανάλυση ροών ισχύος συνίσταται στον υπολογισμό των τάσεων κατά μέτρο σε όλους τους ζυγούς, καθώς και των ροών ενεργού ισχύος σε όλες τις γραμμές ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας, το οποίο ορίζεται από τις καταναλώσεις των φορτίων, την παραγωγή ενεργού ισχύος και τις τάσεις των γεννητριών. Οι μελέτες ροών ισχύος είναι απαραίτητες για διάφορους λόγους, μερικοί από τους οποίους αναφέρονται παρακάτω [1.2]:

- Για τον έλεγχο των τάσεων και ροών ισχύος, ώστε να διατηρούνται εντός προκαθορισμένων ορίων λειτουργίας.
- Για τη μελέτη των επιπτώσεων των ενδεχόμενων διαταραχών.
- Για την επιλογή της πλέον οικονομικής λειτουργίας των γεννητριών του συστήματος. Επειδή στη διάρκεια κάθε ημέρας τα φορτία μεταβάλλονται συνεχώς, απαιτείται συχνά ο εκ νέου υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος κάθε γεννήτριας, ώστε τα φορτία να τροφοδοτούνται με τον πιο οικονομικό τρόπο.
- Για μελέτες ανάπτυξης και επέκτασης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η ανάλυση των ρών ισχύος είναι το σημείο εκκίνησης για όλες τις επιμέρους μελέτες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

1.1.4 Ιστορική ανάπτυξη της πιθανοτικής ροής φορτίου

Το 1973, η Barbara Borkowska [1.9], έκανε την πρώτη επιτυχημένη προσπάθεια αντιμετώπισης του προβλήματος ροής φορτίου με πιθανοτικό τρόπο. Η μέθοδος βασίζεται στη DC ανάλυση ροής φορτίου και τα δεδομένα δίνονται με τη μορφή συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας για τα φορτία και την παραγωγή κάθε ζυγού. Η κανονική, η διωνυμική και η διακριτή κατανομή αποτελούν αυτές τις συναρτήσεις. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της πραγματικής ροής οποιασδήποτε γραμμής, και του ισοζυγίου ισχύος στο ζυγό αναφοράς του συστήματος υπολογίζεται από τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε. Η ανεξαρτησία των τυχαίων μεταβλητών του προβλήματος είναι η βασική υπόθεση που διατυπώνεται για την εφαρμογή των τεχνικών συνέλιξης.

Το 1974 οι Allan, Borkowska και Grigg [1.9] διατυπώνουν την ίδια διατύπωση της πιθανοτικής μεθόδου που προτάθηκε από την Borkowska, αλλά δίνοντας περισσότερη έμφαση στις πρακτικές εφαρμογές της. Εκτεταμένη ανάλυση των αποτελεσμάτων ενός συστήματος 15 ζυγών πραγματοποιείται για να φανεί η τεράστια διαφορά πληροφοριών που αποκτώνται με την πιθανοτική ροή φορτίου σε σχέση με την ντετερμινιστική ανάλυση. Παραμένουν παρόν οι προσεγγιστικές παραδοχές της DC ανάλυσης.

Το 1975 η στοχαστική ροή φορτίου [1.9] αναπτύσσεται με διαφορετικό τρόπο από τους Dorazo, Klitin και Sasson, ο πίνακας συμμεταβλητότητας που είχε εφαρμοστεί με αποδοτικό τρόπο στο πρόβλημα εκτίμησης κατάστασης χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς. 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 απόκλιση τους. Επίσης παρουσιάζεται η μέθοδος των "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.

Η θεωρία των συνδεδεμένων συστημάτων αναπτύσσεται με στατιστικό τρόπο το 1975 από τους Heydt και Katz [1.9]. Η αβεβαιότητα ως προς το μέγεθος της αλληλεπίδρασης με τα γειτονικά συστήματα προκαλείται από την αβεβαιότητα των φορτίων σε συνδυασμό με την πιθανή μη διαθεσιμότητα των μονάδων παραγωγής. Η υπόθεση που γίνεται είναι ότι οι γραμμικοί περιορισμοί της παραγωγής ακολουθούν κανονική κατανομή και ότι χρησιμοποιείται επίλυση με γραμμικό προγραμματισμό.

Το 1975 ο Heydt [1.9] προτείνει μία μέθοδο, το οποίο χρησιμοποιεί τις γραμμικοποιήσεις των εξισώσεων ροής φορτίου που επιτρέπουν τον υπολογισμό της πιθανότητας συγκεκριμένων λειτουργικών συνθηκών όπως υπερφορτίσεων και μεγίστων ορίων γεννητριών. Η στοχαστική μέθοδος ροής φορτίου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό αυτών των πιθανοτήτων ως ολοκλήρωμα μιας μεταβαλλόμενης κανονικής κατανομής με γνωστή μέση τιμή και δεδομένο πίνακα συνδιασποράς και προσεγγίζεται με τα γνωστά πολυώνυμα του Hermite που συγκλίνουν γρήγορα για μικρά επίπεδα συνδιασποράς. Η βασική υπόθεση είναι ότι οι μεταβλητές εξόδου ακολουθούν την κανονική κατανομή όπως σε όλες τις μεθόδους στοχαστικής ροής φορτίου που έχουν αναπτυχθεί, και με αυτόν τον τρόπο δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της έντονης μη γραμμικότητας των εξισώσεων ροής φορτίου στα αποτελέσματα.

Μία επέκταση της πιθανοτικής DC ροής φορτίου σύμφωνα με τη βασική θεμελίωση της Borkowska διτυπώνεται το 1976 από τους Allan και Shakarchi [1.9]. Η μέθοδος χρησιμοποιεί δύο ισοδύναμες μεταξύ τους μορφές γραμμικοποίησης των εξισώσεων ροής φορτίου και τα δεδομένα είναι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας πραγματικών και άεργων φορτίων και παραγωγής στους ζυγούς. Οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των πραγματικών και άεργων ροών ισχύος, των τάσεων και των άεργων εγχύσεων μπορούν να υπολογιστούν από τον αλγόριθμο. Οι αριθμητικές τεχνικές που δημοσιεύθηκαν τον ίδιο χρόνο εφαρμόζονται για την πραγματοποίηση των συνελίξεων. Οι παραδοχές όμως στις οποίες στηρίζονται οι γραμμικοποιήσεις

των εξισώσεων της ροής φορτίου είναι σημαντικές με αποτέλεσμα την μειωμένη ακρίβεια των υπολογισμών.

Τον επόμενο χρόνο οι Allan και Shakarchi [1.9] διατυπώνουν δύο ακόμη μορφές γραμμικοποίησης των εξισώσεων της ροής φορτίου. 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.

Τον ίδιο χρόνο [1.9], το πως μπορεί να υπολογιστεί και πως μπορεί να συμπεριληφθεί η υπόθεση της γραμμικής θετικής ή αρνητικής εξάρτησης των εγχύσεων ισχύος ενός συστήματος στην ανάλυση της πιθανοτικής AC ροής φορτίου δημοσιεύεται από τους ίδιους συγγραφείς. 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. Από τους Allan, Grigg, Newey και Simmons είχε προηγηθεί μία ανάλυση για την εφαρμογή της ολικής ή μερικής συσχέτισης μεταξύ των δεδομένων τυχαίων μεταβλητών στην πιθανοτική DC ανάλυση και αυτή η δημοσίευση αποτελεί επέκταση της εργασίας αυτής. Στη λειτουργική ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και στη βραχυπρόθεσμη λήψη αποφάσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο της πιθανοτικής ροής φορτίου με χρήση εξαρτημένων τυχαίων μεταβλητών, όπου η υπόθεση της ανεξαρτησίας μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών δεν ισχύει.

Το 1978 από τον Aboytes και το 1979 από τους Allan, Grigg και Prato-Garcia γίνονται δύο διατυπώσεις για την πιθανότητα απώλειας γραμμής και γενικότερα μεταβολής στην τοπολογία του συστήματος [1.9]. 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. Οι Leite da Silva, Allan, Soares και Arienti παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα για την πρώτη διατύπωση. 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. Ορισμένος αριθμός πιθανών διαταραχών δευτέρας τάξεως έχει θεωρηθεί στην δεύτερη διατύπωση.

Ο Leite da Siiva το 1980 [1.9] μελετάει την αποδοτικότητα του υπολογισμού σε χρόνο, μνήμη, ακρίβεια και απλότητα των πιθανοτικών μεθόδων. Μέσω της χρήσης της αριθμητικής μεθόδου Monte-Carlo διερευνάται αναλυτικά, που βασίζεται η επίλυση και η αξιολόγηση μεγάλου αριθμού ροών φορτίου, οι βασικές προτεινόμενες γραμμικοποιήσεις και το σφάλμα που επιφέρουν στα αποτελέσματα. Με αυτόν τον τρόπο διαπιστώνεται η επίδραση της μη γραμμικότητας των εξισώσεων ροής φορτίου στα αποτελέσματα και αποδεικνύεται η ανακρίβεια της υπόθεσης στην οποία βασίζονται όλες οι στοχαστικές μέθοδοι, ότι οι άγνωστες τυχαίες μεταβλητές ακολουθούν την κανονική κατανομή. Για τον πιο ακριβή υπολογισμό των άκρων των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας προτείνεται μια νέα μέθοδος πιθανοτικής ροής φορτίου, που λαμβάνει υπόψη την επίδραση της μη γραμμικότητας των εξισώσεων ροής φορτίου στα αποτελέσματα παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιεί γραμμικοποιημένα πρότυπα. Η μέθοδος αυτή που δημοσιεύεται τον επόμενο χρόνο, βασίζεται στην δυνατότητα αλλαγής του σημείου γραμμικοποίησης των εξισώσεων σε όλο το φάσμα των πιθανών τιμών και την κατάλληλη σύνθεση των τελικών συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας.

Ένας καινούργιος αλγόριθμος που βασίζεται στον ταχύ μετασχηματισμό Fourier (F.F.T.) εφαρμόζεται για την πραγματοποίηση των συνελίξεων [1.9], ο οποίος εκμεταλλεύεται ορισμένες ιδιότητες των εκθετικών συναρτήσεων και ανάγει την συνέλιξη σε περιορισμένο πολλαπλασιασμό διακριτών τιμών στο πεδίο της συχνότητας. Η τεχνική αυτή αποδεικνύεται ότι είναι πολύ πιο γρήγορη και το ίδιο ακριβής με την τεχνική της συμβατικής συνέλιξης που βασίζεται στις ιδιότητες του μετασχηματισμού Laplace, αλλά είναι κατάλληλη μόνο για τη συνέλιξη διακριτών ή διακριτοποιημένων κατανομών. Οφείλονται να παρασταθούν ως διακριτές κατανομές οι ισοδύναμες κανονικές κατανομές ή οι άλλες συνεχείς κατανομές και έτσι αναπτύσσονται οι τεχνικές με τις οποίες πραγματοποιείται αυτή η διακριτοποίηση με προκαθορισμένο αριθμό σημείων και εντός του επιθυμητού διαστήματος εμπιστοσύνης.

Οι Leite da Silva, Arienti και Allan [1.9], το 1984, επεκτείνουν την πιθανοτική μέθοδο ροής φορτίου που θεωρεί εξάρτηση μεταξύ των δεδομένων

εγχύσεων των ζυγών έτσι ώστε να συμπεριλάβει οικονομική κατανομή των φορτίων μεταξύ των γεννητριών. Η αναλυτική μέθοδος με την αριθμητική μέθοδο Monte-Carlo συνδυάζονται αποδοτικά από τον αλγόριθμο και η παραγωγή του ζυγού αναφοράς θα είναι συμβατή με την μέγιστη δυνατότητα παραγωγής για να εξασφαλισθεί η βεβαιότητα για την κάλυψη της συνολικής ζήτησης. Έτσι, ο ζυγός αναφοράς χάνει το φυσικό του νόημα και περιορίζεται η αβεβαιότητά του. Οι ίδιοι συγγραφείς μαζί με τον Soares, το 1985, επεκτείνουν τη διατύπωση των Allan, Grigg και Prato-Garcia για τη μεταβλητή τοπολογία του δικτύου έτσι ώστε να εφαρμόζεται στην πιθανοτική AC ανάλυση. Πρακτικές εφαρμογές και προγραμματιστικές τεχνικές της μεθόδου σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζονται διαδοχικά μέχρι και το 1988.

Τέλος, μια νέα θεώρηση της πολυγραμμικοποιημένης πιθανοτικής ροής φορτίου δημοσιεύεται από τους Leite da Silva και Arienti [1.9], το 1990, όπου ο προσδιορισμός των κατάλληλων σημείων γραμμικοποίησης βασίζεται στην συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της συνολικής ζήτησης που υπολογίζεται. Έτσι, το κάθε διάστημα μπορεί να αντιστοιχηθεί σε μια διαφορετική περιοχή φόρτισης του συστήματος και για κάθε περιοχή φόρτισης μπορεί να προσδιοριστεί ένα αντίστοιχο σημείο γραμμικοποίησης εάν η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της συνολικής ζήτησης χωριστεί σε προκαθορισμένο αριθμό διαστημάτων.

1.1.5 Πιθανοτική ροή φορτίου σε DC δίκτυα

Η 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 μπορεί να οριστεί ως πιθανοτική ροή φορτίου [1.9]. Είναι ένας τρόπος υπολογισμού το οποίο με μία μόνο ανάλυση ροής φορτίου υπολογίζει όλες τις πιθανές καταστάσεις του συστήματος, που αντιστοιχούν σε όλες τις δυνατές στατιστικές μεταβολές των φορτίων και της παραγωγής μέσω μίας μόνο ανάλυσης ροής φορτίου.

Η αβεβαιότητα των στατιστικών δεδομένων και η αβεβαιότητα προσαρμογής της αναλυτικής συνάρτησης που χρησιμοποιείται κατά την πρόβλεψη οφείλονται στην αβεβαιότητα των φορτίων. Οι προβλεπόμενοι παράγοντες είναι όπως ο χειρισμός ή η συντήρησης, ή οι απρόβλεπτοι παράγοντες όπως η βλάβη είναι υπεύθυνη για την αβεβαιότητα της παραγωγής. Σε περιπτώσεις ανανεώσιμων πηγών πρωτογενούς ενέργειας η αβεβαιότητα οφείλεται στη στοχαστική φύση των καιρικών συνθηκών, όπως για παράδειγμα η αβεβαιότητα της παραγωγής ανεμογεννήτριας οφείλεται στην αβεβαιότητα του ανέμου. Όσο απομακρύνεται η χρονική στιγμή της πρόβλεψης από τη χρονική στιγμή της μέτρησης τόσο αυξάνεται ο βαθμός της αβεβαιότητας. Κατά τη χρονική στιγμή της μέτρησης η αβεβαιότητα των φορτίων και της παραγωγής οφείλεται αποκλειστικά στο σφάλμα της μέτρησης.

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

Σε σύστημα με N ζυγούς και k διαφορετικές τιμές φορτίων σε κάθε ζυγό 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 εύρεση της μέσης τιμής, της τυπικής απόκλισης και ο σχεδιασμός της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των ζητούμενων μεγεθών τόσο μεγάλου πλήθους αποτελεσμάτων ροής φορτίου είναι πρακτικά αδύνατη.

Στην πιθανοτική ανάλυση ροής φορτίου σε DC δίκτυα, οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των φορτίων και της παραγωγής θεωρούνται ως δεδομένα και απαιτείτε ο υπολογισμός των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας του μέτρου των τάσεων, των ενεργών ροών ισχύος στις γραμμές του δικτύου, των απωλειών κ.λ.π. Οι μέθοδοι (αναλυτικές, αριθμητικές ή συνδυασμός και των δύο) χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος της πιθανοτικής ροής φορτίου. Το πλεονέκτημα των αριθμητικών μεθόδων είναι

ότι είναι απλές και εφαρμόζονται χωρίς καμία παραδοχή, ενώ στις αναλυτικές μεθόδους απαιτείτε να γίνουν σοβαρές παραδοχές και απλοποιήσεις που έχουν επίδραση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων λόγω του ότι χρησιμοποιούν πιο σύνθετη μοντελοποίηση.

Η αριθμητική μέθοδος Monte-Carlo συνίσταται στην επαναληπτική διαδικασία της επίλυσης του ίδιου προβλήματος ντετερμινιστικά, με συγκεκριμένες πάντα τιμές δεδομένων σε κάθε επίλυση. Με βάση την πιθανοτική κατανομή που ακολουθεί το κάθε μέγεθος γίνεται τυχαία η επιλογή των τιμών των δεδομένων. Για το σκοπό αυτό απαιτείται μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών μεταξύ 0 και 1 και έχοντας υπόψη την πιθανοτική κατανομή που ακολουθεί η κάθε μεταβλητή, οι αντίστοιχοι τυχαίοι αριθμοί λαμβάνονται με κατάλληλο μετασχηματισμό. Τα διαδοχικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την ντετερμινιστική επίλυση της ροής φορτίου, αποτελούν πιθανές καταστάσεις του ίδιου συστήματος και συνθέτουν τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των ζητούμενων μεγεθών. Θεωρητικά στην μέθοδο Monte-Carlo δεν υπάρχουν περιοριστικές παραδοχές. Κατά την επίλυση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακριβείς μη γραμμικές εξισώσεις ροής φορτίου, να θεωρηθεί εξάρτηση μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών, καθώς επίσης και διαφορετική τοπολογία δικτύου και διαφορετικές τιμές στις παραμέτρους ελέγχου του συστήματος. Έτσι αποτελεί έναν τρόπο ελέγχου της ακρίβειας και της ορθότητας των παραδοχών των αναλυτικών μεθόδων της πιθανοτικής ροής φορτίου που χρησιμοποιείται. Ο αριθμός των διαδοχικών επιλύσεων καθορίζει την ακρίβεια της μεθόδου. Για να θεωρηθεί αξιόπιστη ανάλυση απαιτεί μερικές χιλιάδες διαφορετικές επιλύσεις. Έτσι ο πλήθος των αριθμών που χρειάζεται να επεξεργαστεί για να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα αποτελεί το μειονέκτημα της μεθόδου Monte-Carlo.

Για να ξεπεραστούν τα πιο πάνω προβλήματα, μπορούν να εφαρμοστούν αναλυτικές μέθοδοι στην επίλυση της πιθανοτικής ροής φορτίου. Η γραμμικότητα των εξισώσεων της ροής φορτίου γύρω από κάποιο συγκεκριμένο λειτουργικό σημείο, συνήθως γύρω από την αναμενόμενη τιμή είναι η βασικότερη παραδοχή που γίνεται σε όλες τις αναλυτικές μεθόδους. Μόνο η παραδοχή στην περιοχή γύρω από το συγκεκριμένο λειτουργικό σημείο οδηγεί σε αποτελέσματα ικανοποιητικής ακρίβειας. Η μοντελοποίηση των αναλυτικών μεθόδων γίνεται πολυπλοκότερη για να διατηρήσει ικανοποιητική ακρίβεια στα αποτελέσματα ιδιαίτερα στα άκρα των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας

όσο η αβεβαιότητα των δεδομένων αυξάνεται ή όσο η μη γραμμικότητα των εξισώσεων γίνεται εντονότερη. Τα προβλήματα που καθιστούν την μοντελοποίηση των αναλυτικών μεθόδων ακόμη πιο πολύπλοκες είναι η θεώρηση των εξαρτημένων μεταβλητών, η γραμμικοποίηση σε διαφορετικά λειτουργικά σημεία, η μεταβλητή τοπολογία του δικτύου και η οικονομική κατανομή των γεννητριών του συστήματος. 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.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο σκοπός της πιθανοτικής ροής φορτίου είναι να καθορίσει όλες τις πιθανές καταστάσεις λειτουργίας του διαμορφωμένου δικτύου και των αντίστοιχων πιθανοτήτων τους. Για να επιτευχθεί αυτό, η σχετική συμπεριφορά δίνεται ως Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας. Η αποστολή της πιθανοτικής ροής φορτίου είναι να προσδιορισθεί η Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας των παραμέτρων του δικτύου από αυτά τα δεδομένα εισόδου. Ως εκ τούτου, πρέπει να ληφθούν υπόψη στην ακραία περίπτωση όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των κομβικών εγχύσεων ισχύος και των καταναλώσεων.

1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει μια παρουσίαση της δομής της εργασίας που οργανώνεται σε τέσσερα κεφάλαια τα οποία περιγράφονται παρακάτω.

- **Κεφάλαιο 1:** Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια γενική εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, για τα δίκτυα συνεχούς ρεύματος και στη ροή ισχύος. Επιπλέον ακολουθεί η ιστορική ανάπτυξη και μετά ακολουθούν εισαγωγικές πληροφορίες για την πιθανοτική ροή φορτίου.

- **Κεφάλαιο 2:** Γίνεται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, όσον αφορά την ανάλυση των ρών φορτίου σε DC δίκτυα. Επίσης γίνεται αναφορά στη μελέτη των ρών φορτίου σε DC δίκτυα και στους μεθόδους επίλυσης του προβλήματος. Ενδεικτικά, οι μέθοδοι είναι: α) Μέθοδος του Gauss-Seidel, β) Μέθοδος του Newton-Raphson και γ) Μέθοδος της Forward and Backward Sweep.
- **Κεφάλαιο 3:** Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά αναλύεται ο σκοπός της πιθανοτικής ροής φορτίου και οι πληροφορίες που αποκτιούνται από την εφαρμογή της. Έπειτα γίνεται αναφορά στις πιθανές εφαρμογές της πιθανοτικής ροής φορτίου. Επίσης αναλύονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην επίλυση του προβλήματος και οι μέθοδοι αυτοί είναι η αριθμητική και η αναλυτική μέθοδος. Ακολουθεί η απλή και η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος. Τέλος γίνεται αναφορά στην τεχνική συνέλιξης το οποίο χρησιμοποιείται στην επίλυση του προβλήματος.
- **Κεφάλαιο 4:** Παρουσιάζεται αναλυτικά το αριθμητικό παράδειγμα του οποίου η εφαρμογή γίνεται σε δυο δίκτυα, το ένα είναι δίκτυο 7 ζυγών και το άλλο είναι δίκτυο 15 ζυγών. Η επίλυση αυτή γίνεται με δυο μεθόδους: α) με την μέθοδο της ροής φορτίου σε DC δίκτυα με την βοήθεια της μεθόδου Newton-Raphson και β) με την πιθανοτική ροή φορτίου σε DC δίκτυα.
- **Παράρτημα Α:** Στο παράρτημα αυτό αρχικά γίνεται μια γενική εισαγωγή για τις κατανομές πιθανότητας και ακολουθεί η κανονική κατανομή, η οποία χρησιμοποιείτε στην πιθανοτική ροή φορτίου.
- **Παράρτημα Β:** Σε αυτό το παράρτημα περιλαμβάνεται οι γραμμικοποιήσεις των εξισώσεων. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στην γενική μορφή της γραμμικοποίησης του γινόμενου, του ηλίικου και του μέτρου των τυχαίων μεταβλητών.
- **Παράρτημα Γ:** Σε αυτό το παράρτημα παρουσιάζονται οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν στην διεξαγωγή αυτής της διπλωματικής.

1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Β. Κ. Παπαδιάς, "Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, τόμ.Ι, Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας". Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985, σελ.1-3
- [1.2] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, "Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας". Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2010, σελ. 289
- [1.3] JB Woudstra, P. van Willigenburg, BBJ Groenewald, H. Stokman, S. De Jonge, S. Willems, "Direct current distribution grids and the road to its full potential", IEEEExplore Digital Library, p. 3-4
- [1.4] O. Krause, J. Schwippe, C. Rehtanz, "Probabilistic load flow for uncertainty based grid operation", espace.library.uq.edu.au, p. 1
- [1.5] R. Teixeira Pinto, M. Aragues-Penalba, O. Gomis-Bellmunt, A. Sumper, "Optimal operation of DC networks to support power system outage management", IEEEExplore Digital Library, p. 1
- [1.6] Michael P. Bahrman, Brian K. Johnson, "The ABCs of HVDC transmission technologies", IEEEExplore Digital Library, p. 2, 4-8.
- [1.7] T. Hakala, P. Jarventausta, T. Lahdeaho, "The utilization potential of LVDC distribution", IEEEExplore Digital Library, p. 1
- [1.8] T. Kaipia, J. Karpanen, A. Mattsson, A. Lana, P. Nuutinen, P. Peltoniemi, P. Salonen, J. Partanen, J. Lohjala, W. Chae, J. Kim, "A system engineering approach to low voltage DC distribution", IEEEExplore Digital Library, p. 1-2
- [1.9] Θ. Καρακατσάνης, "Συμβολή της πιθανοτικής ροής φορτίου στον έλεγχο λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας", Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 1995, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, ΕΜΠ, σελ. 5-12, 17-19
- [1.10] <http://searchsoftwarequality.techtarget.com/definition/use-case>

ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ DC ΔΙΚΤΥΑ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάλυση των χαρακτηριστικών των κύριων συνιστώντων μερών του συστήματος, δηλαδή γραμμών γεννητριών και μετασχηματιστών αποσκοπεί κυρίως στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς τους σαν στοιχείων της όλης εγκαταστάσης, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος. Ο προσδιορισμός αυτός των παραμέτρων των εξισώσεων και ισοδύναμων κυκλωμάτων των επί μέρους στοιχείων του ολοκληρωμένου συστήματος αφορά κατά κύριο λόγο τη συγκρότηση ή τη δομή της εγκαταστάσης, η οποία αποτελεί τον φορέα των ηλεκτρικών μεγεθών [2.1].

Δομή και λειτουργία του συστήματος είναι δύο διαφορετικές πλευρές της τεχνικής των συστημάτων της ηλεκτρικής ενέργειας. Στις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού οι δραστηριότητες των υπηρεσιών μελετών και κατασκευών εξυπηρετούν τη συγκρότηση ή δομή, ενώ οι δραστηριότητες των υπηρεσιών εκμεταλλεύσης της λειτουργίας του συστήματος. Από άποψη λειτουργίας του ολοκληρωμένου συστήματος διακρίνουμε την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ή την κανονική λειτουργία και την μεταβατική και ασύμμετρη κατάσταση λειτουργίας ή γενικότερα μη κανονική ή ανώμαλη λειτουργία [2.1].

Ο κύριος προορισμός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι να προμηθεύει την πραγματική ισχύ, τις οποίες ζητούν τα διάφορα φορτία τα οποία

είναι συνδεδεμένα στο σύστημα. Η ροή ισχύος ή φορτίου στο δίκτυο για την τροφοδότηση της ζήτησης, αποτελεί τη χαρακτηριστικότερη εκδήλωση της μόνιμης καταστάσης λειτουργίας για ένα σύστημα. Ταυτόχρονα, η συχνότητα και η τάση στους διάφορους ζυγούς πρέπει να τηρούνται μέσα σε προδιαγεγραμμένα όρια παρά το γεγονός ότι τα φορτία υπόκεινται σε σημαντικές και εως ένα σημείο απρόβλεπτες μεταβολές. Στα δίκτυα διανομής τα οποία λειτουργούν κατά κανόνα ακτινικά η ροή ισχύος είναι καθορισμένη και δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα προβλήματα [2.1].

Το πρόβλημα των ροών φορτίου συνίσταται στον προσδιορισμό των μεταβλητών του συστήματος (ισχύων, ρευμάτων, τάσεων), σε μια δεδομένη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια ορισμένη εικόνα φορτίων, μια αντίστοιχη εικόνα παραγόμενης ισχύος και αντίστοιχη εικόνα των τάσεων και των ροών στο δίκτυο. Κάθε άλλη εικόνα φορτίων, ή ροών, συνιστά μια άλλη κατάσταση λειτουργίας και περιγράφεται από άλλες τιμές μεταβλητών [2.1].

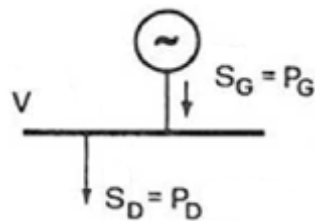
Η μέθοδος που εφαρμόζεται για την ανάλυση του δικτύου στην περίπτωση των ροών φορτίου βασίζεται στη μέθοδο "κόμβων" της αναλύσης κυκλωμάτων, η οποία παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως τα ακόλουθα [2.1]:

- Μικρότερο πλήθος μεταβλητών
- Εύκολη εισαγωγή γραμμών, ή μετασχηματιστών εν παραλλήλω
- Άμεσος υπολογισμός των μεγεθών που ενδιαφέρουν: τάσεων κόμβων και ρευμάτων κλάδων

2.2 ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ DC ΔΙΚΤΥΑ

2.2.1 Μεταβλητές συστήματος του DC δικτύου

Θεωρώντας τη γενική περίπτωση ενός ζυγού του συστήματος, με παραγωγή και φορτίο, που εκφράζονται ως ισχύς, διακρίνουμε τα ακόλουθα 3 μεγέθη (Σχήμα 2.1) [2.1]:



Σχήμα 2.1: Ζυγός ενός Σ.Η.Ε.

P_G : Παραγόμενη ενεργός ισχύς

P_D : Ενεργός ισχύς φορτίου

V : Τάση ζυγού

Τα ηλεκτρικά αυτά μεγέθη αποτελούν τις μεταβλητές του προβλήματος και είναι 3 ανά ζυγό. Σε ένα σύστημα με N ζυγούς υπάρχουν συνολικά $3N$ μεταβλητές, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες. Τα φορτία ή μεταβλητές ζήτησης (P_D) χαρακτηρίζονται και σαν μεταβλητές διαταραχής και μπορούν να αποτελέσουν τα στοιχεία ενός διανύσματος διάστασης N .

Η ισχύς παραγωγής (P_G) χαρακτηρίζεται και σαν μεταβλητής ελέγχου και μπορεί επίσης να θεωρηθεί σαν στοιχείο ενός άλλου διανύσματος, διάστασης N . Ο όρος δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι μονάδες παραγωγής αποτελούν τα κύρια μέσα ελέγχου της λειτουργίας του συστήματος. Τέλος, οι τάσεις των

ζυγών είναι εξαρτημένες μεταβλητές, οι οποίες κατά συνέπεια προς τα προηγούμενα μπορούν να ονομαστούν μεταβλητές κατάστασης και το αντίστοιχο διάνυσμα, διάστασης N , διάνυσμα κατάστασης συστήματος.

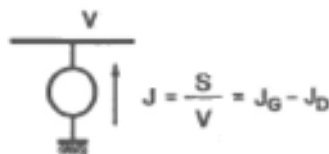
Η συνισταμένη ισχύς ζυγού, η οποία μπορεί να οριστεί σαν ισχύς ζυγού, δίνεται από το σχήμα 2.1,

$$S = S_G - S_D = P_G - P_D = P \quad (2.2.1)$$

Και μπορεί να έχει χαρακτήρα παραγωγής, ή φορτίου (εισερχόμενη στο δίκτυο, ή εξερχόμενη από το δίκτυο). Αντίστοιχα, ορίζεται το ρεύμα ζυγού:

$$J = \frac{S}{V} = \frac{S_G - S_D}{V} = J_G - J_D = \frac{P_G - P_D}{V} = \frac{P}{V} \quad (2.2.2)$$

Η σχηματική παράσταση του ζυγού τότε μπορεί να είναι αυτή του σχήματος 2.2

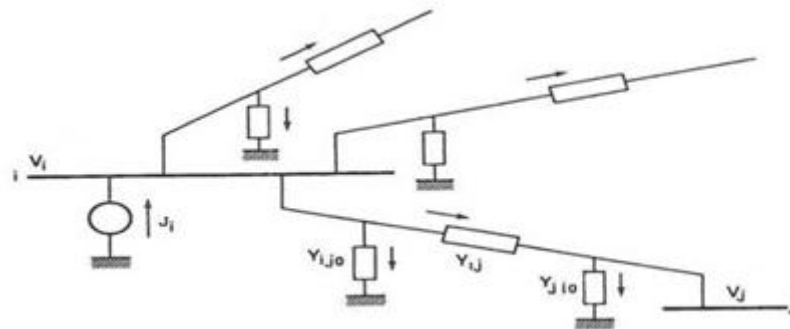


Σχήμα 2.2 – Ρεύμα και ισχύς ζυγού

Η εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchoft σε κάθε ζυγό ενός συστήματος N ζυγών, οδηγεί σε ένα σύστημα N εξισώσεων με $3N$ μεταβλητές, η διαμόρφωση και η επίλυση του οποίου αποτελεί το στόχο της μελέτης των ροών φορτίου.

2.2.2 Εξισώσεις ρών φορτίου του DC δικτύου

Η μαθηματική ανάλυση καταλήγει στη διαμόρφωση ενός συστήματος N μη γραμμικών εξισώσεων, όπου N ο αριθμός των κόμβων (ζυγών) του δικτύου. Κατά τη διαδικασία, η γη ως προς την οποία αναφέρονται οι τάσεις των κόμβων και οι εγκάρσιοι κλάδοι αποτελεί πρόσθετο κόμβο αναφοράς [(N+1)-στό].



Σχήμα 2.3-Τυπικό κομμάτι δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας

Θεωρούμε ένα αντιπροσωπευτικό ζυγό του συστήματος, με ισχύ ζυγού και συμβολές γραμμών μεταφοράς (σχήμα 2.3). Οι εγκάρσιες αγωγιμότητες προς γη των γραμμών μεταφοράς συγκεντρώνονται στους ζυγούς, οπότε για το θεωρούμενο ζυγό θα είναι [2.1]:

$$Y_{i0} = \sum_{j=1}^N Y_{ij0} \quad (2.2.3)$$

Η εξίσωση των ρευμάτων στο ζυγό γράφεται:

$$J_i = V_i Y_{i0} + \sum_{j \neq i}^N (V_i - V_j) Y_{ij} = V_i Y_{i0} + (V_i - V_1) Y_{i1} + (V_i - V_2) Y_{i2} + \dots + (V_i - V_N) Y_{iN} = (Y_{i0} + \sum_{j \neq i}^N Y_{ij}) V_i - Y_{i1} V_1 - Y_{i2} V_2 - \dots - Y_{iN} V_N \quad (2.2.4)$$

$Y_{i1}, Y_{i2}, \dots, Y_{iN}$, είναι οι αγωγιμότητες σειράς των γραμμών οι οποίες συνδέονται στο ζυγό i (σχήμα 2.3) και, V_1, V_2, \dots, V_N , οι τάσεις προς γη των ζυγών του δικτύου.

Εισάγοντας τις ακόλουθες νέες παραμέτρους

$$y_{ii} = Y_{i0} + \sum_{j \neq i}^N Y_{ij} \quad (2.2.5)$$

$$y_{ij} = -Y_{ij} = -Y_{ji} \quad (2.2.6)$$

η εξίσωση (2.4) γίνεται:

$$J_i = y_{i1}V_1 + y_{i2}V_2 + \dots + y_{ii}V_i + \dots + y_{iN}V_N = \sum_{j=1}^N y_{ij}V_j \quad (2.2.7)$$

Για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας N ζυγών, έχουμε N εξισώσεις ρών φορτίου της μορφής

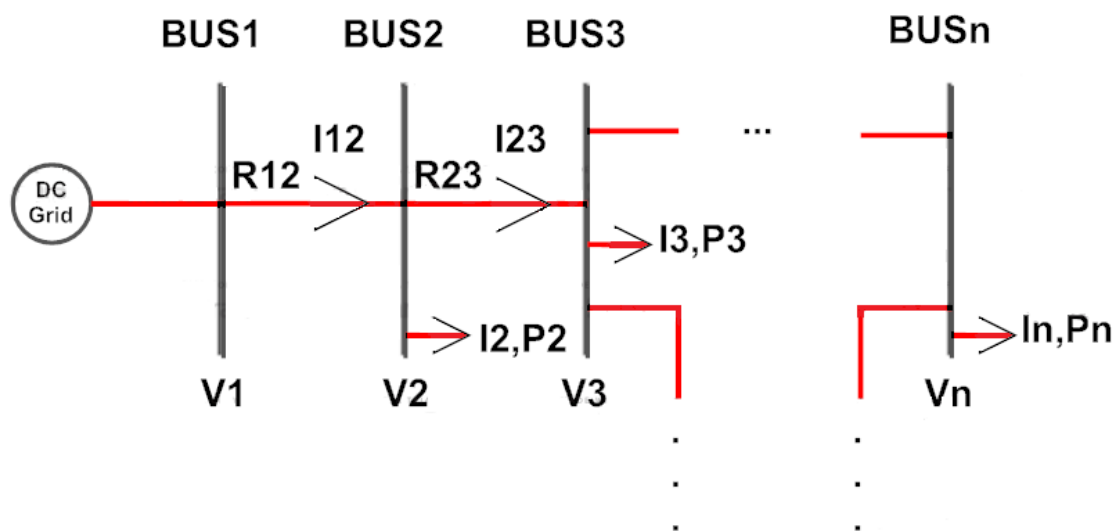
$$P_i = |V_i| \sum_{j=1}^N |V_j| g_{ji} \quad (2.2.8)$$

όπου

$$y_{ji} = g_{ji} \quad (2.2.9)$$

2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ DC ΔΙΚΤΥΑ

Υπάρχουν καθιερωμένοι αλγόριθμοι και προγράμματα για τις μελέτες ροής φορτίου των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτά τα προγράμματα ροής φορτίου μπορούν να εφαρμοστούν για την επίλυση των συστημάτων συνεχούς ρεύματος, αλλά υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Ως εκ τούτου, οι τεχνικές της DC ροής φορτίου και τα προγράμματα, βασίζονται στην μέθοδο Newton-Raphson και στην μέθοδο Gauss-Seidel που βασίζεται στην επαναληπτική τεχνική, έχουν αναπτυχθεί. Παρακάτω φαίνεται ένα δίκτυο n ζυγών με βάση το οποίο εφαρμόζονται οι μέθοδοι [2.2].



Σχήμα 2.4: Δίκτυο n ζυγών

2.3.1 Η μέθοδος Gauss-Seidel βασισμένη στην επαναληπτική τεχνική

Η επαναληπτική μέθοδος Gauss-Seidel είναι μία μικρή παραλλαγή της μεθόδου Jacobi και ο ρυθμός σύγκλισης της μεθόδου είναι αρκετά πιο γρήγορος [2.3].

Οι εξισώσεις του συστήματος που βασίζονται στις αγωγιμότητες των κλάδων μπορούν να γραφτούν ως εξής [2.2]:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \dots & G_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.3.1)$$

I_1, I_2, \dots, I_n είναι τα εισερχόμενα ρεύματα και P_1, P_2, \dots, P_n είναι οι εισερχόμενες ισχύς στους ζυγούς 1, 2, ... n αντίστοιχα. Οι όροι της μήτρας αγωγιμότητας προσδιορίζονται εύκολα από το παραπάνω κύκλωμα.

Οι διαγώνιοι όροι είναι το άθροισμα των αγωγιμοτήτων των γραμμών που συνδέονται στον ζυγό. Η μη-διαγώνιοι όροι του G_{ij} είναι το αρνητικό της αγωγιμότητας μεταξύ των ζυγών i και j ($i > j$).

$$G_{ij} = -\frac{1}{R_{ij}} \quad (2.3.2)$$

Από την (2.3.1) έχουμε:

$$I_2 = G_{21}V_1 + G_{22}V_2 + \dots + G_{2n}V_n \quad (2.3.3)$$

$$V_2 = \frac{1}{G_{22}} [I_2 - (G_{21}V_1 + G_{23}V_3 + \dots + G_{2n}V_n)] \quad (2.3.4)$$

Αντικαθιστώντας την $I_2 = -\frac{P_2}{V_2}$ στην (2.3.4) παίρνουμε:

$$V_2 = \frac{1}{G_{22}} \left[-\frac{P_2}{V_2} - (G_{21}V_1 + G_{23}V_3 + \dots + G_{2n}V_n) \right] \quad (2.3.5)$$

Για τον ζυγό n , η ίδια διαδικασία ισχύει:

$$V_n = \frac{1}{G_{nn}} \left[-\frac{P_n}{V_n} - (G_{n1}V_1 + G_{n2}V_2 + \dots + G_{n,n-1}V_{n-1}) \right] \quad (2.3.6)$$

Οι εξισώσεις (2.3.5) και (2.3.6) είναι σε κατάλληλη μορφή για την εφαρμογή της μεθόδου του Gauss-Seidel που βασίζεται στην επαναληπτική τεχνική.

Τα βήματα αυτής της διαδικασίας είναι τα εξής:

- Βήμα 1: Ανάθεση εκτιμήσεων στις V_2, V_3, \dots, V_n (για παράδειγμα, $V_2 = V_3 = \dots = V_n = 1$ α.μ). Σημειώνετε ότι η V_1 είναι σταθερή
- Βήμα 2: Χρησιμοποιώντας την (2.3.7), η οποία είναι η (2.3.5) η οποία αντιπροσωπεύει τις επαναλήψεις του G-S, υπολογίζεται η νέα τιμή για την V_2 με τις αρχικές εκτιμήσεις των V_2, V_3, \dots, V_n :

$$V_2^{(n+1)} = \frac{1}{G_{22}} \left[-\frac{P_2}{V_2^{(n)}} - (G_{21}V_1 + G_{23}V_3^{(n)} + \dots + G_{2n}V_n^{(n)}) \right] \quad (2.3.7)$$

όπου n ο αριθμός της επανάληψης

- Βήμα 3: Χρησιμοποιώντας την (2.3.8) υπολογίζεται μια νέα τιμή για την V_n με την αρχική εκτίμηση της V_n και τις υπολογισμένες τιμές των V_2, V_3, \dots, V_{n-1} :

$$V_n^{(n+1)} = \frac{1}{G_{nn}} \left[-\frac{P_n}{V_n^{(n)}} - (G_{n1}V_1 + G_{n2}V_2^{(n)} + \dots + G_{n,n-1}V_{n-1}^{(n)}) \right] \quad (2.3.8)$$

- Βήμα 4: Επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 και 3 με χρήση των τελευταίων υπολογισμένων τάσεων V_2, V_3, \dots, V_n μέχρις ότου η διαφορά μεταξύ των τάσεων των διαδοχικών επαναλήψεων να είναι μικρότερο από μια προκαθορισμένη τιμή για κάθε ζυγό

2.3.2 Η μέθοδος Newton-Raphson

Η Newton-Raphson είναι μία από τις καλύτερες μεθόδους διαδοχικών προσεγγίσεων για την προσεγγιστική εύρεση των ριζών μιας πραγματικής συνάρτησης. Η μέθοδος είναι ικανή να συγκλίνει σημαντικά γρήγορα, ειδικά αν η επαναληπτική διαδικασία ξεκινήσει «αρκετά κοντά» στην ζητούμενη λύση [2.4].

Η εφαρμογή της μέθοδου του Newton-Raphson σε ένα δίκτυο με n ζυγούς. Οι ισχύς των ζυγών εκφράζονται ως μη γραμμικές συναρτήσεις των τάσεων των ζυγών όπως στις παρακάτω σχέσεις [2.2]:

$$P_1 = V_1(G_{11}V_1 + G_{12}V_2 + \dots + G_{1n}V_n) \quad (2.3.9)$$

$$P_2 = V_2(G_{21}V_1 + G_{22}V_2 + \dots + G_{2n}V_n) \quad (2.3.10)$$

⋮

$$P_n = V_n(G_{n1}V_1 + G_{n2}V_2 + \dots + G_{nn}V_n) \quad (2.3.11)$$

Μικρές αλλαγές στις τάσεις των ζυγών (ΔV) θα προκαλέσουν αντίστοιχες μικρές αλλαγές στους ισχύς των ζυγών (ΔP). Μια γραμμικοποιημένη προσέγγιση των μεταβολών ισχύος σαν συνάρτηση των μεταβολών των τάσεων μπορεί να προκύψει ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_n} \\ \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \frac{\partial P_n}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (2.3.12)$$

ή συμβολικά

$$[\Delta P] = [J][\Delta V]$$

όπου $[J]$ είναι ο Ιακωβιανός πίνακας, το οποίο περιέχει τα μερικά παράγωγα των ισχύων ως προς τα μερικά παράγωγα των τάσεων για ένα συγκεκριμένο σύνολο τάσεων, V_1, V_2, \dots, V_n (δηλαδή οι μερικοί παράγωγοι των (2.3.9), (2.3.10) και (2.3.11)). Όταν μια ή περισσότερες από τις τάσεις αλλάξουν αρκετά ένας καινούργιος Ιακωβιανός πίνακας πρέπει να υπολογιστεί.

Στο πρόβλημα της ροής φορτίου, η V_1 είναι δεδομένη. Επίσης, δεδομένου ότι η ΔP_1 δεν εισάγετε τους υπολογισμούς αναλυτικά, η (2.3.12) μπορεί να μετατραπεί σε:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (2.3.13)$$

Αλλαγές στις V_2, V_3, \dots, V_n λόγω των αλλαγών στις P_2, P_3, \dots, P_n λαμβάνονται αναστρέφοντας την $[J]$

$$[\Delta V] = [J]^{-1}[\Delta P] \quad (2.3.14)$$

Τα βήματα της μεθόδου της Newton-Raphson είναι:

- Βήμα 1: Αναθέση εκτιμήσεων στις V_2, V_3, \dots, V_n
- Βήμα 2: Υπολογισμός των P_2, P_3, \dots, P_n (από 2.3.10 και 2.3.11)
- Βήμα 3: Υπολογισμός της διαφοράς μεταξύ της υπολογισμένης και της καθορισμένης ισχύος:

$$\Delta P_2 = P_2 - P'_2 \quad (2.3.15)$$

$$\vdots$$

$$\Delta P_n = P_n - P'_n \quad (2.3.16)$$

όπου ο δεύτερος όρος είναι η καθορισμένη τιμή

- Βήμα 4: Οι νέες εκτιμήσεις για τις τάσεις των ζυγών υπολογίζονται από:

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}_{\text{new}} = \begin{bmatrix} V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}_{\text{old}} - [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} \quad (2.3.17)$$

Αυτή είναι η βασική εξίσωση της μεθόδου Newton-Raphson. Το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στον τρόπο που η ΔP ορίζεται

- Βήμα 5: Τα παραπάνω βήματα 2 έως 4 επαναλαμβάνονται μέχρι $\Delta P_2, \dots, \Delta P_n$ να είναι μικρότερα από μια προκαθορισμένη μικρή τιμή (κριτήριο σύγκλισης)

2.3.3 Η μέθοδος Forward and Backward Sweep (FBS)

Η μέθοδος forward/backward είχε αρχικά σχεδιαστεί για ακτινικά ή ασθενώς διασυνδεδεμένα AC δίκτυα διανομής. Ωστόσο, στη συνέχεια διαπιστώθηκε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου και για τα DC δίκτυα.

Ο ζυγός τροφοδοσίας επιλέχθηκε ως ο ζυγός αναφοράς και έγινε ανάθεση μιας αρχικής τάσης στον ζυγό αυτό. Στη συνέχεια, ξεκινώντας από τον τελευταίο ζυγό και πηγαίνοντας προς τα πίσω, προς τη ρίζα, οι εγχύσεις των ρευμάτων υπολογίζονται από [2.2]:

$$I_{ij}^{(n)} = \frac{P_i}{V_i^{k-1}} \quad (2.3.18)$$

όπου j είναι ο γειτονικός ζυγός στον ζυγό i στην φορά του ρεύματος.

Στη συνέχεια, ξεκινώντας από τη ρίζα και πηγαίνοντας προς τα εμπρός, προς τα φορτία, οι τάσεις σε κάθε ζυγό υπολογίζονται από [2.2]:

$$V_j^{(n+1)} = V_j^{(n)} - R_{ij}I_{ij}^{(n)} \quad (2.3.19)$$

Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται επαναληπτικά έως ότου οι διαφορές των ισχύων ή των τάσεων να είναι μικρότερα από μια προκαθορισμένη τιμή σε κάθε ζυγό.

2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] Β. Κ. Παπαδιάς, "Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας", τόμ. Ι, Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας", Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985, σελ. 126-135
- [2.2] Chathuranga Jayarathna, Prabath Binduhewa, Janaka Ekanayake, Jianzhong Wu, "Load flow analysis of low voltage dc networks with photovoltaic", IEEEExplore Digital Library, p.1-3
- [2.3] <http://myria.math.aegean.gr/epeaek/pdfs/numerical-analysis.pdf>, p.79
- [2.4] https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%AD%CE%B8%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CF%82_%CE%9D%CE%B9%CE%BF%CF%8D%CF%84%CE%BF%CE%BD

ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ DC ΔΙΚΤΥΑ

3.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Πρέπει να γίνει επίλυση υπερβολικά μεγάλου πλήθους ντετερμινιστικών ροών φορτίου για να ληφθούν υπόψη όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί μεταβολής των φορτίων και της παραγωγής. Για συστήματα με N ζυγούς και K διαφορετικές τιμές φορτίων σε κάθε ζυγό απαιτούνται K^N ροές φορτίου π.χ. [3.2]

$$\begin{array}{lll} \text{Av} & N = 10 \text{ και } K = 2 & 2^{10} \approx 10^3 \\ & K = 4 & 4^{10} \approx 10^6 \end{array}$$

$$\begin{array}{lll} \text{Av} & N = 100 \text{ και } K = 2 & 2^{100} \approx 10^{30} \\ & K = 4 & 4^{100} \approx 10^{60} \end{array}$$

Είναι πρακτικά αδύνατη 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. Έτσι, γίνεται επιλογή κάποιων αναμενόμενων τιμών, ακραίων τιμών και τυχόν αυθαίρετων ενδιάμεσων τιμών 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, όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί μεταβολών των φορτίων και της παραγωγής λαμβάνονται υπόψη με την πιθανοτική ροή φορτίου με μία μόνο επίλυση. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη στατιστική θεώρηση των φορτίων και των παραγωγών των οποίων οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας θεωρούνται δεδομένες. Σκοπός της πιθανοτικής ροής φορτίου είναι ο υπολογισμός της μέσης τιμής, της τυπικής απόκλισης και της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των αγνώστων μεγεθών. Η σύνθεση όλων αυτών των πιθανών αποτελεσμάτων που αντιστοιχούν στα δεδομένα δίνουν απάντηση σε πολλά πρακτικά προβλήματα.

A) Πλεονεκτήματα–Μειονεκτήματα

Τα βασικά πλεονεκτήματα της πιθανοτικής μεθόδου είναι [3.2]:

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

Τα μειονεκτήματα και οι δυσκολίες που παρουσιάζει είναι [3.2]:

- α. 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.
- β. Η αύξηση του αριθμού των δεδομένων σε σχέση με τη ντετερμινιστική μέθοδο και η δυσκολία προσδιορισμού τους με στατιστικές παραμέτρους.
- γ. 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 [3.2]:

Δίνονται:

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

Προσδιορίζονται:

- α. Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των πραγματικών εγχύσεων, των πραγματικών ροών ισχύος στις γραμμές και στα στοιχεία αντισταθμίσεως και των τάσεων στους ζυγούς φορτίου.
- β. Η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του ισοζυγίου της ισχύος στο σύστημα.
- γ. Οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των τάσεων, των πραγματικών ροών ισχύος.
- δ. Οι συντελεστές ευαισθησίας των γραμμών.

3.2 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΠΟΥ ΑΠΟΚΤΑΜΕ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

A) Η πιθανοτική ροή φορτίου που προσδιορίζει την μορφή των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας παρέχει της ακόλουθες πληροφορίες [3.2]:

- i. Ποια είναι η πιο πιθανή τιμή της ροής φορτίου σε μία γραμμή ή τάσεως σε ένα ζυγο.
- 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.

Β) Επειδή είναι γνωστές όλες οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας της παραγωγής και των φορτίων επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας του ισοζυγίου της ισχύος στο σύστημα. Το ισοζύγιο ισχύος είναι ανεξάρτητο από τις παραμέτρους των στοιχείων του δικτύου και την τοπολογία. Η πιθανότητα να υπάρχει πλεόνασμα ή έλλειμμα ισχύος στο σύστημα εξάγεται από την γραφική παράσταση αυτής της συνάρτησης με αποτέλεσμα την ποσοτική εκτίμηση της ικανότητας του συστήματος να καλύψει τη συνολική ζήτηση. Ο προσδιορισμός του αριθμού και της ικανότητας των εφεδρειών που θα χρησιμοποιηθούν μπορεί να φανεί από αυτήν την πληροφορία [3.2].

Γ) Πρώτα πρέπει να γίνει η εξαγωγή του διανύσματος των συντελεστών ευαισθησίας που καθορίζει πόσο επηρεάζεται το συγκεκριμένο μέγεθος από τη μεταβολή της πραγματικής εγχύσεως σε κάθε ζυγό ξεχωριστά για να επιτευχθεί ο υπολογισμός των αγνώστων μεγεθών στην πιθανοτική ροή φορτίου. Μπορεί να γίνει χρήση των συντελεστών αυτών στην 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 [3.2].

3.3 ΠΙΘΑΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Στη λειτουργία και στη σχεδίαση της επέκτασης του δικτύου ο υπολογισμός της Πιθανοτικής Ροής Φορτίου παρέχει πολύ πιο σύνθετες πληροφορίες για την πιθανή λειτουργική κατάσταση του δικτύου από ότι ο υπολογισμός της συμβατικής ντετερμινιστικής ροής φορτίου. Αντί να γίνει εστίαση σε ντετερμινιστικές καταστάσεις, οι οποίες αποτελούνται από ένα επιλεγμένο αριθμό σεναρίων, παρέχει ένα χειριστή ή ένα ρυθμιστή με πληροφορίες για όλες τις πιθανές καταστάσεις και τις αντίστοιχες πιθανότητες τους. Τα αποτελέσματα δεν δείχνουν μόνο αν είναι δυνατή ή όχι μια ορισμένη ακραία φόρτωση, αλλά επίσης την πιθανότητα του και έτσι είναι ένα μέσο για την εκτίμηση της διάρκειας της εμφάνισης του φαινομένου. Τότε είναι η απόφαση του χειριστή ή του ρυθμιστή αν κάποια αντίμετρα είναι αναγκαία ή όχι. Έχοντας υπόψιν ότι στην πραγματικότητα δεν είναι μια υπερένταση που βλάπτει την γραμμή, αλλά η παραγόμενη και η συσσωρευμένη θερμότητα, γίνεται σαφές ότι οι πληροφορίες για την πιθανότητα καθώς και για την αναμενόμενη διάρκεια εμφάνισης του είναι εξαιρετικά πολύτιμες πληροφορίες [3.5].

Σχεδιασμός επέκτασης του δικτύου

Στην περίπτωση του σχεδιασμού της επέκτασης του δικτύου, τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθεί η πιθανότητα και έτσι ο μέσος χρόνος εμφάνισης των απρόβλεπτων καταστασεων του δικτύου. Η πληροφορία αυτή έχει μεγάλη σημασία για την επενδυτική απόφαση επειδή τα απρόβλεπτα κόστη μπορούν να εκτιμηθούν με βάση τα αποτελέσματα της πιθανοτικής ροής φορτίου. Επιπλέον, οι πιο σημαντικοί κόμβοι, συμμετέχουν ενεργά στον υπολογισμό της συσχέτισης.

Τα λεγόμενα N-1 κριτήρια, που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό της επέκτασης του παραδοσιακού δικτύου μπορούν να συμπεριληφθούν από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των ρευμάτων των γραμμών τα οποία βρίσκονται σε κίνδυνο πολλαπλότητας στις σχετικές τοπολογίες του δικτύου. Σε αυτή την περίπτωση, είναι επίσης απαραίτητο να ληφθεί υπόψιν η πιθανότητα της επιλεγμένης τοπολογίας. Συγκρίνοντας την αντίστοιχη προκύπτουσα

συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας με την πιθανότητα εμφάνισης της εξεταζόμενης τοπολογίας, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η μέση διάρκεια της υπερφόρτωσης ακόμη και με την εξέταση των διακοπών των γραμμών [3.5].

Online λειτουργία

Ένα άλλο πιθανό πεδίο εφαρμογής είναι ο υπολογισμός της πιθανότητας φόρτωσης της γραμμής κάτω από την ισχυρή επιρροή των στοχαστικών εγχύσεων ενέργειας (π.χ. τροφοδότηση από τις ανεμογεννήτριες). Προγνώσεις ανέμου μπορούν να μετατραπούν άμεσα σε προβλέψεις των φορτίων των γραμμών, βοηθώντας τον χειριστή του δικτύου να αξιολογήσει τους κινδύνους υπερφόρτωσης της γραμμής. Είναι τότε η απόφασή του αν θέλει ή όχι να περιορίσει την τροφοδοσία. Για αυτήν την απόφαση, τα αποτελέσματα της πιθανοτικής ροής φορτίου είναι η μόνη έγκυρη βάση.

Εκτός από την επίδραση των εγχύσεων ισχύος με στοχαστικό χαρακτήρα, η πιθανοτική ροή φορτίου επιτρέπει την αξιολόγηση του κινδύνου των διακοπών της γεννήτριας. Καθώς η πιθανότητα μιας διακοπής μπορεί εύκολα να μοντελοποιηθεί με την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των εγχύσεων ισχύος, η εξέταση των διακοπών της γεννήτριας είναι ένα φυσικό χαρακτηριστικό της πιθανοτικής ροής φορτίου [3.5].

3.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ DC ΔΙΚΤΥΑ

Η πιθανοτική ροή φορτίου μπορεί να εκτελεστεί χρησιμοποιώντας είτε μια αριθμητική είτε μια αναλυτική προσέγγιση. Η αριθμητική όπως η Monte-Carlo (MC), αντικαθιστά έναν επιλεγμένο αριθμό τιμών για τις στοχαστικές μεταβλητές και τις παραμέτρους του δικτύου και εκτελεί μια ντετερμινιστική ανάλυση για κάθε τιμή έτσι ώστε ο ίδιος αριθμός τιμών να εμπεριέχεται στα αποτελέσματα, δεδομένου ότι η αναλυτική προσέγγιση αναλύει το σύστημα και τις εξόδους του χρησιμοποιώντας μαθηματικές εκφράσεις, όπως για παράδειγμα οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας, και περιέχει αποτελέσματα σε όρους μαθηματικών εκφράσεων [3.3].

Αριθμητική μέθοδος

Η αριθμητική προσέγγιση [3.3], [3.6] υιοθετεί τη μέθοδο MC για την πιθανοτική ανάλυση ροής φορτίου. Τα δύο κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου MC είναι η παραγωγή τυχαίων αριθμών και η τυχαία δειγματοληψία. Προγράμματα όπως το Matlab παρέχουν αλγόριθμους για παραγωγή τυχαίων αριθμών. Στην αναφορά [3.8] μπορούμε να δούμε διαφορετικές τεχνικές τυχαίας δειγματοληψίας όπως η απλή και η κατά τμήματα δειγματοληψία. Αν και οι τεχνικές δειγματοληψίας μπορεί να είναι κάπως περίπλοκες η πιθανοτική ανάλυση ροής φορτίου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο MC αρχικά εκτελεί ντετερμινιστική ανάλυση πολλές φορές έχοντας σαν εισόδους διαφορετικούς συνδυασμούς σημαντικών τιμών ισχύος. Έτσι η ακριβής μη γραμμική μορφή των εξισώσεων ροής φορτίου όπως φαίνονται στις σχέσεις (3.4.1) & (3.4.2) μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πιθανοτική ανάλυση.

$$P_i = U_i \sum_{k=1}^n U_k G_{ik} \quad (3.4.1)$$

$$P_{ik} = -t_{ik} G_{ik} U_i^2 + U_i U_k G_{ik} \quad (3.4.2)$$

42 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ DC ΔΙΚΤΥΑ

όπου P_i είναι η ενεργός ισχύς του δικτύου στον ζυγό i , P_{ik} είναι η ενεργός έγχυση στη γραμμή ik από τη μεριά του ζυγού i , U_i και U_k είναι η τάση στον ζυγό i και k , G_{ik} είναι το πραγματικό μέρος του αντίστοιχου πίνακα αγωγιμοτήτων.

Η ικανότητα χρησιμοποίησης των μη γραμμικών εξισώσεων ροών φορτίου είναι ο λόγος που τα αποτελέσματα από την πιθανοτική ροή φορτίου (PLF) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο MC συνήθως θεωρούνται το μέτρο σύγκρισης (ως πιο αξιόπιστα) άλλων αλγορίθμων PLF με απλοποιημένες εξισώσεις ροής φορτίου ώστε να ελέγχεται η ακρίβεια των αλγορίθμων. Παρά την υψηλή ακρίβεια της μεθόδου MC, απαιτεί υψηλό υπολογιστικό χρόνο εξαιτίας του μεγάλου αριθμού υπολογισμών που εκτελεί.

Αναλυτική μέθοδος

Η βασική ιδέα της αναλυτικής προσέγγισης [3.3], [3.6] είναι να κάνει αριθμητική προσέγγιση χρησιμοποιώντας τεχνικές συνέλιξης με τις σππ των στοχαστικών μεταβλητών των εισόδων ισχύος έτσι ώστε οι σππ των στοχαστικών μεταβλητών των καταστάσεων του συστήματος και των ροών να λαμβάνονται υπόψη. Παρόλα αυτά οι δυσκολίες επίλυσης των εξισώσεων της PLF μέσω της συνέλιξης των σππ των μεταβλητών εισόδου ισχύος είναι διπλάσιες:

α) Οι εξισώσεις (3.4.1) και (3.4.2) που παρουσιάζονται παραπάνω δεν είναι γραμμικές

β) Οι μεταβλητές εισόδου για τις ισχύς σε διαφορετικούς ζυγούς δεν είναι συνήθως εντελώς ανεξάρτητες

Άρα κάποιες υποθέσεις γίνονται συνήθως για να είναι δυνατό να εκτελεστεί μια PLF εύκολα χρησιμοποιώντας μια αναλυτική προσέγγιση.

Οι υποθέσεις είναι:

γ) Γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροής φορτίου

δ) Πλήρως ανεξάρτητες ή γραμμικά συσχετισμένες μεταβλητές ισχύος

ε) Υποθέτονται κανονική και διακριτή κατανομή για τα φορτία και τις παραγωγές αντίστοιχα

στ) Η διαμόρφωση του δικτύου και οι παράμετροι παραμένουν σταθερές

Έτσι οι εξισώσεις της ροής φορτίου γραμμικοποιούνται γύρω από τη μέση τιμή των καταστάσεων του συστήματος \hat{X} με της πρώτης τάξης ανάπτυξη Taylor. Αν η (3.4.1) παριστάνεται από την πιο γενική σχέση:

$$Y=f(X) \quad (3.4.3)$$

Τότε η γραμμικοποιημένη σχέση μπορεί να εκφραστεί σαν:

$$X \approx \hat{X} + A(Y - \bar{Y}) \quad (3.4.4)$$

όπου

$$A = \left(\frac{\partial f}{\partial X} \Big|_{X = \hat{X}} \right)^{-1} \quad (3.4.5)$$

Η μεταβλητή A αναφέρεται σαν συντελεστής ευαισθησίας στην PLF. Παρόμοιες εκφράσεις μπορούν να εξαχθούν και για την σχέση (3.4.2). Στην επίλυση της ντετερμινιστικής ροής φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson, ο ιακωβιανός πίνακας A υπολογίζεται σε κάθε επανάληψη μέχρι τα σφάλματα των αποτελεσμάτων να είναι μικρότερα από κάποιες προκαθορισμένες τιμές. Παρ'όλα αυτά στην PLF, ο ιακωβιανός πίνακας υπολογίζεται μια φορά για τον υπολογισμό κάθε ροής φορτίου. Άρα τα σφάλματα που προκαλούνται λόγω της γραμμικοποίησης των εξισώσεων ροής φορτίου πρέπει να επισημαίνονται και να λαμβάνονται υπόψιν. Η σχέση (3.4.4) δείχνει ότι οι καταστάσεις του συστήματος εκφράζονται από ένα γραμμικό συνδυασμό των μεταβλητών ισχύος που εισάγονται. Με την υπόθεση της ανεξαρτησίας μια τεχνική συνέλιξης μπορεί να εφαρμοστεί για να παραχθούν οι σππ των καταστάσεων του συστήματος:

$$f(X_i) = f(Y_1 - \bar{Y}_1) * f(Y_2 - \bar{Y}_2) * \dots * f(Y_n - \bar{Y}_n) \quad (3.4.6)$$

3.5 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Με χρήση του παρακάτω συστήματος μη γραμμικών εξισώσεων μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά το πρόβλημα της ροής φορτίου [3.1]:

$$Y=g(X) \quad (3.5.1)$$

$$Z=h(X) \quad (3.5.2)$$

όπου: Y το διάνυσμα εισόδου

X το διάνυσμα κατάστασης

Z το διάνυσμα εξόδου

και g,h μη γραμμικές διανυσματικές συναρτήσεις

Το διάνυσμα Y αντιπροσωπεύει τις ενεργές εγχύσεις σε όλους τους ζυγούς, εκτός του ζυγού αναφοράς, το διάνυσμα X αντιπροσωπεύει το μέτρο των τάσεων και τέλος το διάνυσμα Z αντιπροσωπεύει όλα τα μεγέθη που μπορούν να υπολογιστούν από το διάνυσμα κατάστασης, όπως ενεργές ροές ισχύος, απώλειες κ.λ.π.

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

- 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 (στην περίπτωση μας είναι η μέση τιμή) και το διάνυσμα κατάστασης X_0 τέτοιο ώστε να ικανοποιεί την διανυσματική εξίσωση:

$$Y_0 = g(X_0) \quad (3.5.3)$$

τότε το διάνυσμα X_0 μπορεί να προκύψει από την επίλυση μιας ντετερμινιστικής ροής φορτίου όπου τα δεδομένα είναι οι αναμενόμενες τιμές των στοιχείων του διανύσματος Y . Μια εκτίμηση της αναμενόμενης τιμής του τυχαίου διανύσματος X είναι το διάνυσμα X_0 (εδώ χρησιμοποιείται η μέση τιμή αυτού που προκύπτει από την Monte-Carlo όταν αυτή υλοποιηθεί για τις μέσες τιμές των κατανομών της ενεργού ισχύος). Ομοίως το διάνυσμα Z_0 , που ικανοποιεί την διανυσματική εξίσωση:

$$Z_0 = h(X_0) \quad (3.5.4)$$

αποτελεί εκτίμηση της αναμενόμενης τιμής του τυχαίου διανύσματος Z (και πάλι η μέση τιμή του προκύπτει από την Monte-Carlo).

Η γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροής φορτίου (3.5.1) και (3.5.2) γύρω από την αναμενόμενη τιμή, δηλαδή τα σημεία (X_0, Y_0) και (X_0, Z_0) δίνει:

$$Y \approx g(X_0) + J(X - X_0) \quad (3.5.5)$$

$$Z \approx h(X_0) + K(X - X_0) \quad (3.5.6)$$

όπου:

$$J = \left. \frac{\partial g}{\partial X} \right|_{X = X_0} \text{ η Ιακωβιανή της } g \text{ στο σημείο } X_0 \quad (3.5.7)$$

$$K = \left. \frac{\partial h}{\partial X} \right|_{X = X_0} \text{ η Ιακωβιανή της } h \text{ στο σημείο } X_0 \quad (3.5.8)$$

46 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ DC ΔΙΚΤΥΑ

Αντικαθιστώντας στις εξισώσεις (3.5.5) και (3.5.6) τις εξισώσεις (3.5.3) και (3.5.4) έχουμε:

$$Y = Y_0 + J(X - X_0) \quad (3.5.9)$$

$$Z = Z_0 + K(X - X_0) \quad (3.5.10)$$

Η επίλυση των εξισώσεων (3.5.9) και (3.5.10) ως προς το διάνυσμα κατάστασης και το διάνυσμα εξόδου δίνει:

$$X = X_0 + J^{-1}(Y - Y_0) \quad (3.5.11)$$

$$Z = Z_0 + KJ^{-1}(Y - Y_0) \quad (3.5.12)$$

ή ακόμα

$$X = X'_0 + AY \quad (3.5.13)$$

$$Z = Z'_0 + BY \quad (3.5.14)$$

όπου

$$A = J^{-1}, X'_0 = X_0 - AY_0$$

$$B = KA, Z'_0 = Z_0 - BY_0$$

Παρακάτω έχουμε την αναλυτική μορφή των εξισώσεων (3.5.13) και (3.5.14)

$$X_i = X'_{0i} + \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} Y_j \quad (3.5.15)$$

$$Z_i = Z'_{0i} + \sum_{j=1}^m b_{ij} Y_j \quad (3.5.16)$$

όπου

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$k = 1, 2, \dots, l$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

n η διάσταση του διανύσματος κατάστασης X

m η διάσταση του διανύσματος δεδομένων Y

l η διάσταση του διανύσματος ζητούμενων Z

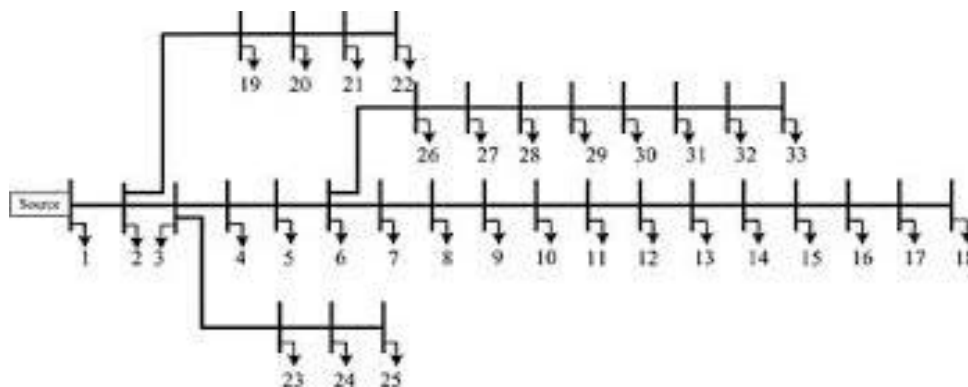
a_{ij} στοιχείο του πίνακα των συντελεστών ευαισθησίας A

b_{kj} στοιχείο του πίνακα των συντελεστών ευαισθησίας B

Από τις εξισώσεις (3.5.15) και (3.5.16) έχουμε ότι κάθε τυχαία μεταβλητή των διανυσμάτων X και Z εκφράζεται ως αλγεβρικό άθροισμα των ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών του διανύσματος Y με συντελεστές βαρύτητας κατάλληλα υπολογισμένους από τους συντελεστές ευαισθησίας. Επομένως από την μαθηματική συνέλιξη των δεδομένων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας των φορτίων και της παραγωγής μπορούν να υπολογιστούν οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των τυχαίων μεταβλητών των διανυσμάτων X και Z, οι οποίες ακολουθούν τις γνωστές κατανομές πιθανότητας.

3.6 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός τριφασικού, συμμετρικού, ακτινικού δικτύου διανομής δίνεται στο σχήμα 3.1. Τα σημεία στα οποία συνδέονται φορτία, τα σημεία αλλαγής των χαρακτηριστικών της γραμμής και τα σημεία σύνδεσης άλλων γραμμών ορίζονται ως κόμβοι. Τα αγωγίμα τμήματα μεταξύ δύο κόμβων ορίζονται ως κλάδοι. Λόγω της ακτινικότητας του δικτύου η αποθήκευση της τοπολογίας γίνεται μόνο σε ένα πίνακα που έχει διάσταση ίση με τον αριθμό των κλάδων και περιέχει σε διατεταγμένη σειρά τους αριθμούς που αντιστοιχούν στους κόμβους ξεκινώντας από τον κόμβο τροφοδοσίας.



Σχήμα 3.1 Τυπικό ακτινικό δίκτυο

48 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ DC ΔΙΚΤΥΑ

Με την χρήση της μεθόδου των βρόχων γίνεται ο υπολογισμός των ρευμάτων που διατρέχουν τους κλάδους του ακτινικού δικτύου, αν θεωρηθούν ως ανεξάρτητοι βρόχοι αυτοί που ορίζονται από τον κόμβο τροφοδοσίας και τους ακραίους κόμβους που συνδέονται τα φορτία.

Σε διανυσματική μορφή έχουμε [3.1]:

$$I = AxJ \quad (3.6.1)$$

όπου J το διάνυσμα των ρευμάτων των φορτίων που έχει διάσταση n
 I το διάνυσμα των ρευμάτων των κλάδων που έχει διάσταση n
 A τετραγωνικός πίνακας διαστάσεων $n \times n$, στον οποίο οι γραμμές αντιστοιχούν στους n κλάδους και οι στήλες στους κόμβους
 n ο αριθμός των κλάδων του ακτινικού δικτύου

Η τοπολογία του δικτύου περιγράφεται από τα στοιχεία του πίνακα A , τα οποία ισούνται με μονάδα ή μηδέν ανάλογα με την πιο κάτω σχέση:

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{όταν ο κόμβος που αντιστοιχεί στη στήλη } j \\ & \text{τροφοδοτείται δια μέσου του κλάδου που} \\ & \text{αντιστοιχεί στη γραμμή } i \\ 0, & \text{σε διαφορετική περίπτωση} \end{cases}$$

Ο πίνακας των συνθέτων αντιστάσεων του δικτύου δίνεται από τη σχέση:

$$Z = A^T \times Z_b \times A \quad (3.6.2)$$

όπου Z_b ο διαγώνιος πίνακας διαστάσεων $n \times n$, του οποίου τα στοιχεία είναι οι σύνθετες αντιστάσεις των κλάδων

Με χρήση του παρακάτω κανόνα μπορούν επίσης να εξαχθούν τα στοιχεία του πίνακα των συνθέτων αντιστάσεων Z .

Κανόνας:

- Τα διαγώνια στοιχεία z_{ii} ισούνται με το άθροισμα όλων των αντιστάσεων Z_b των κλάδων που σχηματίζουν την αγώγιμη σύνδεση μεταξύ του κόμβου τροφοδοσίας και του κόμβου i .
- Τα μη διαγώνια στοιχεία z_{ij} ($i \neq j$) ισούνται με το άθροισμα όλων των αντιστάσεων Z_b των κλάδων που σχηματίζουν το κοινό αγώγιμο τμήμα της σύνδεσης μεταξύ του κόμβου τροφοδοσίας και των κόμβων i και j αντίστοιχα.

Και ο συντελεστής βαρύτητας της ισχύος υπολογίζεται με βάση τον παρακάτω πίνακα:

$$\gamma(k,i) = -\text{Real}\{Z(i,k)\} \quad (3.6.3)$$

Ο υπολογισμός των τάσεων και των ενεργών ροών ισχύος, και των απωλειών του συστήματος, τα οποία δεν βασίζονται μόνο σε συγκεκριμένες τιμές φόρτισης, αλλά λαμβάνει υπόψη του το πλήρες φάσμα των πιθανών τιμών με τις αντίστοιχες πιθανότητες τους αποτελούν τον σκοπό της πιθανοτικής ανάλυσης ροών φορτίου. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται η γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροών φορτίου έτσι ώστε τα ζητούμενα μεγέθη να εκφράζονται ως το αλγεβρικό άθροισμα των δεδομένων ενεργών εγχύσεων στους κόμβους του δικτύου. Η γραμμικοποίηση του προβλήματος απλοποιείται σημαντικά στην περίπτωση που το δίκτυο είναι ακτινικό.

Έτσι, αμελώντας σε πρώτη προσέγγιση τις απώλειες στις γραμμές του δικτύου η ενεργός ροή ισχύος στην γραμμή ij δίνεται από την εξίσωση:

$$P_{ij} = \sum_{k \in a(j)} P_k \quad (3.6.4)$$

50 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ DC ΔΙΚΤΥΑ

όπου P_k η ενεργός συνιστώσα του φορτίου στον κόμβο k και $a(j)$ το σύνολο των κόμβων που τροφοδοτούνται από τον κόμβο j .

Για τον υπολογισμό της τάσης ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία:

Έστω V_0 και V_k οι τάσεις στον κόμβο τροφοδοσίας και στον κόμβο k αντίστοιχα, τότε:

$$V_k = V_0 - \Delta U_k \quad (3.6.5)$$

όπου ΔU_k είναι η συνολική πτώση τάσης από τον κόμβο τροφοδοσίας μέχρι τον κόμβο k , και ΔV_k η πτώση τάσης πάνω στον κλάδο k .

$$\Delta U_k = \Delta V_1 + \dots + \Delta V_k = \sum_{i=1}^k \Delta V_i \quad (3.6.6)$$

Και σε διανυσματική μορφή:

$$\Delta U = A^T \times \Delta V \quad (3.6.7)$$

όπου $\Delta V = Z_b \times I = Z_b \times A \times J \quad (3.6.8)$

και $\Delta U = A^T \times Z_b \times A \times J = Z \times J \quad (3.6.9)$

Έτσι η αναλυτική έκφραση της συνολικής πτώσης τάσης από τον κόμβο τροφοδοσίας μέχρι τον κόμβο k είναι:

$$\Delta U_k = \sum_{i=1}^n z_{ki} J_i \quad (3.6.10)$$

όπου z_{ki} στοιχείο της k γραμμής του πίνακα συνθέτων αντιστάσεων Z
 n ο αριθμός των κόμβων του ακτινικού δικτύου, εκτός του κόμβου τροφοδοσίας

J_i το ρεύμα φορτίου στον κόμβο i

Ανεξάρτητα από τις μεταβολές της τάσης αν θεωρηθούν όλα τα φορτία ως φορτία σταθερού ρεύματος, για την έγχυση ρεύματος σε κάποιο κόμβο έχουμε την παρακάτω εξίσωση:

$$J_i = P_i \quad (3.6.11)$$

Και επομένως η τάση V_k στον κόμβο k δίνεται από την ακόλουθη αναλυτική σχέση:

$$V_k = V_0 - \sum_{i=1}^n z_{ki} P_i \quad (3.6.12)$$

Στην περίπτωση μας που το δίκτυο είναι DC η $z_{ki} = R_{ki}$.

Άρα η τελική μορφή της εξίσωσης της τάσης είναι το ακόλουθο:

$$V_k = \sum_{i=1}^n (-R_{ki} P_i) + V_0 \quad (3.6.13)$$

3.7 ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΥΝΕΛΙΞΗΣ

Με την χρήση της εξίσωσης (A.15) του παραρτήματος A συνελίσσονται οι προηγούμενες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας, για τον υπολογισμό της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των ζητούμενων μεταβλητών.

Από κανονικές και διακριτές κατανομές αποτελείται το τυχαίο διάνυσμα Y που αντιπροσωπεύει τις μεταβολές ή την αβεβαιότητα των φορτίων και της παραγωγής στο σύστημα. Η συμβατική μέθοδος για την πραγματοποίηση της συνέλιξης στηρίζεται στον μετασχηματισμό Laplace και υπολογίζει δύο ισοδύναμες κατανομές μια για όλες τις κανονικές και μια για όλες τις διακριτές, και κατόπιν συνελίσσει τις δυο αυτές κατανομές μεταξύ τους για τον υπολογισμό της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των ζητούμενων τυχαίων μεταβλητών.

Από τις αναμενόμενες τιμές και τις τυπικές αποκλίσεις όλων των κανονικών κατανομών υπολογίζεται η ισοδύναμη κανονική κατανομή [3.1]:

$$\text{Αν} \quad f_1 = N(\mu_1, \sigma_1) \quad (3.7.1)$$

$$f_2 = N(\mu_2, \sigma_2) \quad (3.7.2)$$

$$\text{και} \quad f_n = \alpha_1 f_1 * \alpha_2 f_2 \quad (3.7.3)$$

όπου μ και σ αντιπροσωπεύουν την αναμενόμενη τιμή και την τυπική απόκλιση αντίστοιχα τότε:

$$f_n = N(\mu_n, \sigma_n) \quad (3.7.4)$$

$$\text{όπου} \quad \mu_n = \alpha_1 \mu_1 + \alpha_2 \mu_2 \quad \text{και} \quad \sigma_n = \sqrt{(\alpha_1 \sigma_1)^2 + (\alpha_2 \sigma_2)^2}$$

Το βασικό πρόβλημα αποτελεί ο υπολογισμός της ισοδύναμης διακριτής κατανομής λόγω του μεγάλου αριθμού των διακριτών τιμών με τις οποίες παριστάνεται. Για παράδειγμα όταν μια διακριτή συνάρτηση που παριστάνεται με r διακριτές τιμές συνελίσσεται με μια άλλη διακριτή συνάρτηση που παριστάνεται με s διακριτές τιμές η τελική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας θα αντιπροσωπεύεται από (rxs) διακριτές τιμές. Όταν ο αριθμός των διακριτών

συναρτήσεων στο σύστημα είναι μεγάλος η διαδικασία αυτή γίνεται χρονοβόρα και μή πρακτική.

$$\text{Αν} \quad f_1(x_1) = \sum_{i=1}^r p_i \delta(x_1 - W_i) \quad (3.7.5)$$

$$f_2(x_2) = \sum_{j=1}^s p'_j \delta(x_2 - W'_j) \quad (3.7.6)$$

$$\text{και} \quad f_D = \alpha_1 f_1 * \alpha_2 f_2 \quad (3.7.7)$$

$$\text{Τότε} \quad f_D(x) = \sum_{k=1}^t g_k \delta(x - h_k) \quad (3.7.8)$$

$$\text{όπου} \quad t = r \times s$$

$$g_k = p_i \times p'_j$$

$$\text{και} \quad h_k = \alpha_1 W_i + \alpha_2 W'_j$$

για όλα τα διατεταγμένα ζεύγη $(i,j) \ i=1,\dots,r \ j = 1,\dots,s$

Αν καθοριστεί εκ των προτέρων ο επιθυμητός αριθμός N των διακριτών τιμών με τις οποίες θα αντιπροσωπευθεί η συνάρτηση πυκνότητα πιθανότητα λύνεται το πρόβλημα του μεγάλου αριθμού των διακριτών τιμών της τελικής ισοδύναμης διακριτής συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας. Για το σκοπό αυτό προσδιορίζονται τα άκρα της τελικής διακριτής συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας και το διάστημα των πιθανών τιμών διαιρείται σε $N-1$ διαστήματα. Αν κατά τη διάρκεια της συνέλιξης κάποια διακριτή τιμή βρεθεί εντός κάποιου διαστήματος από τα προηγούμενα $N-1$ διαμοιράζεται μεταξύ των σταθερών ακραίων σημείων του διαστήματος αντιστρόφως ανάλογα της απόστασής της από αυτά.

Η τελική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που αποτελεί τη συνέλιξη της ισοδύναμης κανονικής κατανομής με την ισοδύναμη διακριτή κατανομή δίνεται από τη σχέση:

$$f_x(x) = f_n(x_n) * f_D(x_D) \quad (3.7.9)$$

$$\text{Και} \quad f_x(x) = \sum_{k=1}^t \frac{g_k}{\sqrt{2\pi\sigma_n}} e^{-\frac{[x-(\mu_n+h_k)]^2}{2\sigma_n^2}} \quad (3.7.10)$$

Η συνάρτηση αυτή είναι γραμμικός συνδυασμός t κανονικών συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας, με μέση τιμή $\mu_n + h_k$, και τυπική απόκλιση σ_n η κάθε μια, που συμβάλουν ανάλογα με τον συντελεστή g_k στο άθροισμα, όπου $k = 1, 2, \dots, t$, το οποίο αποτελεί τις θέσεις των διακριτών τιμών.

Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για να αναπτυχθούν τεχνικές που επιτρέπουν την πραγματοποίηση της συνέλιξης με μεγαλύτερη ακρίβεια και λιγότερο χρόνο υπολογισμού. Η τελευταία τεχνική που εφαρμόζεται στην πιθανοτική ανάλυση ροών φορτίου βασίζεται στον ταχύ μετασχηματισμό Fourier (FFT). Με χρήση του ταχύ μετασχηματισμού Fourier γίνεται εκμεταλλεύση ορισμένων ιδιοτήτων των εκθετικών συναρτήσεων για να δοθεί μια γρήγορη και ακριβή παρουσίαση της συνάρτησης στο πεδίο της συχνότητας.

Η μιγαδική συνάρτηση $S(\omega)$ στο πεδίο της συχνότητας για μια δεδομένη συνεχή απεριοδική συνάρτηση $f(y)$ που ορίζεται στο διάστημα $T = \frac{1}{f}$ δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(y) e^{-j\omega y} dy \quad (3.7.11)$$

Και ο αντίστροφος μετασχηματισμός του είναι :

$$f(y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{j\omega y} d\omega \quad (3.7.12)$$

όπου $\omega = 2\pi f = \frac{1}{T}$

Στην περίπτωση που η συνάρτηση $f(y)$ είναι μια διακριτή ή διακριτοποιημένη με N διακριτές τιμές σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους θα ισχύει:

$$f(y) = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k \delta(y - k\Delta y) \quad (3.7.13)$$

και η εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier θα δίνει:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k \delta(y - k\Delta y) e^{-j\omega y} dy = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k e^{-j\omega \Delta y} \quad (3.7.14)$$

Η $S(\omega)$ είναι μια περιοδική συνάρτηση με περίοδο $T = \frac{2\pi}{\Delta y} = N\Delta\omega$ και η παράσταση της με N διακριτά σημεία είναι:

$$S(n\Delta\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k e^{-j\omega\Delta y} \Rightarrow S(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k W^{-nk} \quad (3.7.15)$$

όπου $W = e^{j\frac{2\pi}{N}}$ και $n=0,1,2,\dots,N-1$

Η μαθηματική συνέλιξη στο πεδίο του χρόνου, μετατρέπεται στο πεδίο της συχνότητας με απλό πολλαπλασιασμό.

$$\text{Έτσι έχουμε: } f(y) = f_1(y) * f_2(y) \Leftrightarrow S(n) = S_1(n) \cdot S_2(n) \quad (3.7.16)$$

Αφού πραγματοποιηθεί η συνέλιξη στο πεδίο της συχνότητας, ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier δίνει αντίστοιχα την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f(y)$ με N διακριτά σημεία από την σχέση (3.7.13) όπου:

$$\alpha_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S(n) W^{nk} \quad (3.7.17)$$

Ο σκοπός του ταχύ μετασχηματισμού Fourier είναι η μείωση των απαιτούμενων μιγαδικών πολλαπλασιασμών και προσθέσεων για τον υπολογισμό των πινάκων $S(n)$ και α_k από τις εξισώσεις (3.7.15) και (3.7.17). Κανονικά απαιτείται να πραγματοποιηθούν N^2 μιγαδικοί πολλαπλασιασμοί και $N(N-1)$ προσθέσεις. Λόγω της περιοδικότητας της (3.7.15) ισχύει:

$$W^{-nk} = W^{-nk \bmod N} \quad (3.7.18)$$

Αν $N=2^M$ ο αλγόριθμος του ταχέως μετασχηματισμού Fourier είναι μια διαδικασία παραγοντοποίησης του πίνακα $N \times N$ σε M πίνακες διαστάσεων $N \times N$ ο καθένας έτσι ώστε στον κάθε παραγοντοποιημένο πίνακα να ελαχιστοποιείται ο αριθμός των απαιτούμενων μιγαδικών πολλαπλασιασμών και προσθέσεων. Έτσι αποδεικνύεται ότι ο αριθμός των μιγαδικών πολλαπλασιασμών αντιστοιχεί σε $N \cdot M/2$ αντί για N^2 και NM προσθέσεις αντί για $N(N-1)$ με τον ταχύ μετασχηματισμό Fourier. Η αναλογία στον χρόνο υπολογισμού μεταξύ του συμβατικού και του ταχέως μετασχηματισμού Fourier είναι περίπου $2N/M$, αν θεωρηθεί ότι ο

απαιτούμενος χρόνος υπολογισμού είναι ανάλογος του αριθμού των πολλαπλασιασμών, όπου M είναι ο ακέραιος αριθμός συνήθως για τις απαιτήσεις της πιθανοτικής ανάλυσης ροών φορτίου.

Ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier όπως αναπτύχθηκε πιο πάνω εφαρμόζεται μόνο σε διακριτές ή διακριτοποιημένες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας. Έτσι απαιτείται η διακριτοποίηση της ισοδύναμης κανονικής κατανομής, ο υπολογισμός της οποίας γίνεται από τη σχέση (3.7.4), σύμφωνα με τους πιο κάτω κανόνες.

- Η ισοδύναμη κανονική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας αποκόπτεται σε προκαθορισμένο αριθμό τυπικών αποκλίσεων, συνήθως $\pm 3\sigma_n$ που δίνει μια ικανοποιητική απεικόνιση του 99% των πιθανών τιμών της. Ο απαιτούμενος αριθμός διακριτών τιμών για την παράστασή της καθορίζεται στη συνέχεια.
- Η τιμή της πιθανότητας α_k στη θέση $y_k = \frac{y_1 + y_2}{2}$ υπολογίζεται από τη σχέση $\alpha_k = P\{y = y_k\} = P\{y \leq y_2\} - P\{y \leq y_1\}$ έτσι ώστε να αντιστοιχεί στην επιφάνεια της κανονικής κατανομής μεταξύ των σημείων y_1 και y_2 .
- Η τιμή της πιθανότητας α_k διαιρείται με την επιφάνεια της αποκομμένης κανονικής κατανομής μεταξύ των σημείων $y_{\min} = y_n - 3\sigma_n$ και $y_{\max} = y_n + 3\sigma_n$ έτσι ώστε η αθροιστική πιθανότητα της αποκομμένης και διακριτοποιημένης ισοδύναμης κανονικής συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας να παραμένει μονάδα.
- Λόγω της συμμετρίας της κανονικής κατανομής μπορεί να θεωρηθεί για τους πιο πάνω υπολογισμούς μόνο το μισό τμήμα της.

Ο αλγόριθμος του ταχέως μετασχηματισμού Fourier στην συνέλιξη αντιμετωπίζει την διακριτοποιημένη κανονική κατανομή ως μια απλή διακριτή κατανομή με ορισμένο αριθμό διακριτών τιμών.

Σε κάθε βήμα η διαδικασία της συνέλιξης πραγματοποιείται διαδοχικά με δύο μόνο συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας. Αν σε κάποιο βήμα της διαδικασίας η $f_{ij} = f_i(\alpha_i y_i) * f_j(\alpha_j y_j)$ αντιπροσωπεύει την συνέλιξη των συναρτήσεων f_i και f_j οι οποίοι ορίζονται στα διαστήματα T_i και T_j αντίστοιχα, τότε θα ορίζεται στο διάστημα:

$$T_{ij} = |\alpha_i|T_i + |\alpha_j|T_j = [z_{\min}, z_{\max}] \quad (3.7.19)$$

όπου

$$z_{\min} = \begin{array}{ll} a_i y_{i(\min)} + a_j y_{j(\min)} & a_i > 0, a_j > 0 \\ a_i y_{i(\min)} + a_j y_{j(\max)} & a_i > 0, a_j < 0 \\ a_i y_{i(\max)} + a_j y_{j(\min)} & a_i < 0, a_j > 0 \\ a_i y_{i(\max)} + a_j y_{j(\max)} & a_i < 0, a_j < 0 \end{array}$$

Και

$$z_{\max} = \begin{array}{ll} a_i y_{i(\max)} + a_j y_{j(\max)} & a_i > 0, a_j > 0 \\ a_i y_{i(\max)} + a_j y_{j(\min)} & a_i > 0, a_j < 0 \\ a_i y_{i(\min)} + a_j y_{j(\max)} & a_i < 0, a_j > 0 \\ a_i y_{i(\min)} + a_j y_{j(\min)} & a_i < 0, a_j < 0 \end{array}$$

Οφείλει να παρασταθεί με $N=2^M$ διακριτά σημεία το τελικό διάστημα T που αντιστοιχεί στην τελική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Τότε ο αριθμός N_{ij} των διακριτών σημείων που απαιτούνται για την παράσταση του διαστήματος T_{ij} της συνέλιξης σε κάποιο βήμα θα δίνεται από τις σχέσεις που ακολουθούν:

$$N'_{ij} = \left(2^M \cdot \frac{T_{ij}}{T}\right) + 1 \quad (3.7.20)$$

$$M'_{ij} = \log_2 N'_{ij} \quad (3.7.21)$$

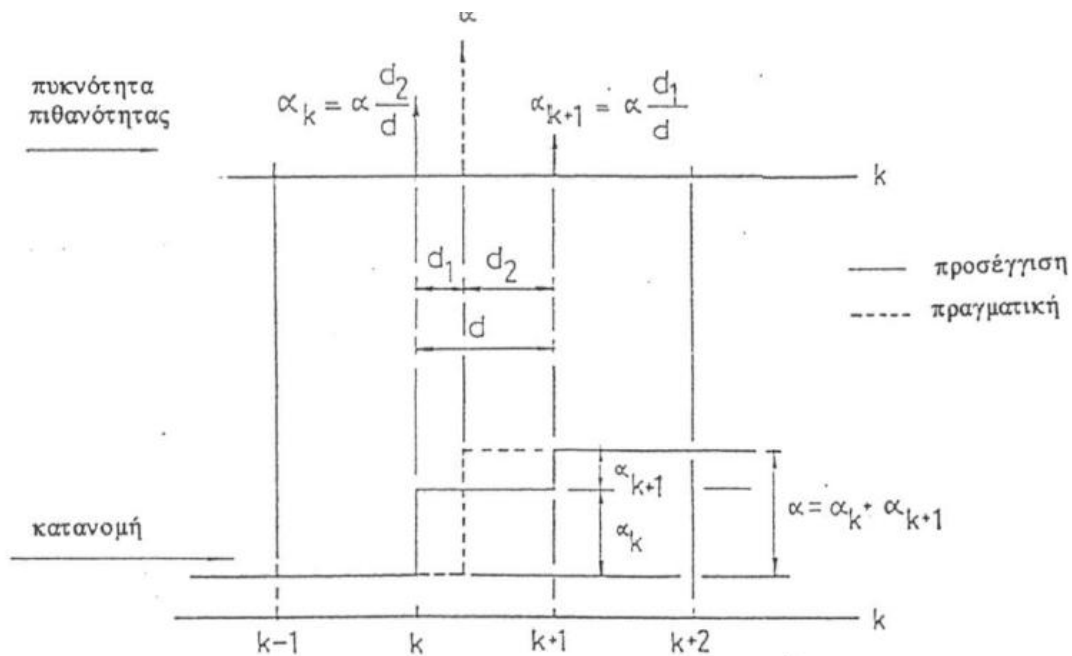
$$M_{ij} = \text{INTEGER}(M'_{ij}) + 1 \quad (3.7.22)$$

$$N_{ij} = 2^{M_{ij}} \quad (3.7.23)$$

Στη σχέση (3.7.20) για να μην υπάρχει πιθανότητα να χαθεί μέρος της τελευταίας διακριτής τιμής που διαμοιράζεται στα ακραία σημεία του διαστήματος T_{ij} θεωρείται ένα επιπλέον σημείο.

Το διάστημα T_{ij} χωρίζεται σε $N_{ij} - 1$ διαστήματα. Αν κατά τη διάρκεια της συνέλιξης προκύψει μια διακριτή τιμή στο διάστημα $(k, k+1)$ με πιθανότητα a ,

τότε διαμοιράζεται η τιμή αυτή μεταξύ των δύο ακραίων σημείων k και $k+1$ αντιστρόφως ανάλογα της απόστασης της από αυτά, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 Διαμοιρασμός μιας διακριτής τιμής

Η συνέλιξη των συναρτήσεων μαθηματικά μπορεί να γίνει με οποιαδήποτε σειρά. Από τις σχέσεις (3.7.20) έως (3.7.23) φαίνεται ότι ανάλογα με τις περιόδους T_i και T_j αυξάνεται ο αριθμός των απαιτούμενων διακριτών σημείων για την παράσταση μιας συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας και η αποδοτικότητα του αλγορίθμου του ταχέως μετασχηματισμού Fourier αυξάνεται όσο ο αριθμός των σημείων είναι μικρότερος. Έτσι είναι πιο αποδοτικό να συνελίσσονται διαδοχικά οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας ανάλογα με το εύρος της περιόδου τους, ξεκινώντας από εκείνες με το μικρότερο εύρος και συνεπώς και τον μικρότερο αριθμό διακριτών σημείων.

3.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] Θ. Καρακατσάνης, "Συμβολή της πιθανοτικής ροής φορτίου στον έλεγχο λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας", Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 1995, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, ΕΜΠ, σελ. 17-29, 137-142, 257-260
- [3.2] Ε. Α. Βορεάδη, "Πιθανοτική προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2009, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, ΕΜΠ, σελ. 33-37
- [3.3] Peiyuan Chen, Birgitte Bak-Jensen, Z. Chen, "Probabilistic load flow: A review", IEEEExplore Digital Library, p. 2
- [3.4] W. G. Cochran, "Sampling techniques", 2nd edition, New York: Wiley 1977
- [3.5] O. Krause, J. Schwippe, C. Rehtanz, "Probabilistic load flow for uncertainty based grid operation", IEEEExplore Digital Library, p. 6-7
- [3.6] Rifki Terzioglu, T. Fedai Cavus, "Probabilistic analysis of load flows in DC power systems", AKADEMIK PLATFORM, p. 2

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

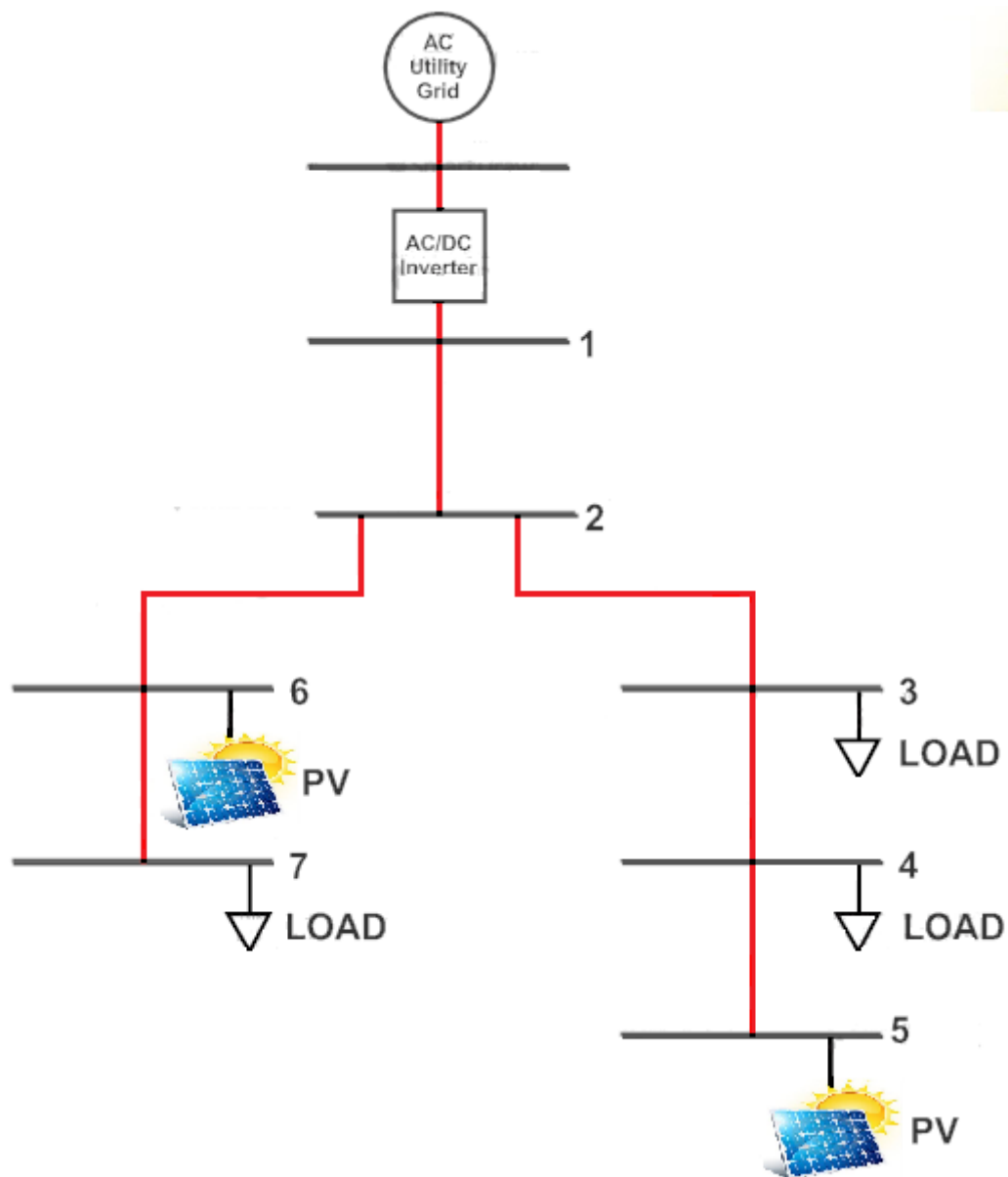
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αναπτυχθεί, τα τελευταία 70 χρόνια, με τρόπο ώστε οι μεγάλες γεννήτριες να τροφοδοτούν ηλεκτρική ενέργεια μέσω του δικτύου μεταφοράς τα φορτία. Σε αυτή τη διαδικασία υπάρχει ένας αριθμός από στάδια μετατροπής της τάσης με αποτέλεσμα την επικράτηση των AC δικτύων. Πολλές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κυρίως τα φωτοβολταϊκά (PV), παράγουν συνεχή τάση στην έξοδό τους. Η συνήθης πρακτική είναι η αντιστροφή της τάσης εξόδου από DC σε AC και η μετέπειτα σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, πολλά φορτία, όπως για παράδειγμα λαμπτήρες LED, ηλεκτρικά οχήματα κ.α., καταναλώνουν DC ρεύμα. Επιπλέον, οικιακές συσκευές, όπως η τηλεόραση, ηλεκτρικοί βραστήρες, οι υπολογιστές κ.α. μπορούν επίσης να λειτουργήσουν με τροφοδοσία DC. Ως εκ τούτου, αν η φωτοβολταϊκή παραγωγή συνδεθεί άμεσα με τα φορτία, ένας αριθμός σταδίων μετατροπής της τάσης θα μπορούσε να αποφευχθεί αυξάνοντας έτσι τη συνολική ενεργειακή απόδοση.

Με όλα τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζονται με τη χρήση DC συστημάτων, το ενδιαφέρον για τα δίκτυα LVDC συνεχώς αυξάνεται. Με την ανάπτυξη όλο και περισσότερων DC δικτύων, εργαλεία για την εκτέλεση της ροής φορτίου, ανάλυσης σφαλμάτων κτλ. απαιτούνται. Η ανάλυση της ροής φορτίου είναι ένα ουσιαστικό μέρος της μελέτης των συστημάτων ηλεκτρικής

ενέργειας. Οι μέθοδοι Newton-Raphson (NR) και Gauss-Seidel (GS) έχουν ήδη εφαρμοστεί σε DC δίκτυα.

4.2 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΩΝ 7 ΖΥΓΩΝ



Σχήμα 4.1 Το δίκτυο των 7 ζυγών

4.2.1 Σενάριο της ντετερμινιστικής ροής φορτίου στο δίκτυο των 7 ζυγών

Υπάρχουν καθιερωμένοι αλγόριθμοι και προγράμματα για μελέτη της ροής φορτίου σε AC δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά τα προγράμματα μπορούν να εφαρμοστούν για την επίλυση της ροής φορτίου σε DC δίκτυα, αλλά υπάρχουν σημαντικές διαφορές [4.5].

Παρακάτω χρησιμοποιείται προς διερεύνηση το δίκτυο των 7 ζυγών. Τα δεδομένα του εν λόγω δικτύου, οι τιμές των καταναλώσεων-παραγωγών των ζυγών και των αντιστάσεων των κλάδων του δικτύου, δίνονται στους πίνακες 4.1 και 4.2. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το πρόγραμμα υλοποιήθηκε στην γλώσσα προγραμματισμού Matlab. Ας υποθέσουμε το δίκτυο του σχήματος 4.1. Στο δίκτυο αυτό έχει εγκατασταθεί και φωτοβολταϊκή παραγωγή.

Ζυγός	Κατανάλωση – Παραγωγή (MW)
1	-
2	-
3	21,70
4	47,80
5	-14,90
6	-11,20
7	3,50

Πίνακας 4.1: Τιμές των καταναλώσεων-παραγωγών των ζυγών του δικτύου των 7 ζυγών

Κλάδος	Αντίσταση (α.μ)
1 - 2	0,04699
2 - 3	0,05811
3 - 4	0,03181
4 - 5	0,01938
2 - 6	0,04699
6 - 7	0,01938

Πίνακας 4.2: Αντιστάσεις των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών

Για τον υπολογισμό της ροής φορτίου χρησιμοποιείται η μέθοδος Newton-Raphson με την βοήθεια της παραλλαγής της συνάρτησης $dcnetworkpf$ του MATACDC. Για τον υπολογισμό αυτό χρειαζόμαστε και τα ακόλουθα δεδομένα, τα οποία δίνονται στους παρακάτω πίνακες.

$$Y_{busdc} = \begin{bmatrix} 21,28112 & -21,2811 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -21,2811 & 59,77099 & -17,2087 & 0 & 0 & -21,2811 & 0 \\ 0 & -17,2087 & 48,6454 & -31,4367 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -31,4367 & 83,03624 & -51,59959 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -51,5996 & 51,59959 & 0 & 0 \\ 0 & -21,2811 & 0 & 0 & 0 & 72,88071 & -51,5996 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -51,5996 & 51,59959 \end{bmatrix}$$

Πίνακας 4.3: Μήτρα αγωγιμοτήτων του δικτύου των 7 ζυγών

V_{dc} (α.μ)	P_{dc} (α.μ)
1	0
1	0
1	0,2170
1	0,4780
1	-0,1490
1	-0,1120
1	0,0350

Πίνακας 4.4: DC τάσεις και DC εγχύσεις ισχύος εισόδου σε κάθε ζυγό του δικτύου των 7 ζυγών

όπου V_{dc} (α.μ): DC τάση σε κάθε ζυγό σε α.μ τιμές

P_{dc} (α.μ): DC εγχύση ισχύος σε κάθε ζυγό σε α.μ τιμές

slack	1
noslack	2, 3, 4, 5, 6, 7
pol	1
tol	1,0000e-04
itmax	100

Πίνακας 4.5: Τιμές των παραμέτρων slack, noslack, pol, tol, itmax του δικτύου των 7 ζυγών

όπου slack: Αριθμός του DC ζυγού αναφοράς
 noslack: Αριθμοί των ζυγών εκτός του DC ζυγού αναφοράς
 pol: Τοπολογία του DC δικτύου
 tol: Ανοχή της μεθόδου του Νεύτωνα
 itmax: Μεγίστη επανάληψη της μεθόδου του Νεύτωνα

Τα αποτελέσματα που παίρνουμε μετά την χρήση της μεθόδου είναι τα ακόλουθα που φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

$V_{dc}(\alpha. \mu)$	$P_{dc}(\alpha. \mu)$
1	-0,5056
0,9762	0
0,9423	0,2170
0,9310	0,4780
0,9341	-0,1490
0,9799	-0,1120
0,9792	0,0350

Πίνακας 4.6: DC τάσεις και DC εγχύσεις ισχύος εξόδου σε κάθε ζυγό του δικτύου των 7 ζυγών

όπου $V_{dc}(\alpha. \mu)$: DC τάση σε κάθε ζυγό σε α.μ τιμές

$P_{dc}(\alpha. \mu)$: DC εγχύση ισχύος σε κάθε ζυγό σε α.μ τιμές

Οι τιμές για τις απώλειες των ισχύων στις γραμμές υπολογίζονται με βάση την σχέση $P_k = \Delta V_k I_k$, όπου k είναι ο κλάδος, τα αποτελέσματα των οποίων δίνονται στον πίνακα 4.7.

Κλάδος	Απώλεια ισχύος στον κλάδο (α.μ)
1 - 2	0,01210
2 - 3	0,01980
3 - 4	0,00400
4 - 5	0,00050
2 - 6	0,00030
6 - 7	0,00003

Πίνακας 4.7: Απώλειες ισχύος των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών

Οι ροές ισχύος υπολογίζονται από τη σχέση $P_{ij} = \sum_{z \in a(j)} P_z$, όπου P_z η ενεργός συνιστώσα του φορτίου στον κόμβο z και $a(j)$ το σύνολο των κόμβων που τροφοδοτούνται από τον κόμβο j . Τα αποτελέσματα των οποίων απεικονίζονται στον πίνακα 4.8.

Κλάδος	Ροή ισχύος στον κλάδο (α.μ)
1 - 2	0,4690
2 - 3	0,5460
3 - 4	0,3290
4 - 5	-0,1490
2 - 6	-0,0770
6 - 7	0,0350

Πίνακας 4.8: Ροές ισχύος των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών

4.2.2 Σενάριο της πιθανοτικής ροής φορτίου στο δίκτυο των 7 ζυγών

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.

Παρακάτω χρησιμοποιείται προς διερεύνηση το δίκτυο των 7 ζυγών. Τα δεδομένα του εν λόγω δικτύου, οι τιμές των καταναλώσεων-παραγωγών των ζυγών και των αντιστάσεων των κλάδων του δικτύου, δίνονται στους πίνακες 4.9 και 4.10. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το πρόγραμμα υλοποιήθηκε στην γλώσσα προγραμματισμού Matlab. Ας υποθέσουμε το δίκτυο του σχήματος 4.1.

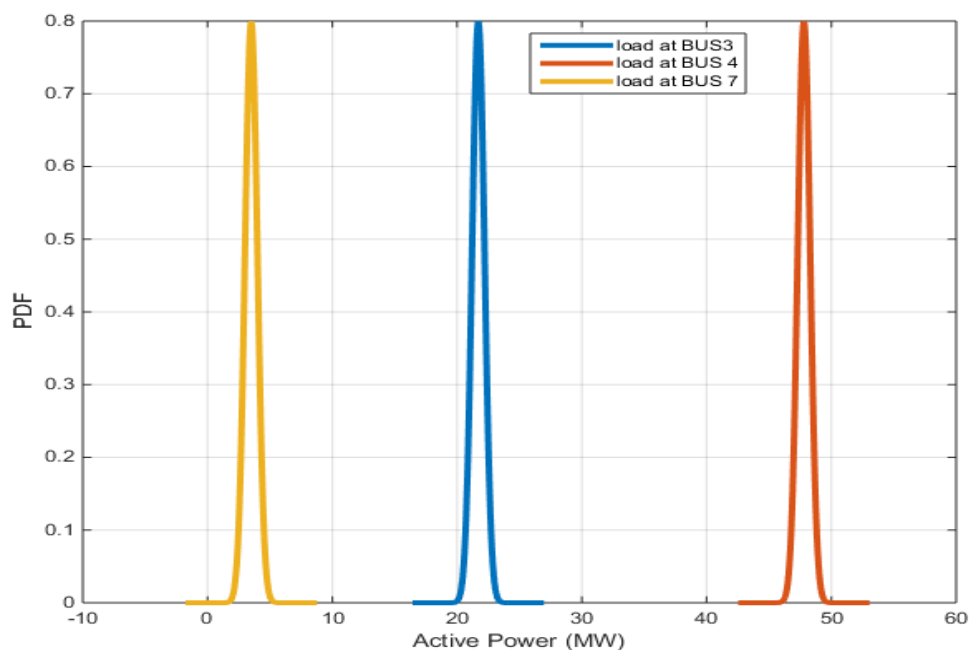
Ζυγός	Κατανάλωση – Παραγωγή (MW)
1	-
2	-
3	21,70
4	47,80
5	-14,90
6	-11,20
7	3,50

Πίνακας 4.9: Τιμές των καταναλώσεων-παραγωγών των ζυγών του δικτύου των 7 ζυγών

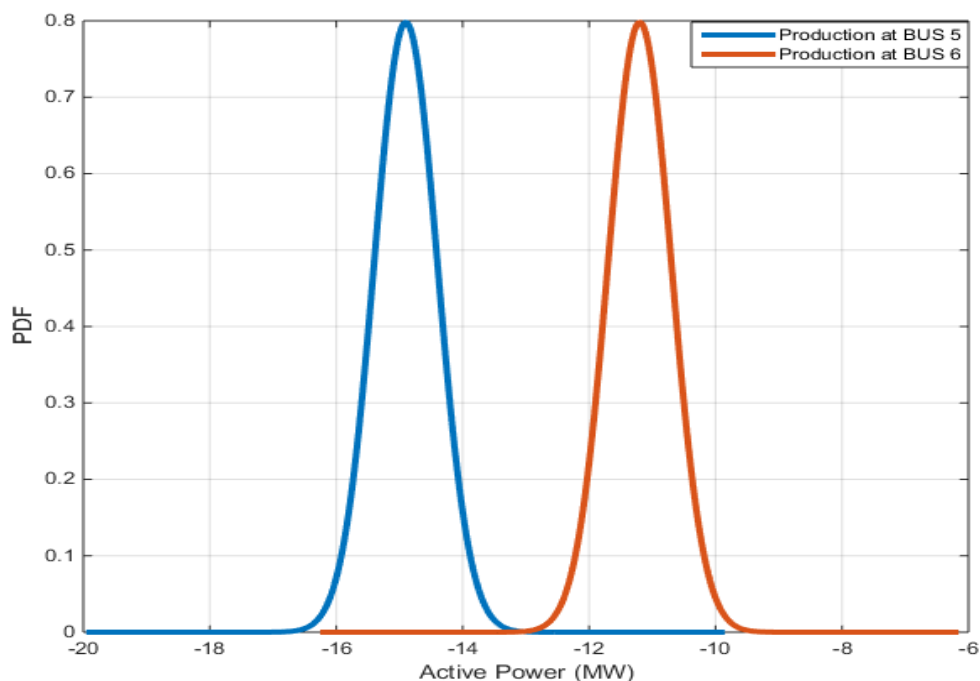
Κλάδος	Αντίσταση (α.μ)
1 - 2	0,04699
2 - 3	0,05811
3 - 4	0,03181
4 - 5	0,01938
2 - 6	0,04699
6 - 7	0,01938

Πίνακας 4.10: Αντιστάσεις των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών

Οι κατανομές των φορτίων και των Φ/Β παραγωγών θεωρούμε πως ακολουθούν την κανονική κατανομή χωρίς αυτό να επηρεάζει τη μεθοδολογία για την επίλυση του προβλήματος. Τα οποία γραφικά φαίνονται στα σχήματα 4.2 και 4.3.



Σχήμα 4.2: Καταναλώσεις των ζυγών 3, 4 και 7 του δικτύου των 7 ζυγών



Σχήμα 4.3: Παραγωγές των ζυγών 5 και 7 του δικτύου των 7 ζυγών

Το πρώτο βήμα είναι η εκτέλεση της ροής φορτίου για τις πιο πιθανές τιμές έτσι ώστε να γίνει η γραμμικοποίηση, ως πιο πιθανή τιμή έχει θεωρηθεί η μέση τιμή των φορτίων και των παραγώγων. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ντετερμινιστικής ροής φορτίου για το δίκτυο του σχήματος 4.1 στους παρακάτω πίνακες.

Ζυγός	V_0 (α.μ)
1	1,000
2	0,976
3	0,942
4	0,931
5	0,934
6	0,980
7	0,979

Πίνακας 4.11: Τάσεις των ζυγών από την ντετερμινιστική ροή φορτίου του δικτύου των 7 ζυγών

Παραγωγή ισχύος στον ζυγό αναφοράς είναι: $P=50,56\text{MW}$

Ζυγός	Κατανάλωση - Παραγωγή (MW)
1	-
2	-
3	21,70
4	47,80
5	-14,90
6	-11,20
7	3,50

Πίνακας 4.12: Ισχύς των ζυγών από την ντετερμινιστική ροή φορτίου του δικτύου των 7 ζυγών

Κλάδος	Ροή ισχύος από τον αρχικό ζυγό (MW)
1 - 2	50,51
2 - 3	57,00
3 - 4	33,33
4 - 5	-14,86
2 - 6	-7,69
6 - 7	3,49

Πίνακας 4.13: Ροές ισχύος από τους αρχικούς ζυγούς των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών

Κλάδος	Ροή ισχύος στον καταλυτικό ζυγό (MW)
1 - 2	-49,31
2 - 3	-55,02
3 - 4	-32,93
4 - 5	14,91
2 - 6	7,72
6 - 7	-3,49

Πίνακας 4.14: Ροές ισχύος στους καταλυτικούς ζυγούς των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών

Κλάδος	Απώλεια ισχύος στον κλάδο (MW)
1 - 2	1,199
2 - 3	1,981
3 - 4	0,398
4 - 5	0,049
2 - 6	0,029
6 - 7	0,002

Πίνακας 4.15: Απώλειες ισχύος των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών

Στη συνέχεια υπολογίζουμε έναν διαγώνιο πίνακα που έχει ως στοιχεία τις αντιστάσεις των κλάδων με την σειρά που είναι αριθμημένη οι ζυγοί στο δίκτυο και ο πίνακας είναι:

$$Z_b = \begin{bmatrix} 0,0470 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0581 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0318 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,0194 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0470 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0194 \end{bmatrix}$$

Πίνακας 4.16: Αντιστάσεις των κλάδων του δικτύου των 7 ζυγών

Μετά υπολογίζουμε τον πίνακα A ο οποίος είναι τετραγωνικός πίνακας διαστάσεων 6x6, στον οποίο οι γραμμές αντιστοιχούν στους 6 κλάδους και οι στήλες στους κόμβους του δικτύου και στον πίνακα 4.17 έχουμε τα αποτελέσματα αυτού του πίνακα.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Πίνακας 4.17: Διασυνδέσεις του κάθε κλάδου με τους κόμβους του δικτύου των 7 ζυγών

Βασιζόμενοι στην παρακάτω σχέση κατασκευάζουμε τον πίνακα των συνθέτων αντιστάσεων του δικτύου. Και τα αποτελέσματα για τον πίνακα Z φαίνονται στον πίνακα 4.18.

$$Z = A^T \times Z_b \times A$$

$$Z = \begin{bmatrix} 0,04700 & 0,04700 & 0,04700 & 0,04700 & 0,04700 & 0,04700 \\ 0,04700 & 0,10510 & 0,10510 & 0,10510 & 0,04700 & 0,04700 \\ 0,04700 & 0,10510 & 0,13690 & 0,13690 & 0,04700 & 0,04700 \\ 0,04700 & 0,10510 & 0,13691 & 0,15630 & 0,04700 & 0,04700 \\ 0,04700 & 0,04700 & 0,04700 & 0,04700 & 0,09400 & 0,09400 \\ 0,04700 & 0,04700 & 0,04700 & 0,04700 & 0,09400 & 0,11340 \end{bmatrix}$$

Πίνακας 4.18: Συνθέτες αντιστάσεις του δικτύου των 7 ζυγών

Μετά από υπολογισμούς και απλοποίησης που προέρχονται από το DC δίκτυο ο τύπος για τον συντελεστή βαρύτητας των ενεργών εγχύσεων των ζυγών δίνεται από τον τύπο: $\gamma(k,i) = -\text{Real}\{Z(i,k)\}$, τα αποτελέσματα του οποίου φαίνονται στον πίνακα 4.19.

$$Y = \begin{bmatrix} -0,04700 & -0,04700 & -0,04700 & -0,04700 & -0,04700 & -0,04700 \\ -0,04700 & -0,10510 & -0,10510 & -0,10510 & -0,04700 & -0,04700 \\ -0,04700 & -0,10510 & -0,13690 & -0,13690 & -0,04700 & -0,04700 \\ -0,04700 & -0,10510 & -0,13691 & -0,15630 & -0,04700 & -0,04700 \\ -0,04700 & -0,04700 & -0,04700 & -0,04700 & -0,09400 & -0,09400 \\ -0,04700 & -0,04700 & -0,04700 & -0,04700 & -0,09400 & -0,11340 \end{bmatrix}$$

Πίνακας 4.19: Συντελεστής βαρύτητας των ενεργών εγχύσεων των ζυγών του δικτύου των 7 ζυγών

Τέλος, οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για τα μεγέθη των τάσεων και των ροών ισχύος στο δίκτυο μπορούν να υπολογιστούν από τη μαθηματική συνέλιξη των δεδομένων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας των φορτίων και των παραγωγών.

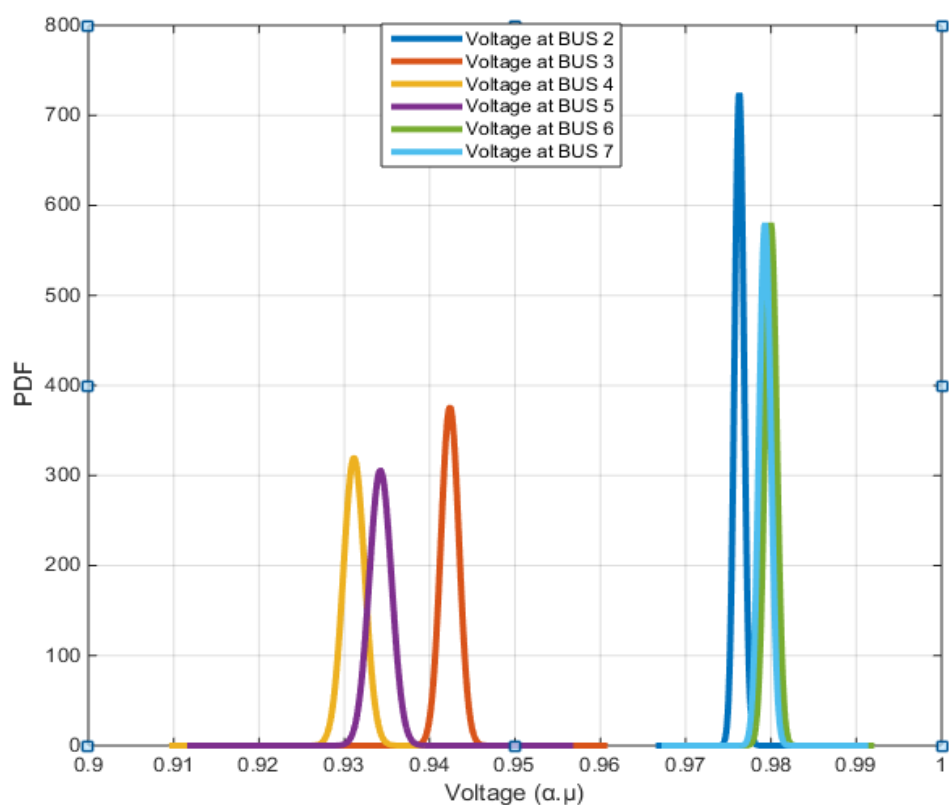
Η τάση υπολογίζεται με την βοήθεια της σχέσης $V_k = \sum_{i=1}^n Y_{ki} P_i + V_0$ και η ροή ισχύος από τη σχέση $P_{ij} = \sum_{z \in a(j)} P_z$. Τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στους πίνακες 4.20 και 4.21. Και γραφικά από τα σχήματα 4.4 και 4.5.

Ζυγός	\bar{V} (α.μ)
2	0,9763
3	0,9423
4	0,9311
5	0,9342
6	0,9800
7	0,9793

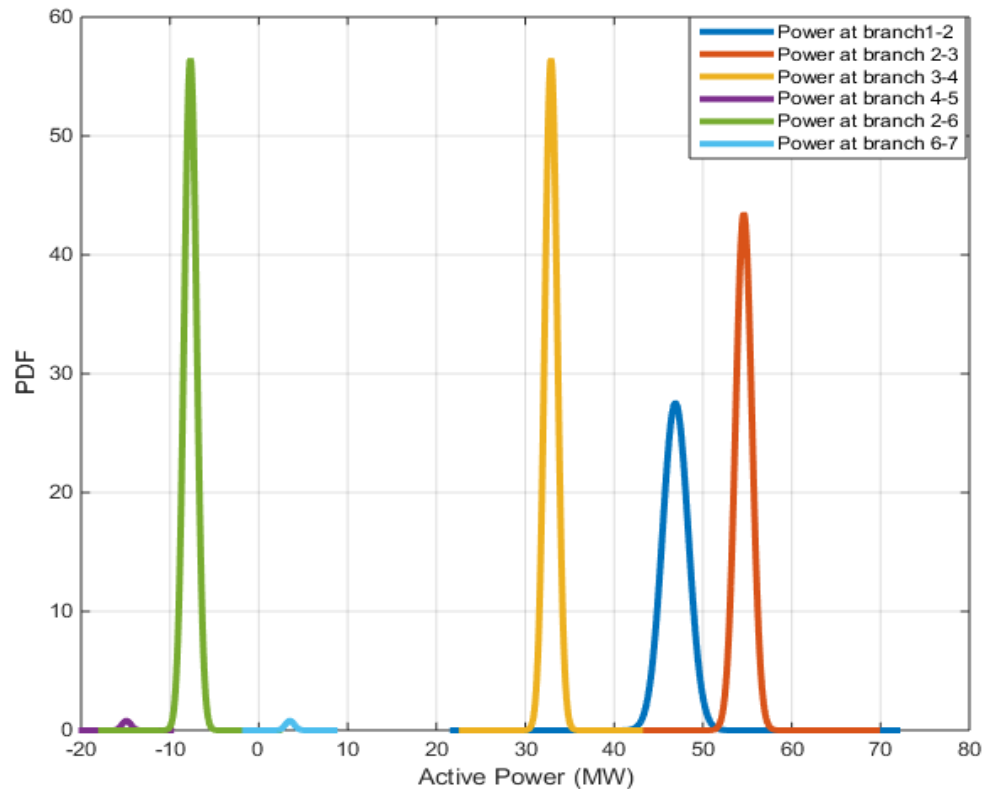
Πίνακας 4.20: Μέσες τιμές των τάσεων των ζυγών από την πιθανοτική ροή φορτίου του δικτύου των 7 ζυγών

Κλάδος	Ροή ισχύος (MW)
1 - 2	46,80
2 - 3	54,57
3 - 4	32,88
4 - 5	-14,91
2 - 6	-7,72
6 - 7	3,49

Πίνακας 4.21: Ροές ισχύος των κλάδων από την πιθανοτική ροή φορτίου του δικτύου των 7 ζυγών



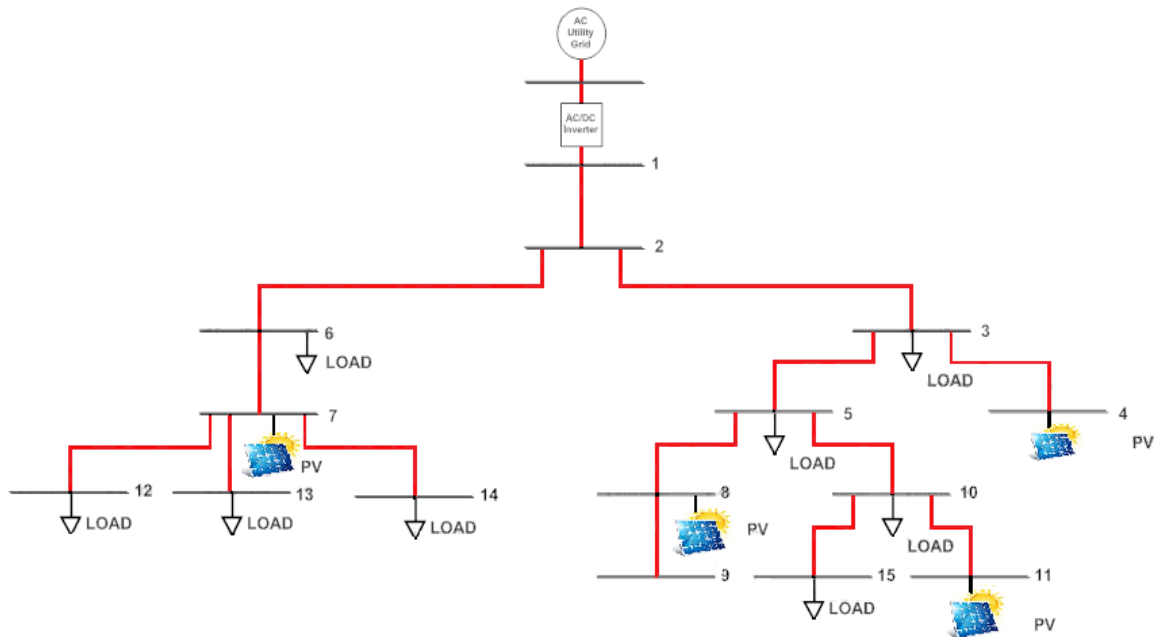
Σχήμα 4.4: Τάσεις των ζυγών 2, 3, 4, 5, 6 και 7 από την πιθανοτική ροή φορτίου του δικτύου των 7 ζυγών



Σχήμα 4.5: Ροές ισχύος των κλάδων από την πιθανοτική ροή φορτίου του δικτύου των 7 ζυγών

Από τα σχήματα 4.4 και 4.5 παρατηρούμε τις γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων των τάσεων και των ροών ισχύος, τα οποία φαίνεται ότι ακολουθούν κανονικές κατανομές. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 4.4 παρουσιάζονται οι κατανομές των τάσεων των ζυγών και στο σχήμα 4.5 οι κατανομές των ροών ισχύος των κλάδων του δικτύου.

4.3 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΩΝ 15 ΖΥΓΩΝ



Σχήμα 4.6: Το δίκτυο των 15 ζυγών

4.3.1 Σενάριο της ντετερμινιστικής ροής φορτίου στο δίκτυο των 15 ζυγών

Παρακάτω χρησιμοποιείται προς διερεύνηση το δίκτυο των 15 ζυγών είναι μια παραλλαγή του δικτύου των 14 ζυγών του IEEE. Τα δεδομένα του εν λόγω δικτύου, οι τιμές των καταναλώσεων-παραγωγών των ζυγών και των αντιστάσεων των κλάδων του δικτύου, δίνονται στους πίνακες 4.22 και 4.23. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το πρόγραμμα υλοποιήθηκε στην γλώσσα προγραμματισμού Matlab. Ας υποθέσουμε το δίκτυο του σχήματος 4.6. Στο δίκτυο αυτό έχει εγκατασταθεί και φωτοβολταϊκή παραγωγή.

Ζυγός	Κατανάλωση – Παραγωγή (MW)
1	-
2	-
3	21,70
4	-94,20
5	47,80
6	7,60
7	-11,20
8	-15,00
9	-
10	29,50
11	-9,00
12	3,50
13	6,10
14	13,50
15	14,90

Πίνακας 4.22: Τιμές των καταναλώσεων-παραγωγών των ζυγών του δικτύου των 15 ζυγών

Κλάδος	Αντίσταση (α.μ)
1 – 2	0,01938
2 – 3	0,01938
3 – 4	0,04699
3 - 5	0,05811
5 – 8	0,05811
5 - 10	0,01938
8 – 9	0,03181
10 – 11	0,03181
10 – 15	0,12711
2 – 6	0,05403
6 – 7	0,05403

7 - 12	0,09498
7 - 13	0,12291
7 - 14	0,06615

Πίνακας 4.23: Αντιστάσεις των κλάδων του δικτύου του δικτύου των 15 ζυγών

Για τον υπολογισμό της ροής φορτίου χρησιμοποιείται η μέθοδος Newton-Raphson με την βοήθεια της παραλλαγής της συνάρτησης $dcnetworkpf$ του MATACDC. Για τον υπολογισμό αυτό χρειαζόμαστε και τα ακόλουθα δεδομένα, τα οποία δίνονται στους παρακάτω πίνακες.

$$Y_{busdc} = \begin{bmatrix} 51,59959 & -51,5996 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -51,5996 & 121,7074 & -51,5996 & 0 & 0 & -18,5082 \\ 0 & -51,5996 & 90,08945 & -21,2811 & -17,2087 & 0 \\ 0 & 0 & -21,2811 & 21,28112 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -17,2087 & 0 & 86,01707 & 0 \\ 0 & -18,5082 & 0 & 0 & 0 & 37,01647 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -18,5082 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -17,2087 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -51,5996 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -17,2087 & 0 & -51,5996 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -18,5082 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 52,28996 & 0 & 0 & 0 & 0 & -10,5285 & -8,1360 & -15,1172 & 0 \\ \dots & 0 & 48,6454 & -31,4367 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -31,4367 & 31,4366 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 90,90344 & -31,4367 & 0 & 0 & 0 & -7,8672 \\ 0 & 0 & 0 & -31,4367 & 31,43666 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -10,5285 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10,5285 & 0 & 0 & 0 \\ -8,13603 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8,1360 & 0 & 0 \\ -15,1172 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15,1172 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -7,8672 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7,8672 \end{bmatrix}$$

Πίνακας 4.24: Μήτρα αγωγιμοτήτων του δικτύου των 15 ζυγών

$V_{dc}(\alpha. \mu)$	$P_{dc}(\alpha. \mu)$
1	0
1	0
1	0,2170
1	-0,9420
1	0,4780
1	0,0760
1	-0,1120
1	-0,1500
1	0
1	0,2950
1	-0,0900
1	0,0350
1	0,0610
1	0,1350
1	0,1490

Πίνακας 4.25: DC τάσεις και DC εγχύσεις ισχύος εισόδου σε κάθε ζυγό του δικτύου των 15 ζυγών

όπου $V_{dc}(\alpha. \mu)$: DC τάση σε κάθε ζυγό σε α.μ τιμές

$P_{dc}(\alpha. \mu)$: DC εγχύση ισχύος σε κάθε ζυγό σε α.μ τιμές

slack	1
noslack	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15
pol	1
tol	1,0000e-04
itmax	100

Πίνακας 4.26: Τιμές των παραμέτρων slack, noslack, pol, tol, itmax του δικτύου των 15 ζυγών

όπου slack: Αριθμός του DC ζυγού αναφοράς

noslack: Αριθμοί των ζυγών εκτός του DC ζυγού αναφοράς

rol: Τοπολογία του DC δικτύου

tol: Ανοχή της μεθόδου του Νεύτωνα

itmax: Μεγίστη επανάληψη της μεθόδου του Νεύτωνα

Τα αποτελέσματα που παίρνουμε μετά την χρήση της μεθόδου είναι τα ακόλουθα που φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

$V_{dc}(\alpha. \mu)$	$P_{dc}(\alpha. \mu)$
1	-0,2350
0,9954	0
0,9948	0,2170
1,0375	-0,9420
0,9527	0,4780
0,9846	0,0760
0,9779	-0,1120
0,9618	-0,1500
0,9618	0
0,9454	0,2950
0,9484	-0,0900
0,9745	0,0350
0,9702	0,0610
0,9687	0,1350
0,9249	0,1490

Πίνακας 4.27: DC τάσεις και DC εγχύσεις ισχύος εξόδου σε κάθε ζυγό του δικτύου των 15 ζυγών

όπου $V_{dc}(\alpha. \mu)$: DC τάση σε κάθε ζυγό σε α.μ τιμές

$P_{dc}(\alpha. \mu)$: DC εγχύσεις ισχύος σε κάθε ζυγό σε α.μ τιμές

Οι τιμές για τις απώλειες των ισχύων στις γραμμές υπολογίζονται με βάση την σχέση $P_k = \Delta V_k I_k$, όπου k είναι ο κλάδος, τα αποτελέσματα των οποίων δίνονται στον πίνακα 4.28.

Κλάδος	Απώλεια ισχύος στον κλάδο (α.μ)
1 - 2	0,00110
2 - 3	0,00002
3 - 4	0,03880
3 - 5	0,03050
5 - 8	0,00140
5 - 10	0,00270
8 - 9	0
10 - 11	0,00030
10 - 15	0,00330
2 - 6	0,00220
6 - 7	0,00080
7 - 12	0,00010
7 - 13	0,00050
7 - 14	0,00130

Πίνακας 4.28: Απώλειες ισχύος των κλάδων του δικτύου των 15 ζυγών

Οι ροές ισχύος υπολογίζονται από τη σχέση $P_{ij} = \sum_{z \in a(j)} P_z$, όπου P_z η ενεργός συνιστώσα του φορτίου στον κόμβο z και $a(j)$ το σύνολο των κόμβων που τροφοδοτούνται από τον κόμβο j . Τα αποτελέσματα των οποίων απεικονίζονται στον πίνακα 4.29.

Κλάδος	Ροή ισχύος στον κλάδο (α.μ)
1 - 2	0,1520
2 - 3	-0,0430
3 - 4	-0,9420
3 - 5	0,6820
5 - 8	-0,1500

5 – 10	0,3540
8 – 9	0
10 – 11	-0,0900
10 – 15	0,1490
2 – 6	0,1950
6 – 7	0,1190
7 – 12	0,0350
7 – 13	0,0610
7 – 14	0,1350

Πίνακας 4.29: Ροές ισχύος των κλάδων του δικτύου των 15 ζυγών

4.3.2 Σενάριο της πιθανοτικής ροής φορτίου στο δίκτυο των 15 ζυγών

Παρακάτω χρησιμοποιείται προς διερεύνηση το δίκτυο των 15 ζυγών είναι μια παραλλαγή του δικτύου 14 ζυγών του IEEE. Τα δεδομένα του εν λόγω δικτύου, οι τιμές των καταναλώσεων-παραγωγών των ζυγών και των αντιστάσεων των κλάδων του δικτύου, δίνονται στους πίνακες 4.30 και 4.31. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το πρόγραμμα υλοποιήθηκε στην γλώσσα προγραμματισμού Matlab. Ας υποθέσουμε το δίκτυο του σχήματος 4.6.

Ζυγός	Κατανάλωση – Παραγωγή (MW)
1	-
2	-
3	21,70
4	-94,20
5	47,80
6	7,60
7	-11,20
8	-15,00
9	-
10	29,50

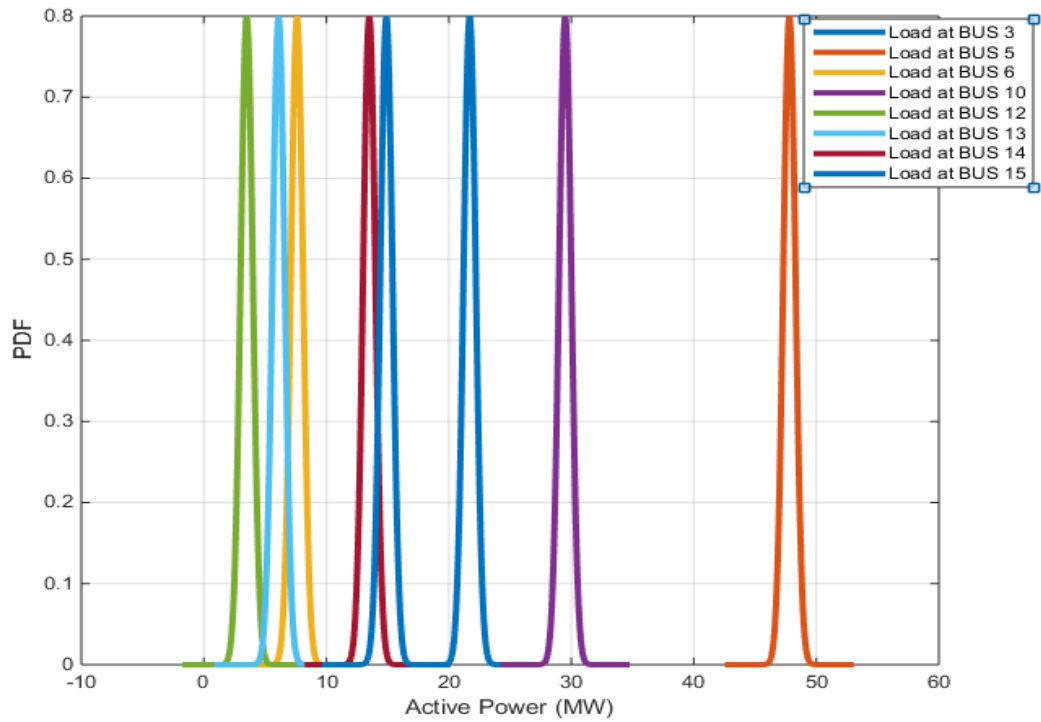
11	-9,00
12	3,50
13	6,10
14	13,50
15	14,90

Πίνακας 4.30: Τιμές των καταναλώσεων-παραγωγών των ζυγών του δικτύου των 15 ζυγών

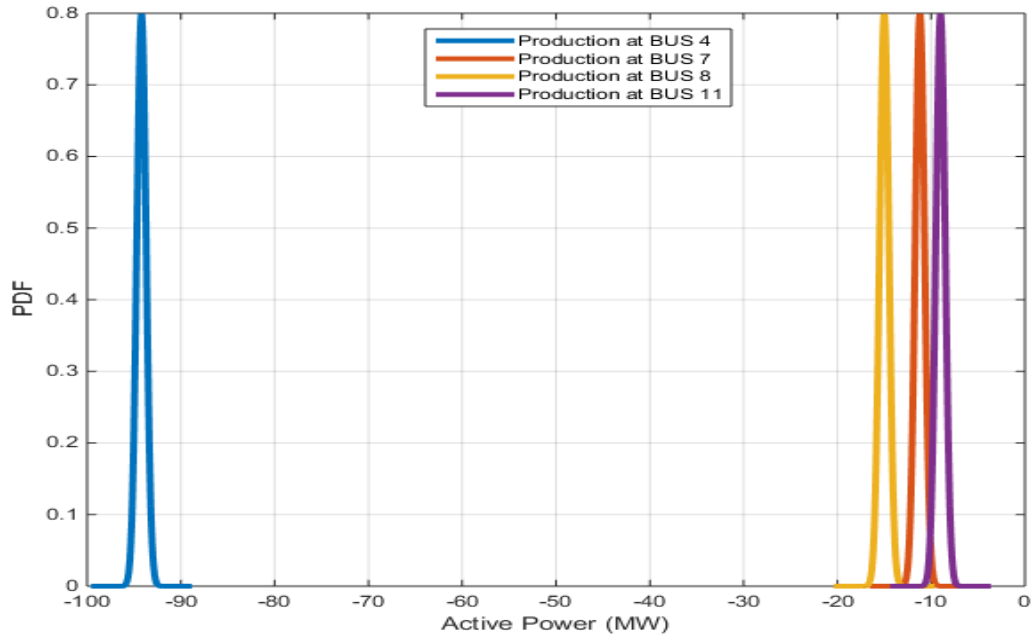
Κλάδος	Αντίσταση (α.μ)
1 - 2	0,01938
2 - 3	0,01938
3 - 4	0,04699
3 - 5	0,05811
5 - 8	0,05811
5 - 10	0,01938
8 - 9	0,03181
10 - 11	0,03181
10 - 15	0,12711
2 - 6	0,05403
6 - 7	0,05403
7 - 12	0,09498
7 - 13	0,12291
7 - 14	0,06615

Πίνακας 4.31: Αντιστάσεις των κλάδων του δικτύου των 15 ζυγών

Οι κατανομές των φορτίων και των φ/β παραγωγών θεωρούμε πως ακολουθούν την κανονική κατανομή χωρίς αυτό να επηρεάζει τη μεθοδολογία για την επίλυση του προβλήματος. Τα οποία γραφικά φαίνονται στα σχήματα 4.7 και 4.8.



Σχήμα 4.7: Καταναλώσεις των ζυγών 3, 5, 6, 10, 12, 13, 14 και 15 του δικτύου των 15 ζυγών



Σχήμα 4.8: Παραγωγές των ζυγών 4, 7, 8 και 11 του δικτύου των 15 ζυγών

Το πρώτο βήμα είναι η εκτέλεση της ροής φορτίου για τις πιο πιθανές τιμές έτσι ώστε να γίνει η γραμμικοποίηση, ως πιο πιθανή τιμή έχει θεωρηθεί η μέση τιμή των φορτίων και των παραγώγων. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ντετερμινιστικής ροής φορτίου για το δίκτυο του σχήματος 4.6 στους παρακάτω πίνακες.

Ζυγός	V_0 (α.μ)
1	1
2	0,995
3	0,995
4	1,037
5	0,953
6	0,985
7	0,978
8	0,962
9	0,962
10	0,945
11	0,948
12	0,975
13	0,970
14	0,969
15	0,925

Πίνακας 4.32: Τάσεις των ζυγών από την ντετερμινιστική ροή φορτίου του δικτύου των 15 ζυγών

Παραγωγή ισχύος στον ζυγό αναφοράς είναι: $P=23,37$ MW

Ζυγός	Κατανάλωση - Παραγωγή (MW)
1	-
2	-
3	21,69
4	-94,21

5	47,79
6	7,59
7	-11,21
8	-15,01
9	-
10	29,49
11	-9,01
12	3,49
13	6,09
14	13,49
15	14,89

Πίνακας 4.33: Ισχύς των ζυγών από την ντετερμινιστική ροή φορτίου του δικτύου των 15 ζυγών

Κλάδος	Ροή ισχύος από τον αρχικό ζυγό (MW)
1 - 2	23,37
2 - 3	3,32
3 - 4	-90,34
3 - 5	71,97
5 - 8	-14,87
5 - 10	36,00
8 - 9	0
10 - 11	-8,98
10 - 15	15,22
2 - 6	19,94
6 - 7	12,13
7 - 12	3,50
7 - 13	6,14
7 - 14	13,62

Πίνακας 4.34: Ροές ισχύος από τους αρχικούς ζυγούς των κλάδων του δικτύου των 15 ζυγών

Κλάδος	Ροή ισχύος στον καταλυτικό ζυγό (MW)
1 - 2	-23,26
2 - 3	-3,32
3 - 4	94,21
3 - 5	-68,93
5 -8	15,01
5 - 10	-35,73
8 - 9	0
10 - 11	9,01
10 - 15	-14,89
2 - 6	-19,72
6 - 7	-12,05
7 - 12	-3,49
7 - 13	-6,09
7 - 14	-13,49

Πίνακας 4.35: Ροές ισχύος στους καταλυτικούς ζυγούς των κλάδων του δικτύου των 15 ζυγών

Κλάδος	Απώλεια ισχύος στον κλάδο (MW)
1 - 2	0,106
2 - 3	0,002
3 - 4	3,875
3 - 5	3,041
5 -8	0,142
5 - 10	0,277
8 - 9	0
10 - 11	0,029
10 - 15	0,329
2 - 6	0,217
6 - 7	0,082
7 - 12	0,012

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Πίνακας 4.38: Διασυνδέσεις του κάθε κλάδου με τους κόμβους του δικτύου των 15 ζυγών

Βασιζόμενοι στην παρακάτω σχέση κατασκευάζουμε τον πίνακα των συνθέτων αντιστάσεων του δικτύου. Και τα αποτελέσματα για τον πίνακα Z φαίνονται στον πίνακα 4.39.

$$Z = A^T \times Z_b \times A$$

$$Z = \begin{bmatrix} 0,01938 & 0,01938 & 0,01938 & 0,01938 & 0,01938 & 0,01938 \\ 0,01938 & 0,03876 & 0,03876 & 0,03876 & 0,01938 & 0,01938 \\ 0,01938 & 0,03876 & 0,08575 & 0,03876 & 0,01938 & 0,01938 \\ 0,019380 & 0,03876 & 0,03876 & 0,09687 & 0,01938 & 0,01938 \\ 0,01938 & 0,01938 & 0,01938 & 0,01938 & 0,07341 & 0,07341 \\ 0,01938 & 0,01938 & 0,01938 & 0,01938 & 0,07341 & 0,12744 \\ 0,01938 & 0,03876 & 0,03876 & 0,09687 & 0,01938 & 0,01938 \\ 0,01938 & 0,03876 & 0,03876 & 0,09687 & 0,01938 & 0,01938 \\ 0,01938 & 0,03876 & 0,03876 & 0,09687 & 0,01938 & 0,01938 \\ 0,01938 & 0,03876 & 0,03876 & 0,09687 & 0,01938 & 0,01938 \\ 0,01938 & 0,01938 & 0,01938 & 0,01938 & 0,07341 & 0,12744 \\ 0,01938 & 0,01938 & 0,01938 & 0,01938 & 0,07341 & 0,12744 \\ 0,01938 & 0,01938 & 0,01938 & 0,01938 & 0,07341 & 0,12744 \\ 0,01938 & 0,01938 & 0,01938 & 0,01938 & 0,07341 & 0,12744 \\ 0,01938 & 0,03876 & 0,03876 & 0,09687 & 0,01938 & 0,01938 \end{bmatrix} \dots$$

0,01938	0,01938	0,01938	0,01938	0,01938	0,01938	0,01938	0,01938
0,03876	0,03876	0,03876	0,03876	0,01938	0,01938	0,01938	0,03876
0,03876	0,03876	0,03876	0,03876	0,01938	0,01938	0,01938	0,03876
0,09687	0,09687	0,09687	0,09687	0,01938	0,01938	0,01938	0,09687
0,01938	0,01938	0,01938	0,01938	0,07341	0,07341	0,07341	0,01938
0,01938	0,01938	0,01938	0,01938	0,12744	0,12744	0,12744	0,01938
0,15498	0,15498	0,09687	0,09687	0,01938	0,01938	0,01938	0,09687
0,15498	0,18679	0,09687	0,09687	0,01938	0,01938	0,01938	0,09687
0,09687	0,09687	0,11625	0,11625	0,01938	0,01938	0,01938	0,11625
0,09687	0,09687	0,11625	0,14806	0,01938	0,01938	0,01938	0,11625
0,01938	0,01938	0,01938	0,01938	0,22242	0,12744	0,12744	0,01938
0,01938	0,01938	0,01938	0,01938	0,12744	0,25035	0,12744	0,01938
0,01938	0,01938	0,01938	0,01938	0,12744	0,12744	0,19359	0,01938
0,09687	0,09687	0,11625	0,11625	0,01938	0,01938	0,01938	0,24336

Πίνακας 4.39: Συνθέτες αντιστάσεις του δικτύου των 15 ζυγών

Μετά από υπολογισμούς και απλοποίησης που προέρχονται από το DC δίκτυο ο τύπος για τον συντελεστή βαρύτητας των ενεργών εγχύσεων των ζυγών δίνεται από τον τύπο: $\gamma(k,i)=-\text{Real}\{Z(i,k)\}$, τα αποτελέσματα του οποίου φαίνονται στον πίνακα 4.40.

-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938
-0,01938	-0,03876	-0,03876	-0,03876	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938
-0,01938	-0,03876	-0,08575	-0,03876	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938
-0,019380	-0,03876	-0,03876	-0,09687	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938
-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,07341	-0,07341	-0,07341	-0,01938
-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,07341	-0,12744	-0,12744	-0,01938
-0,01938	-0,03876	-0,03876	-0,09687	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938
-0,01938	-0,03876	-0,03876	-0,09687	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938
-0,01938	-0,03876	-0,03876	-0,09687	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938
-0,01938	-0,03876	-0,03876	-0,09687	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938
-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,07341	-0,12744	-0,12744	-0,01938
-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,07341	-0,12744	-0,01938
-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,07341	-0,12744	-0,01938
-0,01938	-0,03876	-0,03876	-0,09687	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938
-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938
-0,03876	-0,03876	-0,03876	-0,03876	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,03876
-0,03876	-0,03876	-0,03876	-0,03876	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,03876
-0,09687	-0,09687	-0,09687	-0,09687	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,09687
-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,07341	-0,07341	-0,07341	-0,01938
-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,12744	-0,12744	-0,12744	-0,01938
-0,15498	-0,15498	-0,09687	-0,09687	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,09687
-0,15498	-0,18679	-0,09687	-0,09687	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,09687
-0,09687	-0,09687	-0,11625	-0,11625	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,11625
-0,09687	-0,09687	-0,11625	-0,14806	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,11625
-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,22242	-0,12744	-0,12744	-0,01938
-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,12744	-0,25035	-0,12744	-0,01938
-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,12744	-0,12744	-0,19359	-0,01938
-0,09687	-0,09687	-0,11625	-0,11625	-0,01938	-0,01938	-0,01938	-0,24336

Πίνακας 4.40: Συντελεστής βαρύτητας των ενεργών εγχύσεων των ζυγών του δικτύου των 15 ζυγών

Τέλος, οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για τα μεγέθη των τάσεων και των ροών ισχύος στο δίκτυο μπορούν να υπολογιστούν από τη μαθηματική συνέλιξη των δεδομένων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας του φορτίου και της παραγωγής.

Η τάση υπολογίζεται με την βοήθεια της σχέσης $V_k = \sum_{i=1}^n Y_{ki} P_i + V_0$ και η ροή ισχύος από τη σχέση $P_{ij} = \sum_{z \in a(j)} P_z$. Τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στους πίνακες 4.41 και 4.42. Και γραφικά από τα σχήματα 4.9 και 4.10.

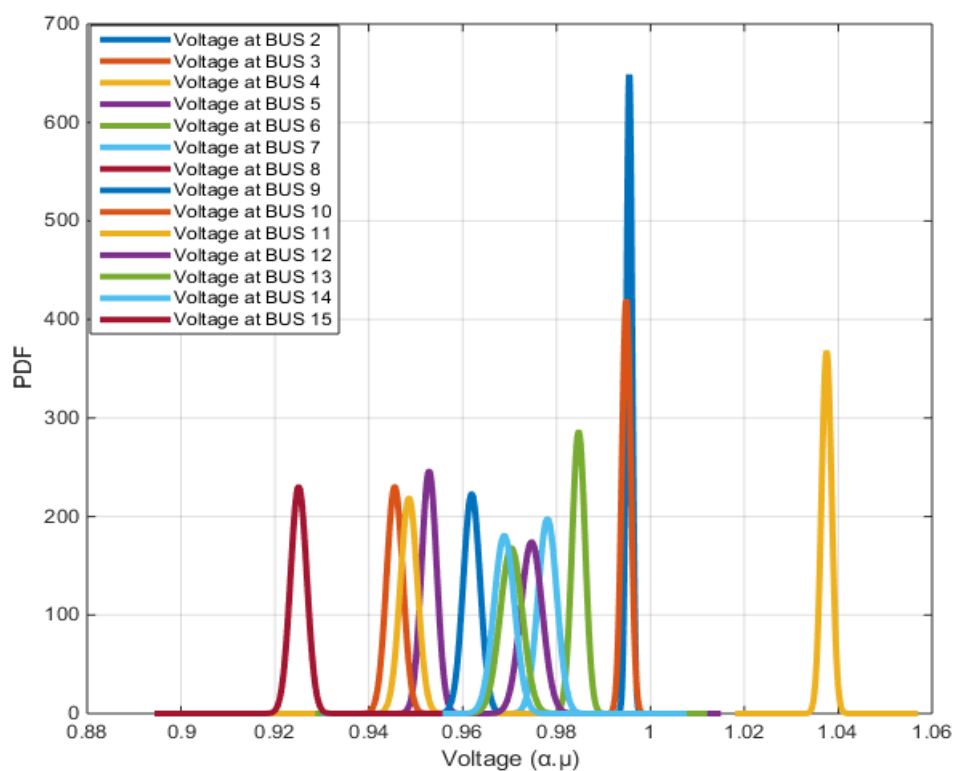
Ζυγός	\bar{V} (α.μ)
2	0,9955
3	0,9948
4	1,0375
5	0,9528
6	0,9847
7	0,9780
8	0,9619
9	0,9619
10	0,9455
11	0,9485
12	0,9746
13	0,9703
14	0,9688
15	0,9250

Πίνακας 4.41: Μέσες τιμές των τάσεων των ζυγών από την πιθανοτική ροή φορτίου του δικτύου των 15 ζυγών

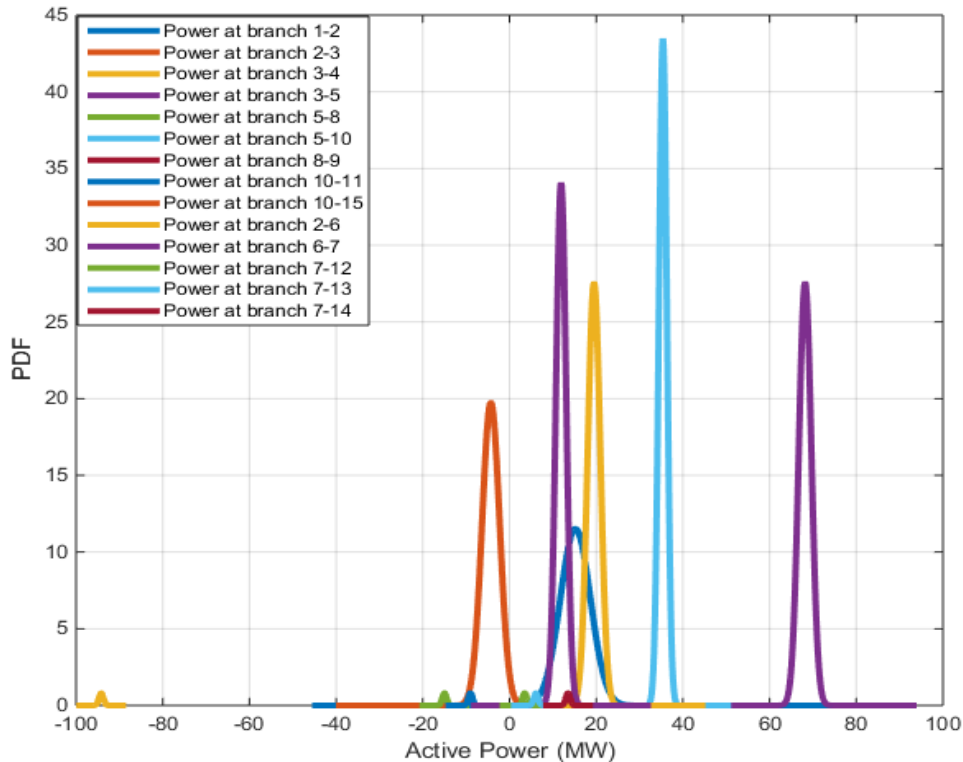
Κλάδος	Ροή ισχύος (MW)
1 - 2	15,08
2 - 3	-4,37
3 - 4	-94,21
3 - 5	68,15

5 - 8	-15,01
5 - 10	35,37
8 - 9	0
10 - 11	-9,01
10 - 15	14,89
2 - 6	19,45
6 - 7	11,86
7 - 12	3,49
7 - 13	6,09
7 - 14	13,49

Πίνακας 4.42: Ροές ισχύος των κλάδων από την πιθανοτική ροή φορτίου του δικτύου των 15 ζυγών



Σχήμα 4.9: Τάσεις των ζυγών 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 και 15 από την πιθανοτική ροή φορτίου του δικτύου των 15 ζυγών



Σχήμα 4.10: Ροές ισχύος των κλάδων από την πιθανοτική ροή φορτίου του δικτύου των 15 ζυγών

Από τα σχήματα 4.9 και 4.10 παρατηρούμε τα αποτελέσματα των τάσεων και των ρών ισχύος, τα οποία φαίνεται ότι ακολουθούν κανονικές κατανομές. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 4.9 παρουσιάζονται οι κατανομές των τάσεων των ζυγών και στο σχήμα 4.10 οι κατανομές των ρών ισχύος των κλάδων.

4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα που πήραμε από την ντετερμινιστική ροή φορτίου με την χρήση της μεθόδου Newton-Raphson και την πιθανοτική ροή φορτίου παρατηρούμε ότι η τάση από την ντετερμινιστική ροή φορτίου με την χρήση της μεθόδου Newton-Raphson με την βοήθεια της παραλλαγής της συνάρτησης `dcnperworkpf` και η τάση με την χρήση της συνάρτησης `runpf` του

MATLAB είναι ίδιες. Και οι μέσες τιμές των τάσεων των ζυγών από την πιθανοτική ροή φορτίου είναι ίδιες με αυτή της ντετερμινιστικής ροής φορτίου. Επίσης παρατηρούμε ότι οι γραφικές παραστάσεις των τάσεων και των ρών ισχύος από την πιθανοτική ροή φορτίου ακολουθούν κανονικές κατανομές και στα δυο συστήματα.

Τα αποτελέσματα της πιθανοτικής ροής φορτίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την:

- ✓ Επέκταση του δικτύου
- ✓ Online λειτουργία του δικτύου
- ✓ Επιλογή των καλωδίων του δικτύου
- ✓ Επιλογή του μετατροπέα στην περίπτωση του μικρού DC δικτύου
- ✓ Γνώση των ρών ισχύος από τις κατανομές των εισόδων
- ✓ Επιλογή διακοπών
- ✓ Συντήρηση
- ✓ Προστασία

4.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] Κ. Παπαρρίζος, "Matlab 6.5", Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΥΓΟΣ, 2004.
- [4.2] Γ. Θεόδωρου, Ν. Θεόδωρου, Πρακτικός οδηγός στο Matlab, Θεσσαλονίκη: 2007
- [4.3] <http://www.mathworks.com/>
- [4.4] J. Beerten, "MATACDC 1.0 User's manual", Leuven: 2012
- [4.5] Chathuranga Jayarathna, Prabath Binduhewa, Janaka Ekanayake, Jianzhong Wu, "Load flow analysis of low voltage dc networks with photovoltaic", IEEEExplore Digital Library, p.1

ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ

A.1 ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ

Έστω η τυχαία μεταβλητή X , η οποία παίρνει τιμές στο διάστημα $[x_{\min}, x_{\max}]$ και η συνάρτηση $f_X(x)$ το οποίο ορίζεται στο διάστημα $[x_{\min}, x_{\max}]$ και παίρνει πραγματικές τιμές. Εάν ισχύουν τα παρακάτω η $f_X(x)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής X [A.1]:

- $f_X(x) \geq 0 \quad \forall x \in [x_{\min}, x_{\max}]$ (A.1)

- $P\{x_1 \leq x \leq x_2\} = \int_{x_1}^{x_2} f_X(x) dx$ (A.2)

Τα παραπάνω ισχύουν για οποιοδήποτε διάστημα $[x_1, x_2] \subseteq [x_{\min}, x_{\max}]$

Με βάση τον παραπάνω ορισμό έχουμε:

$$\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} f_X(x) dx = 1 \quad (A.3)$$

Σε μια τυχαία μεταβλητή X με πυκνότητα πιθανότητας $f_X(x)$ αντιστοιχεί η συνάρτηση κατανομής $F_X(x)$ για την οποία ισχύει:

$$F_X(x) = P\{X' \leq x\} = \int_{-\infty}^x f_X(x) dx \quad (\text{A.4})$$

Η συνάρτηση αυτή:

- Είναι αύξουσα
- Παίρνει πραγματικές τιμές

Και σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό έχουμε:

$$F_X(-\infty) = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$F_X(\infty) = 1 \quad (\text{A.6})$$

$$f_X(x) = \frac{d}{dx} F_X(x) \quad (\text{A.7})$$

Έστω δύο ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές X και Y με δεδομένες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας $f_X(x)$ και $f_Y(y)$ αντίστοιχα. Αν μια καινούργια τυχαία μεταβλητή Z δίνεται από τη σχέση:

$$Z = \alpha X + \beta Y \quad (\text{A.8})$$

όπου α και β κατάλληλες σταθερές

Τότε για την πιθανοτική κατανομή της τυχαίας μεταβλητής Z θα ισχύει:

$$F_Z(z) = P\{Z \leq z\} = P\{\alpha X + \beta Y \leq z\} = \iint_{\alpha X + \beta Y \leq z} f_X(\alpha x) f_Y(\beta y) dx dy \quad (\text{A.9})$$

Επειδή οι τυχαίες μεταβλητές X και Y είναι ανεξάρτητες, από την εξίσωση (A.9) προκύπτει:

$$F_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_Y(\beta y) \int_{-\infty}^{z-\beta y} f_X(\alpha x) dx dy \quad (\text{A.10})$$

Με βάση την εξίσωση (A.4) προκύπτει:

$$\int_{-\infty}^{z-\beta y} f_X(\alpha x) dx = F_X(\alpha x) = F_X(z - \beta y) \quad (\text{A.11})$$

Η (A.10) με την αντικατάσταση της (A.11) μετατρέπεται στην

$$F_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_Y(\beta y) f_X(z - \beta y) dy \quad (\text{A.12})$$

και από την (A.7) έχουμε $f_X(\alpha x) = \frac{d}{d(\alpha x)} F_X(\alpha x)$ επομένως έχουμε:

$$f_Z(z) = \frac{d}{dz} F_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_Y(\beta y) \frac{d}{d(\alpha x)} F_X(z - \beta y) \frac{d(\alpha x)}{dz} dy$$

$$\Rightarrow f_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_Y(\beta y) f_X(z - \beta y) dy = \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(\alpha x) f_X(z - \alpha x) dy \quad (\text{A.13})$$

Η εξίσωση (A.13) είναι γνωστή ως η μαθηματική συνέλιξη των τυχαίων μεταβλητών αX και βY , το οποίο μπορεί να γραφεί και ως:

$$f_Z(z) = f_X(\alpha x) * f_Y(\beta y) \quad (\text{A.14})$$

Όταν δίνονται οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας η χρήση της παραπάνω σχέσης δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας του γραμμικού συνδυασμού των τυχαίων μεταβλητών.

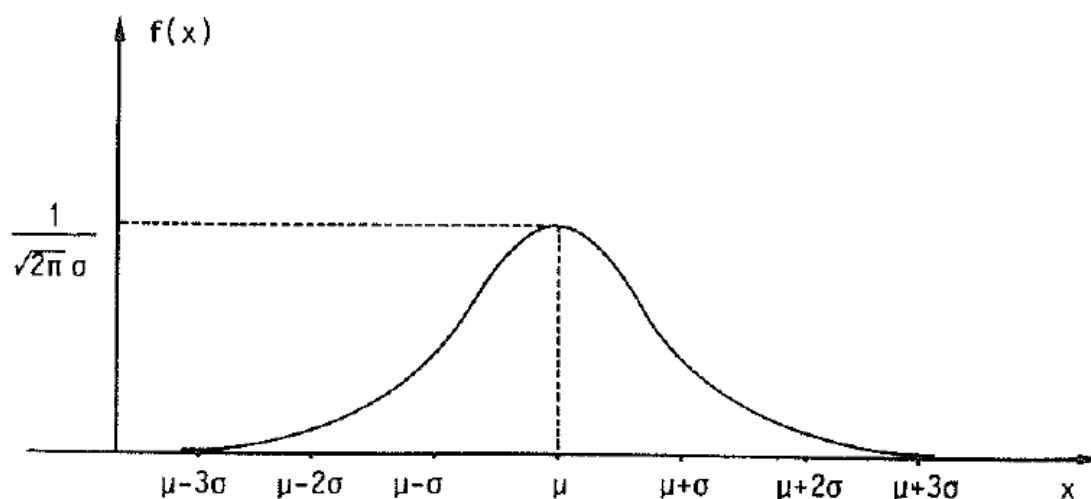
Με απλή επέκταση για $Z = \sum_{i=1}^r \alpha_i y_i$ ισχύει:

$$f_Z(z) = f_1(\alpha_1 y_1) * f_2(\alpha_2 y_2) * \dots * f_i(\alpha_i y_i) * \dots * f_r(\alpha_r y_r) \quad (\text{A.15})$$

A.1.1 Κανονική κατανομή

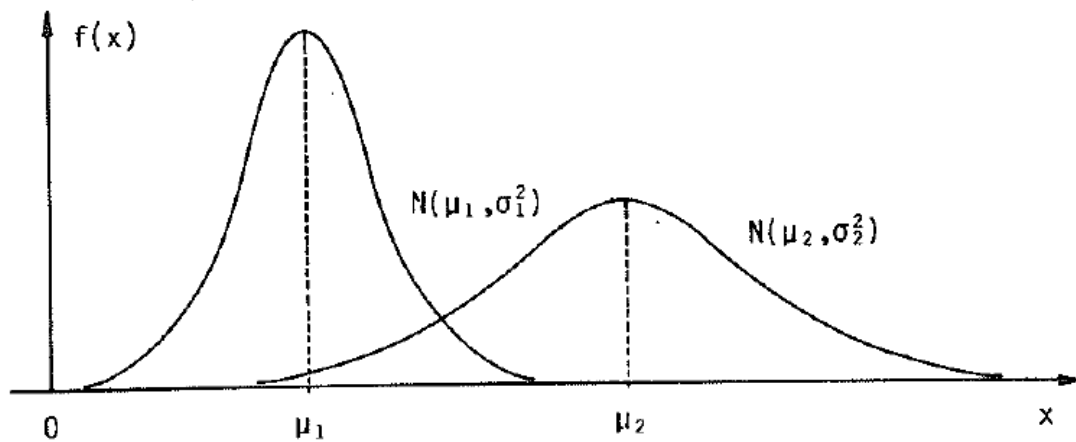
Η συνεχής τυχαία μεταβλητή X ακολουθεί την Κανονική κατανομή με παραμέτρους μ, σ ($-\infty < \mu < +\infty, \sigma > 0$), και γράφουμε $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, όταν έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας την [A.2]:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}(x - \mu)^2\right\} \equiv N(x|\mu, \sigma^2), x \in \mathbb{R} \quad (\text{A.16})$$



Σχήμα A.1 Κατανομή $N(\mu, \sigma^2)$

Είναι προφανές ότι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (A.16) έχει κορυφή το σημείο $x=\mu$ και είναι συμμετρική ως προς τον άξονα το διερχόμενο από το μ . Επίσης στο διάστημα $(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$ περιέχονται όλες σχεδόν οι "πιθανές" τιμές της τυχαίας μεταβλητής X . Συγκεκριμένα $P(|X-\mu|>3\sigma)\cong 0,003$. Η παράμετρος μ καθορίζει τη θέση της κατανομής πάνω στον άξονα των x , γι' αυτό και ονομάζεται παράμετρος θέσης, ενώ η παράμετρος σ καθορίζει το πόσο απλώνεται η κατανομή πάνω στον άξονα των x , παράμετρος μεταβλητότητας.



Σχήμα Α.2 Κανονικές κατανομές ($\sigma_1 < \sigma_2$)

Σχετικά με τη συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $F(x)$ μιας τυχαίας μεταβλητής X που ακολουθεί κατανομή $N(\mu, \sigma^2)$ ισχύουν το παρακάτω. Εξ ορισμού [A.2]:

$$F_x(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2\right\} dx \quad (\text{A.17})$$

A.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [A.1] Θ. Καρακατσάνης, "Συμβολή της πιθανοτικής ροής φορτίου στον έλεγχο λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας", Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 1995, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, ΕΜΠ, σελ. 235-237
- [A.2] Γ. Κοκολάκης, Ι. Σπηλιώτης, "Εισαγωγή στη θεωρία πιθανοτήτων και στατιστική", Έκδοση 4^η, Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών, 1999, σελ. 102-106

ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

B.1 ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Ο σκοπός των γραμμικοποιήσεων των εξισώσεων της ροής φορτίου [B.1] είναι να εκφράσουν τα ζητούμενα μεγέθη ως το αλγεβρικό άθροισμα των εγχύσεων των ζυγών με κατάλληλα υπολογισμένους συντελεστές βαρύτητας έτσι ώστε να μπορέσουν να εφαρμοστούν οι τεχνικές της συνέλιξης για τον υπολογισμό των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας των αγνώστων μεγεθών.

Αρχικά δίνονται οι γενικής μορφής γραμμικοποιήσεις του γινομένου, του πηλίκου και του μέτρου των τυχαίων μεταβλητών, οι οποίες εφαρμόζονται στη συνέχεια για τις γραμμικοποιήσεις των εξισώσεων της ροής φορτίου των ακτινικών δικτύων διανομής και τον προσδιορισμό των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας των τάσεων.

Όλες οι γραμμικοποιήσεις των εξισώσεων ροής φορτίου γύρω από κάποιο σημείο βασίζονται στην πιο κάτω γενική εξίσωση [B.1]:

$$f(X,Y) \approx f(X_0,Y_0) + \frac{\partial f(X,Y)}{\partial X} \Big|_{X_0,Y_0} (X-X_0) + \frac{\partial f(X,Y)}{\partial Y} \Big|_{X_0,Y_0} (Y-Y_0) \quad (B.1)$$

Έτσι,

$$\begin{aligned} X \cdot Y &\approx X_0 Y_0 + Y_0 (X - X_0) + X_0 (Y - Y_0) = X_0 Y_0 + Y_0 X - Y_0 X_0 + X_0 Y - X_0 Y_0 \\ &= Y_0 X + X_0 Y - X_0 Y_0 \quad (\text{B.2}) \end{aligned}$$

$$X^2 \approx 2X_0 X - X_0^2 \quad (\text{B.3})$$

$$\begin{aligned} \frac{X}{Y} &\approx \frac{X_0}{Y_0} + \frac{1}{Y_0} (X - X_0) - \frac{X_0}{Y_0^2} (Y - Y_0) = \frac{X_0}{Y_0} + \frac{X}{Y_0} - \frac{X_0}{Y_0} - \frac{X_0 Y}{Y_0^2} + \frac{X_0 Y_0}{Y_0^2} \\ &= \frac{1}{Y_0} X - \frac{X_0}{Y_0^2} Y + \frac{X_0}{Y_0} \quad (\text{B.4}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{X^2 + Y^2} = (X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}} \approx (X_0^2 + Y_0^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \frac{2X_0(X - X_0)}{(X_0^2 + Y_0^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{1}{2} \frac{2Y_0(Y - Y_0)}{(X_0^2 + Y_0^2)^{\frac{1}{2}}} \\ &= Z_0 + \frac{X_0 X - X_0^2 + Y_0 Y - Y_0^2}{Z_0} = Z_0 + \frac{X_0}{Z_0} X + \frac{Y_0}{Z_0} Y - \frac{X_0^2 + Y_0^2}{Z_0} = \frac{X_0}{Z_0} X + \frac{Y_0}{Z_0} Y \quad (\text{B.5}) \end{aligned}$$

όπου $Z_0 = (X_0^2 + Y_0^2)^{1/2}$

B.1.1 Τάση στους ζυγούς

Βάση της εξίσωσης (3.4.11) για την τάση στον κόμβο k ισχύει [B.1]:

$$V_k = V_{\text{feed}} - \sum_{i=1}^n z_{ki} P_i \quad (\text{B.6})$$

όπου

$$z_{ki} = R_{ki}$$

και

$$|V_k| = \sqrt{\text{Re}\{V_k\}^2}$$

όπου

$$\text{Re}\{V_k\} = V_{\text{feed}} - \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i$$

Θέτω $X = \text{Re}\{V_k\}$ και $Y = 0$ και βάση της (B.5) έχουμε:

$$\begin{aligned} |V_k| &= \sqrt{\text{Re}\{V_k\}^2} \approx \frac{\text{Re}\{V_k\}_0}{|V_k|_0} \text{Re}\{V_k\} = \\ &= r_k [V_{\text{feed}} - \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i] = \\ &= r_k V_{\text{feed}} - \sum_{i=1}^n (r_k \alpha_i) P_i = \sum_{i=1}^n \gamma_i P_i + \delta_k \\ &\Rightarrow |V_k| = \sum_{i=1}^n \gamma_i P_i + \delta_k \end{aligned}$$

όπου

$$\gamma_i = -(r_k \alpha_i)$$

$$\delta_k = r_k V_{\text{feed}}$$

και
$$r_k = \frac{\operatorname{Re}\{V_k\}_0}{|V_k|_0} = 1$$

$$\alpha_i = R_{ki}$$

Άρα
$$\delta_k = V_0$$

$$\gamma_i = -R_{ki}$$

B.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [B.1] Θ. Καρακατσάνης, "Συμβολή της πιθανοτικής ροής φορτίου στον έλεγχο λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας", Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 1995, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, ΕΜΠ, σελ. 257-260

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

Γ.1 Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η συνάρτηση `dcnetworkpf` είναι μια παραλλαγή της συνάρτησης `dcnetworkpf` του MATACDC:

Όπου

- `Ybusdc`: Μήτρα αγωγιμοτήτων του DC δικτύου
- `Vdc`: DC τάση σε κάθε ζυγό
- `Pdc`: DC εγχύση ισχύος σε κάθε ζυγό
- `slack`: Αριθμός των DC ζυγών αναφοράς
- `noslack`: Αριθμοί των ζυγών εκτός του DC ζυγού αναφοράς
- `rho`: Τοπολογία του DC δικτύου
- `tol`: Ανοχή της μεθόδου του Newton
- `itmax`: Μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων της μεθόδου του Newton

```
function [Vdc, Pdc] = dcnetworkpf(Ybusdc, Vdc, Pdc, slack, noslack, pol,
tol, itmax)
```

```
initialisation
```

```
nb      = length(Vdc);      number of dc busses
Pdc1    = -Pdc;             convention on power flow direction
```

```
----- dc network iteration -----
```

```
initialisation
```

```
it=0;
converged=0;
```

```
Newton-Raphson iteration
```

```
while ~converged && it<=itmax
```

```
    update iteration counter
```

```
    it = it+1;
```

```
    calculate power injections and Jacobian matrix
```

```
    Pdccalc = pol*Vdc.*(Ybusdc*Vdc);
```

```
    J      = sparse(pol*Ybusdc.*(Vdc*Vdc'));
```

```
        J((1:nb:nb*nb) + (0:nb-1)) = diag(J)+Pdccalc;  replace
matrix elements
```

```
    dc network solution
```

```
    Jr = J(noslack,noslack);           reduce Jacobian
```

```
    dPdcr = Pdc1(noslack)-Pdccalc(noslack);  power mismatch vector
```

```
    dVr = Jr\dPdcr;                   voltage corrections
```

```
    update dc voltages
```

```
    Vdc(noslack) = Vdc(noslack).*(ones(size(noslack,1),1)+dVr);
```

```
    convergence check
```

```
    if max(abs(dVr))<tol
```

```
        converged = 1;
```

```
    end
```

```

end
convergence print
if ~converged
    fprintf(1, '\nDC network power flow did NOT converge after %d
iterations\n', it);
end

----- Output update -----
recalculate slack bus powers
Pdc1(slack) = pol*Vdc(slack).*(Ybusdc(slack,:)*Vdc);
Pdc(slack) = -Pdc1(slack);

```

Γ.2 Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

Ντετερμινιστική ροή φορτίου για τις πιο πιθανές τιμές έτσι ώστε να γίνει η γραμμικοποίηση:

- Η `mpc` είναι ένας πίνακας που περιέχει όλα τα δεδομένα εισόδου όπως τους ισχύς των ζυγών, τις αντιστάσεις των κλάδων κτλ.
- Η `load_PD_normal` είναι ένας πίνακας που περιέχει τις κατανομές των συνάρτησεων πυκνότητας πιθανότητας και των αθροιστικών συνάρτησεων κατανομών για όλους τους ζυγούς.

```

mpc0=mpc;
for i=1:dim_buses
    if mpc0.bus(i,3)~=0
        mpc0.bus(i,3)=load_PD_normal(i).x(N/2);
    end
end

results0=runpf(mpc0);
V0=results0.bus(:,8);

```

Οι εξισώσεις τις πιθανοτικής ροής φορτίου είναι τα ακόλουθα:

Όπου Z_b : Διαγώνιος πίνακας που έχει ως στοιχεία τις αντιστάσεις των κλάδων με την σειρά που είναι αριθμημένη οι ζυγοί στο δίκτυο
 A : Τετραγωνικός πίνακας διαστάσεων $n \times n$, στον οποίο οι γραμμές αντιστοιχούν στους κλάδους και οι στήλες στους κόμβους του δικτύου
 Z : Οι συνθέτες αντιστάσεις του δικτύου
 g : Ο συντελεστής βαρύτητας των ενεργών εγχύσεων των ζυγών

```
for i=1:dim_branches
    Zb(i,i)=mpc.branch(i,3);
end
```

```
Z=A'*Zb*A;
```

```
for k=1:(dim_buses-1)
    for i=1:(dim_buses-1)
        g(k,i)=-real(Z(i,k));
    end
end
```

Τεχνική συνέλιξης για τον υπολογισμό των τάσεων των ζυγών και των ροών ισχύος στους ζυγούς:

Οι δυο μη μηδενικοί ενεργοί ισχύς:

- Οι $\max P$ είναι οι μέγιστες τιμές των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας.
- Ενώ οι $\min P$ είναι οι ελάχιστες τιμές των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας.
- Η $\text{bus_distribution_P}$ είναι ο πίνακας load_PD_normal δηλαδή είναι ο πίνακας που περιέχει τις κατανομές των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας και των αθροιστικών συναρτήσεων κατανομών για όλους τους ζυγούς.

```
for i=2:dim
    maxP(i-1)=max(bus_distribution_P(1,i).x);
    minP(i-1)=min(bus_distribution_P(1,i).x);
end

for m=1:(dim-1)
    i=1;
    while maxP(i)==0
        i=i+1;
    end
    j=i+1;
    while maxP(j)==0
        j=j+1;
    end
end

max1=maxP(i);
min1=minP(i);
step1=(max1-min1)/(N-1);
X1=(min1:step1:max1);
Y1=bus_distribution_P(1,i+1).pdf;
```

```
max2=maxP(j);  
min2=minP(j);  
step2=(max2-min2)/(N-1);  
X2=(min2:step2:max2);  
Y2=bus_distribution_P(1,j+1).pdf;
```

```
maxt=max1+max2;  
mint=min1+min2;  
step3=(maxt-mint)/(N+N-1-1);  
Y=convn(Y1,Y2);
```

```
sumconvn=sum(Y);  
x1=1/(sumconvn*step3);  
sum3=sum(Y)*step3*x1;  
Y=Y*x1;
```

```
step4=(maxt-mint)/(N-1);  
Xnew=mint:step4:maxt;
```

```
Ynew(1)=Y(1);
```

```
k=1;
```

```
for l=2:N
```

```
    Ynew(l)=Y(k+2);k=k+2;
```

```
end
```

```
sum4=sum(Ynew);
```

```
x2=1/(sum4*step4);
```

```
sum4=sum4*step4*x2;
```

```
Ynew=Ynew*x2;
```