



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ
ΕΝΕΡΓΩΝ ΑΚΤΙΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΜΕ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ο. Σιάγκας

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Νικόλαος Χ. Κουτσούκης, Υ.Δ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2016



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ
ΕΝΕΡΓΩΝ ΑΚΤΙΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΜΕ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ο. Σιάγκας

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Νικόλαος Χ. Κουτσούκης, Υ.Δ. Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22^α Μαρτίου 2016

.....
Παύλος Γεωργιλάκης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2016

.....
Δημήτριος Ο. Σιάγκας

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

Copyright © Δημήτριος Σιάγκας, 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

Η πρόσφατη απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η συμφόρηση των γραμμών μεταφοράς και η ανάπτυξη των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν συμβάλλει σημαντικά στην αυξανόμενη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) στα δίκτυα διανομής τα τελευταία χρόνια. Ωστόσο ο σχεδιασμός και η κατασκευή των περισσότερων σημερινών δικτύων διανομής δεν έχει γίνει με την προοπτική εγκατάστασης ΔΠ σε αυτά. Το αποτέλεσμα είναι η ενσωμάτωση μονάδων ΔΠ στα δίκτυα να ακολουθείται από την επιβολή κατάλληλων τεχνικών ελέγχου της λειτουργίας τους με σκοπό την αποφυγή ανεπιθύμητων διαταραχών.

Μια από τις επικρατέστερες μεθόδους ελέγχου των μονάδων ΔΠ είναι η περικοπή της παραγόμενης ενεργού ισχύος τους ώστε το δίκτυο να μην υπερβεί τα επιτρεπόμενα όρια λειτουργίας. Αυτή η πρακτική, αν και αποτελεσματική, έχει δυσμενείς οικονομικές συνέπειες για τους διαχειριστές των δικτύων διανομής (ΔΔΔ) των οποίων το συμφέρον είναι η μεγιστοποίηση της εισερχόμενης ενεργού ισχύος από ΔΠ στα δίκτυα. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, μια από τις προτεινόμενες τεχνικές ελέγχου των δικτύων που φιλοξενούν μονάδες ΔΠ είναι η χρήση τηλεχειριζόμενων διακοπών με σκοπό την επαναδιαμόρφωση του δικτύου, δηλαδή τη μεταβολή της τοπολογίας του.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διατύπωση και επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης για ενεργά ακτινικά δίκτυα διανομής θέτοντας ως αντικειμενικό στόχο την ελαχιστοποίηση της περικοπής ενεργού ισχύος των εγκατεστημένων μονάδων ΔΠ στο δίκτυο.

Αρχικά χρησιμοποιείται το μοντέλο του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος το οποίο τροποποιείται κατάλληλα ώστε να αποτελέσει τη βάση για τη διατύπωση του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης. Με τη μετατροπή των εξισώσεων του από μη-γραμμικές σε τετραγωνικές και την εισαγωγή στοιχείων ελέγχου με διακριτή συμπεριφορά (όπως για παράδειγμα οι διακόπτες αλλαγής τοπολογίας) προέκυψε το προτεινόμενο μοντέλο, το οποίο αποτελεί ένα πρόβλημα μικτών ακεραίων με τετραγωνικούς περιορισμούς (Mixed Integer Quadratically Constrained Problem).

Το εν λόγω μοντέλο υποστηρίζει, σε συνδυασμό με τον έλεγχο της ενεργού και της αέργου ισχύος των μονάδων ΔΠ, τη χρήση διακοπών του δικτύου για επαναδιαμόρφωσή του αλλά και το χειρισμό εγκάρσιων αντισταθμίσεων και μετασηματιστών με ΣΑΤΥΦ για την αντιμετώπιση των περιορισμών τάσης και ρεύματος. Σκοπός είναι να βρεθεί εκείνη η κατάσταση λειτουργίας των ελεγχόμενων στοιχείων που να ελαχιστοποιεί την περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ.

Στην παρούσα εργασία το προτεινόμενο μοντέλο υλοποιήθηκε στο λογισμικό GAMS και εφαρμόστηκε σε τρία δίκτυα διανομής, με 34, 69 και 136 ζυγούς. Χρησιμοποιούνται διάφορες στρατηγικές ελέγχου για κάθε δίκτυο και τα αποτελέσματά τους συγκρίνονται με σκοπό τον προσδιορισμό της καταλληλότερης ενώ παράλληλα προτείνονται και ορισμένες πρακτικές μέθοδοι για ελαχιστοποίηση του χρόνου εκτέλεσης του μοντέλου με χρήση παρελθοντικών αποτελεσμάτων.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Βέλτιστη επαναδιαμόρφωση, ενεργά ακτινικά δίκτυα διανομής, διεσπαρμένη παραγωγή, περικοπή ενεργού ισχύος, τηλεχειριζόμενοι διακόπτες, κεντρικός έλεγχος

ABSTRACT

The recent liberalization of the electricity market, the shortage of transmission capacity and the development of renewable energy technologies have all contributed greatly to the increasing penetration of distributed generation units (DG-units) in distribution networks during the last few years. However, the planning and construction of most of today's distribution networks have not taken into account the possibility of installation of DG-units in them. As a result, any incorporation of DG-units in said networks is ensued by the implementation of suitable control schemes in order to prevent unwanted disruptions.

One of the most widely adopted control methods for DG-units is the curtailment of their generated active power to ensure the satisfaction of the network's operating constraints. This approach, effective as it may be, entails adverse financial consequences for the distribution system operators (DSOs) whose interest lies in maximizing the amount of active power generation from DG-units in their network. In order to deal with this problem one of the proposed control methods for DG-hosting networks is installing and using remotely controlled switches so as to perform network reconfiguration, to wit altering its topology.

The scope of this Diplomatic Thesis is the formulation and solution of the Optimal Network Reconfiguration Problem for radial active distribution networks considering the minimization of the network's total DG-unit curtailment as an objective.

Initially, the model of the Optimal Power Flow (OPF) problem is used as a basis for the formulation of the optimal network reconfiguration problem. The proposed model has replaced all nonlinear constraints by quadratic ones and introduces control apparatus with discrete behavior, thus being considered a Mixed Integer Quadratically Constrained Problem (MIQCP).

Said model supports the operation of network switches in combination with active and reactive power control of DG-units as well as the operation of shunt capacitor banks and On-Load Tap Changing (OLTC) transformers in order to deal with voltage and thermal constraints. Its goal lies in finding the operation state of the network's controllable apparatus that minimizes the DG-units' active power curtailment.

The proposed model has been developed using the GAMS software and was applied to a 34 bus, a 69 bus and a 136 bus distribution system. For each network several different control strategies are employed and have their results compared in order to determine the fittest. At the same time certain practical methods are considered in order to minimize the model's execution time by means of using results from past executions.

KEY WORDS

Optimal network reconfiguration, radial active distribution networks, distributed generation, active power curtailment, remotely controlled switches, centralized control

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015–2016 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιάκη, επίκουρο καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, δίνοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα ενδιαφέρον θέμα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Νικόλαο Κουτσούκη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου (Όθων και Ελένη), που μου έδωσαν τις βάσεις για την απόκτηση γνώσεων και καλλιέργησαν μέσα μου την αγάπη για μάθηση, τη γιαγιά μου (Ζαφειρώ), για την αγάπη και φροντίδα που μου παρείχε στα παιδικά μου χρόνια και εξακολουθεί ακόμα και σήμερα, στον αδερφό μου (Γιώργο) για τη συμπαράστασή του στις δύσκολες στιγμές και στους καλούς μου φίλους (Θανάση και Βιβή) που ήταν κοντά μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Αντικείμενο της εργασίας	2
1.3	Δομή της εργασίας	2
1.4	Βιβλιογραφία	3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1	Εισαγωγή	5
2.2	Δομή και στοιχεία δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	6
2.2.1	Θεμελιώδη στοιχεία	6
2.2.1.1	Υποσταθμοί μεταφοράς	6
2.2.1.2	Γραμμές μέσης τάσης	7
2.2.1.3	Υποσταθμοί διανομής	7
2.2.1.4	Γραμμές χαμηλής τάσης	7
2.2.2	Στοιχεία ελέγχου δικτύων διανομής	8
2.2.2.1	Διακοπτικά στοιχεία	8
2.2.2.2	Χωρητικές αντισταθμίσεις	10
2.2.2.3	Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ	10
2.2.3	Τοπολογίες δικτύων διανομής	10
2.2.3.1	Ακτινικό δίκτυο διανομής	11
2.2.3.2	Βροχοειδές δίκτυο διανομής	12
2.2.3.3	Τοπολογία primary network	12
2.3	Μέθοδοι ελέγχου λειτουργίας δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	13
2.3.1	Κεντρικός έλεγχος	13
2.3.2	Αποκεντρωμένος έλεγχος	14
2.4	Βιβλιογραφία	15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

3.1	Εισαγωγή - Ορισμός	17
3.2	Ανάλυση επιδράσεων διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής	18
3.2.1	Πλεονεκτήματα	19
3.2.2	Μειονεκτήματα	20
3.2.2.1	Ποιότητα τάσης	20
3.2.2.2	Προστασία δικτύου	20

3.3	Κανόνες σύνδεσης και ελέγχου λειτουργίας των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής	21
3.3.1	Μέθοδοι ελέγχου μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής	21
3.3.1.1	Παθητικά δίκτυα	21
3.3.1.2	Ενεργά δίκτυα	22
3.3.2	Ρυθμιστικά πλαίσια	22
3.4	Βιβλιογραφία	24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1	Εισαγωγή	27
4.2	Πρόβλημα βέλτιστης AC ροής ισχύος	28
4.2.1.	Διατύπωση του προβλήματος της Βέλτιστης Ροής Ισχύος	29
4.2.2	Εναλλακτική διατύπωση του προβλήματος της Βέλτιστης Ροής Ισχύος	34
4.3	Βέλτιστη επαναδιαμόρφωση σε ενεργά δίκτυα διανομής	35
4.3.1	Μοντελοποίηση των στοιχείων ελέγχου των δικτύων διανομής	35
4.3.1.1	Διακόπτες	35
4.3.1.2	Εγκάρσιες Αντισταθμίσεις	36
4.3.1.3	Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ	37
4.3.2	Περιορισμοί του προβλήματος	38
4.3.3	Αντικειμενική συνάρτηση	42
4.4	Βιβλιογραφία	45

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΩΔΙΚΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

5.1	Εισαγωγή	47
5.2	Αλγόριθμος επίλυσης προβλήματος	49
5.3	Χαρακτηριστικά λογισμικού ανάπτυξης κώδικα	51
5.3.1	Το λογισμικό GAMS	51
5.3.2	Σύνταξη μοντέλου στο περιβάλλον GAMS	52
5.3.3	Δεδομένα εισαγωγής	53
5.3.3.1	Στατικά δεδομένα δικτύων	54
5.3.3.2	Στοχαστικές παράμετροι εισόδου	54
5.3.3.3	Διαδικασία εισαγωγής δεδομένων	55
5.3.4	Εξαγωγή αποτελεσμάτων	55
5.4	Βιβλιογραφία	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1	Εισαγωγή	59
6.2	Εφαρμογή στο δίκτυο 34 ζυγών	63
6.2.1	Στρατηγική Ελέγχου 1 : Έλεγχος δικτύου αποκλειστικά με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ	66
6.2.2	Στρατηγική Ελέγχου 2 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στο σταθμό υποβιβασμού	69
6.2.3	Στρατηγική Ελέγχου 3 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς των εγκάρσιων αντισταθμίσεων των ζυγών	73
6.2.4	Στρατηγική Ελέγχου 4 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς διακοπών των γραμμών	77
6.2.5	Στρατηγική Ελέγχου 5 : Συνδυασμένος χειρισμός των στοιχείων του δικτύου	81
6.2.6	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	84
6.3	Εφαρμογή στο δίκτυο 69 ζυγών	88
6.3.1	Στρατηγική Ελέγχου 1 : Έλεγχος δικτύου αποκλειστικά με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ	91
6.3.2	Στρατηγική Ελέγχου 2 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στο σταθμό υποβιβασμού	92
6.3.3	Στρατηγική Ελέγχου 3 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς των εγκάρσιων αντισταθμίσεων των ζυγών	94
6.3.4	Στρατηγική Ελέγχου 4 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς διακοπών των γραμμών	95
6.3.5	Στρατηγική Ελέγχου 5 : Συνδυασμένος χειρισμός των στοιχείων του δικτύου	97
6.3.5.1	Στρατηγική 5α : Έλεγχος διακοπών αλλαγής τοπολογίας και εγκάρσιων αντισταθμίσεων	97
6.3.5.2	Στρατηγική 5β : Έλεγχος εγκάρσιων αντισταθμίσεων και Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ	98
6.3.5.3	Στρατηγική 5γ : Έλεγχος διακοπών αλλαγής τοπολογίας και Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ	99
6.3.6	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	101
6.4	Εφαρμογή στο δίκτυο 136 ζυγών	103
6.4.1	Στρατηγική Ελέγχου 1 : Έλεγχος δικτύου αποκλειστικά με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ	107
6.4.2	Στρατηγική Ελέγχου 2 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στο σταθμό υποβιβασμού	108
6.4.3	Στρατηγική Ελέγχου 3 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς των εγκάρσιων	109

	αντισταθμίσεων των ζυγών	
6.4.4	Στρατηγική Ελέγχου 4 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς διακοπών των γραμμών	110
6.4.5	Στρατηγική Ελέγχου 5 : Συνδυασμένος χειρισμός των στοιχείων του δικτύου	112
6.4.6	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	112
6.5	Βιβλιογραφία	115

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1	Σύνοψη της εργασίας	117
7.2	Μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας	119

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) καλείται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Ένα ΣΗΕ αποτελείται από μονάδες παραγωγής, από συσκευές κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και από το δίκτυο που τις συνδέει. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης [1.1].

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του ΣΗΕ : την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί βρίσκεται σε μια συνεχή ροή και επειδή η ηλεκτρική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί σε μεγάλες ποσότητες με οικονομικό τρόπο, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που χρειάζεται η κατανάλωσή της.

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Κύριοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι θερμικοί και οι υδροηλεκτρικοί. Τελευταία γίνεται μια ανάπτυξη στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κυρίως με την εκμετάλλευση του αέρα και του ήλιου.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται με τις γραμμές υψηλής τάσης (ΥΤ) και υπερυψηλής τάσης (ΥΥΤ), οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς, από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης (ΜΤ) που διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές δια μέσου των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης (ΧΤ).

Η δομή του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική της μεταβολή κατά τη διάρκεια του 24ώρου και από τη χωροταξική της κατανομή. Τα ΣΗΕ ποικίλουν σε μέγεθος και δομή, ωστόσο όλα έχουν τα ίδια βασικά χαρακτηριστικά. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος, συχνότητας 50 ή 60Hz, χρησιμοποιούνται όμως και συστήματα συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Η τάση λειτουργίας πρέπει να παραμένει σταθερή στην ονομαστική τιμή. Οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης διαθέτουν επίσης και τον ουδέτερο αγωγό. Γραμμές διανομής υπάρχουν και μονοφασικές, με δύο αγωγούς.

Οι πελάτες που συνδέονται στα δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης είναι στην πλειονότητά τους βιομηχανικοί καταναλωτές ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται πελάτες οικιακής χρήσης και ένα μεγάλο μέρος πελατών εμπορικής χρήσης. Οι μονοφασικές καταναλώσεις κατανέμονται ισομερώς στις τρεις φάσεις για την ισορροπημένη λειτουργία του τριφασικού συστήματος [1.2].

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διατύπωση και η επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης για ενεργά ακτινικά δίκτυα διανομής με αντικειμενικό στόχο την ελαχιστοποίηση της περικοπής ενεργού ισχύος των εγκατεστημένων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΔΠ) στο δίκτυο. Για τον έλεγχο του δικτύου χρησιμοποιούνται στοιχεία με διακριτή συμπεριφορά, δηλαδή διακόπτες αλλαγής τοπολογίας του δικτύου, εγκάρσιες αντισταθμίσεις στους ζυγούς και Μ/Σ με συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο στους υποσταθμούς υποβιβασμού.

1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε επτά κεφάλαια :

- Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά και περιγράφονται τα κύρια δομικά στοιχεία τα ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Στο **Κεφάλαιο 3** δίνεται ο ορισμός της διεσπαρμένης παραγωγής, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που προκύπτουν από τη διεξόδυσή της στα δίκτυα διανομής και αναλύονται οι διάφοροι μέθοδοι ελέγχου της.
- Στο **Κεφάλαιο 4** χρησιμοποιώντας ως βάση το πρόβλημα της βέλτιστης ροής AC ισχύος κατασκευάζεται το μοντέλο του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης σε ενεργά ακτινικά δίκτυα διανομής.
- Στο **Κεφάλαιο 5** αναλύεται ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης και περιγράφεται το λογισμικό GAMS που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του σχετικού κώδικα επίλυσης του μοντέλου.
- Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου σε δίκτυα 34, 69 και 136 ζυγών.
- Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται μια σύνοψη της εργασίας και προτείνονται τρόποι βελτίωσης και επέκτασής της.

1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας*, τόμ. Ι, Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας, Αθήνα : Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985.
- [1.2] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Αθήνα : Εκδόσεις Συμμετρία, 2010.

ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης.

Τα δίκτυα διανομής είναι τριφασικά και έχουν ως αφετηρία τους υποσταθμούς υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ, όπου σταματά το δίκτυο μεταφοράς. Περιλαμβάνουν το σύνολο των γραμμών ηλεκτροδότησης μέσης και χαμηλής τάσης μέχρι τους μετρητές παροχής ενέργειας των καταναλωτών. Μετά από κάθε μετρητή ξεκινά η ιδιωτική εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, που αποτελείται από το εσωτερικό δίκτυο διανομής και τις συσκευές κατανάλωσης.

Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα τάσης, μέση και χαμηλή. Ως αποτέλεσμα, τα δίκτυα διανομής παρουσιάζουν δύο διακριτές βαθμίδες :

- Το τμήμα του δικτύου που βρίσκεται υπό μέση τάση (ΜΤ) ονομάζεται *πρωτεύον δίκτυο* ή *δίκτυο διανομής μέσης τάσης* και εκτείνεται από τους υποσταθμούς υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ έως και τους μετασχηματιστές διανομής, όπου έχουμε περαιτέρω υποβιβασμό της ΜΤ σε ΧΤ. Από το πρωτεύον δίκτυο τροφοδοτούνται άμεσα με τριφασική παροχή τα φορτία ΜΤ, που ανήκουν κυρίως σε μεγάλους βιομηχανικούς καταναλωτές.
- Το τμήμα του δικτύου που τροφοδοτείται από τους μετασχηματιστές διανομής βρίσκεται σε χαμηλή τάση (ΧΤ) και ονομάζεται *δευτερεύον δίκτυο* ή *δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης*. Μέσω αυτού η ενέργεια διανέμεται στους πελάτες ΧΤ, που είναι κυρίως οικιακοί αλλά και εμπορικοί καταναλωτές, άλλοι με τριφασικές και άλλοι με μονοφασικές παροχές.

Υπεύθυνοι για την λειτουργία, συντήρηση και ανάπτυξη των δικτύων διανομής διαφόρων περιοχών ή και χωρών είναι οι Διαχειριστές Δικτύων Διανομής (*Distribution System Operators – DSOs*). Ο ρόλος τους ποικίλλει, αφού κυμαίνεται από απλή διαχείριση των δικτύων έως την μερική ή και πλήρη κτήση τους. Τη διαχείριση του ελληνικού δικτύου διανομής έχει από το 2010 ο Δ.Ε.Δ.Δ.Η.Ε. (Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ενέργειας), θυγατρική εταιρεία της Δ.Ε.Η. που όμως είναι ανεξάρτητη λειτουργικά και διοικητικά.

2.2 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σε αντίθεση με τα δίκτυα μεταφοράς, που παρουσιάζουν εν γένει παρόμοια χαρακτηριστικά κατασκευής σε μεγάλο εύρος χωρών, η μορφολογία των δικτύων διανομής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος και την πυκνότητα φορτίων των καταναλωτών, που καθορίζονται τόσο από τη χωροταξική διαμόρφωση της κάθε χώρας, όσο και από τα χαρακτηριστικά δόμησης των επιμέρους περιοχών. Για το λόγο αυτό απαντώνται διαφορές μεταξύ των δικτύων διανομής ακόμη και εντός της ίδιας χώρας, όχι μόνο όσον αφορά στα χαρακτηριστικά λειτουργίας, όπως τα επίπεδα τάσης, αλλά ακόμα και στην τοποθέτηση και τον τρόπο διασύνδεσης των γραμμών.

Η θέση των αγωγών των δικτύων διανομής σε σχέση με το έδαφος είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό με βάση το οποίο διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα εναέρια και τα υπόγεια.

- Τα *εναέρια* ή *υπέργεια* δίκτυα διανομής φέρουν ως γραμμές γυμνούς αγωγούς που προσαρτώνται στην κορυφή στύλων. Παρουσιάζουν μειωμένο κόστος κατασκευής σε σχέση με τα υπόγεια ενώ, όντας πιο προσιτά, ευνοούν τον γρηγορότερο εντοπισμό και αποκατάσταση πιθανής βλάβης τους. Για τους λόγους αυτούς καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος του δικτύου.
- Στα *υπόγεια* δίκτυα οι γραμμές περνούν κάτω από την επιφάνεια της γης. Προτιμώνται κυρίως σε περιοχές που είναι πυκνοκατοικημένες, όπως οι αστικές, λόγω του περιορισμένου χώρου εγκατάστασης για την εξυπηρέτηση μεγάλης πυκνότητας φορτίων. Σε ορισμένες περιπτώσεις βέβαια συναντάται η χρήση συνδυασμού και των δύο ειδών δικτύων.

2.2.1 Θεμελιώδη Στοιχεία

Παρά τις κατασκευαστικές διαφοροποιήσεις που μπορεί να εμφανίζονται μεταξύ των δικτύων διανομής ανά περιοχές, όλα τους φέρουν κοινά βασικά χαρακτηριστικά και συντίθενται από τα ίδια στοιχεία, τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια.

2.2.1.1 Υποσταθμοί Μεταφοράς

Τα δίκτυα διανομής ξεκινούν από τους υποσταθμούς μεταφοράς ΥΤ/ΜΤ, και συγκεκριμένα από ζυγούς συνδεδεμένους με τα δευτερεύοντα τυλίγματα μετασχηματιστών υποβιβασμού. Στους υποσταθμούς βρίσκεται επίσης εγκατεστημένος εξοπλισμός προστασίας και χειρισμού του δικτύου, όπως αποζεύκτες, αυτόματοι διακόπτες, εν σειρά ή/και εν παραλλήλω χωρητικότητες, γειώσεις, μετρητικές και άλλες συσκευές [2.1].

Οι υποσταθμοί μπορούν να βρίσκονται υπό την επίβλεψη χειριστών ή να είναι σχεδιασμένοι για τηλεχειρισμό του εξοπλισμού τους. Η συνδεσμολογία μεταξύ των ζυγών των μετασχηματιστών και των γραμμών του δικτύου διανομής στο εσωτερικό των υποσταθμών μπορεί να υλοποιηθεί με ποικίλους τρόπους, καθένας από τους οποίους παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα [2.1].

2.2.1.2 Γραμμές Μέσης Τάσης

Οι γραμμές αυτές αποτελούν το πρωτεύον δίκτυο διανομής. Συνήθως οι μεγαλύτερες από αυτές συνθέτουν το βασικό κορμό του δικτύου, από διάφορα σημεία του οποίου ξεκινούν μικρότερες με στόχο την κάλυψη όλων των φορτίων της περιοχής. Το σύνολο των γραμμών του κορμού ονομάζονται *κύριες γραμμές διανομής (primary feeders)*, ενώ οι μικρότερες γραμμές αποτελούν τις *διακλαδώσεις (laterals)*.

Οι γραμμές διανομής φέρουν κατά μήκος τους πολλά διακοπτικά σημεία έτσι ώστε σε περίπτωση βλάβης να τεθεί εκτός λειτουργίας το μικρότερο δυνατό τμήμα του δικτύου διασφαλίζοντας έτσι μεγαλύτερη αξιοπιστία παροχής ενέργειας. Η ονομαστική τους τάση εξαρτάται από πλήθος παραγόντων, όπως από το είδος και την πυκνότητα φορτίου της περιοχής, το κατασκευαστικό κόστος του δικτύου, το σχεδιασμό και την ονομαστική ισχύ των συνδεδεμένων υποσταθμών αλλά και το ρυθμό αύξησης του φορτίου στην περιοχή [2.1].

2.2.1.3 Υποσταθμοί Διανομής

Στις απολήξεις του δικτύου διανομής ΜΤ βρίσκονται εγκατεστημένοι οι υποσταθμοί διανομής όπου γίνεται ο υποβιβασμός από μέση σε χαμηλή τάση και ξεκινά η τροφοδοσία του δευτερεύοντος δικτύου. Κύρια στοιχεία τους είναι οι μετασχηματιστές διανομής, ενώ περιέχουν και εξοπλισμό ρύθμισης τάσης αλλά και μέσα προστασίας, όπως διακοπτικούς μηχανισμούς.

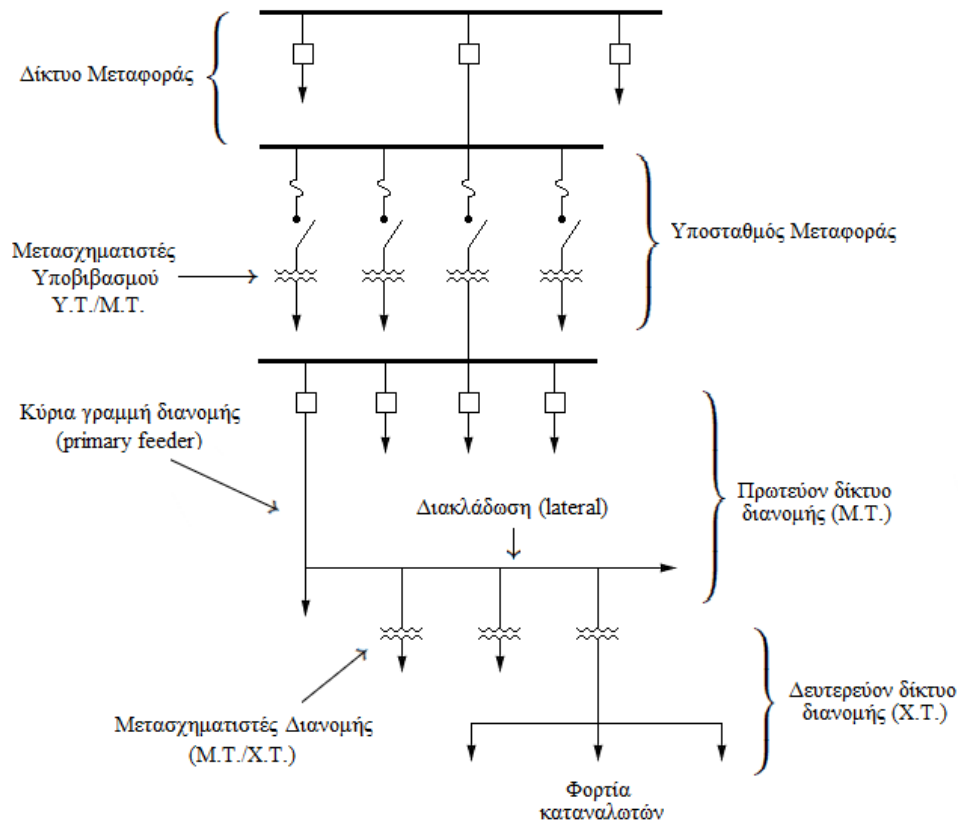
Ανάλογα με το είδος του κάθε δικτύου μεταβάλλεται όχι μόνο ο τύπος των μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται αλλά και η τοποθέτησή τους. Στα εναέρια δίκτυα, για ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασής τους οι μικρότεροι από αυτούς κατασκευάζονται για προσάρτηση σε στύλους. Αντίθετα, στα υπόγεια δίκτυα τοποθετούνται σε υπόγειους θαλάμους, φρεάτια ή ακόμα και στο εσωτερικό των κτιρίων [2.1].

2.2.1.4 Γραμμές Χαμηλής Τάσης

Πρόκειται για τις γραμμές που έχουν ως αφετηρία τους μετασχηματιστές διανομής και από τις οποίες τροφοδοτούνται άμεσα οι καταναλωτές ΧΤ Έχουν κατά κανόνα ακτινική δομή εκτός από πολύ συγκεκριμένες περιπτώσεις (όπως σε μεγάλα αστικά κέντρα ή κάποιες στρατιωτικές και νοσοκομειακές εγκαταστάσεις, όπου η αξιοπιστία του δικτύου κρίνεται σημαντικότερη των οικονομικών δαπανών κατασκευής τους).

Κατά το σχεδιασμό τους λαμβάνεται υπόψιν η δυνατότητα τροφοδότησης των φορτίων τους ακόμα και σε ενδεχόμενα αποσύνδεσης μιας κύριας γραμμής του πρωτεύοντος δικτύου (*single contingency*), ή σε κάποιες περιπτώσεις ακόμα και δύο εξ' αυτών (*double contingency*). Ο σχεδιασμός και η συνδεσμολογία των δικτύων διανομής ΧΤ θα πρέπει να εξασφαλίζουν την κατάλληλη κατανομή φορτίων μεταξύ των μετασχηματιστών διανομής, καλή ρύθμιση τάσης σε όλους τους καταναλωτές αλλά και την αντιμετώπιση βραχυκυκλωμάτων σε οποιοδήποτε σημείο τους χωρίς διακοπή της τροφοδότησης του δικτύου [2.2].

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα με τη δομή ενός τυπικού δικτύου διανομής, όπου μπορούν να διακριθούν όλα τα στοιχεία που περιγράφηκαν και η μεταξύ τους συνδεσμολογία :



Σχήμα 2.1 : Διάγραμμα δομής τυπικού δικτύου διανομής

2.2.2 Στοιχεία Ελέγχου Δικτύων Διανομής

Έχοντας περιγράψει τη γενική μορφή και τα βασικά μέρη των δικτύων διανομής, σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα στοιχεία χειρισμού τους. Ο σκοπός της εγκατάστασης του εξοπλισμού αυτού στα δίκτυα είναι η ρύθμιση ορισμένων μεγεθών λειτουργίας τους, όπως το επίπεδο τάσης, ή ακόμα και η αλλαγή της οδού ροής ισχύος των δικτύων, που μπορεί να είναι απαραίτητη για λόγους είτε ασφαλείας είτε καλής λειτουργίας.

2.2.2.1 Διακοπτικά Στοιχεία

Στα δίκτυα συμπεριλαμβάνεται πλήθος συσκευών που χρησιμοποιούνται για σύνδεση και αποσύνδεση τμημάτων τους. Διακρίνονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τη χρήση τους σε :

- **Αποζεύκτες :** Χρησιμοποιούνται για απομόνωση τμημάτων κυκλώματος αλλά μόνο όταν το κύκλωμα έχει ήδη τεθεί εκτός τάσης.
- **Διακόπτες Φορτίου :** Χρησιμοποιούνται για αποσύνδεση μερών του κυκλώματος ακόμα και κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.
- **Διακόπτες Ισχύος :** Πρόκειται για μέσα προστασίας που προκαλούν τη διακοπή λειτουργίας του κυκλώματος όταν το ρεύμα σε αυτό υπερβεί τα επιτρεπτά όρια λειτουργίας.

Με τη χρήση των διακοπών είναι δυνατή η απομόνωση διαφόρων τμημάτων του δικτύου για λόγους ασφαλείας, συντήρησης ή επισκευής διατηρώντας παράλληλα την παροχή ενέργειας στο υπόλοιπο δίκτυο. Με την τοποθέτησή τους σε κατάλληλα σημεία μπορούν να ελαχιστοποιήσουν το εκάστοτε μέρος που αποσυνδέεται αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία του δικτύου. Απαιτείται βέβαια κατάλληλος σχεδιασμός των γραμμών ώστε να μπορούν σε τέτοιες περιπτώσεις να παρέχουν εναλλακτικές οδούς παροχής ενέργειας σε σημεία του δικτύου.

Για το λόγο αυτό σε κάποια δίκτυα σχεδιάζονται γραμμές οι οποίες υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν λαμβάνουν μέρος στην τροφοδότηση, αλλά ως σκοπό έχουν τη δημιουργία συνδέσεων μεταξύ κατάλληλων σημείων των κυρίων γραμμών διανομής του δικτύου. Αυτές ονομάζονται *γραμμές διασύνδεσης (tie lines)*. Ως αποτέλεσμα, σε περίπτωση αποσύνδεσης μιας ή περισσότερων γραμμών τροφοδότησης, μπορεί να αποκατασταθεί η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των γραμμών διασύνδεσης σε σημεία που ειδάλλως θα έμεναν εκτός δικτύου.

Υπάρχουν επομένως διακόπτες κανονικά κλειστοί, οι οποίοι συνδέουν τις γραμμές μεταξύ τους κατά την φυσιολογική λειτουργία του δικτύου και άλλοι που είναι κανονικά ανοικτοί και κλείνουν μόνον όταν κριθεί απαραίτητο. Με αυτό τον τρόπο πραγματοποιείται *επαναδιαμόρφωση (reconfiguration)* του δικτύου ανακατευθύνοντας τη ροή ισχύος σε διαφορετικά τμήματά του. Οι κανονικά κλειστοί ονομάζονται *διακόπτες απομόνωσης (sectionalizing switches)* ενώ οι κανονικά ανοικτοί λέγονται *αποζεύκτες ανοικτοί υπό φορτίο (tie switches)*.

Οι διακόπτες και των δύο κατηγοριών μπορούν να είναι χειροκίνητοι ή τηλεχειριζόμενοι. Ο τηλεχειρισμός είναι εφικτός με διάφορες μεθόδους. Για σχετικά μικρές αποστάσεις είναι δυνατή η χρήση της τεχνολογίας "φέροντος ρεύματος" (*carrier current*) μια μέθοδος ΑΜ μετάδοσης που χρησιμοποιεί τα καλώδια του ίδιου του δικτύου για μετάδοση σημάτων χαμηλής ενέργειας. Για μεγαλύτερες αποστάσεις χρησιμοποιείται ασύρματη επικοινωνία με ραδιοκύματα, ή ακόμα χρήση τηλεφωνικών γραμμών για μετάδοση των σημάτων ελέγχου.

Η χρήση των διακοπών για επαναδιαμόρφωση του δικτύου δεν συμβαίνει μόνο λόγω αποσύνδεσης κάποιου τμήματος τροφοδότησης. Σε σύγχρονα δίκτυα δίνεται η δυνατότητα χρήσης τηλεχειριζόμενων διακοπών για μεταβολή της τοπολογίας τους σε πραγματικό χρόνο. Αυτό μπορεί να συμβεί σε περίπτωση που κατά τη λειτουργία του δικτύου παρατηρηθεί παραβίαση διαφόρων περιορισμών, όπως για παράδειγμα των σχετικών με τα επίπεδα τάσης ή ρεύματος των γραμμών. Τότε, με κατάλληλη σύνδεση/αποσύνδεση γραμμών μέσω χειρισμών διακοπών, σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να εντοπιστεί μια τοπολογία του δικτύου η οποία να εξασφαλίζει την παροχή ενέργειας σε όλα τα φορτία και ταυτόχρονα να επαναφέρει όλα τα μεγέθη εντός των απαιτούμενων ορίων λειτουργίας.

Αντίστοιχη διαδικασία μπορεί να ακολουθηθεί έχοντας ως σκοπό όχι μόνο την αποκατάσταση της ομαλής λειτουργίας του δικτύου, αλλά και το οικονομικό όφελος του διαχειριστή, με την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του δικτύου. Σε αυτό το πλαίσιο χαρακτηριστική πρακτική, που έχει αποτελέσει και αποτελεί ακόμα στόχο πολλών προβλημάτων βελτιστοποίησης, είναι η εύρεση των χειρισμών των διακοπών του δικτύου με τους οποίους επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος στις γραμμές του [2.3].

2.2.2.2 Χωρητικές Αντισταθμίσεις

Εκτός από εξοπλισμό ασφαλείας, οι υποσταθμοί μεταφοράς αλλά και οι μετασχηματιστές διανομής συνήθως διαθέτουν εγκατεστημένες ομάδες πυκνωτών με σκοπό τη ρύθμιση της τάσης αλλά και τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος των γραμμών του δικτύου. Η σύνδεση των συστοιχιών πυκνωτών είναι δυνατόν να γίνει σε σειρά ή παράλληλα με τις γραμμές. Η εγκατάσταση εν σειρά χωρητικών αντισταθμίσεων έχει πολύ περιορισμένες εφαρμογές και για το λόγο αυτό επιλέγεται σε ελάχιστες περιπτώσεις [2.1].

Αντίθετα, ευρεία χρήση συναντούν οι πυκνωτές που συνδέονται παράλληλα με τις γραμμές και ονομάζονται *εγκάρσιοι πυκνωτές (shunt capacitors)* ή *εγκάρσιες αντισταθμίσεις*. Αυτό συμβαίνει λόγω της δυνατότητάς τους να παρέχουν άεργο ισχύ στο δίκτυο αντισταθμίζοντας έτσι μέρος της αέργου κατανάλωσης από τις αντιδράσεις των γραμμών. Με την τοποθέτησή τους σε ζυγούς του δικτύου συμβάλλουν επίσης στη μείωση της πτώσης τάσης μεταξύ των γραμμών του αλλά και στη μεταβολή του συντελεστή ισχύος προς τη μονάδα. Ιδιαίτερα χρήσιμες είναι οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις με πολλαπλές καταστάσεις λειτουργίας, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της χωρητικότητάς τους όσο το σύστημα βρίσκεται υπό φορτίο. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η ρύθμιση της επίδρασής τους στο δίκτυο ανάλογα με τις ανάγκες κάλυψης αέργου ισχύος ή προσαρμογής επιπέδων τάσεως που παροσιάζονται κάθε στιγμή.

2.2.2.3 Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ

Οι μετασχηματιστές υποβιβασμού ΥΤ σε ΜΤ είναι συνήθως εξοπλισμένοι με συστήματα που δίνουν τη δυνατότητα μεταβολής της τάσης εξόδου τους υπό φορτίο (*Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο – ΣΑΤΥΦ*).

Με τη χρήση πολλαπλών λήψεων στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή και κινητών επαφών στο δευτερεύον καθίσταται εφικτή η αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού των τυλιγμάτων τους χωρίς διακοπή της ροής ισχύος [2.4]. Η μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού δεν είναι συνεχής αλλά με βήματα, κατά ένα ποσοστό του αρχικού λόγου ανά βήμα [2.5]. Συνήθως, η μέγιστη δυνατή ποσοστιαία αύξηση του λόγου μετασχηματισμού είναι ίση με τη μέγιστη δυνατή ποσοστιαία μείωσή του.

Με τη χρήση των μετασχηματιστών με ΣΑΤΥΦ δύναται να προκληθεί αύξηση ή μείωση του επιπέδου της τάσης στους ζυγούς του δικτύου διανομής που βρίσκονται στους υποσταθμούς υποβιβασμού, μεταβάλλοντας αντίστοιχα τις τιμές τάσεων σε όλα τα υπόλοιπα σημεία του. Επομένως, σε περιπτώσεις παραβίασης των περιορισμών τάσης σε τμήμα του πρωτεύοντος δικτύου, με μια ή περισσότερες αλλαγές λήψεων στον μετασχηματιστή της κατάλληλης κύριας γραμμής τροφοδοσίας είναι δυνατή η αποκατάσταση της λειτουργίας του εντός των επιθυμητών ορίων.

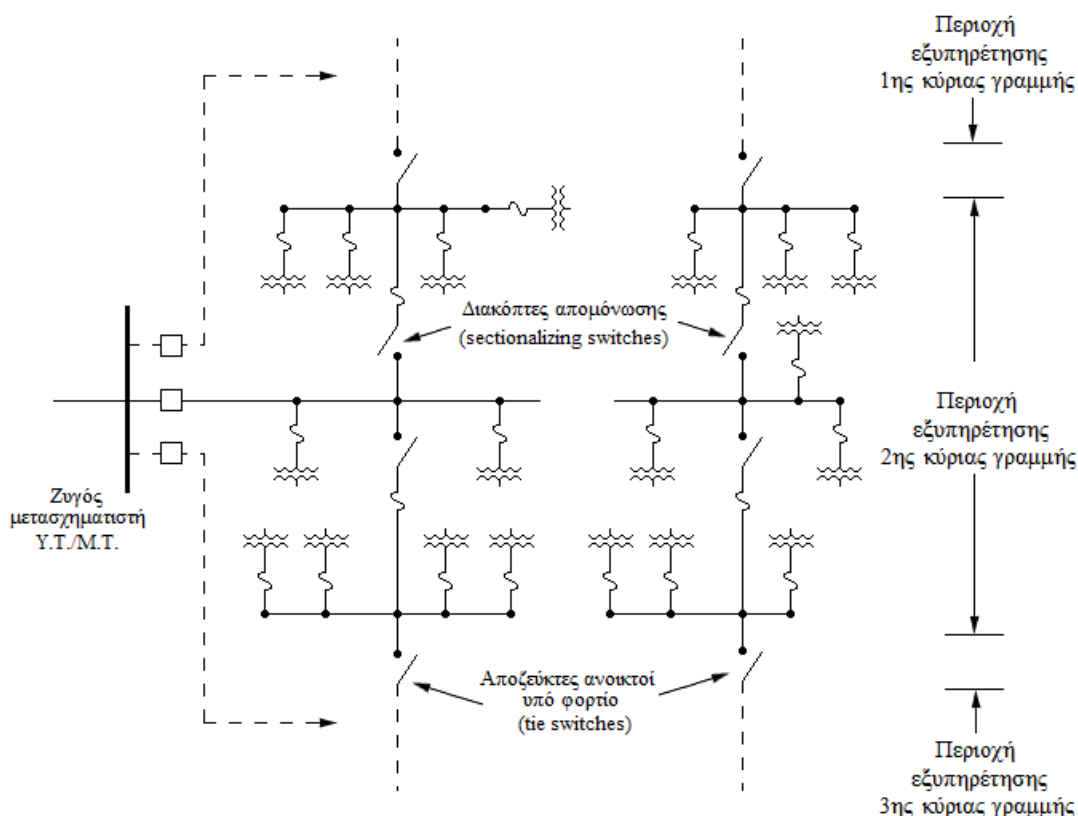
2.2.3 Τοπολογίες Δικτύων Διανομής

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η μορφή των δικτύων διανομής ποικίλλει ανάλογα με τα ιδιάζοντα χωροταξικά και δομικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής. Έτσι, ανάλογα με τη θέση και το είδος των φορτίων τροφοδότησης τα δίκτυα μπορεί να εμφανίζουν από διαφορετικές τιμές λειτουργίας έως και διαφορετική συνδεσμολογία μεταξύ των γραμμών. Συγκεκριμένα διακρίνουμε τις εξής βασικές τοπολογίες δικτύων:

2.2.3.1 Ακτινικό Δίκτυο Διανομής

Αυτή η τοπολογία χρησιμοποιείται κυρίως σε εναέρια δίκτυα. Σε αυτή κάθε κύρια γραμμή διανομής συνδέεται μόνο από το ένα άκρο του σε μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης και διακλαδίζεται σε ολοένα μικρότερες γραμμές δημιουργώντας έτσι δενδροειδές δίκτυο, με απολήξεις τους μετασχηματιστές διανομής. Τόσο η προστασία όσο και η επέκταση των συστημάτων αυτών είναι σχετικά εύκολες λόγω του απλού σχεδιασμού τους. Ωστόσο βασικό μειονέκτημα είναι η σχετικά μεγάλη πτώση τάσης που σημειώνεται στα άκρα τους με αποτέλεσμα πιο αυξημένη δυσκολία στη ρύθμιση του επιπέδου τάσης τους. Επίσης, η αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτά είναι περιορισμένη. Για παράδειγμα, σε περίπτωση αποσύνδεσης μιας γραμμής για αντικατάσταση ή συντήρηση, τίθεται εκτός λειτουργίας και ολόκληρο το τμήμα του δικτύου που την ακολουθεί. Το φαινόμενο αυτό αντιμετωπίζεται εν μέρει λόγω της ύπαρξης γραμμών διασύνδεσης που συνδέουν μεταξύ τους διάφορα σημεία κατά μήκος των κύριων γραμμών διανομής των δικτύων με ακτινική τοπολογία. Συνεπώς, στην παραπάνω περίπτωση, αφού απομονωθεί με άνοιγμα των κατάλληλων διακοπών η γραμμή ενδιαφέροντος, το υπόλοιπο μέρος του δικτύου θα συνδεθεί, κλείνοντας τους κατάλληλους αποζεύκτες, σε κάποια γειτονική γραμμή διανομής.

Στο Σχήμα 2.2 μπορεί να παρατηρηθεί η δομή ενός ακτινικού δικτύου διανομής. Φαίνονται επίσης και οι διακόπτες απομόνωσης αλλά και τα σημεία σύνδεσης γειτονικών κύριων γραμμών διανομής μέσω των ανοικτών υπό φορτίο αποζευκτών.



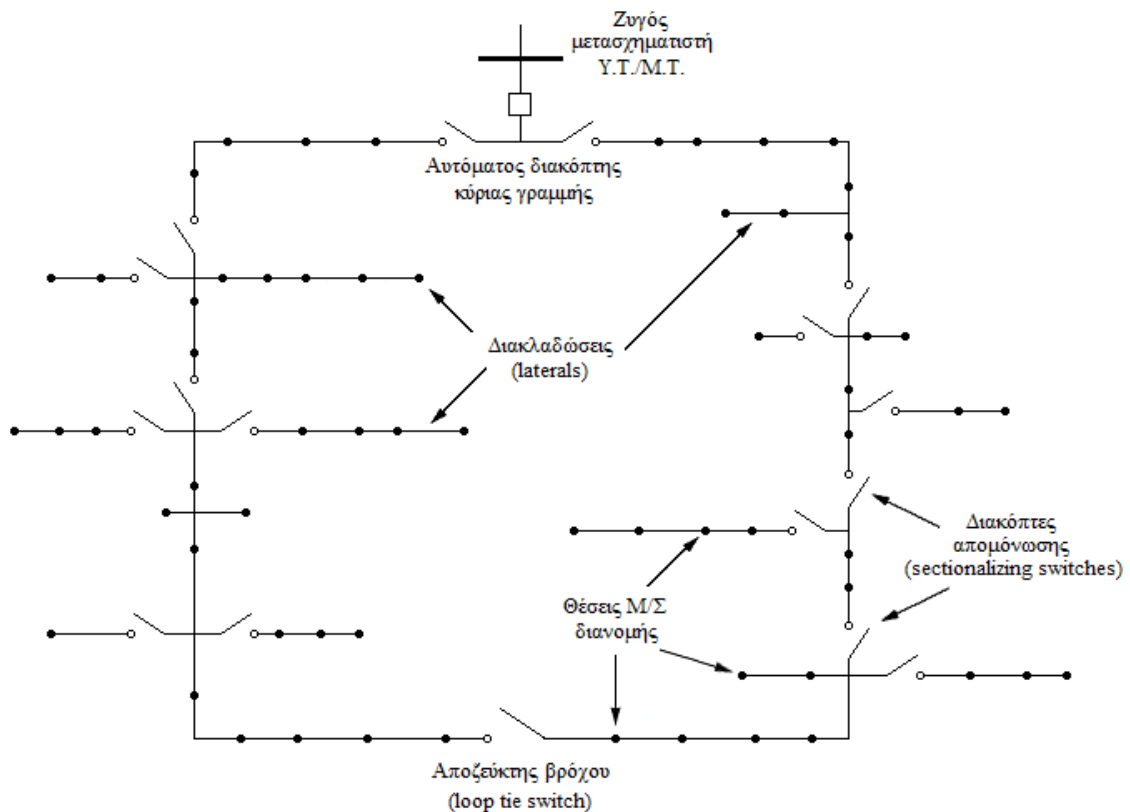
Σχήμα 2.2 : Ακτινικό δίκτυο διανομής MT

2.2.3.2 Βροχοειδές Δίκτυο Διανομής

Στα δίκτυα με αυτή την τοπολογία παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια στις κύριες γραμμές διανομής από τα δύο άκρα τους, τα οποία μπορεί να βρίσκονται στον ίδιο ή και σε διαφορετικούς μετασχηματιστές υποβιβασμού.

Κάθε κύρια γραμμή σχηματίζει βρόχο μέσω ενός αποζεύκτη ο οποίος παραμένει ανοικτός σε κανονική λειτουργία διαχωρίζοντας τα δυο μισά του βρόχου. Καθένα από αυτά τα μισά σχεδιάζεται ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει τα συνδεδεμένα σε αυτό φορτία μαζί με τα φορτία του άλλου μισού. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η μεταφορά των φορτίων του ενός μισού στο άλλο σε περίπτωση βλάβης τμήματος της κύριας γραμμής, κλείνοντας τον αποζεύκτη στο σημείο σύνδεσης.

Τα βροχοειδή δίκτυα είναι κυρίως υπόγεια και εμφανίζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία παροχής ενέργειας από τα ακτινικά. Η δομή ενός τυπικού βροχοειδούς δικτύου διανομής εμφανίζεται στο Σχήμα 2.3.

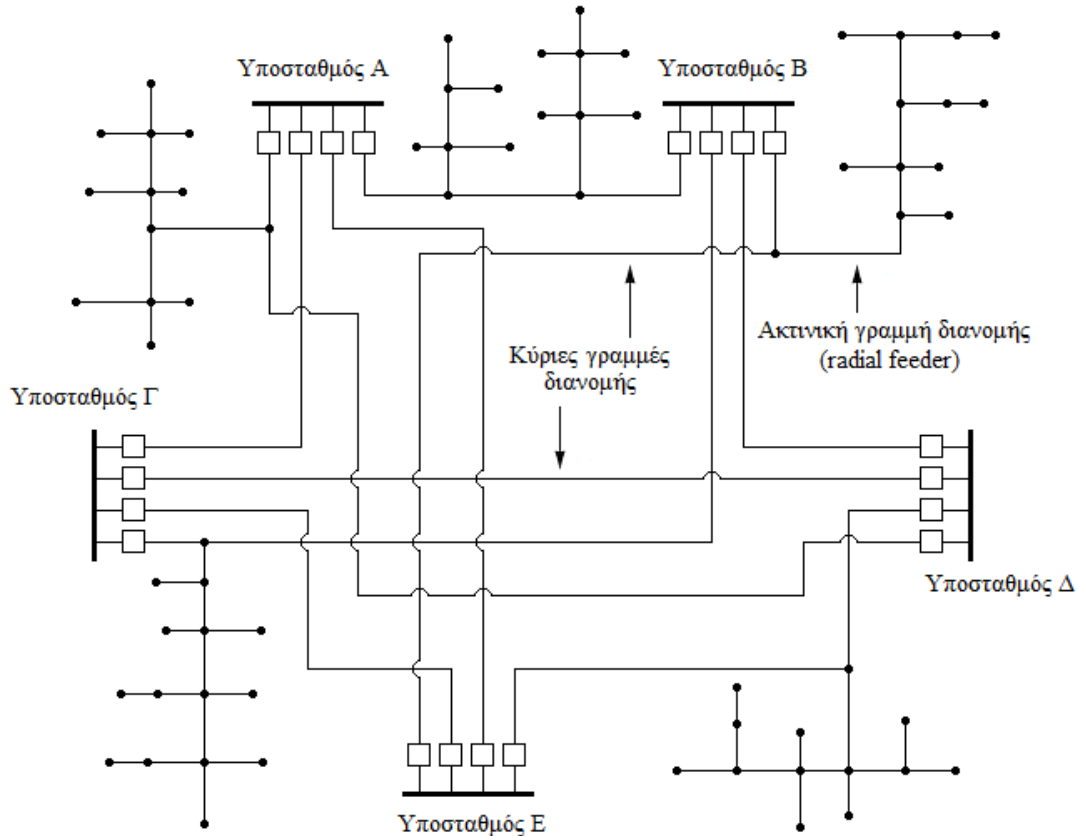


Σχήμα 2.3 : Βροχοειδές δίκτυο διανομής MT

2.2.3.3 Τοπολογία primary network

Πρόκειται για ένα σύνολο γραμμών διανομής στο οποίο παρέχεται ενέργεια από ένα αριθμό υποσταθμών. Εδώ οι κύριες γραμμές διανομής τροφοδοτούνται από δύο υποσταθμούς, ένα σε κάθε άκρο τους, και από αυτές ξεκινούν οι ακτινικές γραμμές διανομής (*radial feeders*), οι οποίες εξυπηρετούν τα φορτία του δικτύου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.

Τα δίκτυα αυτής της μορφής μπορούν να εξυπηρετήσουν φορτία από πολλές κατευθύνσεις. Σε γενικές γραμμές, οι απώλειές τους είναι χαμηλότερες από αυτές σε αντίστοιχου μεγέθους ακτινικά ή βροχοειδή δίκτυα και παρέχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία. Παρ' όλα αυτά παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυσκολία στο σχεδιασμό και το χειρισμό.



Σχήμα 2.4 : Δίκτυο διανομής MT με τοπολογία primary network

2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στην υποενότητα 2.2.2 δόθηκε μια περιγραφή των στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ελέγξουν τη λειτουργία του δικτύου διανομής. Η δυνατότητα τηλεχειρισμού τους στις σύγχρονες εγκαταστάσεις έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη τεχνικών που ρυθμίζουν ολόκληρα τμήματα δικτύου με ταυτόχρονο χειρισμό όλων των στοιχείων ελέγχου που βρίσκονται σε αυτά μέσω ευφών συστημάτων. Ανάλογα με την κλίμακα στην οποία επιδιώκουν τον έλεγχο του δικτύου, τα συστήματα αυτά διακρίνονται σε κεντρικού και αποκεντρωμένου ελέγχου.

2.3.1 Κεντρικός Έλεγχος

Τα συστήματα κεντρικού ελέγχου έχουν τη δυνατότητα χειρισμού του συνόλου των στοιχείων ενός δικτύου από ένα κεντρικό σημείο. Συγκεντρώνοντας επαρκή δεδομένα

μετρήσεων από διάφορους ζυγούς σε επιλεγμένα σημεία του δικτύου (δεδομένου ότι αυτό είναι επαρκώς παρατηρήσιμο), το κεντρικό σύστημα υπολογίζει τις τιμές λειτουργίας των μεγεθών σε κάθε σημείο αυτού και έτσι μπορεί να επιβλέπει τη λειτουργία τους. Με την εμφάνιση κάποιας διαταραχής, το σύστημα καταστρώνει και επιλύει ένα ολικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, από το οποίο προκύπτουν τα νέα σημεία λειτουργίας των στοιχείων ελέγχου. Μπορεί να κριθούν απαραίτητες κινήσεις διακοπών, αλλαγή επιπέδων τάσης των Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ, ζεύξη/απόζευξη χωρητικών αντισταθμίσεων, ή και περιορισμός παραγωγής γεννητριών διεσπαρμένης παραγωγής που μπορεί να είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο.

Ο κεντρικός έλεγχος παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι επιτυγχάνει το βέλτιστο σημείο ελέγχου για ολόκληρο του δίκτυο, με τις λύσεις που εξάγει να εξασφαλίζουν την καλύτερη δυνατή οικονομική διαχείριση του συνόλου των στοιχείων του δικτύου. Ο μεγάλος όγκος, ωστόσο, των δεδομένων που απαιτούν επεξεργασία έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται πολύς χρόνος για την εξαγωγή λύσης, ιδιαίτερα σε δίκτυα με μεγάλο αριθμό ζυγών. Ένα χαρακτηριστικό πεδίο εφαρμογής του κεντρικού ελέγχου σε δίκτυα διανομής αποτελεί η επίλυση του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος [2.6], [2.7].

2.3.2 Αποκεντρωμένος Έλεγχος

Τα συστήματα αποκεντρωμένου ελέγχου λειτουργούν αντίστοιχα με αυτά του κεντρικού όσον αφορά τη μέθοδο συγκέντρωσης δεδομένων και την διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η διαφορά βρίσκεται στο ότι υπάρχουν πολλά διανεμημένα σημεία ελέγχου σε όλο το δίκτυο, καθένα από τα οποία είναι υπεύθυνο για την τοπική επίβλεψη και ρύθμιση ενός συγκεκριμένου τμήματος. Το συνολικό πρόβλημα βελτιστοποίησης λοιπόν διατυπώνεται ως μικρότερα τοπικά υποπροβλήματα που καλούνται να επιλυθούν από κάθε σύστημα με χρήση των τοπικών σε αυτό στοιχείων.

Αν και στις περισσότερες περιπτώσεις εξασφαλίζεται σημαντική εξοικονόμηση χρόνου με αυτή την τεχνική, η λύση στην οποία καταλήγει το σύστημα είναι η βέλτιστη εν γένει μόνο τοπικά και όχι για όλο το δίκτυο. Επίσης θα παρατηρηθεί δυσκολία εύρεσης λύσεων σε ακραίες περιπτώσεις που κάποια διαταραχή του δικτύου για την εξάλειψή της απαιτεί τη συμμετοχή πολλών και απομακρυσμένων σημείων ελέγχου.

2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] T. Gönen, *Electric power distribution system engineering*, 2nd ed, CRC Press, 2008.
- [2.2] H. P. Seelye, *Electrical Distribution Engineering*, 1st ed., New York : McGraw-Hill, 1930.
- [2.3] M. E. Baran and F. F Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1497, Apr. 1989.
- [2.4] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμ. Ι, Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας*, Αθήνα : Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985.
- [2.5] Π. Σ. Γεωργιλιάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015.
Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα : <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/2013>
- [2.6] M. J. Dolan, E. M. Davidson, I. Kockar, G.W. Ault and S.D.J. McArthur, "Distribution power flow management utilizing an online optimal power flow technique," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 790–799, Jan. 2012.
- [2.7] M. J. Dolan, E. M. Davidson, G.W. Ault, K.R.W. Bell and S.D.J. McArthur, "Distribution power flow management utilizing an online constraint programming method," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 798–805, Mar. 2013.

ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΟΡΙΣΜΟΣ

Η Διεσπαρμένη Παραγωγή (ΔΠ – Distributed Generation - DG) αποτελεί μια νέα τάση στο πεδίο της ηλεκτρικής ενέργειας. Ως πρακτική ωστόσο, έχει κάνει την εμφάνισή της στα πρώτα ΣΗΕ, τα οποία λειτουργούσαν με συνεχές ρεύμα. Τέτοιου είδους δίκτυα επέβαλλαν περιορισμούς στη μέγιστη τιμή της παρεχόμενης τάσης, απαιτώντας μικρές αποστάσεις μεταξύ καταναλωτών και παραγωγής. Το αποτέλεσμα ήταν οι πελάτες να τροφοδοτούνται από τοπικά κέντρα παραγωγής και μονάδες αποθήκευσης. Για την περιγραφή της ΔΠ στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται και ποικίλοι άλλοι όροι, όπως "διάσπαρτη" (dispersed), "αποκεντρωμένη" (decentralized) ή "ενσωματωμένη" (embedded) παραγωγή.

Λόγω της σχετικά πρόσφατης εμφάνισής της δεν έχει δοθεί ακόμα ένας σαφής γενικός ορισμός της ΔΠ [3.1], με χώρες και φορείς να διαφωνούν ως προς τα χαρακτηριστικά της. Σύμφωνα με την [3.2], για απόδοση ενός κοινώς αποδεκτού ορισμού της ΔΠ πρέπει να προσδιοριστούν κάποιες σχετικές με αυτή παράμετροι, όπως ο σκοπός και η θέση της, η τάξη μεγέθους της ισχύος παραγωγής, η περιοχή τροφοδότησης, το εύρος διείσδυσης, το είδος της τεχνολογίας, ο τρόπος λειτουργίας της, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αλλά και η ιδιοκτησία των μονάδων παραγωγής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα υιοθετηθεί ο ορισμός που χρησιμοποιείται στην Ευρωπαϊκή νομοθεσία [3.3] :

Διεσπαρμένη παραγωγή είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέεται άμεσα στο δίκτυο διανομής.

Με τον ορισμό αυτό προσδιορίζεται η θέση της ΔΠ - στα δίκτυα διανομής - και ταυτόχρονα εξάγεται έμμεσα ένα άνω όριο της ισχύος παραγωγής, αν ληφθεί υπόψιν ότι δεν είναι δυνατή η σύνδεση μονάδων παραγωγής ισχύος μεγαλύτερης των 300 MW σε μέσα ή χαμηλά επίπεδα τάσης, λόγω τεχνικών περιορισμών.

Ωστόσο ο ορισμός που επιλέχθηκε δεν παύει να είναι αρκετά ευρύς, περιλαμβάνοντας μονάδες ΔΠ με σημαντικές διαφορές τόσο στα ονομαστικά μεγέθη όσο και στον τρόπο λειτουργίας τους.

Ανάλογα με την τάξη μεγέθους της ισχύος παραγωγής, η ΔΠ χαρακτηρίζεται ως :

- | | | | | |
|----------------------|---|-----------|-----|--------|
| • Πολύ μικρή (micro) | – | Από 1 W | έως | 5 kW |
| • Μικρή (small) | – | Από 5 kW | έως | 5 MW |
| • Μεσαία (medium) | – | Από 5 MW | έως | 50 MW |
| • Μεγάλη (large) | – | Από 50 MW | έως | 300 MW |

Υπάρχει πλήθος τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στις μονάδες ΔΠ. Αυτές μπορούν να διακριθούν στις εξής κατηγορίες [3.2]:

- *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)*, που περιλαμβάνουν τις ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά, τα συστήματα ηλιοθερμίας, τα μικρά υδροηλεκτρικά αλλά και μονάδες εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας (ενέργειας του ωκεανού).
- *Μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (Cogeneration of Heat and Power – CHP)* όπως μηχανές εσωτερικής καύσης, κυψελών καυσίμου, γεωθερμίας και βιομάζας.
- *Συνδυασμός των δύο προηγούμενων κατηγοριών παραγωγής*, δηλαδή μονάδων ΑΠΕ με συμβατικές μονάδες παραγωγής.

Ο σκοπός της ΔΠ αναγνωρίζεται από το σύνολο των ερευνητών ως η παροχή ενεργού ισχύος στο δίκτυο. Αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάλυψη των τοπικών φορτίων ή για ενίσχυση του δικτύου. Η παροχή αέργου ισχύος, αν και είναι εξίσου δυνατή, δε θεωρείται αναγκαία.

Η ανάπτυξη της ΔΠ στη σημερινή εποχή οφείλεται σε ένα συνδυασμό διαφόρων τεχνολογικών και οικονομικών παραγόντων, οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι [3.4],[3.5] :

- Η μείωση του ρυθμού ανάπτυξης των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες.
- Η αύξηση στις απαιτήσεις αξιοπιστίας από τους καταναλωτές.
- Η μείωση του κόστους μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που επιτυγχάνεται με την παρουσία μονάδων ΔΠ κοντά στο φορτίο.
- Η εξέλιξη στις νέες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η περιβαλλοντική μέριμνα.

Συγκεκριμένα στην Ευρώπη η αύξηση στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθεί από το 1990 αύξηση της τάξης του 1,7% ανά έτος και υπολογίζεται να συνεχίσει στο 1,5% έως το 2020 [3.6]. Με αυτά τα δεδομένα, οι σημαντικότερες αλλαγές που θα υλοποιηθούν στα δίκτυα διανομής συμπεριλαμβάνουν τη σταδιακά αυξανόμενη ενσωμάτωση μικρών και μεσαίων μονάδων ΔΠ και θα έχουν ως αποτέλεσμα τη σταδιακή μετάβαση σε νέους τύπους δομής και ελέγχου του δικτύου [3.1].

3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Η αυξανόμενη διείσδυση της ΔΠ στα δίκτυα διανομής θέτει τα θεμέλια για τη δημιουργία καινούριων αρχιτεκτονικών σχεδιασμού συστημάτων με πολλά πλεονεκτήματα, αλλά ταυτόχρονα μπορεί να οδηγήσει τα δίκτυα σε μη αναμενόμενη συμπεριφορά.

Τα αποτελέσματα της εγκατάστασης μιας νέας μονάδας ΔΠ εξαρτώνται σημαντικά τόσο από τη θέση σύνδεσής της στο δίκτυο όσο και από τα λειτουργικά της χαρακτηριστικά. Συνεπώς, πριν την απόφαση ενσωμάτωσής της, απαιτείται εκ των προτέρων ανάλυση και αξιολόγηση των επιδράσεών της σε όλο το σύστημα. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν τα σημαντικότερα οφέλη και οι επιπτώσεις της ΔΠ σε τεχνικά ζητήματα των δικτύων.

3.2.1 Πλεονεκτήματα

Η εγκατάσταση μονάδων ΔΠ στα δίκτυα διανομής δεν παρουσιάζει μόνο οικονομικά πλεονεκτήματα, αλλά βελτιώνει και ορισμένα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά, αποτελώντας έτσι μια ελκυστική επιλογή για τους διαχειριστές των δικτύων. Τα σημαντικότερα οφέλη για τα δίκτυα είναι τα εξής :

- Δίνεται η δυνατότητα εξυπηρέτησης μέρους των φορτίων των δικτύων από τοπικές μονάδες ΔΠ με αποτέλεσμα τη μείωση της εισροής ισχύος από το επίπεδο μεταφοράς. Παράλληλα, επιτυγχάνεται αποσυμφόρηση στα συστήματα μεταφοράς αλλά και στα δίκτυα διανομής και ελαχιστοποιείται η πιθανότητα παραβίασης των λειτουργικών ορίων τους. Έτσι επιτυγχάνεται ευκολότερος χειρισμός των δικτύων και καλύτερη συντήρηση του εξοπλισμού τους λόγω μειωμένης καταπόνησης.
- Εκτός από την παροχή ενεργού ισχύος, η ΔΠ μπορεί να προσφέρει στο δίκτυο και ελεγχόμενη άεργο ισχύ, παρέχοντας παρόμοια οφέλη με τις χωρητικότητες αντιστάθμισης, δηλαδή δυνατότητα ρύθμισης των επιπέδων τάσης και κάλυψη των αέργων καταναλώσεων των γραμμών του δικτύου.
- Η σύνδεση μονάδων ΔΠ σε ένα δίκτυο επηρεάζει άμεσα το μέγεθος των απωλειών στις γραμμές του. Τα αποτελέσματα εξαρτώνται από το είδος και τα χαρακτηριστικά του δικτύου αλλά και το είδος και τη θέση σύνδεσης των μονάδων ΔΠ. Έτσι, οι απώλειες ενεργού και αέργου ισχύος ενός δικτύου μπορεί μετά από ενσωμάτωση νέας μονάδας είτε να μειωθούν είτε να αυξηθούν, ανάλογα με τις συνθήκες. Βέβαια, το συγκεκριμένο θέμα έχει προσελκύσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον με αποτέλεσμα να έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι με τους οποίους υπολογίζονται οι βέλτιστες θέσεις τοποθέτησης μονάδων ΔΠ ώστε όχι μόνο να επιτυγχάνεται μείωση των απωλειών ισχύος, αλλά αυτή να είναι και η μέγιστη δυνατή [3.7],[3.8]. Εξασφαλίζεται με τον τρόπο αυτό σημαντικό κέρδος, αφού ως γνωστόν το στάδιο διανομής εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό απωλειών ενεργού ισχύος σε σχέση με τα υπόλοιπα λόγω της συγκριτικά μεγαλύτερης τιμής των αντιστάσεων των γραμμών του.
- Οι μονάδες ΔΠ, με τη χρήση μέσων αποθήκευσης της παραγόμενης ισχύος, μπορούν να λειτουργήσουν για παροχή εφεδρείας στο δίκτυο και κάλυψη τοπικών φορτίων σε περιπτώσεις απότομης διακοπής της ηλεκτροδότησης.

3.2.2 Μειονεκτήματα

Από τις σημαντικότερες συνέπειες της σύνδεσης μονάδων ΔΠ στα δίκτυα διανομής είναι η αμφίδρομη ροή ισχύος στις γραμμές τους. Αυτή μπορεί να οδηγήσει όχι μόνο σε διαταραχές στην τάση λειτουργίας, αλλά και να προκαλέσει προβλήματα σχετικά με την προστασία του συστήματος, καθιστώντας πιο πολύπλοκη την ανίχνευση και αντιμετώπιση υπερφορτίσεων και βραχυκυκλωμάτων.

3.2.2.1 Ποιότητα τάσης

Η ποιότητα τάσης αποτελεί σημαντικό στοιχείο αξιολόγησης ενός δικτύου και σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά της παρεχόμενης από αυτό τάσης. Η διασφάλισή της απαιτεί την τήρηση ορισμένων προϋποθέσεων :

- Διατήρηση συχνότητας και πλάτους τάσης σταθερών και εντός συγκεκριμένων ορίων από τις ονομαστικές τιμές.
- Περιορισμός των αρμονικών συνιστωσών.
- Διατήρηση συμμετρίας μεταξύ των φάσεων.
- Αποφυγή απότομων διαταραχών τάσης (βυθίσεις/ανυψώσεις, flicker).
- Αποφυγή διακοπών παροχής τάσης.

Με την εγκατάσταση ΔΠ στα δίκτυα διανομής εμφανίζεται συνεχής διακύμανση της παραγωγής ισχύος η οποία, σε συνδυασμό με την ήδη υπάρχουσα διακύμανση φορτίου οδηγεί σε συνεχή μετάβαση του συστήματος από μια κατάσταση λειτουργίας σε άλλη. Επομένως, προκαλούνται ταχείες μεταβολές στην τάση που μπορεί να οδηγήσουν σε παραβίαση των άνω προϋποθέσεων και πρόκληση διαταραχών, τοπικών ή ευρύτερων, προξενώντας πιθανότατα βλάβες σε εξοπλισμό του δικτύου ή και των καταναλωτών.

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου απαιτείται διεξοδική ανάλυση ώστε να κατανοηθούν όλοι οι τρόποι με τους οποίους η εγκατάσταση μιας νέας μονάδας ΔΠ επηρεάζει το υπάρχον δίκτυο. Έχουν μάλιστα γραφτεί σχετικές εργασίες κάποιες από τις οποίες αναλύουν τα θέματα των διαταραχών της τάσης [3.9],[3.10] και άλλες που προτείνουν τεχνικές ελέγχου της [3.11].

3.2.2.2 Προστασία δικτύου

Κατά το σχεδιασμό πολλών σημερινών δικτύων διανομής δεν είχε μελετηθεί το ενδεχόμενο άμεσης ενσωμάτωσης σε αυτά μονάδων παραγωγής. Εύλογα λοιπόν, η ροή ισχύος θεωρούταν με κατεύθυνση αποκλειστικά από τους υποσταθμούς προς στους καταναλωτές. Με τη διείσδυση της ΔΠ δημιουργείται πλέον το ενδεχόμενο ροής ισχύος από τους καταναλωτές προς το δίκτυο ή ακόμα και από το δίκτυο διανομής προς το σύστημα μεταφοράς σε περιπτώσεις υψηλής παραγωγής και χαμηλής ζήτησης.

Τα συστήματα προστασίας και ελέγχου που είναι εγκατεστημένα όμως, έχουν αναπτυχθεί χωρίς να λαμβάνουν υπόψιν τους την αμφίδρομη ροή ισχύος. Ως αποτέλεσμα, πιθανά ρεύματα σφάλματος (fault currents) έχουν επιπλέον διόδους ροής στο δίκτυο που δεν

υπόκεινται σε έλεγχο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αδυναμία εντοπισμού υπάρχοντος σφάλματος σε περίπτωση υπερεντάσεως.

Μια λύση στο εν λόγω πρόβλημα είναι η εγκατάσταση μέσω προστασίας σχεδιασμένων για αμφίδρομη ανίχνευση σφαλμάτων. Στο πλαίσιο αυτό είναι απαραίτητη η συνδυασμένη δράση του εξοπλισμού προστασίας του δικτύου με αυτόν των μονάδων ΔΠ ώστε να αποφευχθούν περιπτώσεις δημιουργίας τμημάτων δικτύου που είναι αποσυνδεδεμένα από το κυρίως δίκτυο και τροφοδοτούνται μόνο από ΔΠ (νησιδοποίηση).

3.3 ΚΑΝΟΝΕΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

3.3.1 Μέθοδοι ελέγχου μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Για τη μετρίαση ή και αποφυγή των δυσμενών επιπτώσεων από τη σύνδεση μονάδων ΔΠ στα δίκτυα διανομής έχουν αναπτυχθεί ποικίλες τεχνικές ελέγχου της λειτουργίας τους. Οι τεχνικές αυτές παρουσιάζουν διαφορές στο είδος και το βαθμό του ελέγχου που εισάγουν και τα αποτελέσματα της εφαρμογής τους εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά των μονάδων παραγωγής, τις εκάστοτε συνθήκες ζήτησης ισχύος αλλά και τους στόχους των διαχειριστών των δικτύων.

Βάσει των μεθόδων ελέγχου των μονάδων ΔΠ που χρησιμοποιούν, τα δίκτυα διανομής μπορούν να ενταχθούν σε δύο θεμελιώδεις κατηγορίες [3.12] : τα *παθητικά* και τα *ενεργά*.

3.3.1.1 Παθητικά Δίκτυα

Τα πρώτα δίκτυα που ενσωμάτωσαν μονάδες ΔΠ υπήρξαν παθητικά. Σε αυτά η ένταξη μιας νέας μονάδας ΔΠ γίνεται βάσει της αρχής "*fit and forget*". Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο, η επίδραση της ΔΠ στο δίκτυο μελετάται κατά το στάδιο σχεδιασμού και η ενσωμάτωσή της γίνεται μόνο όταν στο χειρότερο δυνατό σενάριο λειτουργίας δεν παραβιάζεται κανένας από τους περιορισμούς του δικτύου.

Η συγκεκριμένη φιλοσοφία είναι πολύ συντηρητική αφού δεν είναι πολλές οι περιπτώσεις στις οποίες κάποια μονάδα παραγωγής θα πληροί τα κριτήρια για την ένταξή της σε δίκτυα, πόσο μάλλον όταν αυτά διαθέτουν ήδη ενσωματωμένες μονάδες ΔΠ. Με μια τέτοια προσέγγιση είναι πολύ δύσκολο να αξιοποιηθούν ικανοποιητικά τα οφέλη της ΔΠ και η συνολική διείσδυσή της στο δίκτυο παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Επίσης δεν προσφέρεται καμία ευελιξία, διότι οι διαχειριστές δεν έχουν κανένα απολύτως τρόπο ελέγχου της παροχής των μονάδων μετά τη σύνδεσή τους.

Τα περισσότερα σύγχρονα δίκτυα σήμερα εξακολουθούν να είναι παθητικά, αλλά σταδιακά πραγματοποιείται μετάβαση σε πιο εξελιγμένες μορφές που προσφέρουν αυξημένες δυνατότητες ελέγχου.

3.3.1.2 Ενεργά Δίκτυα

Μια από τις τρέχουσες επιδιώξεις στον τομέα των δικτύων διανομής είναι η σταδιακή μετατροπή των σημερινών παθητικών δικτύων σε ευφυή δίκτυα, τα οποία μπορούν να ελέγξουν τις ενέργειες χειρισμού όλων των συνδεδεμένων χρηστών σε αυτά με σκοπό τη βιώσιμη, ασφαλή και οικονομική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας [3.13].

Τα ενεργά δίκτυα αποτελούν το πρώτο στάδιο αυτής της εξέλιξης. Διαθέτουν ενσωματωμένα συστήματα ελέγχου χάρη στα οποία είναι δυνατός ο χειρισμός εξοπλισμού τμήματος ή και ολόκληρου του δικτύου. Τα δυο κυριότερα ρυθμιστικά μοντέλα που εφαρμόζονται στα ενεργά δίκτυα είναι ο *κεντρικός* και ο *αποκεντρωμένος έλεγχος*, που περιγράφηκαν στην ενότητα 2.3.

Απώτερος σκοπός του ελέγχου είναι να ικανοποιούνται κάθε στιγμή τα οικονομικά και λειτουργικά κριτήρια που έχουν τεθεί από το διαχειριστή. Η δυνατότητα ευφυούς συνδυασμού χειρισμών των στοιχείων για αλλαγή της κατάστασης του δικτύου προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και επιτρέπει μεγαλύτερη διείσδυση ΔΠ σε σχέση με τα παθητικά δίκτυα.

Εκτός από την αλλαγή κατάστασης των στοιχείων του δικτύου (διακόπτες για αλλαγή τοπολογίας, χωρητικές αντισταθμίσεις και μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ για ρύθμιση της τάσης) είναι δυνατός και ο έλεγχος της παρεχόμενης ενεργού και αέργου ισχύος των μονάδων ΔΠ. Οι δύο πιο χαρακτηριστικές πρακτικές είναι οι εξής :

- *Περικοπή (curtailment)* της παρεχόμενης ενεργού ισχύος των μονάδων παραγωγής λόγω παραβίασης των περιορισμών ασφαλείας του δικτύου. Σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να χρειαστεί έως και προσωρινή αποσύνδεση μιας ή περισσότερων μονάδων.
- *Έγχυση/Απορρόφηση* αέργου ισχύος από τις μονάδες ΔΠ με σκοπό τη βελτίωση των τάσεων λειτουργίας του δικτύου ή/και μείωση των απωλειών αέργου ισχύος.

3.3.2 Ρυθμιστικά πλαίσια

Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας ελέγχεται από τα ρυθμιστικά πλαίσια που βρίσκονται σε ισχύ σε κάθε χώρα. Μεταξύ αυτών υπάρχουν συγκεκριμένα πλαίσια που σχετίζονται με την ενσωμάτωση ΔΠ στα δίκτυα διανομής και περιέχουν κανόνες και διατάξεις που διέπουν :

- Τη σύνδεση και τον έλεγχο μονάδων ΔΠ στα δίκτυα διανομής.
- Τη διαχείριση των δικτύων που φέρουν μονάδες ΔΠ.
- Την αγοραπωλησία ηλεκτρικής ενέργειας από ΔΠ.
- Την μελλοντική ανάπτυξη/επέκταση των δικτύων με ΔΠ.

Με τις λεγόμενες «συμφωνίες σύνδεσης» μεταξύ των ιδιοκτητών των μονάδων ΔΠ και των διαχειριστών των δικτύων διανομής καθορίζονται τα οικονομικά και ρυθμιστικά ζητήματα της ενσωμάτωσης ΔΠ [3.14], όπως οι σχετικές ενεργειακές χρεώσεις ή οι συνθήκες περικοπής της ισχύος των μονάδων ΔΠ στο δίκτυο.

Ανάλογα με το είδος συμφωνίας που συνάπτει ο διαχειριστής του δικτύου διανομής, μπορεί να γίνει η διάκριση δύο ειδών ΔΠ. Αρχικά, έχουμε τις μονάδες παραγωγής που

αποτελούν επενδύσεις ενίσχυσης του δικτύου και κατά την ένταξή τους ακολουθούν την αρχή "fit and forget", όπως στα παθητικά δίκτυα. Αυτές ονομάζονται *σταθερές μονάδες ΔΠ (firm DG units)* και μετά τη σύνδεσή τους δεν υπόκεινται σε έλεγχο της παροχής ισχύος τους στο δίκτυο. Οι υπόλοιπες, των οποίων η παραγωγή ενεργού ισχύος μπορεί να υποστεί περικοπές αν κριθεί απαραίτητο, αποτελούν τις *μη σταθερές μονάδες ΔΠ (non-firm DG units)* [3.15].

Οι περικοπές ενεργού ισχύος στις μη σταθερές μονάδες παραγωγής επιφέρουν ελαττωμένα έσοδα στους ιδιοκτήτες τους, διότι η ενέργεια που τελικά θα χρησιμοποιηθεί από το δίκτυο (και άρα αυτή που θα αγοραστεί από το διαχειριστή) θα αποτελέσει ένα μέρος μόνο της συνολικής παραγωγής. Βέβαια, ως αντιστάθμιση, αρκετά ρυθμιστικά πλαίσια προβλέπουν την μερική αποζημίωση του ιδιοκτήτη μιας μονάδας παραγωγής για την ενέργεια που δεν αγοράζεται από το διαχειριστή του δικτύου.

Στα Ευρωπαϊκά ρυθμιστικά πλαίσια απαγορεύεται ο διαχειριστής ενός δικτύου να διαθέτει εγκατεστημένες μονάδες ΔΠ σε αυτό [3.14]. Ωστόσο, η λειτουργία του δικτύου με ανεξάρτητους ιδιοκτήτες μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μικρή συνολική διείσδυση και μειωμένες αποδόσεις του δικτύου. Με τη θεώρηση αντίθετα μοντέλου στο οποίο ο διαχειριστής του δικτύου είναι και κάτοχος μέρους της ΔΠ σε αυτό, λύνονται πολλά από αυτά τα προβλήματα. Για το λόγο αυτό και τα τελευταία χρόνια έχει διατυπωθεί η επιδίωξη εφαρμογής πλαισίων που επιτρέπουν την ιδιοκτησία ΔΠ από διαχειριστές δικτύων [3.16].

Εξετάζοντας διάφορα ρυθμιστικά πλαίσια και συγκρίνοντάς τα παρατηρείται ότι το κυριότερο που αλλάζει είναι ο *αντικειμενικός στόχος* που καλούνται να πραγματοποιήσουν. Ανάλογα με το μοντέλο επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση άλλοτε των απωλειών, άλλοτε της περικοπής ενεργού ισχύος και άλλοτε των αποζημιώσεων προς τους ιδιοκτήτες του δικτύου. Το ρυθμιστικό πλαίσιο ουσιαστικά καθορίζει τα κριτήρια με τα οποία ο διαχειριστής θα πάρει τις αποφάσεις για τη λειτουργία του δικτύου διανομής. Αυτός είναι και ο λόγος που το ίδιο δίκτυο υπό διαφορετικά καθεστάτα μπορεί να παρουσιάζει υπολογίσιμες αλλαγές στην κατάσταση λειτουργίας.

3.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] H. Ferreira, G. Fulli, W. Kling, A. L'Abbate, H. Faas and J. Peças Lopes, "Distributed Generation in Europe : the European Regulatory Framework and the Evolution of the Distribution Grids towards Smart Grids," in *5th IEEE Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering*, Mar. 2010.
- [3.2] T. Ackermann, G. Andersson and L. Soder, "Distributed Generation : a definition," *Electric Power Systems Research*, vol. 57, no. 3, pp. 195–204, May 2001.
- [3.3] Directive 2009/72/EC of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in electricity.
- [3.4] International Energy Agency, *Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets*, OECD/IEA, 2002.
- [3.5] N. Hadjsaid, J. Canard and F. Dumas, "Dispersed generation impact on distribution networks," *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 12, no. 2, pp. 22–28, Apr. 1999.
- [3.6] European Commission, "DG Energy and Transport," *European Energy and Transport, Trends to 2030 – update 2007*, p. 58, May 2006.
- [3.7] A. L. Devi and B. Subramanyam, "Optimal DG unit placement for loss reduction in radial distribution system – a case study," *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 2, no. 6, pp. 57–61, Dec. 2007.
- [3.8] M. P. Lalitha, V.C.V. Reddy and V. Usha, "Optimal DG placement for minimum real power loss in radial distribution systems using PSO," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 13, no. 2, pp. 107–116, Mar. 2010.
- [3.9] E. R. Collins and J. Jiang, "Voltage Sags and the Response of a Synchronous Distributed Generator: A Case Study," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 1, pp. 442–448, Jan. 2008.
- [3.10] A. Woyte, V.V. Thong, R. Belmans and J. Nijs, "Voltage Fluctuations on Distribution Level Introduced by Photovoltaic Systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 1, pp. 202–209, Mar. 2006.
- [3.11] R. Comfort, M. Gonzalez, A. Mansoor, P. Barker, T. Short and A. Sundaram, "Power Quality Impact of Distributed Generation: Effect on Steady State Voltage Regulation," presented at the PQA 2001 North America Conf., Pittsburgh.
- [3.12] A. Keane, L. F. Ochoa, C.L.T. Borges, G.W. Ault, A.D. Alarcon-Rodriguez, R.A.F. Curri, F. Pilo, C. Dent and G. P. Harrison, "State-of-the-art techniques and challenges ahead for distributed generation planning and optimization," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1493–1502, Sep. 2013.
- [3.13] M. Sanchez Jimenez, "Policy perspective towards the implementation of Smart Grids into the European internal energy market," presented at Smart Grids: Comparative views from the EU and Japan, Brussels, 15 Dec. 2009.
- [3.14] P. Hallberg et al., "Active distribution system management a key tool for the smooth integration of distributed generation," *Eurelectric TF Active System Management*, 2013.

-
- [3.15] M. J. Dolan, E. M. Davidson, I. Kockar, G.W. Ault and S.D.J. McArthur, "Distribution power flow management utilizing an online optimal power flow technique," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 790–799, Jan. 2012.
- [3.16] P. Siano, L.F. Ochoa, G. P. Harrison and A. Picollo, "Assessing the strategic benefits of distributed generation ownership for DNOs," *IET Gener. Trans. Distrib.* 3, vol. 3, pp. 225–236, Mar. 2009.

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πλειοψηφία των μοντέλων και των τεχνικών ελέγχου που εφαρμόζονται στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας βασίζονται στην επίλυση του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος – *BPI (Optimal Power Flow – OPF)*, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στόχος του είναι οι μεταβλητές ελέγχου του δικτύου να λάβουν τιμές τέτοιες ώστε να επιτευχθεί η καταλληλότερη κατάσταση λειτουργίας βάσει δεδομένων κριτηρίων.

Αφού προσδιοριστούν οι εξισώσεις που συνδέουν τα ηλεκτρικά μεγέθη του συστήματος, είναι δυνατόν με δεδομένες μόνο τις μεταβλητές ελέγχου να υπολογιστούν όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές του δικτύου μέσω επαναληπτικών μεθόδων. Σε ένα κλασικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, με δεδομένα τα στοιχεία των γραμμών του και τις καταναλώσεις των φορτίων του, οι μεταβλητές ελέγχου είναι οι παραγωγές ενεργού ισχύος και τα μέτρα των τάσεων των γεννητριών. Κάθε αρχική αποτίμηση των μεταβλητών αυτών οδηγεί σε μία και μόνο κατάσταση λειτουργίας του δικτύου.

Κατά τη διατύπωση του προβλήματος BPI προσδιορίζεται ένα σύνολο περιορισμών για τις τιμές διαφόρων μεγεθών του δικτύου. Μια αποτίμηση των μεταβλητών ελέγχου που οδηγεί το δίκτυο σε κατάσταση λειτουργίας όπου αυτοί οι περιορισμοί τηρούνται ονομάζεται *εφικτή λύση (feasible solution)*. Το πρόβλημα λοιπόν αναζητά την πιο κατάλληλη από ένα σύνολο εφικτών λύσεων που προκύπτουν από διαφορετικές αποτιμήσεις των μεταβλητών ελέγχου.

Η καταλληλότητα μιας λύσης αξιολογείται με κριτήριο την τιμή που λαμβάνει μια συνάρτηση των μεγεθών του δικτύου που ονομάζεται *αντικειμενική συνάρτηση*. Ο στόχος του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση ή η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών είναι αυτά που έχουν ως στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου [4.1] ή την ελαχιστοποίηση της περικοπής ενεργού ισχύος των γεννητριών ΔΠ [4.2].

Η επίλυση του προβλήματος BPI είναι πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον διαχειριστή ενός δικτύου διανομής, αφού για δεδομένες συνθήκες μπορεί να εντοπίσει το σύνολο των τιμών των μεταβλητών ελέγχου που θα οδηγήσουν το δίκτυο στο σημείο λειτουργίας με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Επομένως, στα ενεργά δίκτυα διανομής με εγκατεστημένη ΔΠ δίνεται η δυνατότητα βέλτιστης λειτουργίας μεταβάλλοντας τα επίπεδα της τάσης και της ενεργού και αέργου παραγωγής των γεννητριών.

Πρόσφατα όμως έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται μοντέλα τα οποία διευρύνουν το σύνολο των μεταβλητών ελέγχου του συστήματος, υποστηρίζοντας τον υπό φορτίο τηλεχειρισμό ορισμένων στοιχείων του και προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία και καλύτερα αποτελέσματα [4.3]–[4.7]. Τέτοιου είδους στοιχεία είναι οι διακόπτες απομόνωσης

μαζί με τους υπό φορτίο ανοικτούς αποζεύκτες, οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις και οι μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2. Η μεταβολή της τοπολογίας του δικτύου μέσω της σύνδεσης/απόξευξης γραμμών λόγω διακοπτικών χειρισμών ονομάζεται *επαναδιαμόρφωση του δικτύου (network reconfiguration)*. Το πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος εμπλουτισμένο με τις νέες μεταβλητές ελέγχου αποτελεί πλέον ένα *πρόβλημα βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του δικτύου*.

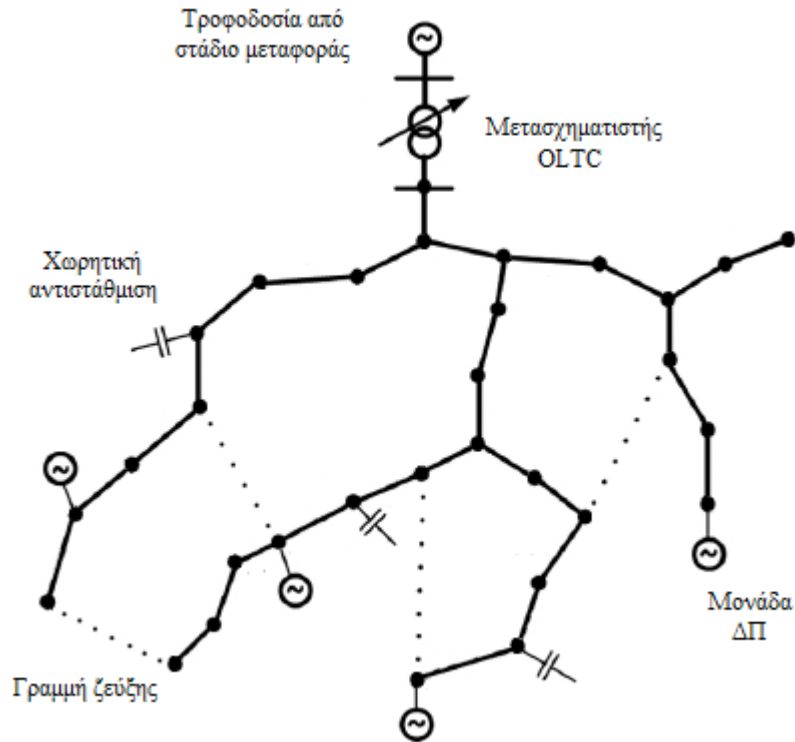
Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά θα παρουσιαστεί η μαθηματική μοντελοποίηση των στοιχείων του δικτύου διανομής. Θα ακολουθήσει η διατύπωση του προβλήματος BPI και στη συνέχεια θα προστεθούν σε αυτό οι εξισώσεις των τηλεχειριζόμενων στοιχείων του δικτύου για τη διατύπωση του συνολικού προβλήματος βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης.

4.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ AC ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Κατά την διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος θα γίνουν κάποιες παραδοχές για τα δίκτυα διανομής. Αρχικά, οι γραμμές θα υποτεθεί ότι παρουσιάζουν την ίδια σύνθετη αντίσταση σε κάθε φάση, δηλαδή θα θεωρηθούν συμμετρικές. Το φορτία θα θεωρηθούν επίσης συμμετρικά, με τα μέτρα των εντάσεων τους σε κάθε φάση να ταυτίζονται και τις γωνίες τους να διαφέρουν κατά 120° [4.8]. Λόγω αυτής της συμμετρίας είναι δυνατή η χρήση του *ανά μονάδα (α.μ.) συστήματος* για την παράσταση των τιμών των ηλεκτρικών μεγεθών και η μονογραμμική αναπαράσταση του τριφασικού συστήματος.

Στην παρούσα εργασία γίνεται εξέταση *ενεργών ακτινικών* δικτύων διανομής στα οποία όλες οι μονάδες ΔΠ και τα στοιχεία ελέγχου βρίσκονται στο *πρωτεύον* τμήμα του δικτύου, δηλαδή στη ΜΤ. Συνεπώς, η μοντελοποίηση του δικτύου ξεκινάει από τον υποσταθμό υποβίβασμού ΥΤ/ΜΤ και φτάνει έως τους πελάτες ΜΤ και τους Μ/Σ διανομής (ΜΤ/ΧΤ). Το δίκτυο διανομής ΧΤ δε θα εξεταστεί αλλά η επίδρασή του στο πρωτεύον δίκτυο θα ληφθεί υπόψη με τη μορφή ισοδυνάμων φορτίων τροφοδοτούμενων από τους Μ/Σ διανομής. Έτσι τα φορτία ΜΤ και ΧΤ του δικτύου μοντελοποιούνται και αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο.

Στο Σχήμα 4.1 δίνεται η τυπική μορφή των δικτύων που θα μελετηθούν. Κάθε κόμβος του διαγράμματος αναπαριστά ένα ζυγό. Το δίκτυο, ως ακτινικό, παρουσιάζει ένα μόνο σημείο τροφοδοσίας από το σύστημα μεταφοράς. Ο αντίστοιχος ζυγός τροφοδοσίας θα θεωρείται σε όλα τα προβλήματα ως ζυγός ταλάντωσης. Οι γραμμές του δικτύου που βρίσκονται συνδεδεμένες αναπαρίστανται ως συνεχείς, ενώ οι γραμμές ζεύξης ως διακεκομμένες. Η δυνατότητα αλλαγής κατάστασης των γραμμών δίνεται από τους διακόπτες που φέρουν στα άκρα τους, στα σημεία σύνδεσής τους με τους ζυγούς. Οι διακόπτες αυτοί δεν εμφανίζονται στο σχέδιο. Με το σύμβολο της γεννήτριας αναπαρίστανται οι μονάδες ΔΠ και με αυτό του πυκνωτή οι χωρητικότητες αντιστάθμισης στους ζυγούς. Τέλος, επειδή σχεδόν κάθε ζυγός πλην του ζυγού τροφοδοσίας του δικτύου στον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ φέρει συνδεδεμένα φορτία, αυτά δε θα εμφανίζονται στο σχέδιο.



Σχήμα 4.1 : Τυπική μορφή εξεταζόμενων δικτύων διανομής

Αρχικά, στην υποενότητα 4.2.1 παρουσιάζεται η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος, η οποία κάνει χρήση μη-γραμμικών εξισώσεων. Στη συνέχεια, στην υποενότητα 4.2.2, γίνονται κάποιες τροποποιήσεις σε μεταβλητές και εξισώσεις, οδηγώντας σε ένα εναλλακτικό μοντέλο που περιλαμβάνει αποκλειστικά γραμμικές και τετραγωνικές εξισώσεις [4.3],[4.9]. Το μοντέλο αυτό είναι πιο εύκολα επιλύσιμο και προσφέρει αυξημένη δυνατότητα ελέγχου σε σχέση με το μη-γραμμικό μοντέλο, που είναι πιο απαιτητικό υπολογιστικά [4.3],[4.10].

4.2.1 Διατύπωση του προβλήματος της Βέλτιστης Ροής Ισχύος

Πριν γίνει η μαθηματική μοντελοποίηση των στοιχείων θεωρείται σκόπιμος ο ορισμός σχετικών συνόλων. Ορίζουμε ως :

- N : το σύνολο των ζυγών του δικτύου
- L : το σύνολο των γραμμών του δικτύου
- G : το σύνολο των μη σταθερών μονάδων ΔΠ του δικτύου

Θεωρείται ότι τοποθετείται το πολύ μία μονάδα ΔΠ ανά ζυγό. Κατά συνέπεια, το σύνολο G θα θεωρηθεί υποσύνολο του N και τα στοιχεία του θα είναι οι ζυγοί στους οποίους βρίσκονται οι μονάδες ΔΠ.

Στη γενικότερη περίπτωση, ένας ζυγός του δικτύου διανομής είναι συνδεδεμένος με γεννήτρια ΔΠ που παρέχει ισχύ στο δίκτυο και τροφοδοτεί φορτία ΜΤ/ΧΤ. Το σύνολο λοιπόν των πληροφοριών για το ζυγό δίνεται από τρία διανύσματα : της τάσης του, της μιγαδικής παραγωγής της μονάδας ΔΠ και της μιγαδικής κατανάλωσης των φορτίων. Καθένα από τα διανύσματα εμπλέκει δύο μεταβλητές. Για κάθε ζυγό $i \in N$ λοιπόν έχουμε :

- Τάση ζυγού :

$$\hat{V}_i = V_i \cdot e^{j\theta_i} = V_i \angle \theta_i$$

όπου V_i, θ_i : το μέτρο και η γωνία της τάσης του ζυγού i , αντίστοιχα

- Παραγωγή ισχύος :

$$\hat{S}_{g_i} = P_{g_i} + jQ_{g_i} \quad (4.1)$$

όπου P_{g_i}, Q_{g_i} : η παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς από τη μονάδα ΔΠ στο ζυγό i , αντίστοιχα

- Κατανάλωση ισχύος :

$$\hat{S}_{d_i} = P_{d_i} + jQ_{d_i} \quad (4.2)$$

όπου P_{d_i}, Q_{d_i} : η ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος από φορτία στο ζυγό i , αντίστοιχα

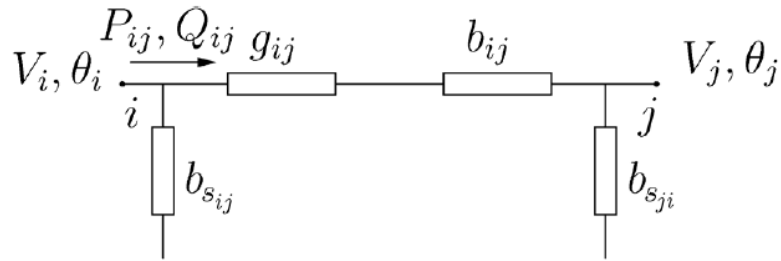
Με βάση τα παραπάνω ηλεκτρικά μεγέθη μπορεί να υπολογιστεί η συνολική έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος στους ζυγούς ενός δικτύου ως διαφορά της κατανάλωσης από την παραγωγή. Μπορεί να λάβει τόσο θετικές τιμές – εισερχόμενη στο δίκτυο – όσο και αρνητικές – εξερχόμενη από αυτό.

- Συνολική έγχυση ισχύος :

$$\hat{S}_i = \hat{S}_{g_i} - \hat{S}_{d_i} \stackrel{(4.1),(4.2)}{\iff} P_i + jQ_i = (P_{g_i} - P_{d_i}) + j(Q_{g_i} - Q_{d_i}) \iff$$

$$\iff \begin{cases} P_i = P_{g_i} - P_{d_i} & (4.3) \\ Q_i = Q_{g_i} - Q_{d_i} & (4.4) \end{cases}$$

Για τη μαθηματική αναπαράσταση των γραμμών θα χρησιμοποιηθεί το ισοδύναμο Π μοντέλο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2 :



Σχήμα 4.2 : Ισοδύναμο Π μοντέλο γραμμής δικτύου

Στο σχήμα αυτό παριστάνεται μια γραμμή που συνδέει τους ζυγούς i και j , οι οποίοι εμφανίζουν τάσεις $V_i \angle \theta_i$ και $V_j \angle \theta_j$ αντίστοιχα. Για κάθε τέτοια γραμμή $i - j$ με $i - j \in L$ τα σχετικά ηλεκτρικά μεγέθη είναι :

- ο Αγωγιμότητα σειράς :

$$\hat{y}_{ij} = g_{ij} + jb_{ij}, \quad i - j \in L$$

$$\text{όπου } g_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}, \quad b_{ij} = \frac{-x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}$$

r_{ij}, x_{ij} : η αντίσταση και αντίδραση σειράς της γραμμής $i - j$, αντίστοιχα

- ο Εγκάρσια αγωγιμότητα προς γη :

Στο μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία οι εγκάρσιες αγωγιμότητες των γραμμών προς τη γη θεωρούνται μηδενικές, απλοποιώντας έτσι τις εξισώσεις που προκύπτουν. Συνεπώς, για κάθε γραμμή $i - j$ ισχύει :

$$b_{s_{ij}} = b_{s_{ji}} = 0, \quad i - j \in L$$

Με βάση τα παραπάνω μεγέθη είναι δυνατός ο υπολογισμός των ροών ενεργού και αέργου ισχύος κατά μήκος των γραμμών του δικτύου συναρτήσει των σταθερών αγωγιμοτήτων των γραμμών και των τάσεων (μέτρου και γωνίας) των ζυγών στα άκρα τους.

- ο Ροές ισχύος γραμμής :

Στο ανά μονάδα σύστημα, η ισχύς \hat{S}_{ij} που μεταφέρεται από τον ζυγό i προς στο ζυγό j δίνεται από τη σχέση :

$$\hat{S}_{ij} = \hat{V}_i \hat{I}_{ij}^* \quad (4.5)$$

όπου \hat{I}_{ij}^* : ο μιγαδικός συζυγής της έντασης \hat{I}_{ij} του ρεύματος που διαρρέει τη γραμμή $i - j$ και δίνεται από τη σχέση :

$$\hat{I}_{ij} = (\hat{V}_i - \hat{V}_j) \hat{y}_{ij} \quad (4.6)$$

Αντικαθιστώντας την (4.6) στην (4.5) και εξισώνοντας τα πραγματικά και φανταστικά μέρη της προκύπτουν οι εξισώσεις ενεργού και αέργου ροής ισχύος αντίστοιχα, από τον ζυγό i προς στο ζυγό j :

$$P_{ij} = g_{ij} V_i^2 - g_{ij} V_i V_j \cos\theta_{ij} - b_{ij} V_i V_j \sin\theta_{ij}, \quad i - j \in L \quad (4.7)$$

$$Q_{ij} = -b_{ij} V_i^2 + b_{ij} V_i V_j \cos\theta_{ij} - g_{ij} V_i V_j \sin\theta_{ij}, \quad i - j \in L \quad (4.8)$$

$$\text{όπου: } \theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$$

Οι εξισώσεις που προκύπτουν για το ισοζύγιο ισχύος σε κάθε ζυγό $i \in N$ είναι οι εξής :

$$\hat{S}_i = \sum_{j \in N_i} \hat{S}_{ij} \Leftrightarrow P_i + jQ_i = \sum_{j \in N_i} (P_{ij} + jQ_{ij}) \Leftrightarrow \begin{cases} P_i = \sum_{j \in N_i} P_{ij} & (4.9) \\ Q_i = \sum_{j \in N_i} Q_{ij} & (4.10) \end{cases}$$

όπου N_i : το σύνολο των ζυγών οι οποίοι συνδέονται μέσω γραμμών με τον i

\hat{S}_i : η συνολική έγχυση μιγαδικής ισχύος στο ζυγό i

\hat{S}_{ij} : η μιγαδική ροή ισχύος από το ζυγό i στο ζυγό j

Αντικαθιστώντας στις (4.9) και (4.10) τις μεταβλητές από προηγούμενες σχέσεις (4.3)–(4.8) προκύπτουν για κάθε $i \in N$ οι βασικές εξισώσεις ροής ισχύος:

$$(4.9) \xrightarrow{(4.3),(4.7)} P_{g_i} - P_{d_i} = \sum_{j \in N_i} (g_{ij} V_i^2 - g_{ij} V_i V_j \cos\theta_{ij} - b_{ij} V_i V_j \sin\theta_{ij}) \quad (4.11)$$

$$(4.10) \xrightarrow{(4.4),(4.8)} Q_{g_i} - Q_{d_i} = \sum_{j \in N_i} (-b_{ij} V_i^2 + b_{ij} V_i V_j \cos\theta_{ij} - g_{ij} V_i V_j \sin\theta_{ij}) \quad (4.12)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις συνοδεύονται και από περιορισμούς για τις συνθήκες λειτουργίας του δικτύου. Στο παρόν μοντέλο θα τεθούν περιορισμοί όσον αφορά τις τάσεις των ζυγών, τα ρεύματα των γραμμών και τις παραγωγές ισχύος των μονάδων ΔΠ.

Για κάθε ζυγό $i \in N$ καθορίζονται η μέγιστη (V_{max_i}) και η ελάχιστη (V_{min_i}) τιμή του μέτρου της τάσης του. Για κάθε γραμμή $i - j$ καθορίζεται η ικανότητα της ($I_{lim_{ij}}$). Επίσης, για κάθε μονάδα ΔΠ $i \in G$ καθορίζεται ο ελάχιστος επιτρεπόμενος συντελεστής ισχύος (Σ.Ι.) λειτουργίας ($\cos\phi_{lim_i}$). Οι τιμές των ορίων αυτών στις εφαρμογές του μοντέλου δίνονται στο κεφάλαιο 6. Οι σχετικοί περιορισμοί είναι οι εξής :

- ο Ορια μέτρων τάσεως των ζυγών :

$$V_{min_i} \leq V_i \leq V_{max_i}, \quad i \in N \quad (4.13)$$

- ο Περιορισμοί λόγω της ικανότητας των γραμμών :

$$|\hat{I}_{ij}| \leq I_{lim_{ij}} \Leftrightarrow \dots \Leftrightarrow (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) (V_i^2 + V_j^2 - 2 V_i V_j \cos\theta_{ij}) \leq I_{lim_{ij}}^2, \quad i - j \in L \quad (4.14)$$

- ο Περιορισμοί ισχύος των μονάδων ΔΠ :

$$P_{g_i}^{min} \leq P_{g_i} \leq P_{g_i}^{max}, \quad i \in G \quad (4.15)$$

όπου $P_{g_i}^{min}$, $P_{g_i}^{max}$: η ελάχιστη και μέγιστη δυνατή τιμή της ενεργού παραγωγής της μονάδας i , αντίστοιχα

Αν και η παροχή ενεργού ισχύος από τις μονάδες ΔΠ επιδιώκεται από το πρόβλημα να είναι η μέγιστη δυνατή, κάτι τέτοιο δεν ισχύει για την άεργο ισχύ. Αν και είναι συνήθης η θεώρηση σταθερών ή και μοναδιαίων Σ.Ι. στις μονάδες ΔΠ, έχει επιλεχθεί στο παρόν μοντέλο η χρήση κυμαινόμενου Σ.Ι. εντός συγκεκριμένων ορίων. Προσφέρεται έτσι η δυνατότητα στις μονάδες ΔΠ να προσαρμόσουν την άεργο ισχύ τους ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου, λειτουργώντας ακόμα και με χωρητικό Σ.Ι :

$$-P_{g_i}^{max} \tan\varphi_{lim_i} \leq Q_{g_i} \leq P_{g_i}^{max} \tan\varphi_{lim_i}, \quad i \in G \quad (4.16)$$

Έτσι, το σύνολο των σχέσεων (4.11)–(4.16) αποτελεί ένα μέρος των εξισώσεων του προβλήματος προς επίλυση. Το μόνο που μένει για την πλήρη περιγραφή του είναι ο ορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης.

Στα κλασικά δίκτυα διανομής συνήθης ενέργεια ελέγχου είναι η περικοπή της παροχής ενεργού ισχύος από τις μη-σταθερές μονάδες ΔΠ. Εφόσον όμως η εισροή ισχύος από ΔΠ είναι υπέρ του οικονομικού οφέλους του διαχειριστή, στόχος είναι η αντιμετώπιση της διαταραχής με περικοπή όσο το δυνατόν μικρότερης ενεργού παραγωγής των μη-σταθερών μονάδων ΔΠ. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις που ικανοποιούν αυτό το κριτήριο είναι οι εξής :

- ο Νόρμα L_1 :

$$L_1 = \min \sum_{i \in G} (P_{g_i}^0 - P_{g_i}) \quad (4.17)$$

- ο Νόρμα L_2 :

$$L_2 = \min \sum_{i \in G} (P_{g_i}^0 - P_{g_i})^2 \quad (4.18)$$

- ο Γραμμική συνάρτηση βαρών :

$$Z = \min \sum_{i \in G} w_{g_i} (P_{g_i}^0 - P_{g_i}) \quad (4.19)$$

όπου $P_{g_i}^0$: η παραγωγή ενεργού ισχύος της μονάδας ΔΠ i στην αρχική κατάσταση

P_{g_i} : η παραγωγή ενεργού ισχύος της μονάδας ΔΠ i στην επιθυμητή τελική κατάσταση

w_{g_i} : ο συντελεστής βάρους της μονάδας ΔΠ i – μεγαλύτερες τιμές του οδηγούν σε μικρότερη περικοπή ισχύος της αντίστοιχης μονάδας

Αν και οι αντικειμενικές συναρτήσεις (4.17) – (4.19) έχουν ποιοτικά τον ίδιο στόχο, η επιλογή της κατάλληλης εξαρτάται άμεσα από το ισχύον ρυθμιστικό πλαίσιο και τα κόστη αγοράς ισχύος, που καθορίζουν την οικονομική στρατηγική του διαχειριστή. Η (4.17) περικόπτει εν γένει την παραγωγή των πιο αποδοτικών μονάδων και οδηγεί σε μεγαλύτερη συνολική διείσδυση ΔΠ στο δίκτυο, ενώ η (4.18) μοιράζει την απαιτούμενη περικοπή ισχύος μεταξύ όλων των μονάδων, εξασφαλίζοντας πιο δίκαιη διαχείριση. Η (4.19) χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τεχνικές προσδιορισμού των μονάδων υπεύθυνων για την υπερφόρτιση του δικτύου και περιορίζει μόνο αυτές [4.3].

4.2.2 Εναλλακτική διατύπωση του προβλήματος της Βέλτιστης Ροής Ισχύος

Με βάση την προηγούμενη διατύπωση του προβλήματος, σε ένα δίκτυο με n ζυγούς σχηματίζονται $2n$ μη-γραμμικές εξισώσεις ροής ισχύος. Το προτεινόμενο μοντέλο [4.9] τις αντικαθιστά με $3n$ εξισώσεις, τις $2n$ μη γραμμικές εξισώσεις ροής ισχύος και n νέες τετραγωνικές εξισώσεις. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση των μεταβλητών τάσης των ζυγών (V_i, θ_i), με δύο μεταβλητές ανά γραμμή του δικτύου (W_{ij}, T_{ij}) και μία ανά ζυγό (U_i). Οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών έχουν ως εξής :

$$U_i = V_i^2, \quad i \in N \quad (4.20)$$

$$W_{ij} = V_i V_j \cos\theta_{ij}, \quad i - j \in L \quad (4.21)$$

$$T_{ij} = V_i V_j \sin\theta_{ij}, \quad i - j \in L \quad (4.22)$$

Από τις (4.21) και (4.22) είναι εμφανές ότι ισχύει, για κάθε $i - j \in L$:

$$(4.21) \Rightarrow W_{ij} = W_{ji} \quad (4.23)$$

$$(4.22) \Rightarrow T_{ij} = -T_{ji} \quad (4.24)$$

$$(4.20) - (4.22) \Rightarrow W_{ij}^2 + T_{ij}^2 = U_i U_j \quad (4.25)$$

Με βάση τις νέες μεταβλητές, οι εξισώσεις (4.11) και (4.12) μετατρέπονται σε:

$$(4.11) \xrightarrow{(4.20)-(4.22)} P_{g_i} - P_{d_i} = \sum_{j \in N_i} (g_{ij} U_i - g_{ij} W_{ij} - b_{ij} T_{ij}), \quad i \in N \quad (4.26)$$

$$(4.12) \xrightarrow{(4.20)-(4.22)} Q_{g_i} - Q_{d_i} = \sum_{j \in N_i} (-b_{ij} U_i + b_{ij} W_{ij} - g_{ij} T_{ij}), \quad i \in N \quad (4.27)$$

Έτσι, η βάση για το νέο μοντέλο είναι οι $2n$ γραμμικές εξισώσεις (4.26) και (4.27) μαζί με τις n τετραγωνικές (4.25). Οι (4.23) και (4.24) χρησιμοποιούνται ως επιπλέον περιορισμοί. Μεταβολές παρατηρούνται επίσης στη μορφή των εξής περιορισμών :

$$(4.13) \stackrel{(4.20)}{\iff} V_{\min_i}^2 \leq U_i \leq V_{\max_i}^2, \quad i \in N \quad (4.28)$$

$$(4.14) \stackrel{(4.20)-(4.22)}{\iff} (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) (U_i + U_j - 2 W_{ij}) \leq I_{lim_{ij}}^2, \quad i - j \in L \quad (4.29)$$

Έτσι, το νέο τετραγωνικό πρόβλημα συνίσταται από τις (4.23)–(4.29), (4.15) και (4.16) με αντικειμενική συνάρτηση μία εκ των (4.17)–(4.19).

4.3 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΕ ΕΝΕΡΓΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Τα μοντέλα που έχουν παρουσιαστεί μέχρι στιγμής υποθέτουν δίκτυα διανομής σταθερής τοπολογίας. Στη συνέχεια θα προστεθούν εξισώσεις περιγραφής ελεγχόμενων διακριτών στοιχείων και θα δοθεί η μορφή του προβλήματος βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης. Πριν τη γραφή των εξισώσεων θα οριστούν και πάλι κάποια χρήσιμα σύνολα :

N	:	των ζυγών του δικτύου
L	:	των γραμμών του δικτύου
G	:	των μη σταθερών μονάδων ΔΠ του δικτύου
S	:	των γραμμών του δικτύου με τηλεχειριζόμενους διακόπτες
T	:	των μετασχηματιστών με ΣΑΤΥΦ
B	:	των συστοιχιών εγκάρσιων αντισταθμίσεων

Αντίστοιχα με την ένα προς ένα αντιστοίχιση γεννητριών σε ζυγούς, θεωρείται ότι τοποθετείται το πολύ ένας Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ ανά γραμμή και το πολύ μία αντιστάθμιση ανά ζυγό. Κατά συνέπεια, τα σύνολα T και B θα θεωρηθούν υποσύνολα των L και N αντίστοιχα και τα στοιχεία τους θα είναι οι γραμμές/ζυγοί στους οποίους βρίσκονται οι μετασχηματιστές/αντισταθμίσεις. Με αυτό τον τρόπο απλοποιείται ο συμβολισμός των στοιχείων κατά γραφή των εξισώσεων του προβλήματος.

4.3.1 Μοντελοποίηση των στοιχείων ελέγχου των δικτύων διανομής

Τα πρόσθετα στοιχεία παρουσιάζουν πεπερασμένες διακριτές καταστάσεις, σε αντίθεση με τη συνεχή φύση των ηλεκτρικών μεγεθών του δικτύου. Για την παράστασή τους θα χρησιμοποιηθούν ακέραιες μεταβλητές.

4.3.1.1 Διακόπτες

Όπως προαναφέρθηκε, κάθε γραμμή $i - j \in S$ του δικτύου φέρει από ένα τηλεχειριζόμενο διακόπτη σε καθένα από τα δύο άκρα σύνδεσής της με ζυγό. Οι διακόπτες αυτοί είναι προγραμματισμένοι να κλείνουν/ανοίγουν ταυτόχρονα, για τη σύνδεση ή

αποσύνδεση της γραμμής από το δίκτυο. Για το συμβολισμό των καταστάσεων αυτών θα γίνει χρήση της δυαδικής μεταβλητής s_{ij} :

$$s_{ij} \in \{0,1\}, \quad i - j \in S \quad (4.30)$$

Η μεταβλητή s_{ij} λαμβάνει μοναδιαία τιμή όταν η γραμμή $i - j$ είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο, ειδάλως είναι μηδέν.

4.3.1.2 Εγκάρσιες Αντισταθμίσεις

Οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις είναι συστοιχίες πυκνωτών παράλληλα συνδεδεμένες στους ζυγούς. Στην παρούσα εργασία θα θεωρηθούν αντισταθμίσεις με τιμή χωρητικότητας που μπορεί να μεταβάλλεται διακριτά με σταθερά βήματα μέσω χρήσης διακοπών. Για το συμβολισμό των καταστάσεων μιας τέτοιας αντιστάθμισης i θα χρησιμοποιηθεί η ακέραια μεταβλητή p_i :

$$p_i \in \{1, 2, \dots, p_i^{max}\}, \quad i \in B \quad (4.31)$$

όπου: p_i^{max} ο αριθμός των διαθέσιμων βημάτων μεταβολής αυξημένος κατά ένα.

Έστω ότι με κάθε βήμα η τιμή της χωρητικότητας μεταβάλλεται κατά Δb_{sh_i} . Η συνολική αγωγιμότητα της αντιστάθμισης (b_{sh_i}) είναι συνάρτηση της μεταβλητής κατάστασης :

$$b_{sh_i} = (p_i - 1) \Delta b_{sh_i} \quad (4.32)$$

Η άεργος ισχύς που παρέχει η αντιστάθμιση στο ζυγό σύνδεσης i (Q_{sh_i}), εξαρτάται από τη b_{sh_i} και το μέτρο της τάσης V_i του ζυγού ως εξής :

$$Q_{sh_i} = b_{sh_i} V_i^2 \xLeftrightarrow{(4.20),(4.32)} Q_{sh_i} = (p_i - 1) \Delta b_{sh_i} U_i \quad (4.33)$$

Επίσης, ισχύουν:

$$\Delta Q_{sh_i} = \Delta b_{sh_i} U_i \quad (4.34)$$

$$(4.33) \xLeftrightarrow{(4.34)} Q_{sh_i} = (p_i - 1) \Delta Q_{sh_i} \quad (4.35)$$

όπου ΔQ_{sh_i} : η μεταβολή της τιμής αέργου ισχύος ανά βήμα

Σε ορισμένες περιπτώσεις, κατά την περιγραφή της αντιστάθμισης δε δίνεται η μεταβολή της αγωγιμότητας ανά βήμα, Δb_{sh_i} , αλλά η αντίστοιχη μεταβολή αέργου ισχύος ΔQ_{sh_i} . Η τιμή αυτή, αν και όπως φαίνεται από την (4.34) είναι συνάρτηση της τάσης του ζυγού σύνδεσης, μπορεί να θεωρηθεί σταθερή λόγω μικρών αποκλίσεων μεταξύ των ακραίων τιμών των τάσεων των ζυγών στην περίπτωση κανονικής λειτουργίας του δικτύου.

4.3.1.3 Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ

Ένας Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ διαθέτει ένα αριθμό διαδοχικών λήψεων, συνήθως στο πρωτεύον τύλιγμά του, σε καθεμιά από τις οποίες αντιστοιχεί ένας διαφορετικός λόγος μετασχηματισμού. Με ένα διακόπτη πολλών θέσεων είναι δυνατή η σταδιακή αλλαγή της λήψης λειτουργίας του, μεταβάλλοντας έτσι το λόγο μετασχηματισμού κατά μικρά βήματα έως την επιθυμητή τιμή. Αν με t_{ij} συμβολιστεί η τρέχουσα λήψη ενός μετασχηματιστή $i - j$ με t_{ij}^{max} λήψεις, τότε ισχύει :

$$t_{ij} \in \{1, 2, \dots, t_{ij}^{max}\}, \quad i - j \in T \tag{4.36}$$

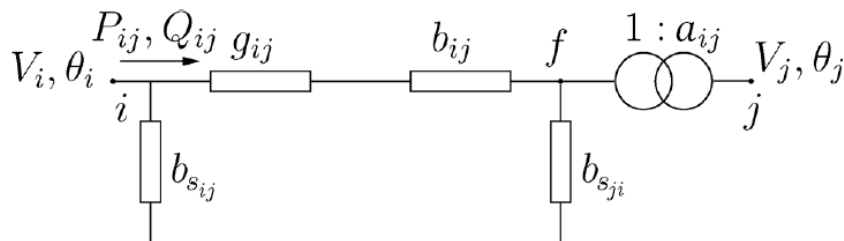
Οι διαφορετικές τιμές του λόγου μετασχηματισμού του Μ/Σ είναι ίσες με τον αριθμό των λήψεων που φέρει. Με μετάβαση από κάθε λήψη σε διαδοχική της επιτυγχάνεται μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού κατά ένα σταθερό ποσοστό επί της ονομαστικής του τιμής. Έστω ότι η μεταβολή αυτή είναι Δa_{ij} ανά βήμα. Γίνεται η παραδοχή ότι η ελάχιστη τιμή του λόγου επιτυγχάνεται για τη λήψη 1 και η μέγιστη για την t_{ij}^{max} . Με τα δεδομένα αυτά, για το λόγο μετασχηματισμού a_{ij} ενός Μ/Σ που βρίσκεται στη λήψη t_{ij} ισχύει :

$$a_{ij} = a_{ij}^{min} + (t_{ij} - 1) \Delta a_{ij} \tag{4.37}$$

όπου:
$$\Delta a_{ij} = \frac{a_{ij}^{max} - a_{ij}^{min}}{t_{ij}^{max} - 1} \tag{4.38}$$

$a_{ij}^{min}, a_{ij}^{max}$: η ελάχιστη και μέγιστη τιμή του λόγου μετασχηματισμού αντίστοιχα

Η μοντελοποίηση ενός Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ συνδεδεμένου σε γραμμή χρησιμοποιεί το π μοντέλο για γραμμή σε σειρά με ένα ιδανικό Μ/Σ. Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται το μοντέλο μιας γραμμής που συνδέει τους ζυγούς i και j και φέρει Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στο ζυγό j . Σε αυτό διακρίνεται ο εικονικός κόμβος f ο οποίος μεσολαβεί μεταξύ των i και j .



Σχήμα 4.3 : Μοντέλο γραμμής με μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ

Οι ροές ισχύος κατά μήκος του Μ/Σ, δηλαδή μεταξύ των κόμβων f και j , λόγω του ότι θεωρήθηκε ιδανικός, πληρούν τη σχέση :

$$\hat{S}_{fj} + \hat{S}_{jf} = 0 \quad (4.39)$$

Άρα για την περιγραφή της σύνθετης γραμμής χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (4.7) (4.8) και (4.14) για τους κόμβους i και f ενώ εντάσσεται στο μοντέλο και η νέα εξίσωση (όπου το a_{ij} δίνεται από την (4.37)) :

$$V_j = a_{ij} V_f \quad (4.40)$$

Με κατάλληλη αντικατάσταση των συμβατικών μεταβλητών του μη-γραμμικού μοντέλου με αυτές του τετραγωνικού, προκύπτει :

$$(4.40) \stackrel{(4.20)}{\iff} U_j = \alpha_{ij}^2 U_f \iff U_j = \bar{a}_{ij} U_f \quad (4.41)$$

$$\text{όπου :} \quad \bar{a}_{ij} = \alpha_{ij}^2 \quad (4.42)$$

Να σημειωθεί ότι μολονότι το παράδειγμα του σχήματος 6.3 αναφερόταν σε μία γραμμή, είναι δυνατόν να υπάρχουν περισσότεροι από ένας Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ σε ένα δίκτυο. Είναι προφανές ότι ο αριθμός των εικονικών κόμβων του μοντέλου ταυτίζεται με τον αριθμό των Μ/Σ στο δίκτυο. Με σκοπό τη διευκόλυνση διάκρισής τους, η τάση του εικονικού κόμβου κάθε γραμμής $i - j \in T$ θα συμβολίζεται ως U_{fij} .

4.3.2 Περιορισμοί του προβλήματος

Με την εισαγωγή των νέων στοιχείων στο μοντέλο βελτιστοποίησης δημιουργούνται διαφοροποιήσεις στις εξισώσεις ροής ισχύος, μεταβάλλονται παλιοί και εισάγονται νέοι περιορισμοί ενώ αλλάζει σημαντικά και η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης που χρησιμοποιείται στη βελτιστοποίηση. Το τελικό μοντέλο που προκύπτει είναι μια επέκταση του τετραγωνικού μοντέλου που παρουσιάζεται στο [4.9] με στοιχεία από τα [4.3],[4.7].

Πλέον οι ζυγοί έχουν τη δυνατότητα να φέρουν εγκάρσιες αντισταθμίσεις οι οποίες συνεισφέρουν στη εισροή αέργου ισχύος σε αυτούς. Αυτό οδηγεί σε τροποποίηση στις εξισώσεις ροής αέργου ισχύος. Η τελική μορφή των εξισώσεων ροής για τους ζυγούς είναι :

$$P_{g_i} - P_{d_i} = \sum_{j \in N_i} (g_{ij} U_i - g_{ij} W_{ij} - b_{ij} T_{ij}), \quad i \in N \quad (4.43)$$

$$(4.27) \implies Q_{g_i} - Q_{d_i} + Q_{sh_i} = \sum_{j \in N_i} (-b_{ij} U_i + b_{ij} W_{ij} - g_{ij} T_{ij}), \quad i \in N \quad (4.44)$$

$$\text{όπου :} \quad Q_{sh_i} = \begin{cases} 0 & , \quad i \in N \setminus B \\ (p_i - 1) \Delta Q_{sh_i} = (p_i - 1) \Delta b_{sh_i} U_i & , \quad i \in B \end{cases} \quad (4.45)$$

Ο περιορισμός (4.28) για τις τάσεις των ζυγών αφαιρείται από το μοντέλο και στη θέση του εισάγεται ο εξής :

$$V_{\min_i}^2 - \delta_{1_i} \leq U_i \leq V_{\max_i}^2 + \delta_{2_i}, \quad i \in N \quad (4.46)$$

όπου δ_{1_i} , δ_{2_i} είναι μεταβλητές χαλάρωσης της τάσης του ζυγού i (είναι μη αρνητικές μεταβλητές, δηλαδή ισχύει $\delta_{1_i} \geq 0$, $\delta_{2_i} \geq 0$)

Αυτό συμβαίνει διότι ενίοτε, προκειμένου να επιτύχει αποδεκτά χαμηλή τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, ο διαχειριστής του δικτύου είναι διατεθειμένος να δεχτεί κάποια μικρή παραβίαση των ορίων τάσεως των ζυγών. Για να γίνει αυτό δυνατόν, ο "αυστηρός" περιορισμός (4.28) αντικαθίσταται από τον (4.46). Ο περιορισμός αυτός επιτρέπει τη χαλάρωση των ορίων τάσης κατά ένα μικρό ποσό για εύρεση επιθυμητών λύσεων οριακά εκτός περιορισμών.

Οι σχέσεις (4.15) και (4.16) για τις μονάδες ΔΠ εξακολουθούν να ισχύουν, επιτρέποντας και εδώ την παροχή ελεγχόμενης αέργου ισχύος για κάλυψη των αναγκών του δικτύου.

Οι περιορισμοί (4.23)–(4.25) και (4.29) εξακολουθούν να ισχύουν μόνο για τις γραμμές χωρίς διακόπτες, δηλαδή για $i - j \in L \setminus S$. Οι αντίστοιχοι περιορισμοί για $i - j \in S$ πρέπει να τροποποιηθούν ώστε να ισχύουν ανεξαρτήτως της κατάστασης των διακοπών, δηλαδή και για τις δύο τιμές του s_{ij} . Προκύπτουν έτσι οι παρακάτω σχέσεις, για κάθε $i - j \in S$:

$$-s_{ij} P_{ij}^{\max} \leq P_{ij} \leq s_{ij} P_{ij}^{\max} \quad (4.47)$$

$$-s_{ij} Q_{ij}^{\max} \leq Q_{ij} \leq s_{ij} Q_{ij}^{\max} \quad (4.48)$$

$$-K_e (1 - s_{ij}) \leq U_i U_j - W_{ij}^2 - T_{ij}^2 \leq K_e (1 - s_{ij}) \quad (4.49)$$

$$-K_W (1 - s_{ij}) \leq W_{ij} - W_{ji} \leq K_W (1 - s_{ij}) \quad (4.50)$$

$$-K_T (1 - s_{ij}) \leq T_{ij} + T_{ji} \leq K_T (1 - s_{ij}) \quad (4.51)$$

$$-K_I (1 - s_{ij}) \leq (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) (U_i + U_j - 2 W_{ij}) \leq K_I (1 - s_{ij}) + I_{lim_{ij}}^2 \quad (4.52)$$

όπου : $P_{ij} = g_{ij} U_i - g_{ij} W_{ij} - b_{ij} T_{ij}$

$$Q_{ij} = -b_{ij} U_i + b_{ij} W_{ij} - g_{ij} T_{ij}$$

P_{ij}^{\max} , Q_{ij}^{\max} είναι ενδεικτικές μέγιστες τιμές ισχύος στις γραμμές

K_e , K_W , K_T , K_I είναι θετικές σταθερές

Οι τιμές των φρασσόμενων παραστάσεων στις εξισώσεις (4.47) – (4.51) εξαρτώνται από την τιμή του s_{ij} . Για μια συνδεδεμένη γραμμή ($s_{ij} = 1$) οι (4.47) και (4.48) δεν επηρεάζουν τις τιμές των μεταβλητών P_{ij} , Q_{ij} ενώ οι (4.49)–(4.51) γίνονται ίσες με τις

αντίστοιχες (4.23)–(4.25). Αντίθετα, για μια μη συνδεδεμένη γραμμή ($s_{ij} = 0$) οι τιμές των P_{ij} , Q_{ij} γίνονται ίσες με το μηδέν βάσει των (4.47) και (4.48) αντίστοιχα. Στην ίδια περίπτωση ($s_{ij} = 0$) οι τιμές των σχέσεων (4.49)–(4.51) κυμαίνονται μεταξύ κάποιων ορίων που καθορίζονται από τις σταθερές K_e , K_W και K_T αντίστοιχα.

Αντίστοιχο ρόλο έχει και η σχέση (4.52), η οποία αντικαθιστά την (4.29) για τις γραμμές με διακόπτες. Η μόνο διαφορά είναι ότι παρουσιάζει και αρνητικό μέλος, δεδομένου ότι σε αποσυνδεδεμένο κλάδο είναι δυνατόν η ποσότητα $U_i + U_j - 2W_{ij}$ να λαμβάνει και αρνητικές τιμές.

Οι σταθερές K_e , K_W , K_T και K_I λαμβάνουν κατάλληλες τιμές ώστε να επιτρέπουν επαρκή ελευθερία στις τιμές των σχετικών μεταβλητών και οι τιμές τους μπορούν να προκύψουν από τις παραστάσεις που φράσσουν [4.9]. Όταν μια γραμμή είναι ανοικτή ($s_{ij} = 0$), τότε ισχύει $P_{ij} = P_{ji} = Q_{ij} = Q_{ji} = 0$. Αντικαθιστώντας στη σχέση αυτή τις μεταβλητές ροών ισχύος με τις μεταβλητές U , T και W προκύπτει ότι $T_{ij} = T_{ji} = 0$, $W_{ij} = U_i$ και $W_{ji} = U_j$. Έτσι για τις ανοικτές γραμμές $i - j$ ισχύει :

$$\begin{aligned} U_i U_j - W_{ij}^2 - T_{ij}^2 &= U_i (U_j - U_i) \\ W_{ij} - W_{ji} &= U_i - U_j \\ T_{ij} + T_{ji} &= 0 \\ (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) (U_i + U_j - 2W_{ij}) &= (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) (U_j - U_i) \end{aligned}$$

Μια δυνατή τιμή για τη μέγιστη επιτρεπόμενη διαφορά μεταξύ των U_i, U_j είναι η V_{max}^2 . Με τη θεώρηση αυτή, οι σταθερές έχουν τις εξής τιμές :

$$\begin{aligned} K_e &= V_{max}^4 \\ K_W &= V_{max}^2 \\ K_T &= 0 \\ K_I &= (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) V_{max}^2 \end{aligned}$$

Σε ορισμένες περιπτώσεις η λύση ενός προβλήματος επαναδιαμόρφωσης μπορεί να απαιτήσει την σύνδεση ή αποσύνδεση πολλών γραμμών. Όμως η λειτουργία των διακοπών σύνδεσης των γραμμών του δικτύου, αν αφηθεί ανεξέλεγκτη, μπορεί να οδηγήσει σε τοπολογία που να μην είναι ακτινική. Για το λόγο αυτό προστίθεται στο μοντέλο ένας περιορισμός που διατηρεί τον αριθμό των συνδεδεμένων γραμμών με τηλεχειριζόμενους διακόπτες πάντα ίδιο :

$$\sum_{ij \in S} s_{ij} = \sum_{ij \in S} s_{ij}^0 \quad (4.53)$$

όπου : s_{ij}^0 η αρχική κατάσταση των διακοπών της γραμμής $i - j \in S$

Ωστόσο μόνο ο εν λόγω περιορισμός δεν αρκεί για να εγγυηθεί διατήρηση της ακτινικής τοπολογίας του δικτύου. Σε περιπτώσεις με τμήματα του δικτύου όπου η τοπική

παραγωγή ΔΠ ταυτίζεται πλήρως με τη ζήτηση φορτίων των κοντινών ζυγών το μοντέλο ελέγχου είναι πιθανό να αποσυνδέσει τα τμήματα αυτά από το κυρίως δίκτυο, προκαλώντας νησιδοποίηση. Η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού γίνεται με την εισαγωγή πρόσθετων περιορισμών που θα διασφαλίζουν ότι το δίκτυο θα έχει κάθε στιγμή τη μορφή *συνδεδεικτού δένδρου (spanning tree)* με ρίζα το ζυγό του υποσταθμού υποβιβασμού [4.1]. Με τον τρόπο αυτό η ακτινικότητα του δικτύου διατηρείται ανεξαρτήτως της κατεύθυνσης των ροών ισχύος στις γραμμές του.

Για την υλοποίηση του δένδρου του δικτύου θα γίνει εισαγωγή δύο δυαδικών μεταβλητών για κάθε γραμμή $i - j$ (β_{ij}, β_{ji}). Οι συνθήκες που ακολουθούν εισάγουν τον περιορισμό ότι κάθε κόμβος (ζυγός) του δικτύου πέραν αυτού στον υποσταθμό θα πρέπει να έχει ακριβώς ένα γονέα στο τελικό δένδρο :

$$\beta_{ij} \in \{0,1\}, \quad i - j \in L \tag{4.54}$$

$$\beta_{ij} + \beta_{ji} = s_{ij}, \quad i - j \in L \tag{4.55}$$

$$\sum_{j \in N_i} \beta_{ij} = 1, \quad i \in N \tag{4.56}$$

$$\beta_{0j} = 0, \quad j \in N_0 \tag{4.57}$$

Η εξίσωση (4.55) υποδεικνύει ότι μία γραμμή του δικτύου αποτελεί μέρος του συνδεδεικτού δένδρου εάν ο ζυγός i είναι γονέας του ζυγού j ($\beta_{ij} = 1$) ή το αντίστροφο ($\beta_{ji} = 1$). Η (4.56) δηλώνει ότι κάθε ζυγός πρέπει να έχει ακριβώς ένα γονέα, ενώ η (4.57) θέτει τον αριθμό των γονέων του ζυγού 0 του υποσταθμού ίσο με μηδέν. Με τις εξισώσεις αυτές η ακτινικότητα του δικτύου είναι εξασφαλισμένη.

Αν και είναι δυνατός ο έλεγχος των κινήσεων των διακριτών στοιχείων ελέγχου μέσω κατάλληλης ρύθμισης σταθερών στην αντικειμενική συνάρτηση, υπάρχουν και συνθήκες που θέτουν ένα άνω όριο στο πλήθος των ενεργειών. Αυτές είναι οι εξής :

$$\sum_{ij \in S} |s_{ij} - s_{ij}^0| \leq s_{sw} \tag{4.58}$$

$$\sum_{ij \in T} |t_{ij} - t_{ij}^0| \leq t_{sw} \tag{4.59}$$

$$\sum_{i \in B} |p_i - p_i^0| \leq p_{sw} \tag{4.60}$$

όπου s_{sw}, t_{sw}, p_{sw} : τα μέγιστα όρια των κινήσεων για διακόπτες, Μ/Σ και εγκάρσιες αντισταθμίσεις αντίστοιχα

4.3.3 Αντικειμενική Συνάρτηση

Η επαναδιαμόρφωση ενός δικτύου μπορεί να οδηγήσει σε συχνές κινήσεις του ελεγχόμενου εξοπλισμού του, οδηγώντας σε φθορά και καταπόνησή του. Αυτά μπορούν να μεταφραστούν σε ζημίες λειτουργίας, οπότε και τοποθετούνται στην αντικειμενική συνάρτηση, ως επιμέρους στόχοι (*multi-objective optimization*).

Στο μοντέλο βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία έχει γίνει χρήση της ακόλουθης αντικειμενικής συνάρτησης :

$$Z = \min \sum_{i \in G} w_{P_g} (P_{g_i}^0 - P_{g_i})^2 + \sum_{ij \in S} w_s |s_{ij} - s_{ij}^0| + \sum_{ij \in T} w_t |t_{ij} - t_{ij}^0| + \sum_{i \in B} w_p |p_i - p_i^0| + \sum_{i \in N} w_v (\delta_{1_i} + \delta_{2_i}) \quad (4.61)$$

όπου : $s_{ij}^0, t_{ij}^0, p_i^0$ οι αρχικές καταστάσεις των διακοπών, των Μ/Σ και των εγκάρσιων αντισταθμίσεων αντίστοιχα

s_{ij}, t_{ij}, p_i οι αντίστοιχες τελικές καταστάσεις των διακοπών, των Μ/Σ και των εγκάρσιων αντισταθμίσεων αντίστοιχα μετά την επαναδιαμόρφωση

$w_{P_g}, w_s, w_t, w_p, w_v$ οι συντελεστές βαρών των διαφορετικών ενεργειών ελέγχου

Έχοντας ορίσει τις μεταβλητές της (4.61), παρατηρείται ότι εκτός από τον τετραγωνικό όρο της ενεργού ισχύος γίνεται και εμφάνιση αθροισμάτων με όρους που περιέχουν τους αριθμούς κινήσεων των διακοπών, Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ και εγκάρσιων αντισταθμίσεων, της μορφής $|A - A^0|$. Κάθε άθροισμα φέρει και διαφορετικό συντελεστή βάρους, που αντικατοπτρίζει το κόστος της αντίστοιχης ενέργειας. Είναι λογικό ότι σε ένα δίκτυο με $w_{P_g} \gg w_s$ για αντιμετώπιση μιας διαταραχής θα προτιμηθεί μεγαλύτερος αριθμός "φθηνών" κινήσεων διακοπών έναντι της "ακριβότερης" περικοπής ενεργού ισχύος της ΔΠ. Αντίθετα, με επαρκώς μεγάλη τιμή του w_s , είναι δυνατό να προκύψει λύση με περιορισμένες ή και καμία κίνηση διακόπτη, περικόπτοντας μεγαλύτερο ποσό ΔΠ. Στο μοντέλο που θα εφαρμοστεί, οι χειρισμοί όλων τα στοιχείων ελέγχου θα θεωρηθούν ότι έχουν ίσο κόστος μεταξύ τους, δηλαδή θα ισχύει $w_s = w_p = w_t$. Το κόστος χειρισμών θα ληφθεί επίσης πολύ μικρότερο από το κόστος περικοπής ενεργού ισχύος w_{P_g} (δεδομένου ότι στο μοντέλο οι τιμές των P_{g_i} θα δίνονται σε ανά μονάδα σύστημα με επαρκώς μεγάλη τιμή βάσης ισχύος).

Ο τελευταίος όρος που εμφανίζεται στην (4.61) έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση των μεταβλητών χαλάρωσης της τάσεως των ζυγών ($\delta_{1_i}, \delta_{2_i}$). Η ελαχιστοποίηση της απόκλισης των τάσεων των ζυγών από τα όρια λειτουργίας αποτελεί κυρίαρχη προτεραιότητα του ελέγχου, γι' αυτό και ο συντελεστής βάρους w_v επιλέγεται πολύ μεγαλύτερος των υπολοίπων. Ως αποτέλεσμα, οι μεταβλητές χαλάρωσης θα λαμβάνουν πολύ μικρότερες τιμές σε σχέση με τις άλλες μεταβλητές ελέγχου.

Συνολικά λοιπόν, για τους συντελεστές βαρών της αντικειμενικής συνάρτησης του μοντέλου βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης θα ισχύει :

$$w_V \gg w_{P_g} \gg w_s = w_p = w_t$$

Το ολοκληρωμένο πρόβλημα βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης σε ενεργά ακτινικά δίκτυα διανομής έχει λοιπόν την ακόλουθη μορφή :

Ελαχιστοποίηση της :

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in G} w_{P_g} (P_{g_i}^0 - P_{g_i})^2 + \sum_{ij \in S} w_s |s_{ij} - s_{ij}^0| + \sum_{ij \in T} w_t |t_{ij} - t_{ij}^0| + \\ & + \sum_{i \in B} w_p |p_i - p_i^0| + \sum_{i \in N} w_V (\delta_{1_i} + \delta_{2_i}) \end{aligned}$$

Υπό τους περιορισμούς :

$$s_{ij} \in \{0,1\}, \quad i - j \in S$$

$$p_i \in \{1, 2, \dots, p_i^{max}\}, \quad i \in B$$

$$t_{ij} \in \{1, 2, \dots, t_{ij}^{max}\}, \quad i - j \in T$$

$$\beta_{ij} \in \{0,1\}, \quad i - j \in L$$

$$P_{ij} = g_{ij} U_i - g_{ij} W_{ij} - b_{ij} T_{ij}, \quad i - j \in L$$

$$Q_{ij} = -b_{ij} U_i + b_{ij} W_{ij} - g_{ij} T_{ij}, \quad i - j \in L$$

$$P_{g_i} - P_{d_i} = \sum_{j \in N_i} P_{ij}, \quad i \in N$$

$$Q_{g_i} - Q_{d_i} + Q_{sh_i} = \sum_{j \in N_i} Q_{ij}, \quad i \in N$$

$$P_{g_i}^{min} \leq P_{g_i} \leq P_{g_i}^{max}, \quad i \in G$$

$$-P_{g_i}^{max} \tan \varphi_{lim_i} \leq Q_{g_i} \leq P_{g_i}^{max} \tan \varphi_{lim_i}, \quad i \in G$$

$$-s_{ij} P_{ij}^{max} \leq P_{ij} \leq s_{ij} P_{ij}^{max}, \quad i - j \in L$$

$$-s_{ij} Q_{ij}^{max} \leq Q_{ij} \leq s_{ij} Q_{ij}^{max}, \quad i - j \in L$$

$$-K_e (1 - s_{ij}) \leq U_i U_j - W_{ij}^2 - T_{ij}^2 \leq K_e (1 - s_{ij}), \quad i - j \in L$$

$$-K_W (1 - s_{ij}) \leq W_{ij} - W_{ji} \leq K_W (1 - s_{ij}), \quad i - j \in L$$

$$-K_T (1 - s_{ij}) \leq T_{ij} + T_{ji} \leq K_T (1 - s_{ij}), \quad i - j \in L$$

$$-K_I (1 - s_{ij}) \leq (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) (U_i + U_j - 2W_{ij}) \leq K_I (1 - s_{ij}) + I_{lim_{ij}}^2, \quad i - j \in L$$

$$Q_{sh_i} = (p_i - 1) \Delta Q_{sh_i}, \quad i \in B$$

$$a_{ij} = a_{ij}^{min} + (t_{ij} - 1) \Delta a_{ij}, \quad i - j \in T$$

$$\Delta a_{ij} = \frac{a_{ij}^{max} - a_{ij}^{min}}{t_{ij}^{max} - 1}, \quad i - j \in T$$

$$\bar{a}_{ij} = \alpha_{ij}^2, \quad i - j \in T$$

$$U_j = \bar{a}_{ij} U_{f_{ij}}, \quad i - j \in T$$

$$-K_e (1 - s_{ij}) \leq U_i U_{f_{ij}} - W_{ij}^2 - T_{ij}^2 \leq K_e (1 - s_{ij}), \quad i - j \in T$$

$$-K_I (1 - s_{ij}) \leq (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) (U_i + U_{f_{ij}} - 2W_{ij}) \leq K_I (1 - s_{ij}) + I_{lim_{ij}}^2, \quad i - j \in T$$

$$\sum_{ij \in S} s_{ij} = \sum_{ij \in S} s_{ij}^0$$

$$\beta_{ij} + \beta_{ji} = s_{ij}, \quad i - j \in L$$

$$\sum_{j \in N_i} \beta_{ij} = 1, \quad i \in N$$

$$\beta_{0j} = 0, \quad j \in N_0$$

$$\sum_{ij \in S} |s_{ij} - s_{ij}^0| \leq s_{sw}$$

$$\sum_{ij \in T} |t_{ij} - t_{ij}^0| \leq t_{sw}$$

$$\sum_{i \in B} |p_i - p_i^0| \leq p_{sw}$$

Για την επίλυση του προβλήματος αυτού θα αναπτυχθεί κώδικας στο λογισμικό GAMS, το οποίο θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Οι εφαρμογές και τα αποτελέσματα του μοντέλου σε ποικίλα δίκτυα διανομής εκτίθενται στο κεφάλαιο 6.

4.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] R. A. Jabr, R. Singh and B. C. Pal, "Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 1106–1115, May 2012.
- [4.2] Q. Zhou and J. Bialek, "Generation curtailment to manage voltage constraints in distribution networks," *IET Gen., Transm., Distrib.*, vol. 1, no. 3, pp. 492–498, May 2007.
- [4.3] I. Bilibin and F. Capitanescu, "Contributions to thermal constraints management in radial active distribution systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 111, pp. 169–176, Jun. 2014.
- [4.4] C. T. Su and C. S. Lee, "Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, no. 3, pp. 1022–1027, Jul. 2003.
- [4.5] J. F. Franco, M. J. Rider, M. Lavorato and R. Romero, "A mixed-integer LP model for the reconfiguration of radial electric distribution systems considering distributed generation," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 97, no. 4, pp. 51–60, Apr. 2013.
- [4.6] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1497, Apr. 1989.
- [4.7] F. Capitanescu, I. Bilibin and E. Romero Ramos, "A comprehensive centralized approach for voltage constraints management in active distribution grid," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 2, Mar. 2014.
- [4.8] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, τόμ. Ι, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1994.
- [4.9] E. Romero Ramos, J. Riquelme Santos and J. Reyes, "A simpler and exact mathematical model for the computation of the minimal losses power tree," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 5, pp. 562–571, May 2010.
- [4.10] M. Lavorato, J. F. Franco, M. J. Rider and R. Romero, "Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 1, pp. 172–180, Feb. 2012.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΩΔΙΚΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4, μπορεί να πάρει την εξής γενική μορφή :

$$\begin{aligned} \text{Ελαχιστοποίηση της :} & \quad f(x, y) \\ \text{Υπό τους περιορισμούς :} & \quad g_i(x, y) \leq 0, \quad i = 1, \dots, k \\ & \quad h_i(x, y) = 0, \quad i = 1, \dots, l \\ & \quad x \in X \subseteq \mathbb{R}^n \\ & \quad y \in Y \subseteq \mathbb{Z}^m \end{aligned}$$

Τα μαθηματικά χαρακτηριστικά ενός τέτοιου προβλήματος εξαρτώνται από τα σύνολα X, Y των μεταβλητών που περιέχει και από τη μορφή των συναρτήσεων f, g_i, h_i που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις και τους περιορισμούς του. Με αυτά τα κριτήρια, γίνεται διάκριση των διαφόρων προβλημάτων σε κατηγορίες :

- Με βάση τις εξισώσεις και τους περιορισμούς τους διαφοροποιούνται σε προβλήματα γραμμικού και μη-γραμμικού προγραμματισμού (*Linear Programming – LP / Non-Linear Programming – NLP*). Στα πρώτα, οι f, g_i, h_i είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών ενώ στα δεύτερα εμφανίζονται σε αυτές και μη-γραμμικές εκφράσεις. Ιδιαίτερη κατηγορία των NLP αποτελούν τα προβλήματα τετραγωνικών περιορισμών (*Quadratically Constrained Programming – QCP*), τα οποία περιέχουν μόνο γραμμικές και τετραγωνικές συναρτήσεις των μεταβλητών, δηλαδή πολυώνυμα το πολύ δευτέρου βαθμού.
- Με βάση το είδος των μεταβλητών τους διακρίνονται σε προβλήματα συνεχών και διακριτών μεταβλητών. Στα πρώτα όλες οι μεταβλητές που περιέχονται είναι πραγματικοί αριθμοί, δηλαδή $Y = \mathbb{R}$. Τα δεύτερα, που ονομάζονται αλλιώς και προβλήματα μικτών ακεραίων αριθμών (*Mixed Integer Programming – MIP*), συμπεριλαμβάνουν και μεταβλητές που είναι δυνατό να λάβουν μόνο ακέραιες τιμές, δηλαδή $Y \neq \mathbb{R}$. Σε συνδυασμό με τον προηγούμενο χαρακτηρισμό βάσει γραμμικότητας, τα MIP διακρίνονται σε *MILP, MINLP* και *MIQCP*.

Σε ένα συνεχές πρόβλημα βελτιστοποίησης με n μεταβλητές η περιοχή των αποδεκτών λύσεων (feasible region) είναι υποσύνολο του χώρου \mathbb{R}^n . Τα σύνορά της καθορίζονται σε κάθε περίπτωση από τους περιορισμούς του προβλήματος, κάθε ένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε μια καμπύλη οριοθέτησης στο χώρο. Είναι προφανές ότι η δυσκολία και ο χρόνος επίλυσης εξαρτώνται άμεσα τόσο από τη μορφολογία της αποδεκτής περιοχής κάθε προβλήματος όσο και από τις μεθόδους που επιλέγονται για τη "σάρωσή" της προς αναζήτηση της βέλτιστης λύσης. Η λύση αυτή μπορεί να είναι η καλύτερη δυνατή από το σύνολο της αποδεκτής περιοχής, οπότε ονομάζεται *ολικό βέλτιστο*, ή να είναι απλά καλύτερη από όλες τις άλλες λύσεις σε κάποια γειτονιά κοντά σε αυτή, οπότε ονομάζεται *τοπικό βέλτιστο*. Σε ένα πρόβλημα υπάρχουν πολλά τοπικά βέλτιστα αλλά μόνο ένα ολικό. Είναι επίσης δύσκολο να αποδειχθεί αν ένα τοπικό βέλτιστο είναι και ολικό.

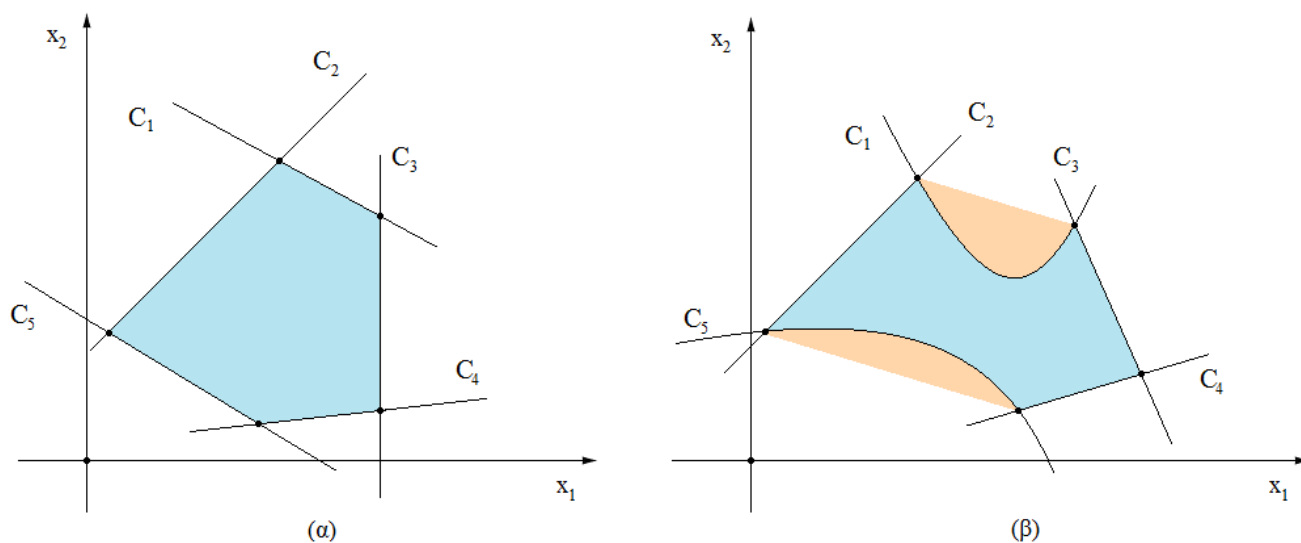
Από τις κατηγορίες προβλημάτων που προαναφέρθηκαν μεγαλύτερη ευκολία στην επίλυση παρουσιάζουν τα LP προβλήματα, στα οποία είναι δυνατή η εύρεση του ολικού βέλτιστου εντός πολυωνυμικού χρόνου. Στα προβλήματα αυτά οι γραμμικοί περιορισμοί δημιουργούν μια *κυρτή* περιοχή λύσεων (Σχήμα 5.1(α)). Το ολικό βέλτιστο για οποιαδήποτε γραμμική αντικειμενική συνάρτηση θα βρίσκεται πάντα σε μια από τις κορυφές του συνόρου της [5.1].

Αντίθετα, τα NLP προβλήματα παρουσιάζουν γενικά μη κυρτές ή και ασυνεχείς περιοχές λύσεων, ενώ το ολικό βέλτιστο μπορεί να βρίσκεται σε οποιοδήποτε σημείο εντός αυτών [5.1]. Έτσι, οι σχετικοί αλγόριθμοι χρειάζονται περισσότερο χρόνο για την επίλυσή τους, ενώ η λύση στην οποία καταλήγουν δεν είναι συνήθως το ολικό αλλά ένα τοπικό βέλτιστο [5.2]. Στο Σχήμα 5.1(β) φαίνεται η περιοχή λύσεων για ένα μη-κυρτό NLP πρόβλημα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα QCP προβλήματα, αφού μολονότι αποτελούν υποσύνολο των NLP, εμφανίζουν τους απλούστερους δυνατούς μη-γραμμικούς περιορισμούς, με αποτέλεσμα να μπορούν να επιλυθούν σχετικά ευκολότερα σε σχέση με τα περισσότερα NLP, προσφέροντας έτσι λύσεις σε καλύτερο χρόνο.

Η διαδικασία επίλυσης γίνεται πιο σύνθετη στην περίπτωση ένταξης ακέραιων μεταβλητών. Όλα τα MIP προβλήματα είναι σχετικά δυσκολότερα από τα ομόλογά τους με συνεχείς μεταβλητές. Επίσης, μεταξύ των MILP, MINLP και MIQCP ισχύουν ποιοτικά αντίστοιχες διαβαθμίσεις δυσκολίας όπως και μεταξύ των αντίστοιχων με συνεχείς μεταβλητές.

Το πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος όπως διατυπώθηκε αρχικά στο κεφάλαιο 4 περιείχε έντονα μη γραμμικές συναρτήσεις (ημιτονοειδείς). Ο σκοπός για τον οποίο έγινε η εισαγωγή νέων μεταβλητών και η αλλαγή των περιορισμών του σε τετραγωνικούς ήταν η μετατροπή του από NLP σε μορφή QCP με ευνοϊκότερα χαρακτηριστικά. Τελικά, με την εισαγωγή και των διακριτών στοιχείων, προέκυψε το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης, που είναι MIQCP και άρα εμφανίζει μεγαλύτερη ευκολία επίλυσης από το αντίστοιχο MINLP. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα περιγραφούν τα προγράμματα επίλυσης (*solvers*) που χρησιμοποιήθηκαν για το πρόβλημα αυτό και θα παρουσιαστεί το λογισμικό GAMS στο οποίο έγινε η ανάπτυξη του κώδικα του μοντέλου.



Σχήμα 5.1 : Γραφική αναπαράσταση αποδεκτών περιοχών προβλημάτων 2 μεταβλητών :
α) Πρόβλημα LP β) Μη-κυρτό NLP

5.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Για την επίλυση των μη-γραμμικών μοντέλων προγραμματισμού υπάρχουν σήμερα αρκετά διαφορετικά είδη αλγορίθμων. Δεν είναι όμως όλοι το ίδιο κατάλληλοι για κάθε πρόβλημα. Κάθε μοντέλο έχει τα δικά του ιδιάζοντα χαρακτηριστικά που καθιστούν ορισμένους αλγορίθμους καλύτερους τόσο από πλευράς ακρίβειας αποτελεσμάτων όσο και χρόνου επίλυσης.

Το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης, αν και τετραγωνικό, ανήκει στην κατηγορία των προβλημάτων MINLP. Για την επίλυσή του χρησιμοποιήθηκε ο solver *BONMIN* (*Basic Open-source Nonlinear Mixed Integer programming*), ο οποίος διαθέτει έξι διαφορετικούς αλγορίθμους για MINLP [5.3]:

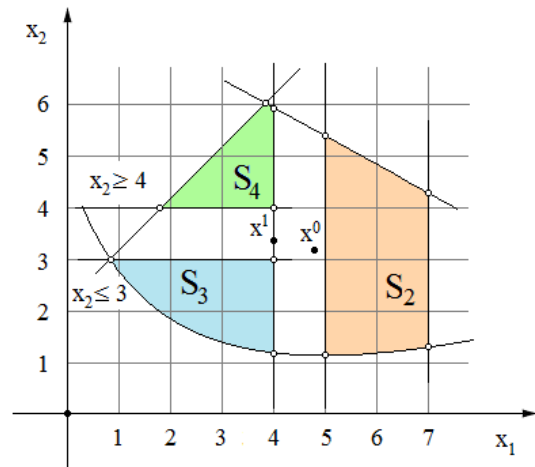
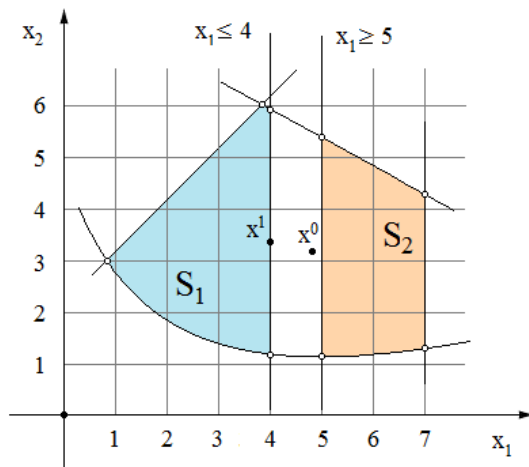
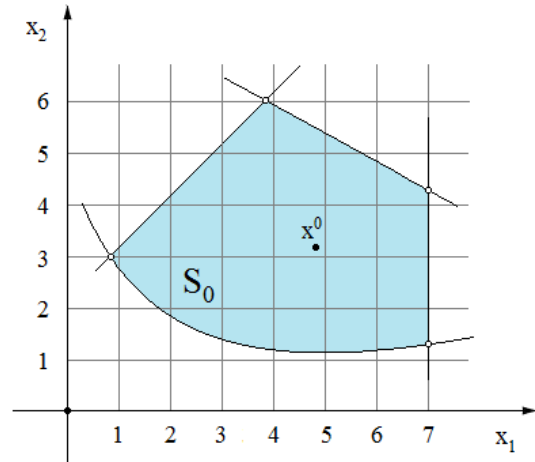
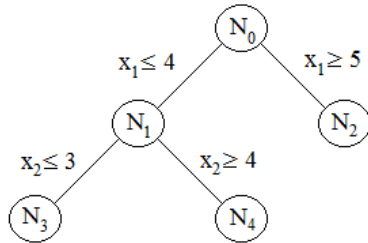
- B – BB : Branch and bound
- B – OA : Outer approximation (OA) with decomposition
- B – QG : Branch and cut (Quesada and Grossmann’s)
- B – Hyb : Hybrid OA based branch and cut
- B – Ecp : Branch and cut variant with ECP cuts
- B – iFP : Iterated feasibility pump

Οι παραπάνω αλγόριθμοι εφαρμόζονται με ακρίβεια μόνο σε MINLP προβλήματα με κυρτές αποδεκτές περιοχές λύσεων, ενώ για μη-κυρτές ακολουθούν ευρετικές μεθόδους (*heuristics*) [5.3]. Τα μοντέλα στο κεφάλαιο 4 είναι όλα μη-κυρτά, ακόμα και μετά την αντικατάσταση των έντονα μη γραμμικών συναρτήσεων. Ο αλγόριθμος που συνίσταται στην περίπτωση αυτή είναι ο *Branch and Bound (BB)* διότι παρά την ευριστική του συμπεριφορά διαθέτει πολλές επιλογές με τις οποίες μπορεί να βελτιωθεί η ποιότητα λύσεων που παρέχει [5.3].

Στη συνέχεια θα περιγραφούν τα κύρια βήματα που ακολουθούνται από τον αλγόριθμο BB για κυρτά προβλήματα MINLP [5.1],[5.2]. Αυτά είναι :

1. *Αρχικοποίηση* : Έστω N_0 το αρχικό πρόβλημα MINLP, με σύνολο ακέραιων μεταβλητών $x \in \mathbb{Z}^n$ και L μια λίστα με τα προβλήματα προς επίλυση για το τέλος του αλγόριθμου. Αρχικά $L = \{N_0\}$. Εισάγεται επίσης το άνω όριο για τη βέλτιστη λύση, z_U , με αρχική τιμή $z_U = +\infty$.
2. *Έλεγχος τερματισμού* : Αν $L = \emptyset$, ο αλγόριθμος τερματίζει και επιστρέφεται η υποψήφια βέλτιστη λύση. Ειδικά, επιλέγεται ένα πρόβλημα N_i από τη λίστα L για επίλυση και διαγράφεται από αυτή.
3. *Επίλυση* : Επιλύεται το N_i χωρίς τις συνθήκες ακεραιότητας, δηλαδή ως απλό NLP με $x \in \mathbb{R}^n$. Αν είναι αδύνατο, γίνεται επιστροφή στο βήμα 2, ειδικά, έστω x^i η βέλτιστη λύση και z^i η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε αυτή.
4. *Κλάδεμα* : Αν $z^i \geq z_U$ γίνεται επιστροφή στο βήμα 2. Αλλιώς, αν η x^i πληροί τις συνθήκες ακεραιότητας για τις μεταβλητές, δηλαδή $x^i \in \mathbb{Z}^n$, γίνεται ανανέωση της τιμής του z_U θέτοντας $z_U = z^i$. Η x^i γίνεται η νέα υποψήφια βέλτιστη λύση και ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 2. Επίσης, γίνεται αφαίρεση από τη λίστα L όλων των προβλημάτων με $z_L^i \geq z_U$ (βλ. βήμα 6 για ορισμό του z_L^i). Σε περίπτωση που $x^i \notin \mathbb{Z}^n$ ο αλγόριθμος προχωρά στο επόμενο βήμα.
5. *Διαιρέση περιοχής – Διακλάδωση* : Επιλέγεται μία μεταβλητή x_j του διανύσματος $x \in \mathbb{Z}^n$ η οποία δεν έλαβε ακέραια τιμή στη λύση x^i , δηλαδή για την οποία ισχύει $x_j^i \notin \mathbb{Z}$. Στη συνέχεια κατασκευάζονται δύο υποπροβλήματα, N_k και N_{k+1} με βάση το πρόβλημα N_i . Καθένα από αυτά είναι όμοιο με το N_i με μία διαφορά : Το πρώτο έχει τον επιπλέον περιορισμό $x_j \leq \lfloor x_j^i \rfloor$ και το δεύτερο τον $x_j \geq \lceil x_j^i \rceil$ (όπου $\lfloor x_j^i \rfloor$, $\lceil x_j^i \rceil$ το κάτω και άνω ακέραιο μέρος του x_j^i αντίστοιχα). Επίσης, ορίζονται για τα N_k και N_{k+1} οι ποσότητες z_L^k και z_L^{k+1} αντίστοιχα, οι οποίες συμβολίζουν τα κάτω όρια των αντικειμενικών συναρτήσεων των βέλτιστων λύσεων για τα ίδια και για όλα τα υποπροβλήματα που θα προκύψουν από αυτά. Αυτές λαμβάνουν τιμές $z_L^k = z_L^{k+1} = z^i$, αφού καθένα από τα N_k και N_{k+1} έχουν περιοχές λύσεων που είναι υποσύνολα της περιοχής του αρχικού προβλήματος N_i . Επομένως η βέλτιστη λύση τους θα έχει τιμή αντικειμενικής συνάρτησης μεγαλύτερη ή στην καλύτερη περίπτωση η ίδια με του N_i . Έπειτα τα προβλήματα N_k και N_{k+1} προστίθενται στη λίστα L . Όταν το βήμα αυτό εκτελείται για πρώτη φορά δημιουργείται ένα δένδρο με γόνο το πρόβλημα N_0 από το οποίο ξεκινούν κλάδοι προς τα υποπροβλήματα N_1 και N_2 . Σε επόμενες εκτελέσεις, απλά δημιουργούνται οι κόμβοι N_k και N_{k+1} και συνδέονται στον κόμβο N_i . Η σειρά με την οποία τα υποπροβλήματα τοποθετούνται στη λίστα L εξαρτάται από τη μέθοδο εξέτασης των κόμβων του δένδρου η οποία μπορεί να είναι κατά βάθος (*depth first*) ή κατά πλάτος (*breadth first*). Στο Σχήμα 5.2 δίνεται εποπτικά ένα παράδειγμα των δύο πρώτων διακλαδώσεων για ένα NLP πρόβλημα δύο μεταβλητών.

- N_0 : Αρχικό πρόβλημα
- $N_i, i \geq 1$: Διακλαδιζόμενα υποπροβλήματα
- S_i : Περιοχή λύσεων προβλήματος N_i
- $x^i = [x_1^i, x_2^i]^T$: Βέλτιστη λύση προβλήματος N_i



Σχήμα 5.2 : Διαδικασία διακλάδωσης αλγορίθμου Branch and Bound

Τα προβλήματα που προστίθενται στη λίστα επεξεργασίας L κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου BB είναι απλά μοντέλα NLP συνεχών μεταβλητών. Για την επίλυσή τους, ο BONMIN κάνει χρήση του υποπρογράμματος (subsolver) *IPOPT (Interior Point OPTimizer)* [5.3]. Πρόκειται για ένα πακέτο λογισμικού για επίλυση NLP μοντέλων μεγάλης κλίμακας. Μπορεί να διαχειρίζεται προβλήματα τα οποία περιέχουν μη-κυρτές περιοχές λύσεων με τη μόνη προϋπόθεση όλες οι συναρτήσεις του μοντέλου να είναι δύο φορές συνεχώς διαφορίσιμες [5.4]. Είναι παρόλα αυτά σημαντικό να αναφερθεί ότι εν γένει οι λύσεις που παρέχει για μη-κυρτά μοντέλα δεν είναι ολικά αλλά τοπικά βέλτιστες.

5.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΩΔΙΚΑ

5.3.1 Το λογισμικό GAMS

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε κώδικας στο λογισμικό *GAMS (General Algebraic Modeling System)*, ένα υπολογιστικό περιβάλλον για τον προσδιορισμό, την ανάλυση και την επίλυση ποικίλων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Είναι μια πολύ ισχυρή γλώσσα και έχει τη δυνατότητα να λύσει όλα τα προβλήματα που μπορεί και ο μαθηματικός προγραμματισμός. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του προγράμματος είναι [5.1] :

- Η ικανότητά του να επιλύει μικρά προβλήματα (δεκάδων μεταβλητών και περιορισμών) αλλά και μεγάλα (χιλιάδων μεταβλητών και περιορισμών) με τη χρήση της ίδιας έκτασης κώδικα. Με τη χαρακτηριστική λειτουργία δεικτών που προσφέρει καθιστά δυνατό τον ορισμό πολλών παρόμοιων περιορισμών με τη γραφή ενός μόνο "τύπου" περιορισμού.
- Ο διαχωρισμός της διαδικασίας μοντελοποίησης του προβλήματος από τη μέθοδο επίλυσης που χρησιμοποιείται. Ο χρήστης φροντίζει να ορίσει με συνέπεια το πρόβλημα και, αφού το διατυπώσει στη γλώσσα του GAMS, ένας από τους πολλούς διαθέσιμους "solvers" αναλαμβάνει την επίλυσή του. Ως αποτέλεσμα, ο χρήστης επικεντρώνεται αποκλειστικά στη μοντελοποίηση του προβλήματος χωρίς να ασχολείται με τις λεπτομέρειες των αλγοριθμικών τεχνικών επίλυσης.
- Το GAMS μιμείται σε μεγάλο βαθμό τη μαθηματική περιγραφή ενός προβλήματος, αποτελώντας οικείο περιβάλλον για τους γνώστες του μαθηματικού προγραμματισμού.
- Παρέχει μηχανισμούς για την επίλυση συλλογών από δομημένα προβλήματα βελτιστοποίησης, όπως αυτά που προκύπτουν από τεχνικές αποδόμησης.
- Διευκολύνει την ανάλυση ευαισθησίας ενός προβλήματος. Ο χρήστης εύκολα μπορεί να προγραμματίσει την επίλυση ενός μοντέλου για διαφορετικές τιμές σταθερών και να δημιουργήσει μια αναφορά με τα χαρακτηριστικά λύσης της κάθε περίπτωσης.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα βασικά συντακτικά στοιχεία ενός μοντέλου του GAMS και τα δεδομένα εξόδου που παρέχονται από το λογισμικό μετά την επίλυση του προβλήματος.

5.3.2 Σύνταξη μοντέλου στο περιβάλλον GAMS

Το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του κεφαλαίου 4 μοντελοποιήθηκε σε ένα αρχείο με το όνομα "*Model.gms*" το οποίο περιέχει στη γλώσσα GAMS το σύνολο των απαραίτητων μεταβλητών και εξισώσεων. Οι κυριότερες από τις εντολές του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη σύνταξή του είναι [5.5] :

- *Sets* : Με την εντολή αυτή εισάγονται τα σύνολα δεικτών του προβλήματος και παρατίθενται οι τιμές που μπορούν να πάρουν.
- *Scalars* : Εισάγονται οι σταθερές του προβλήματος.
- *Parameters / Tables* : Πρόκειται για δομές που χρησιμοποιούνται για τον ορισμό μονοδιάστατων παραμέτρων ή πινάκων με τουλάχιστον δύο διαστάσεις. Στη δεύτερη περίπτωση, οι δείκτες ακολουθούν τη δήλωση του ονόματος της παραμέτρου / πίνακα εντός παρενθέσεων.

- *Variables* : Με την εντολή αυτή εισάγονται οι μεταβλητές ελέγχου. Κατά τη δήλωση θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται οι διαστάσεις των μεταβλητών. Υπάρχουν επιπλέον προθέματα που μπορούν να τοποθετηθούν στην εντολή για προσδιορισμό συγκεκριμένων τύπων μεταβλητών όπως *Positive*, *Binary* ή *Integer* που εισάγουν θετικές, δυαδικές και ακέραιες μεταβλητές αντίστοιχα.
- *Equations* : Εισάγει τις εξισώσεις και τους περιορισμούς του προβλήματος. Αρχικά δηλώνονται ονομαστικά όλες οι συνθήκες που ορίζουν το πρόβλημα και στη συνέχεια αντιστοιχείται από μία σχέση ισότητας ή ανισότητας σε κάθε όνομα.
- *Model* : Με την εντολή αυτή προσδιορίζονται οι εξισώσεις που θα συμπεριληφθούν στο προς επίλυση μοντέλο. Είναι δυνατόν ένα μοντέλο να μην περιέχει όλες τις δηλωμένες εξισώσεις της εντολής *Equations*.
- *Option* : Έχει τη δυνατότητα να αλλάζει προκαθορισμένες από το λογισμικό τιμές παραμέτρων επίλυσης των solvers για τις ιδιαίτερες ανάγκες κάθε προβλήματος ή και να αναθέσει σε συγκεκριμένο solver την εκτέλεση διαφόρων ειδών προγραμματισμού. Στο αρχείο "Model.gms" με αυτή την εντολή ανατέθηκε η επίλυση MINLP στο solver BONMIN.
- *Solve* : Πρόκειται για την εντολή επίλυσης του προβλήματος που έχει διατυπωθεί. Ακολουθείται από το είδος του προγραμματισμού που ο χρήστης επιθυμεί να εφαρμόσει και από τον προσδιορισμό του στόχου της επίλυσης, δηλαδή την ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση μιας μεταβλητής. Για τη μεταβλητή αυτή θα πρέπει να έχει πρωτύτερα συμπεριληφθεί – με την εντολή *Equations* – σχέση που να την εξισώνει με την επιθυμητή αντικειμενική συνάρτηση.
- *Display* : Αν και είναι δυνατόν να γίνει εξαγωγή των αποτελεσμάτων επίλυσης σε ξεχωριστό αρχείο, με την εντολή αυτή εμφανίζονται οι τελικές τιμές των επιθυμητών μεταβλητών στο περιβάλλον του λογισμικού.

5.3.3 Δεδομένα εισαγωγής

Τα δεδομένα που χρησιμοποιεί ένα μοντέλο GAMS είναι δυνατόν να περιέχονται σε μέρος του κώδικα ή να εισάγονται από εξωτερικές πηγές. Το GAMS έχει τη δυνατότητα να διαβάζει και να γράφει σε ένα συγκεκριμένο τύπο αρχείων, τα οποία ονομάζονται *GDX* (*Gams Data eXchange files*). Πρόκειται για αρχεία η διαχείριση των οποίων υποστηρίζεται από πολλά διαφορετικά λογισμικά (*platform independent*) προσφέροντας ευελιξία στη μεταφορά πληροφοριών για παραμέτρους, μεταβλητές και εξισώσεις μεταξύ διαφορετικών προγραμμάτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση εντολών που διαβάζουν τα περιεχόμενα των κελιών αρχείων του *Microsoft Excel* και δημιουργούν *GDX* αρχεία για χρήση από τα μοντέλα του GAMS.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας συνδυάστηκε η χρήση του GAMS με το λογισμικό *MATLAB* (*MATrix LABoratory*). Δημιουργήθηκε ένα αρχείο *MATLAB* με το όνομα "*ActiveDNR.m*" με σκοπό να λειτουργήσει ως μεσάζων μεταξύ των δεδομένων, που περιείχονταν σε αρχεία *Excel*, και του μοντέλου επίλυσης στο "*Model.gms*". Με τον τρόπο

αυτό επιτεύχθηκε ευκολότερος έλεγχος της εισαγωγής δεδομένων από διαφορετικά αρχεία Excel και εξασφαλίστηκε η αυτόματη επίλυση του μοντέλου για πολλές διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης των δικτύων.

5.3.3.1 Στατικά δεδομένα δικτύων

Τα δεδομένα τοπολογίας κάθε δικτύου περιέχονται στα αρχεία Excel που φέρουν την ονομασία "#bus.xls", όπου # η εκάστοτε τιμή των ζυγών των δικτύων. Εκεί βρίσκονται οργανωμένα σε φύλλα εργασίας ανάλογα με το είδος τους. Στο φύλλο των γραμμών του δικτύου περιέχεται ένας πίνακας με τους συνδεδεμένους ζυγούς, τις τιμές αγωγιμοτήτων των γραμμών και τα θερμικά τους όρια. Για τις μονάδες ΔΠ, που στην εργασία θεωρήθηκαν αποκλειστικά ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά, δίνεται ένας πίνακας που καθορίζει τους ζυγούς σύνδεσής τους στο δίκτυο και τα όρια των ισχύων παραγωγής τους. Επίσης έχει δημιουργηθεί ένα φύλλο για κάθε είδος στοιχείου ελέγχου, δηλαδή για διακόπτες, χωρητικές αντισταθμίσεις και Μ/Σ OLTC με τα απαραίτητα χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας καθενός και τις γραμμές/ζυγούς σύνδεσής τους. Όλα τα παραπάνω στοιχεία περιγράφουν πλήρως την τοπολογία ενός δικτύου όταν βρίσκεται εκτός φορτίου. Το μόνο που μένει για τη δημιουργία του προβλήματος είναι οι παράμετροι εισόδου, δηλαδή οι παραγωγές των μονάδων ΔΠ και τα φορτία ζήτησης των ζυγών.

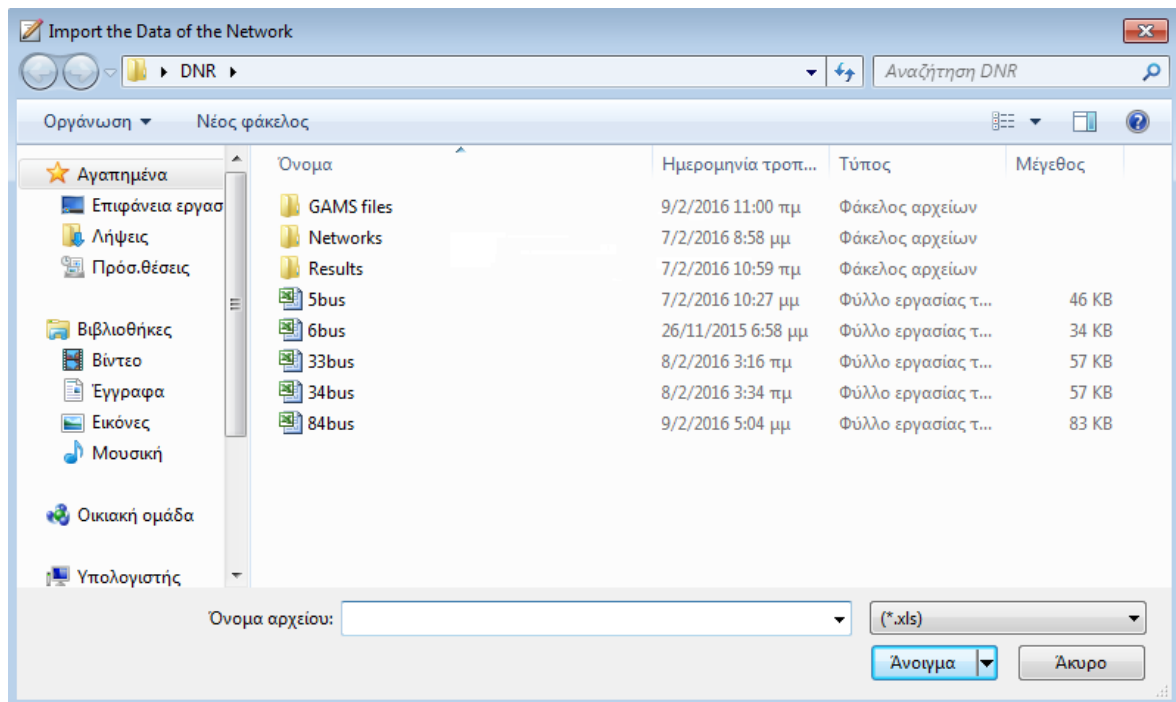
5.3.3.2 Στοχαστικές παράμετροι εισόδου

Τόσο τα φορτία των ζυγών όσο και οι συνθήκες που καθορίζουν την παραγωγή των μονάδων ΔΠ εμφανίζουν στοχαστική συμπεριφορά εντός ενός δεδομένου χρονικού διαστήματος. Ως αποτέλεσμα, σε ένα δίκτυο είναι απαραίτητο να εξεταστεί ένας επαρκής αριθμός σεναρίων λειτουργίας για να ληφθούν υπόψιν οι σχετικές διακυμάνσεις και να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα που παρέχονται από κάθε είδος ελέγχου. Καθώς όμως η εξέταση όλων των πιθανών σεναρίων λειτουργίας για ένα δίκτυο είναι πολύ χρονοβόρα υπολογιστικά, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι για ελάττωση του αριθμού τους διατηρώντας όμως τον ίδιο βαθμό στοχαστικότητας.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία είναι οι τιμές φορτίου, ανέμου και ακτινοβολίας για κάθε μία από τις 24 ώρες της ημέρας για όλες τις 365 ημέρες του έτους, δημιουργώντας έτσι ένα σύνολο 8760 ωρών. Κάθε ώρα λαμβάνεται μία μέτρηση για καθένα από τα τρία μεγέθη και εφαρμόζεται στο σύνολο των αντίστοιχων στοιχείων του δικτύου, δηλαδή θεωρείται ότι όλα τα φορτία του δικτύου ακολουθούν όμοια προφίλ λειτουργίας, ενώ αντίστοιχες θεωρήσεις γίνονται για τις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά. Χρησιμοποιώντας μία μέθοδο ομαδοποίησης δεδομένων (*data clustering method*) κατέστη δυνατό να μειωθούν οι προς εξέταση περιπτώσεις καταλήγοντας έτσι σε σημαντικά λιγότερα σενάρια με παρόμοια όμως στατιστικά χαρακτηριστικά με τα αρχικά. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε είναι μια μορφή της μεθόδου ομαδοποίησης των k -μέσων (*k-means clustering algorithm*), στην οποία δοθέντων n σημείων στο χώρο \mathbb{R}^m (όπου m ο αριθμός διαφορετικών μεγεθών μέτρησης ανά σενάριο) δημιουργούνται k ομάδες σημείων τοποθετώντας καθένα από τα n αρχικά σημεία σε ένα μοναδικό σύνολο. Στόχος είναι οι k ομάδες να κατασκευαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε το άθροισμα των τετραγώνων των αποστάσεων των σημείων από το μέσο όρο της ομάδας στην οποία ανήκουν να ελαχιστοποιείται [5.6].

5.3.3.3 Διαδικασία εισαγωγής δεδομένων

Εκτελώντας το "ActiveDNR.m" αρχικά εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο επιλέγεται το αρχείο Excel του επιθυμητού δικτύου προς επίλυση (Σχήμα 5.3). Στη συνέχεια ζητείται το αρχείο με τα δεδομένα φορτίων και παραγωγής. Τα δεδομένα διαβάζονται από το MATLAB και με τη μέθοδο που των κ-μέσων προσδιορίζονται οι παραγωγές και ζητήσεις ισχύος του δικτύου για ένα αριθμό 50 σεναρίων. Στη συνέχεια για κάθε σενάριο ακολουθείται η εξής διαδικασία : Τα δεδομένα του σεναρίου εξάγονται σε ένα GDX αρχείο με το όνομα "InputData.gdx", το οποίο φέρει τις πληροφορίες εισόδου για μία εκτέλεση του μοντέλου GAMS και στη συνέχεια, καλείται το αρχείο "Model.gms " το οποίο εισάγοντας τις παραμέτρους του από το αρχείο GDX επιλύει το πρόβλημα.



Σχήμα 5.3 : Επιλογή αρχείου Excel δικτύου εισόδου

5.3.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Αφού πραγματοποιηθεί η επίλυση ενός προβλήματος εντός του περιβάλλοντος GAMS γίνεται προβολή αναφοράς της διαδικασίας που ακολουθήθηκε από τον εκάστοτε solver και καταγράφονται οι τελικές τιμές των μεταβλητών. Στο Σχήμα 5.4 δίνεται το παράθυρο στο οποίο προβάλλονται οι τιμές των μεταβλητών εντός του λογισμικού. Οι τελείες υποδηλώνουν την τιμή μηδέν, το EPS πολύ μικρή τιμή, ενώ το INF το άπειρο. Για κάθε μεταβλητή παρατηρούνται τέσσερις τιμές. Τα LOWER και UPPER δίνουν τα άνω και κάτω όριά της, το LEVEL τη βέλτιστη τιμή της και το MARGINAL δείχνει πόσο μια χαλάρωση των ορίων της μεταβλητής επηρεάζει την αντικειμενική συνάρτηση.

The screenshot shows the GAMS IDE window titled "Revolt Excel.lst". The left pane shows a tree view of the model structure, including sections for Compilation, Execution, Display, Equation Listing, Column Listing, Model Statistics, Solution Report, SolEQU, SolVAR, and Execution. The right pane displays the final values for three variable groups:

---- VAR PCURT Active Power curtailment				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
g1	.	3.0814E-7	0.050	0.002
g2	.	0.002	0.050	3.6756E-7
g3	.	9.7598E-8	0.050	0.007
g4	.	1.0426E-7	0.050	0.007
g5	.	4.9665E-7	0.050	0.001
g6	.	0.050	0.050	-0.001

---- VAR QCURT Reactive Power curtailment				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
g1	.	5.1357E-8	0.030	0.013
g2	.	3.0100E-4	0.030	2.2680E-6
g3	.	1.6266E-8	0.030	0.042
g4	.	1.7377E-8	0.030	0.039
g5	.	8.2774E-8	0.030	0.008
g6	.	0.008	0.030	5.0930E-8

---- VAR U U magnitude				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
n0	-INF	0.949	+INF	EPS
n1	-INF	0.947	+INF	EPS

Σχήμα 5.4 : Εμφάνιση τελικών τιμών μεταβλητών στο περιβάλλον GAMS

Στην υλοποίηση με χρήση MATLAB που πραγματοποιήθηκε στην εργασία, λόγω του μεγάλου αριθμού των προβλημάτων προς επίλυση δεν έγινε προβολή των αποτελεσμάτων στο περιβάλλον GAMS, αλλά εξαγωγή τους σε αρχείο Excel. Το αρχείο "Model.gms", μετά την κλήση του από το "ActiveDNR.m" και την ολοκλήρωση της επίλυσης του εκάστοτε προβλήματος, μεταφέρει τα αποτελέσματα σε ένα νέο GDX αρχείο με το όνομα "OutputData.gdx" το οποίο διαβάζεται στη συνέχεια από το "ActiveDNR.m", που καταγράφει τα αποτελέσματα σε εσωτερικές δομές του MATLAB. Στη συνέχεια, μετά την ολοκλήρωση επίλυσης και του τελευταίου σεναρίου, τα αποθηκευμένα αποτελέσματα κάθε σεναρίου εξάγονται σε αρχείο Excel με το όνομα "Results.xls".

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα εκτέλεσης του μοντέλου για τις ποικίλες περιπτώσεις φόρτισης σε διάφορα δίκτυα, όπως αυτά προέκυψαν από την επίλυση με το μοντέλο "Model.gms" κατά την εκτέλεση του "ActiveDNR.m".

5.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] E. Castillo, A. J. Gonejo, P. Pedegral, R. Garcíá, N. Alguacil, *Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*, Αγγλία: Wiley – Interscience, 2001.
- [5.2] J. Lee, S. Leyffer, *Mixed Integer Nonlinear Programming*, New York, NY: Springer, 2012.
- [5.3] P. Bonami, J. Lee, *BONMIN User's Manual*, v. 1.5, May 2013, [Online].
Διαθέσιμο: <https://projects.coin-or.org/Bonmin>
- [5.4] A. Wächter and L. T. Biegler, "On the implementation of a primal-dual interior point filter line search algorithm for large-scale nonlinear programming," *Mathematical Programming*, vol. 106, pp. 25–27, Apr. 2006.
- [5.5] GAMS Development Corporation, *GAMS – A User's Guide*, Washington, DC, USA, Jan. 2016.
- [5.6] T. Kannungo, D. M. Mount, N. S. Netanyahu, C. D. Piatko, R. Silverman and A. Y. Wu, "An efficient k-means clustering algorithm: Analysis and implementation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 24, no. 7, pp. 881–892, Jul. 2002.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

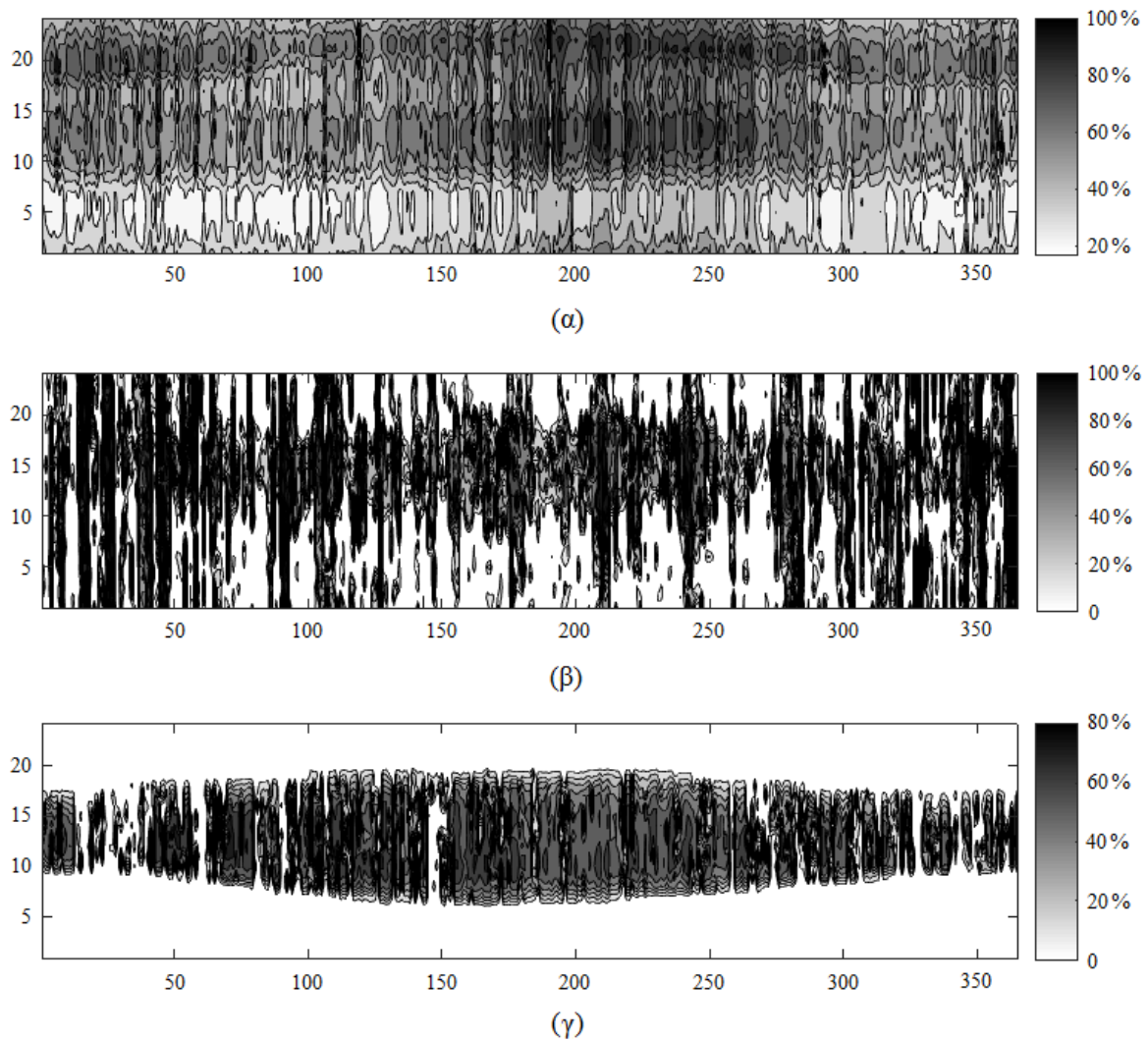
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εφαρμογών του μοντέλου βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης σε δίκτυα διανομής που περιέχονται σε σχετική βιβλιογραφία. Με σκοπό την εφαρμογή όλων των τεχνικών ελέγχου που προτείνονται στην παρούσα εργασία, σε καθένα από αυτά έχουν θεωρηθεί συνδεδεμένες μονάδες ΔΠ και τα απαιτούμενα στοιχεία ελέγχου, δηλαδή Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ, εγκάρσιες χωρητικότητες και διακόπτες για την επαναδιαμόρφωσή τους. Τα δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν είναι 34, 69 και 136 ζυγών.

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5, ως δεδομένα για τον καθορισμό τόσο της ζήτησης φορτίου όσο και της παραγωγής των μονάδων ΔΠ (φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες) χρησιμοποιούνται ωριαίες μετρήσεις φορτίου, ηλιακής ακτινοβολίας και ταχύτητας ανέμου για περίοδο ενός έτους. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται τα ετήσια προφίλ ζήτησης ισχύος, αιολικής και ηλιακής παραγωγής ισχύος, όπως φαίνονται στο Σχήμα 6.1. Γίνεται χρήση αυτών των προφίλ σε όλα τα στοιχεία του δικτύου, δηλαδή θεωρείται ότι όλες οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά παρέχουν το ίδιο αντίστοιχα ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος τους στο δίκτυο κάθε στιγμή, ενώ ανάλογα συμπεριφέρονται και τα φορτία.

Στη συνέχεια, με χρήση της μεθόδου ομαδοποίησης των k -μέσων (k -means) [6.1] δημιουργούνται από το σύνολο των μετρήσεων 50 σενάρια καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει τη ζήτηση φορτίου, την αιολική και ηλιακή παραγωγή. Επιπλέον, για κάθε σενάριο υπολογίζεται μία πιθανότητα εμφάνισης του ανάλογα με τον αριθμό των μετρήσεων που αντιπροσωπεύει το σενάριο αυτό. Η εξέταση των τεχνικών ελέγχου γίνεται για τα παραγόμενα αυτά σενάρια, περιορίζοντας σημαντικά τον χρόνο υπολογισμού και δίνοντας παράλληλα στατιστικώς ορθά αποτελέσματα.

Σε κάθε σενάριο επιλύεται το τελικό μοντέλο βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης που ορίστηκε στο κεφάλαιο 4. Τα αποτελέσματα της επίλυσης σε κάθε περίπτωση είναι οι απαιτούμενες περικοπές ισχύος των μονάδων ΔΠ, οι χειρισμοί των διαθέσιμων διακριτών στοιχείων για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του δικτύου και το σύνολο των απωλειών ενεργού ισχύος των γραμμών. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα κάθε σεναρίου και λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα εμφάνισής του, είναι δυνατό να προκύψουν οι μέσες ετήσιες τιμές ορισμένων χαρακτηριστικών μεγεθών. Αυτές θα χρησιμοποιηθούν ως μέτρο αξιολόγησης και σύγκρισης των διαφόρων τεχνικών ελέγχου που θα εφαρμοστούν.



Σχήμα 6.1 : Ετήσια δεδομένα συναρτήσει ημερών (οριζόντιος άξονας) και ωρών (κάθετος άξονας) για :

α) Ετήσια ζήτηση του φορτίου στους ζυγούς (α.μ.) β) Αιολική παραγωγή ενεργού ισχύος (α.μ.) και γ) ηλιακή παραγωγή ενεργού ισχύος (α.μ.)

Αν συμβολιστούν ως

- Ω : το σύνολο των σεναρίων
- p_i : η πιθανότητα εμφάνισης του σεναρίου $i \in \Omega$
- $P_{curt,i}$: η συνολική περικοπή ενεργού ισχύος στο σενάριο $i \in \Omega$
- $P_{loss,i}$: οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος στο σενάριο $i \in \Omega$
- \bar{P}_{curt} : η μέση ετήσια περικοπή ενεργού ισχύος
- \bar{P}_{loss} : οι μέσες ετήσιες απώλειες ενεργού ισχύος

τότε ισχύει :

$$\bar{P}_{curt} = \sum_{i \in \Omega} p_i \cdot P_{curt,i} \quad (6.1)$$

$$\bar{P}_{loss} = \sum_{i \in \Omega} p_i \cdot P_{loss,i} \quad (6.2)$$

Αν η \bar{P}_{curt} δίνεται σε MW, μπορούν στη συνέχεια να προκύψουν η ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια (E_{curt}) και οι ετήσιες απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας (E_{loss}) στο δίκτυο σε MWh, ως εξής :

$$E_{curt} = 8760 \bar{P}_{curt} \quad (6.3)$$

$$E_{loss} = 8760 \bar{P}_{loss} \quad (6.4)$$

Επομένως η ελαχιστοποίηση της περικοπής ισχύος από την εφαρμογή ελέγχου σε ένα ΔΔ μεταφράζεται σε ελαχιστοποίηση της μη αξιοποιημένης ενέργειας από τις μονάδες ΔΠ καθώς και της ενέργειας απωλειών, οδηγώντας έτσι σε μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους του διαχειριστή. Στη συνέχεια του κεφαλαίου οι E_{curt} και E_{loss} θα αποτελέσουν τα βασικά μέτρα αξιολόγησης των τεχνικών ελέγχου των δικτύων που θα εξεταστούν.

Σε όλες τις εφαρμογές του μοντέλου στο παρόν κεφάλαιο τα όρια λειτουργίας των δικτύων θεωρήθηκαν κοινά. Οι τιμές τους δίνονται από τις σχέσεις :

$$V_{min_i} = 0,95 \text{ (α.μ.)}, \quad i \in N \setminus \{0\}$$

$$V_{max_i} = 1,05 \text{ (α.μ.)}, \quad i \in N \setminus \{0\}$$

$$V_{min_0} = 0,99 \text{ (α.μ.)}$$

$$V_{max_0} = 1,01 \text{ (α.μ.)}$$

$$I_{lim_{ij}} = \frac{S_{lim_{ij}}}{V_{max_i}} \Leftrightarrow I_{lim_{ij}} \text{ (α.μ.)} = \frac{S_{lim_{ij}} \text{ (α.μ.)}}{1,05 \text{ (α.μ.)}}, \quad i-j \in L$$

$$\cos\varphi_{lim_i} \geq 0,95, \quad i \in G$$

Τα όρια των τάσεων για τον ζυγό 0 διαφέρουν από αυτά των υπόλοιπων ζυγών διότι στα εξεταζόμενα δίκτυα ο ζυγός 0 έχει θεωρηθεί ως το τερματικό σημείο του δικτύου μεταφοράς στον υποσταθμό υποβιβασμού. Το ανάντη δίκτυο μεταφοράς που καταλήγει σε αυτόν μπορεί να θεωρηθεί στα πλαίσια της εργασίας ως άπειρο ΣΗΕ, οπότε το μοντέλο επιτρέπει στην τάση του απόκλιση μόνο 0,01 (α.μ.) από τη μοναδιαία τιμή.

Από τις παραπάνω αναθέσεις προκύπτουν μοναδικές τιμές και για τις σταθερές K_e , K_W , K_T , K_I που χρησιμοποιούνται στις σχέσεις (4.50)–(4.53), αφού όλες είναι συναρτήσεις του V_{max} . Οι τιμές ικανότητας των γραμμών $I_{lim_{ij}}$ είναι εμφανές ότι εξαρτώνται από τις τιμές μέγιστης ροής ισχύος διαμέσου αυτών $S_{lim_{ij}}$, οι οποίες διαφέρουν μεταξύ

δικτύων. Οι τιμές των συντελεστών βαρών των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης ακολουθούν τις σχέσεις που προσδιορίστηκαν στο κεφάλαιο 4. Συνεπώς, σε όλες τις εφαρμογές του μοντέλου θα ισχύει :

$$w_V \gg w_{P_g} \gg w_s = w_p = w_t$$

Για κάθε δίκτυο που θα εξεταστεί στη συνέχεια επιλέχθηκαν και εφαρμόστηκαν τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου ανάλογα με τα μέσα που επιλέγει να χρησιμοποιήσει ο διαχειριστής του ΔΔ για την επαναφορά της ομαλής λειτουργίας του. Σε κάθε περίπτωση θεωρείται δυνατός ο Q-V έλεγχος της παραγωγής της αέργου ισχύος των μονάδων ΔΠ. Έτσι, τα διαφορετικά μέσα ελέγχου που θα συγκριθούν είναι η περικοπή ενεργού ισχύος ΔΠ, η μεταβολή των λήψεων των Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στον υποσταθμό υποβιβασμού, ο χειρισμός εγκάρσιων αντισταθμίσεων και η χρήση διακοπών για αλλαγή τοπολογίας του δικτύου. Οι στρατηγικές ελέγχου που προκύπτουν είναι :

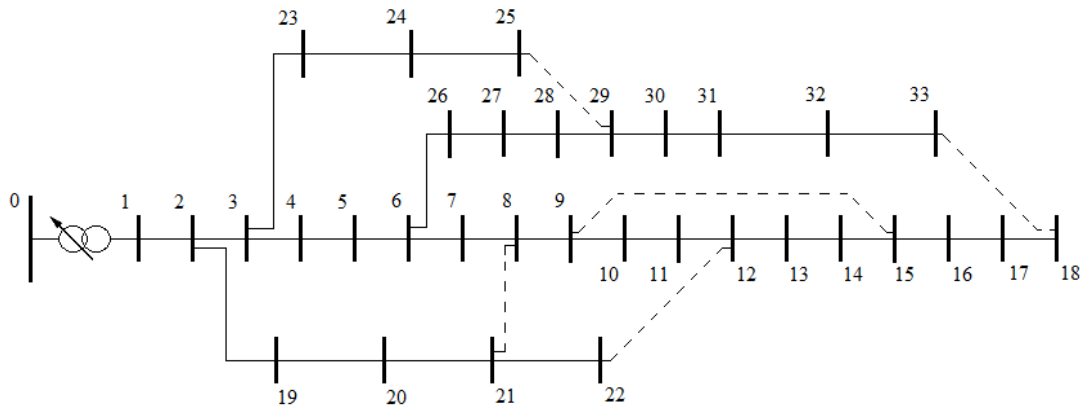
- *Στρατηγική Ελέγχου 1:* Ο μοναδικός τρόπος ελέγχου του δικτύου που επιλέγεται από το διαχειριστή είναι η περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ. Οι Μ/Σ, οι διακόπτες και οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις του δικτύου διατηρούν την αρχική κατάσταση λειτουργίας τους.
- *Στρατηγική Ελέγχου 2:* Ο έλεγχος του δικτύου περιλαμβάνει, εκτός από περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ, και χειρισμό των λήψεων των Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στον υποσταθμό υποβιβασμού. Χειρισμοί διακοπών ή αντισταθμίσεων δεν υφίστανται.
- *Στρατηγική Ελέγχου 3:* Ο έλεγχος του δικτύου περιλαμβάνει, εκτός από περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ, και χειρισμό των εγκάρσιων αντισταθμίσεων για ρύθμιση της τάσης στο σύστημα. Οι διακόπτες και οι Μ/Σ δε μεταβάλλουν την κατάσταση λειτουργίας τους.
- *Στρατηγική Ελέγχου 4:* Ο έλεγχος του δικτύου περιλαμβάνει, εκτός από περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ, και χειρισμούς διακοπών για επαναδιαμόρφωση της τοπολογίας του. Οι αντισταθμίσεις και οι Μ/Σ παραμένουν αμετάβλητοι.
- *Στρατηγική Ελέγχου 5:* Ο έλεγχος του δικτύου περιλαμβάνει, εκτός από περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ, και συνδυασμούς χειρισμών των στοιχείων ελέγχου του δικτύου με σκοπό την εξασφάλιση της βέλτιστης λύσης.

Όλες οι εφαρμογές του μοντέλου που ακολουθούν έγιναν σε H/Y με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά :

- Επεξεργαστής Intel Core 2 Duo P8600 @ 2.4 GHz
- Μνήμη RAM 2 GB
- Λειτουργικό σύστημα Windows 7 Ultimate

6.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 34 ΖΥΓΩΝ

Το δίκτυο 34 ζυγών που εμφανίζεται στο Σχήμα 6.3 είναι ονομαστικής τάσης 12,66 kV. Τα δεδομένα των φορτίων και των γραμμών του δίνονται στο [6.2].



Σχήμα 6.3 : Δίκτυο διανομής 34 ζυγών

Τα θερμικά όρια όλων των γραμμών του δικτύου θεωρούνται ίσα με 8 MVA. Οι ανοικτοί υπό φορτίο αποξεύκτες εμφανίζονται στο Σχήμα 6.3 με διακεκομμένες γραμμές. Ο ζυγός 0 τυπικά δεν ανήκει στο δίκτυο, καθώς αποτελεί τερματικό σημείο του δικτύου μεταφοράς στον υποσταθμό υποβιβασμού. Τα χαρακτηριστικά των στοιχείων ελέγχου του δικτύου για τις εφαρμογές του μοντέλου φαίνονται στους πίνακες 6.1– 6.3.

Το ίδιο δίκτυο θα εξεταστεί για δύο πιθανές περιπτώσεις μονάδων ΔΠ. Οι γεννήτριες σε καθεμία θα έχουν διαφορετικές θέσεις σύνδεσης και χαρακτηριστικά λειτουργίας. Στον πίνακα 6.4 παρουσιάζονται τα δεδομένα των μονάδων για κάθε περίπτωση. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς (P_{inst}) είναι 5 MW για την περίπτωση Α και 4,5 MW για την περίπτωση Β.

Με την εφαρμογή της μεθόδου ομαδοποίησης των κ-μέσων, με βάση το ετήσιο αρχείο δεδομένων παρήχθησαν 50 σενάρια λειτουργίας. Στον πίνακα 6.5 δίνονται για κάθε σενάριο η συνολική ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος ως ποσοστό επί του συνολικού εγκατεστημένου φορτίου στο δίκτυο καθώς και η ηλιακή και αιολική παραγωγή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ ως ποσοστό επί της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος. Η κάθε στρατηγική ελέγχου θα εφαρμοστεί στο σύνολο των σεναρίων για όλες τις περιπτώσεις μονάδων ΔΠ και στη συνέχεια θα εξαχθούν βάσει των σχέσεων (6.1)–(6.4) οι τιμές των μεγεθών αξιολόγησης της κάθε στρατηγικής.

Οι παραβιάσεις των περιορισμών του δικτύου εντοπίζονται συνήθως σε δύο είδη σεναρίων : στα σενάρια λειτουργίας υπό ελάχιστη παραγωγή και μέγιστο φορτίο, που εν γένει χαρακτηρίζονται από μεγάλες πτώσεις τάσης, και στα σενάρια λειτουργίας υπό μέγιστη παραγωγή και ελάχιστο φορτίο, όπου συνήθως εμφανίζονται υπερτάσεις στους ζυγούς. Η κάθε στρατηγική ελέγχου θα αξιολογηθεί και για τα δύο είδη σεναρίων.

Πίνακας 6.1 : Δεδομένα διακοπών του δικτύου 34 ζυγών

Τηλεχειριζόμενοι Διακόπτες	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Είδος
S8	7	8	Διακόπτες Απομόνωσης
S21	20	21	
S24	23	24	
S28	27	28	
S34	8	21	Ανοικτοί Αποζεύκτες
S35	9	15	
S36	12	22	
S37	18	33	
S38	25	29	

Πίνακας 6.2 : Δεδομένα εγκάρσιων αντισταθμίσεων του δικτύου 34 ζυγών

Εγκάρσιες αντισταθμίσεις	Ζυγός	Q_{sh} (MVar)	Αριθμός λήψεων	Αρχική θέση
C1	11	2,1	8	2
C2	17	2,1	8	2
C3	22	2,1	8	2
C4	25	2,1	8	2

Πίνακας 6.3 : Δεδομένα Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ του δικτύου 34 ζυγών

Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ	Ζυγός άκρου λήψεων	Ζυγός μη ελεγχόμενου άκρου	Αριθμός λήψεων	Αρχική θέση	Μεταβολή λόγου Μ/Σ ανά λήψη (α.μ.)
T1	0	1	25	14	0,01

Πίνακας 6.4 : Δεδομένα μονάδων ΔΠ του δικτύου 34 ζυγών

Εξεταζόμενες Περιπτώσεις	Μονάδες ΔΠ	Ζυγός	Είδος	$P_{inst,i}$ (MW)	$cos\phi_{lim,i}$
A	G1	18	Α/Γ	4	0,95
	G2 – G11	8 – 17	Φ/Β	0,1	0,95
B	G1	10	Α/Γ	1,5	1
	G2	16	Α/Γ	2	1
	G3 – G12	23 – 32	Φ/Β	0,1	1

Πίνακας 6.5 : Σενάρια ζήτησης φορτίου, ηλιακής και αιολικής παραγωγής για το δίκτυο των 34 ζυγών

A/A	Πιθανότητα εμφάνισης	Συνολική ζήτηση (%)	Ηλιακή παραγωγή (%)	Αιολική παραγωγή (%)	A/A	Πιθανότητα εμφάνισης	Συνολική ζήτηση (%)	Ηλιακή παραγωγή (%)	Αιολική παραγωγή (%)
1	0,019	71,18	2,86	47,10	26	0,013	67,42	3,55	66,95
2	0,071	33,95	0,27	1,64	27	0,017	31,60	0,50	96,73
3	0,011	44,11	53,89	47,29	28	0,013	55,50	60,63	21,25
4	0,009	72,74	17,89	4,42	29	0,026	32,33	0,67	39,43
5	0,010	71,59	30,56	61,74	30	0,044	71,88	0,24	1,17
6	0,014	32,35	0,60	66,64	31	0,065	42,23	0,45	0,93
7	0,008	81,20	59,79	76,31	32	0,038	30,67	0,56	20,64
8	0,018	53,43	17,25	2,17	33	0,006	49,52	61,63	93,59
9	0,016	58,89	59,93	1,94	34	0,014	57,14	48,13	29,36
10	0,058	26,05	0,06	1,47	35	0,010	81,85	59,62	48,14
11	0,016	59,77	62,64	41,62	36	0,010	36,88	16,67	2,01
12	0,060	51,26	0,68	1,08	37	0,011	39,99	33,48	1,58
13	0,013	58,71	35,16	5,10	38	0,012	52,26	46,05	66,07
14	0,013	53,00	20,77	55,65	39	0,014	53,68	47,89	2,27
15	0,012	54,23	66,30	71,20	40	0,013	65,56	22,33	24,24
16	0,024	50,98	2,92	38,83	41	0,017	78,65	0,71	24,73
17	0,011	69,49	57,08	60,35	42	0,014	53,02	4,77	76,76
18	0,016	50,26	2,21	98,66	43	0,014	48,82	28,47	38,28
19	0,022	61,36	1,99	28,26	44	0,012	67,31	45,28	43,61
20	0,012	77,18	55,27	25,70	45	0,010	44,92	41,76	22,32
21	0,008	48,49	33,36	88,55	46	0,009	68,38	2,83	96,52
22	0,054	61,20	0,77	0,63	47	0,006	75,66	54,95	97,20
23	0,018	49,67	1,61	57,15	48	0,011	42,48	53,91	1,13
24	0,020	84,31	0,19	1,21	49	0,027	62,84	0,84	13,47
25	0,031	45,29	1,54	18,80	50	0,009	74,33	56,30	4,04

6.2.1 Στρατηγική Ελέγχου 1 : Έλεγχος δικτύου αποκλειστικά με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ

Στη στρατηγική αυτή ο μόνος τρόπος για τη διατήρηση της ομαλής λειτουργίας του δικτύου είναι η μείωση της παραγόμενης ενεργού ισχύος από τις μονάδες ΔΠ. Τόσο οι διακόπτες όσο και οι Μ/Σ και οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις του δικτύου διατηρούν τις αρχικές τους θέσεις, οπότε στο μοντέλο του προβλήματος τίθενται $s_{sw} = p_{sw} = t_{sw} = 0$.

Το πρόβλημα του δικτύου επιλύθηκε και στις δύο διαφορετικές περιπτώσεις μονάδων ΔΠ για όλα τα σενάρια και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν.

• Περίπτωση Α

Στην περίπτωση αυτή οι συνδεδεμένες μονάδες ΔΠ είναι μια ανεμογεννήτρια εγκατεστημένης ισχύος 4 MW στο ζυγό 18 και δέκα φωτοβολταϊκές μονάδες των 100 kW συνδεδεμένες στους ζυγούς 8 έως 17.

Τα σενάρια περικοπής ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για το δίκτυο φαίνονται στον πίνακα 6.6. Για κάθε σενάριο αναγράφονται η συνολική περικοπή ενεργού ισχύος των γεννητριών και οι απώλειες ενεργού ισχύος σε όλο το δίκτυο. Το ποσό περικοπής εμφανίζει διακυμάνσεις και σημειώνει την ελάχιστη τιμή του στο σενάριο 5 και τη μέγιστη – η οποία αποτελεί περίπου το ένα τρίτο της συνολικής εγκατεστημένης ενεργού ισχύος στο δίκτυο – στο σενάριο 27.

Η συνολική άεργος παραγωγή των γεννητριών σε κάθε σενάριο εμφανίζει αρνητική τιμή και μάλιστα πολύ κοντά στην κατώτατη επιτρεπόμενη. Αυτό το αποτέλεσμα οφείλεται στον Q-V έλεγχο των μονάδων ΔΠ που επιτρέπει τη λειτουργία τους υπό χωρητικό συντελεστή ισχύος, επιτρέποντας έτσι την απορρόφηση της πλεονάζουσας αέργου ισχύος του δικτύου. Ελλείψει τέτοιου ελέγχου, το απαιτούμενο ποσό περικοπής θα ήταν μεγαλύτερο.

Εκτός από τα σενάρια περικοπής ενεργού ισχύος, παρουσιάζονται και δύο σενάρια, τα 24 και 30, στα οποία το μοντέλο δε δίνει καμία αποδεκτή λύση για το δίκτυο. Αυτό οφείλεται στο ότι στα συγκεκριμένα σενάρια εμφανίζεται μεγάλη ζήτηση και αμελητέα παραγωγή ισχύος, με αποτέλεσμα η πτώση τάσεως στους ακραίους ζυγούς του δικτύου να οδηγεί σε τιμές τάσης χαμηλότερες του κατώτατου ορίου. Στα συγκεκριμένα σενάρια δεν είναι δυνατή η αποκατάσταση της ομαλής λειτουργίας του δικτύου με τη χρήση της στρατηγικής ελέγχου 1. Αυτό συμβαίνει διότι ο μόνος τρόπος ελέγχου είναι η μεταβολή της ενεργού ή/και αέργου ισχύος των μονάδων ΔΠ, η οποία βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

Έχοντας διαθέσιμες τις τιμές όλων των μεταβλητών του δικτύου για κάθε σενάριο είναι δυνατός ο υπολογισμός των βασικών μεγεθών για τη στρατηγική, τα οποία καταγράφονται στον πίνακα 6.7. Με βάση την πιθανότητα εμφάνισης του κάθε σεναρίου υπολογίζεται η συνολική πιθανότητα το δίκτυο να οδηγηθεί σε λειτουργία εκτός φυσιολογικών ορίων είτε σε περικοπή ισχύος των μονάδων ΔΠ. Επίσης, με χρήση των σχέσεων (6.1)–(6.4) υπολογίζεται η ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια από ΔΠ και οι ετήσιες απώλειες του δικτύου. Αυτές καταγράφονται στον πίνακα τόσο ως απόλυτα μεγέθη όσο και ως ποσοστά επί της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας από ΔΠ στο δίκτυο (E_g). Τέλος, αναφέρεται και ο μέσος χρόνος επίλυσης του μοντέλου για το σύνολο των σεναρίων με τη στρατηγική ελέγχου 1.

Πίνακας 6.6 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 1 στην περίπτωση Α του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	$P_{loss,i}$ (MW)
3	0,011	0,2619	0,1913
5	0,010	0,1245	0,3293
6	0,014	0,6806	0,2193
7	0,008	0,5874	0,4384
14	0,013	0,1986	0,2342
15	0,012	0,7807	0,3349
17	0,011	0,2445	0,3262
18	0,016	1,2003	0,4539
21	0,008	1,1355	0,3976
23	0,018	0,1953	0,2246
26	0,013	0,1885	0,3297
27	0,017	1,4329	0,3710
33	0,006	1,3686	0,4533
38	0,012	0,5894	0,2906
42	0,014	0,6501	0,3297
46	0,009	0,8675	0,5226
47	0,006	1,0623	0,5817

Πίνακας 6.7 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 1 στην περίπτωση Α του δικτύου των 34 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας		6,4%
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος		19,8%
E_{curt}	(MWh)	1145,01
	(%) · E_g	11,48
E_{loss}	(MWh)	962,01
	(%) · E_g	9,64
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)		1,26

- **Περίπτωση Β**

Σε αυτή την περίπτωση στο δίκτυο θεωρούνται συνδεδεμένες δύο ανεμογεννήτριες των 1,5 MW και 2 MW στους ζυγούς 10 και 16 αντίστοιχα, ενώ δέκα φωτοβολταϊκές μονάδες των 100 (kW) βρίσκονται στους ζυγούς 23 με 32. Με σκοπό να ελεγχθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου υπό πιο αυστηρούς περιορισμούς, ο Q–V έλεγχος

πραγματοποιείται με $\cos\phi_{im} = 1$, δηλαδή εκφυλίζεται σε έλεγχο των μονάδων ΔΠ υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Τα αποτελέσματα του μοντέλου για τη στρατηγική ελέγχου 1 δίνονται στον πίνακα 6.8.

Σε σχέση με την περίπτωση Α παρατηρούνται μικρότερες απώλειες ενεργού ισχύος στο δίκτυο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διαφορές μεταξύ των μονάδων ΔΠ στις δύο περιπτώσεις. Το μεγαλύτερο μέρος της ενεργού ισχύος από ΔΠ στην περίπτωση Α παράγεται από την ανεμογεννήτρια G1. Έτσι, σε σενάρια μεγάλης παραγωγής, η εισροή ισχύος στο δίκτυο γίνεται κυρίως από ένα σημείο, προκαλώντας ρεύματα με μεγάλες τιμές έντασης. Αντίθετα, στην περίπτωση Β η παραγόμενη ενεργός ισχύς εισέρχεται στο δίκτυο από δύο κύρια σημεία (ζυγοί 10 και 16), με αποτέλεσμα η συνολική φόρτιση των γραμμών να είναι χαμηλότερη. Έτσι οι ωμικές απώλειες του δικτύου σημειώνουν μείωση, αφού εξαρτώνται τετραγωνικά από τις τιμές έντασης των ρευμάτων στις γραμμές.

Αντίστοιχα με την περίπτωση Α, τα σενάρια 24 και 30 δε δίνουν ούτε εδώ αποδεκτές λύσεις. Αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού οι θέσεις και τα χαρακτηριστικά των μονάδων ΔΠ δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα το δίκτυο όταν η παραγωγή ενεργού ισχύος είναι αμελητέα.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου 1 για την περίπτωση Β καταγράφονται στον πίνακα 6.9.

Πίνακας 6.8 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 1 στην περίπτωση Β του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφανισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	$P_{loss,i}$ (MW)
6	0,014	0,5657	0,0738
7	0,008	0,2141	0,1235
15	0,012	0,4991	0,0864
18	0,016	1,2116	0,0974
21	0,008	1,0150	0,0889
27	0,017	1,4359	0,0836
33	0,006	1,2013	0,0907
38	0,012	0,3400	0,0848
42	0,014	0,5478	0,0936
46	0,009	0,8721	0,1199
47	0,006	0,8899	0,1203

Πίνακας 6.9 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 1 στην περίπτωση Β του δικτύου των 34 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας		6,4%
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος		12,2%
E_{curt}	(MWh)	887,29
	(%) · E_g	9,98
E_{loss}	(MWh)	394,66
	(%) · E_g	4,44
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)		1,21

6.2.2 Στρατηγική Ελέγχου 2 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στο σταθμό υποβιβασμού

Με αυτή τη στρατηγική ελέγχου, πέρα από τη ρύθμιση της ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ, ο διαχειριστής έχει τη δυνατότητα μεταβολής των λήψεων των Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στον υποσταθμό υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ για αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού τους. Κατά συνέπεια οι αρχικοί ζυγοί των γραμμών του δικτύου διανομής μπορούν πλέον να μεταβάλλουν την ανά μονάδα τιμή της τάσης τους σε σχέση με τον τελικό ζυγό του δικτύου μεταφοράς. Έτσι είναι δυνατόν να αντιμετωπιστούν τόσο οι πτώσεις τάσης όσο και οι υπερτάσεις του δικτύου. Επιθυμώντας οι διακόπτες και οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις να μην αλλάζουν την κατάσταση λειτουργίας τους, στο μοντέλο τίθεται $s_{sw} = p_{sw} = 0$.

Το πρόβλημα επιλύθηκε για κάθε περίπτωση στο σύνολο των 50 σεναρίων. Τα μόνα σενάρια στα οποία σημειώθηκαν διαφορετικά αποτελέσματα σε σχέση με τη στρατηγική ελέγχου 1 υπήρξαν τα σενάρια περικοπής ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και τα σενάρια στα οποία η στρατηγική 1 δεν κατάφερε να δώσει αποδεκτή λύση.

• Περίπτωση Α

Τα αποτελέσματα εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου 2 για τα αρχικά σενάρια περικοπής ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ της περίπτωσης Α δίνονται στον πίνακα 6.10. Στα περισσότερα σενάρια παρατηρείται μείωση της συνολικής περικοπής ισχύος και ταυτόχρονα αύξηση των συνολικών απωλειών του δικτύου σε σχέση με τη στρατηγική ελέγχου 1.

Στον πίνακα 6.11 παρουσιάζονται οι χειρισμοί του Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στον υποσταθμό υποβιβασμού. Εμφανίζεται ο τελικός λόγος μετασχηματισμού και η τελική λήψη λειτουργίας του Μ/Σ, αλλά και η μεταβολή σε σχέση με την αρχική λήψη. Όλα τα σενάρια όπου η περικοπή ενεργού ισχύος είναι μικρότερη σε σχέση με τη στρατηγική 1 χρησιμοποιούν υψηλότερη λήψη από την αρχική στο Μ/Σ. Αυτό συμβαίνει διότι ο ζυγός 0 του δικτύου βρίσκεται μόνιμα πολύ κοντά στη μοναδιαία τιμή, οπότε με αύξηση του λόγου μετασχηματισμού οι τάσεις του δικτύου οδηγούνται μαζικά σε χαμηλότερα επίπεδα. Κατά

συνέπεια, απαιτείται μικρότερη περικοπή ισχύος από τις μονάδες ΔΠ για τήρηση των άνω ορίων τάσης.

Τα σενάρια 24 και 30, τα οποία με χρήση της στρατηγικής ελέγχου 1 δεν έδιναν αποδεκτές λύσεις, πλέον τηρούν όλους τους περιορισμούς τάσης. Σε αυτά ο Μ/Σ οδηγήθηκε σε χαμηλότερη λήψη, ανυψώνοντας τα επίπεδα τάσης του δικτύου προς τη μοναδιαία τιμή και αντιμετωπίζοντας τα προβλήματα που δημιουργούνταν από τη μεγάλη πτώση τάσης. Τα σενάρια αυτά εμφανίζονται μαζί με τα υπόλοιπα στον πίνακα 6.11.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου 2 για την περίπτωση Α καταγράφονται στον πίνακα 6.12. Παρατηρείται μείωση στην ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια των μονάδων ΔΠ κατά 36,6% σε σχέση με τη στρατηγική ελέγχου 1 και αύξηση των απωλειών του δικτύου κατά 10%.

Πίνακας 6.10 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 2 στην περίπτωση Α του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
3	0,011	–	-100	0,2417	+26,33
5	0,010	0,1245	0	0,3293	0
6	0,014	0,1341	-80,30	0,3551	+61,96
7	0,008	0,5874	0	0,4384	0
14	0,013	–	-100	0,2718	+16,05
15	0,012	0,4865	-37,68	0,4165	+24,37
17	0,011	0,1855	-24,13	0,3412	+4,59
18	0,016	0,8924	-25,65	0,5511	+21,42
21	0,008	0,7766	-31,60	0,5063	+27,35
23	0,018	–	-100	0,2615	+16,46
26	0,013	0,1457	-22,67	0,3404	+3,26
27	0,017	0,8937	-37,63	0,5360	+44,47
33	0,006	1,0021	-26,78	0,5714	+26,06
38	0,012	0,2850	-51,65	0,3701	+27,35
42	0,014	0,3881	-40,30	0,4005	+21,49
46	0,009	0,8675	0	0,5226	0
47	0,006	1,0623	0	0,5817	0

Πίνακας 6.11 : Πίνακας χειρισμών Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ για τη Στρατηγική Ελέγχου 2 στην περίπτωση Α του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάρια	Λόγος Μ/Σ	Τελική λήψη Μ/Σ	Μεταβολή λήψης Μ/Σ
30	0,99	12	-2
24	1	13	-1
5, 7, 46, 47	1,01	14	0
17, 26	1,02	15	1
3, 14, 15, 18, 21, 23, 33, 38, 42	1,03	16	2
27	1,04	17	3
6	1,05	18	4

Πίνακας 6.12 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 2 στην περίπτωση Α του δικτύου των 34 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας		0%
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος		15,7%
E_{curt}	(MWh)	725,63
	(%) · E_g	7,27
E_{loss}	(MWh)	1074,18
	(%) · E_g	10,76
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)		1,54

• Περίπτωση Β

Τα αποτελέσματα εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου 2 για τα αρχικά σενάρια περικοπής ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ της περίπτωσης Β δίνονται στον πίνακα 6.13. Ο έλεγχος του Μ/Σ υποβιβασμού οδηγεί σε σημαντική μείωση των περικοπών ισχύος στα σενάρια, αλλά με μεγάλη αύξηση των απωλειών του δικτύου σε σχέση με τη στρατηγική 1.

Στον πίνακα 6.14 παρουσιάζονται οι χειρισμοί του Μ/Σ για κάθε σενάριο. Η φιλοσοφία των χειρισμών είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που περιγράφηκε στην περίπτωση Α.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου 2 για την περίπτωση Β καταγράφονται στον πίνακα 6.15. Σε σχέση με τη στρατηγική 1 παρατηρείται μείωση της ετήσιας μη αξιοποιημένης ενέργειας κατά περίπου 60%, ενώ οι ετήσιες απώλειες σημειώνουν μια αύξηση της τάξης του 20%.

Πίνακας 6.13 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 2 στην περίπτωση Β του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
6	0,014	–	-100	0,1513	+104,97
7	0,008	–	-100	0,1567	+26,87
15	0,012	–	-100	0,1594	+84,41
18	0,016	0,6780	-44,04	0,1753	+80,09
21	0,008	0,4832	-52,40	0,1658	+86,41
27	0,017	0,9107	-36,58	0,1549	+85,29
33	0,006	0,6722	-44,05	0,1676	+84,85
38	0,012	–	-100	0,1311	+54,57
42	0,014	–	-100	0,1727	+84,54
46	0,009	0,5261	-39,68	0,1707	+42,42
47	0,006	0,4137	-53,51	0,1953	+62,45

Πίνακας 6.14 : Πίνακας χειρισμών Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ για τη Στρατηγική Ελέγχου 2 στην περίπτωση Β του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάρια	Λόγος Μ/Σ	Τελική λήψη Μ/Σ	Μεταβολή λήψης Μ/Σ
30	0,99	12	-2
24	1	13	-1
7, 38, 46	1,03	16	2
15, 18, 21, 27, 33, 42, 47	1,04	17	3
6	1,05	18	4

Πίνακας 6.15 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 2 στην περίπτωση Β του δικτύου των 34 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας		0%
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος		6,3%
E_{curt}	(MWh)	367,49
	(%) · E_g	4,13
E_{loss}	(MWh)	469,43
	(%) · E_g	5,28
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)		1,87

6.2.3 Στρατηγική Ελέγχου 3 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς των εγκάρσιων αντισταθμίσεων των ζυγών

Σε αυτό το πλάνο ελέγχου οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις που βρίσκονται στο δίκτυο έχουν τη δυνατότητα αυξομείωσης της χωρητικότητάς τους και κατά συνέπεια της αέργου ισχύους τους με σκοπό την εξισορρόπηση των επιπέδων τάσης στα διάφορα σημεία του δικτύου. Οι Μ/Σ και οι διακόπτες μένουν στις αρχικές τους θέσεις, οπότε στο μοντέλο τίθεται $s_{sw} = t_{sw} = 0$.

Το πρόβλημα επιλύθηκε για κάθε περίπτωση στο σύνολο των 50 σεναρίων. Τα μόνα σενάρια στα οποία σημειώθηκαν διαφορετικά αποτελέσματα σε σχέση με τη στρατηγική ελέγχου 1 υπήρξαν τα σενάρια περικοπής ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και τα σενάρια στα οποία η στρατηγική 1 δεν κατάφερε να δώσει αποδεκτή λύση.

• Περίπτωση Α

Τα αποτελέσματα εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου 3 για τα αρχικά σενάρια περικοπής ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ της περίπτωσης Α δίνονται στον πίνακα 6.16. Παρατηρείται ότι σε αρκετά σενάρια επιτυγχάνεται μεγάλη μείωση ή και μηδενισμός της περικοπής ισχύος των μονάδων ΔΠ. Η αρνητική συνέπεια του ελέγχου είναι και εδώ η αύξηση των απωλειών ενεργού ισχύος στο δίκτυο.

Οι χειρισμοί των εγκάρσιων αντισταθμίσεων που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε σενάριο δίνονται στον πίνακα 6.17. Για κάθε αντιστάθμιση $i \in B$ δίνεται η διαφορά $p_i - p_i^0$. Κατά συνέπεια, εμφάνιση αρνητικών αριθμών ερμηνεύεται ως μετάβαση σε χαμηλότερη λήψη και μείωση της έγχυσης αέργου ισχύος στο δίκτυο από την αντιστάθμιση. Είναι εύλογο ότι τα σενάρια με μεγαλύτερη περικοπή ενεργού ισχύος απαιτούν μεγαλύτερο αριθμό χειρισμών και συμμετοχή περισσότερων από μίας αντισταθμίσεων. Στο μοντέλο όμως παρατηρείται μία προτεραιότητα χρήσης αντισταθμίσεων για αντιμετώπιση των περικοπών ισχύος. Φαίνεται ότι όταν απαιτείται μία μόνο ενέργεια χειρισμού προτιμάται πάντα η C2, ενώ αυξάνοντας τον αριθμό ενεργειών συμμετέχει στη συνέχεια και η C3. Οι C4 και C1 οδηγήθηκαν σε χαμηλότερη λήψη μόνο στο σενάριο 15, ενώ χρησιμοποίησαν τις υψηλότερες λήψεις τους για αντιμετώπιση της πτώσης τάσης στα σενάρια 24 και 30.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου 3 για την περίπτωση Α καταγράφονται στον πίνακα 6.18. Η πιθανότητα των σεναρίων στα οποία σημειώνεται περικοπή ισχύος των μονάδων ΔΠ έχει μειωθεί περίπου στο μισό σε σχέση με τη στρατηγική 1, ενώ η ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια των μονάδων ΔΠ εμφανίζει μείωση κατά περίπου 60%. Αντίθετα, οι ωμικές απώλειες εμφανίζουν αύξηση κατά 30%. Στο μέσο χρόνο εκτέλεσης παρατηρείται μια σχετική αύξηση, η οποία όμως είναι σχεδόν αμελητέα.

Πίνακας 6.16 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 3 στην περίπτωση Α του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
3	0,011	–	-100	0,2660	+39,07
5	0,010	–	-100	0,3689	+12,03
6	0,014	0,2162	-68,23	0,3841	+75,17
7	0,008	0,1324	-77,45	0,6704	+52,92
14	0,013	–	-100	0,2939	+25,52
15	0,012	0,2737	-64,94	0,5632	+68,20
17	0,011	–	-100	0,4102	+25,75
18	0,016	0,6566	-45,29	0,7230	+59,27
21	0,008	0,6152	-45,82	0,6428	+61,67
23	0,018	–	-100	0,2843	+26,61
26	0,013	–	-100	0,3982	+20,79
27	0,017	0,9155	-36,11	0,6053	+63,16
33	0,006	0,8364	-38,88	0,7202	+58,89
38	0,012	0,1071	-81,83	0,4883	+68,05
42	0,014	0,1482	-77,20	0,5448	+65,24
46	0,009	0,3618	-58,29	0,7948	+52,08
47	0,006	0,5767	-45,72	0,8634	+48,41

Πίνακας 6.17 : Πίνακας χειρισμών των εγκάρσιων αντισταθμίσεων για τη Στρατηγική Ελέγχου 3 στην περίπτωση Α του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάρια	Ενέργειες χειρισμού εγκάρσιων αντισταθμίσεων			
	C1	C2	C3	C4
24	5	1		
30		1		1
3, 5, 14, 17, 23, 26		-1		
6, 7, 18, 21, 27, 33, 38, 42, 46, 47		-1	-1	
15	-1	-1		-1

Πίνακας 6.18 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 3 στην περίπτωση Α του δικτύου των 34 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας		0%
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος		12,2%
E_{curt}	(MWh)	471,70
	(%) · E_g	4,73
E_{loss}	(MWh)	1253,38
	(%) · E_g	12,56
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)		2,19

- **Περίπτωση Β**

Τα αποτελέσματα εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου 3 για τα αρχικά σενάρια περικοπής των μονάδων ΔΠ της περίπτωσης Β δίνονται στον πίνακα 6.19. Σε κάθε σενάριο παρατηρείται μείωση της περικοπής ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ, ενώ οι απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου εμφανίζονται και εδώ αυξημένες κατά ένα σημαντικό ποσοστό σε σχέση με την στρατηγική 1.

Οι ενέργειες χειρισμού των εγκάρσιων αντισταθμίσεων δίνονται στον πίνακα 6.20. Η C2 φαίνεται να συμμετέχει παντού, τόσο στα σενάρια περικοπής ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ όσο και στα σενάρια με μεγάλη πτώση τάσης (24, 30). Σε σενάρια με μεγαλύτερη περικοπή ισχύος των μονάδων ΔΠ γίνεται η χρήση των C1 και C4. Η C3 δεν εμφανίζει καμία ενέργεια, κάτι που πιθανότατα σημαίνει ότι η άεργος ισχύς που εγχέει αξιοποιείται στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό από το δίκτυο.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου 3 για την περίπτωση Β καταγράφονται στον πίνακα 6.21. Η ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια των μονάδων ΔΠ έχει μειωθεί περίπου στο 50%, ενώ αντίθετα οι ωμικές απώλειες εμφανίζουν αύξηση κατά περίπου 15% σε σχέση με τη στρατηγική 1. Ο μέσος χρόνος επίλυσης του μοντέλου παραμένει σε χαμηλές τιμές.

Πίνακας 6.19 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 3 στην περίπτωση Β του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
6	0,014	0,1350	-76,14	0,1259	+70,58
7	0,008	–	-100	0,1596	+29,25
15	0,012	0,0570	-88,58	0,1569	+81,45
18	0,016	0,7700	-36,45	0,1655	+69,96
21	0,008	0,5743	-43,42	0,1552	+74,53
27	0,017	0,9970	-30,57	0,1377	+64,75
33	0,006	0,7631	-36,48	0,1571	+73,27
38	0,012	–	-100	0,1360	+60,40
42	0,014	0,1024	-81,30	0,1643	+75,57
46	0,009	0,4267	-51,07	0,2024	+68,90
47	0,006	0,4603	-48,27	0,1999	+66,21

Πίνακας 6.20 : Πίνακας χειρισμών των εγκάρσιων αντισταθμίσεων για τη Στρατηγική Ελέγχου 3 στην περίπτωση Β του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάρια	Ενέργειες χειρισμού εγκάρσιων αντισταθμίσεων			
	C1	C2	C3	C4
24	5	1		
30		1		1
7		-1		
6, 38, 47	-1	-1		
15, 18, 21, 27, 33, 42, 46	-1	-1		-1

Πίνακας 6.21 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 3 στην περίπτωση Β του δικτύου των 34 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας		0%
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος		10,2%
E_{curt}	(MWh)	433,31
	(%) · E_g	4,87
E_{loss}	(MWh)	463,48
	(%) · E_g	5,21
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)		2,23

6.2.4 Στρατηγική Ελέγχου 4 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς διακοπών των γραμμών

Με αυτή τη στρατηγική ο διαχειριστής του ΔΔ έχει τη δυνατότητα τηλεχειρισμού διακοπών με σκοπό την αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου και κατά συνέπεια των κατευθύνσεων των ροών ισχύος μέσα σε αυτό. Στο μοντέλο αυτό οι Μ/Σ και οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις δε μεταβάλλουν τις λήψεις τους, άρα τίθεται $t_{sw} = p_{sw} = 0$.

Το πρόβλημα επιλύθηκε για κάθε περίπτωση στο σύνολο των 50 σεναρίων. Τα μόνα σενάρια στα οποία σημειώθηκαν διαφορετικά αποτελέσματα σε σχέση με τη στρατηγική ελέγχου 1 υπήρξαν τα σενάρια περικοπής ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και τα σενάρια στα οποία η στρατηγική 1 δεν κατάφερε να δώσει αποδεκτή λύση.

- *Περίπτωση Α*

Τα αποτελέσματα εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου 4 για τα αρχικά σενάρια περικοπής ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ της περίπτωσης Α δίνονται στον πίνακα 6.22. Παρατηρείται αξιοσημείωτη επιτυχία, αφού σε κάθε σενάριο επιτυγχάνεται πλήρης εξάλειψη των περικοπών ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ, με εξαίρεση το σενάριο 27 όπου η τελική περικοπή είναι στο ένα τέταρτο της αρχικής τιμής της. Παράλληλα, στην μεγάλη πλειοψηφία των σεναρίων επέρχεται μείωση των απωλειών του δικτύου έως και κατά 70%, σε αντίθεση με τις προηγούμενες στρατηγικές ελέγχου, στις οποίες οι απώλειες ενεργού ισχύος αυξάνονταν σημαντικά.

Οι ενέργειες χειρισμού των διακοπών του δικτύου εμφανίζονται στον πίνακα 6.23. Παρατηρείται ότι για την αντιμετώπιση των σεναρίων περικοπής ενεργού ισχύος γίνεται χρήση τεσσάρων διαφορετικών συνδυασμών διακοπών ενώ ένας επιπλέον συνδυασμός χρησιμοποιείται για τα σενάρια πτώσης τάσης (24 και 30). Είναι χαρακτηριστικό ότι τρεις από τους διακόπτες που επιλέχθηκαν για τον έλεγχο του δικτύου, οι S21, S34 και S35, δεν άλλαξαν κατάσταση καμία φορά κατά την επίλυση του προβλήματος. Μια εύλογη ενέργεια λοιπόν για τη βελτίωση του μοντέλου θα ήταν η απομάκρυνση των διακοπών αυτών που από το σύνολο των ελεγχόμενων στοιχείων. Ο υπολογιστικός χώρος του προβλήματος θα μειωθεί σημαντικά ακόμα και από την αφαίρεση μικρού αριθμού διακοπών, με αποτέλεσμα να ελαττωθεί αισθητά ο απαιτούμενος χρόνος επίλυσης.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου 3 για την περίπτωση Α καταγράφονται στον πίνακα 6.24. Η ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια λόγω περικοπών είναι ελάχιστη, σημειώνοντας μείωση κατά 95% σε σχέση με τη στρατηγική 1, ενώ οι ετήσιες απώλειες σημειώνουν μείωση κατά περίπου 20%. Ο μέσος χρόνος επίλυσης του προβλήματος ανά σενάριο είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με τις προηγούμενες στρατηγικές λόγω της έντονης μη κυρτότητας της αποδεκτής περιοχής λύσεων που εισάγει στο μοντέλο η ένταξη διακοπών.

Πίνακας 6.22 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 4 στην περίπτωση Α του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
3	0,011	–	-100	0,1244	-34,95
5	0,010	–	-100	0,0890	-72,97
6	0,014	–	-100	0,1514	-30,96
7	0,008	–	-100	0,1914	-56,34
14	0,013	–	-100	0,1055	-54,96
15	0,012	–	-100	0,2732	-18,40
17	0,011	–	-100	0,1064	-67,37
18	0,016	–	-100	0,3389	-25,34
21	0,008	–	-100	0,3419	-14,01
23	0,018	–	-100	0,0983	-56,21
26	0,013	–	-100	0,1180	-64,20
27	0,017	0,3456	-75,88	0,3299	-11,07
33	0,006	–	-100	0,6234	37,55
38	0,012	–	-100	0,1630	-43,90
42	0,014	–	-100	0,1642	-50,19
46	0,009	–	-100	0,2619	-49,90
47	0,006	–	-100	0,4374	-24,82

Πίνακας 6.23 : Πίνακας ενεργειών των τηλεχειριζόμενων διακοπών για τη Στρατηγική Ελέγχου 4 στην περίπτωση Α του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάρια	Ενέργειες χειρισμού διακοπών								
	S8	S21	S24	S28	S34	S35	S36	S37	S38
24, 30				-1					1
3, 14, 23, 26	-1							1	
5, 7, 17			-1	-1				1	1
6, 21, 27, 38, 42, 46	-1			-1				1	1
15, 18, 33, 47	-1		-1	-1			1	1	1

Πίνακας 6.24 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 4 στην περίπτωση Α του δικτύου των 34 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας		0%
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος		1,7%
E_{curt}	(MWh)	53,75
	(%) · E_g	0,54
E_{loss}	(MWh)	744,54
	(%) · E_g	7,47
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)		79,74

- **Περίπτωση Β**

Τα αποτελέσματα εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου 4 για τα σενάρια περικοπής ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ της περίπτωσης Β δίνονται στον πίνακα 6.25. Στην προκειμένη περίπτωση παρατηρείται ότι τα σενάρια στα οποία επιτυγχάνεται μηδενισμός της συνολικής περικοπής ισχύος είναι λιγότερα σε σχέση με την περίπτωση Α, ενώ δεν παρατηρείται αύξηση των απωλειών του δικτύου αντί της μείωσης που επήλθε προηγουμένως. Αυτά τα αποτελέσματα φανερώνουν τις δυσμενείς επιπτώσεις απουσίας του Q–V ελέγχου των μονάδων ΔΠ από το μοντέλο.

Στον πίνακα 6.26 φαίνονται οι αλλαγές κατάστασης των διακοπών. Στην παρούσα περίπτωση παρατηρούνται διαφορετικοί συνδυασμοί χειρισμών διακοπών σε σχέση με την προηγούμενη, ακόμα και για ίδια σενάρια. Παρόλα αυτά, το σύνολο των διακοπών που δε συμπληρώνουν κανένα χειρισμό είναι ακριβώς το ίδιο με αυτό της περίπτωσης Α, δίνοντας περαιτέρω λόγους για την αφαίρεση των διακοπών αυτών από το μοντέλο ελέγχου.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου 3 για την περίπτωση Β καταγράφονται στον πίνακα 6.34. Οι ετήσιες περικοπές ενέργειας από ΔΠ μειώνονται κατά 70% σε σχέση με τη στρατηγική ελέγχου 1, ενώ οι απώλειες του δικτύου παραμένουν σχεδόν οι ίδιες, σημειώνοντας μια αύξηση της τάξης του 3%.

Πίνακας 6.25 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 4 στην περίπτωση Β του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
6	0,014	–	-100	0,0859	+16,32
7	0,008	–	-100	0,1249	+1,13
15	0,012	0,4506	-9,71	0,0855	-1,10
18	0,016	0,2479	-79,54	0,1368	+40,55
21	0,008	0,2511	-75,26	0,1244	+39,93
27	0,017	0,8994	-37,36	0,0966	+15,57
33	0,006	0,5514	-54,10	0,1296	+42,98
38	0,012	–	-100	0,1060	+25,05
42	0,014	–	-100	0,1203	+28,56
46	0,009	–	-100	0,1327	+10,68
47	0,006	–	-100	0,1593	+32,44

Πίνακας 6.26 : Πίνακας ενεργειών των τηλεχειριζόμενων διακοπών για τη Στρατηγική Ελέγχου 4 στην περίπτωση Β του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάρια	Ενέργειες χειρισμού διακοπών								
	S8	S21	S24	S28	S34	S35	S36	S37	S38
24, 30				-1					1
15			-1						1
7, 38, 42				-1				1	
6, 18, 27, 46, 47			-1	-1				1	1
21, 33	-1		-1	-1			1	1	1

Πίνακας 6.27 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 4 στην περίπτωση Β του δικτύου των 34 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας		0%
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος		6%
E_{curt}	(MWh)	264,22
	(%) · E_g	2,97
E_{loss}	(MWh)	407,87
	(%) · E_g	4,59
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)		75,36

6.2.5 Στρατηγική Ελέγχου 5 : Συνδυασμένος χειρισμός των στοιχείων του δικτύου

Με αυτή τη στρατηγική είναι δυνατός ο ταυτόχρονος χειρισμός διαφορετικών στοιχείων ελέγχου του δικτύου, δηλαδή Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ, εγκάρσιων αντισταθμίσεων αλλά και διακοπών αλλαγής τοπολογίας. Για την παρουσίαση αυτού του είδους ελέγχου επιλέχθηκε για κάθε περίπτωση ο συνδυασμός των στοιχείων των δύο πιο αποτελεσματικών στρατηγικών με κριτήριο την τιμή της ετήσιας μη αξιοποιημένης ενέργειας. Κατά συνέπεια, για την περίπτωση Α εκτελέστηκε συνδυασμένος έλεγχος διακοπών και εγκάρσιων αντισταθμίσεων (θέτοντας $t_{sw} = 0$), ενώ για την περίπτωση Β συνδυασμός χειρισμών διακοπών και Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ (θέτοντας $p_{sw} = 0$).

• Περίπτωση Α

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του συνδυασμένου ελέγχου διακοπών και εγκάρσιων αντισταθμίσεων για την περίπτωση Α δίνονται στον πίνακα 6.28. Έχοντας ήδη πετύχει μηδενισμό της περικοπής ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ στα περισσότερα σενάρια με έλεγχο μόνο των διακοπών, στον πίνακα περιέχονται πληροφορίες μόνο για το σενάριο 27. Σε όλα τα υπόλοιπα σενάρια οι λύσεις υπήρξαν όμοιες σε ακρίβεια έως και τρίτου δεκαδικού ψηφίου με αυτές της στρατηγικής ελέγχου 4.

Οι χειρισμοί των στοιχείων του δικτύου για το σενάριο 27 φαίνονται στον πίνακα 6.29. Παρατηρείται ότι οι διακόπτες που αλλάζουν κατάσταση λειτουργίας κατά τον έλεγχο είναι οι ίδιοι με αυτούς της στρατηγικής 4 για το ίδιο σενάριο, ενώ δεν ισχύει το ίδιο για τις εγκάρσιες αντισταθμίσεις της στρατηγικής 3.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου διακοπών και αντισταθμίσεων για την περίπτωση Α καταγράφονται στον πίνακα 6.30. Η συνολική ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια έχει μηδενιστεί, ενώ διακρίνεται αύξηση των ετήσιων απωλειών ενέργειας κατά περίπου 2% σε σχέση με την στρατηγική 3. Παρατηρείται επίσης ότι ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου είναι πολύ μεγαλύτερος από το μέσο χρόνο των προηγούμενων στρατηγικών. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά την εκτέλεση αφήνονται ελεύθερες περισσότερες διακριτές μεταβλητές ελέγχου, κάτι που οδηγεί σε υπολογίσιμη αύξηση του χώρου καταστάσεων του προβλήματος.

Πίνακας 6.28 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 5 στην περίπτωση Α του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
27	0,017	–	-100	0,4212	+27,68

Πίνακας 6.29 : Πίνακας ενεργειών διακοπών και εγκάρσιων αντισταθμίσεων για τη Στρατηγική Ελέγχου 5 στην περίπτωση Α του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάρια	Ενέργειες χειρισμού διακοπών									Ενέργειες χειρισμού αντισταθμίσεων			
	S8	S21	S24	S28	S34	S35	S36	S37	S38	C1	C2	C3	C4
27	-1			-1				1	1	-1			

Πίνακας 6.30 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 5 στην περίπτωση Α του δικτύου των 34 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας	0%	
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος	0%	
E_{curt}	(MWh)	0
	(%) · E_g	0
E_{loss}	(MWh)	758,14
	(%) · E_g	7,60
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)	133,85	

• Περίπτωση Β

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του συνδυασμένου ελέγχου διακοπών και Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ για την περίπτωση Β δίνονται στον πίνακα 6.31. Φαίνεται ότι για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια πλην του 27 η περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ μηδενίζεται. Επίσης σε όλα παρατηρούνται μεγάλες αυξήσεις στις απώλειες του δικτύου, οι τιμές των οποίων φτάνουν έως και σε υπερδιπλάσια τιμή σε σχέση με τη στρατηγική ελέγχου 1.

Οι χειρισμοί των στοιχείων του δικτύου φαίνονται στον πίνακα 6.32. Η παρουσία του ελέγχου Μ/Σ στο μοντέλο μειώνει σε κάποιες περιπτώσεις τον αριθμό των διακοπών του δικτύου που χρειάζεται να αλλάξουν θέση σε σχέση με τη στρατηγική 4, όπως στα σενάρια 15 και 21. Οι διακόπτες S21, S34 και S35 εξακολουθούν να μη χρησιμοποιούνται σε κανένα σενάριο.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου διακοπών και Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ για την περίπτωση Α καταγράφονται στον πίνακα 6.33. Η συνολική ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια έχει μειωθεί κατά 95% σε σχέση με την αρχική τιμή της, ενώ οι ετήσιες απώλειες αυξήθηκαν κατά περίπου 10%. Ο μέσος χρόνος επίλυσης του μοντέλου είναι και εδώ μεγαλύτερος από το μέσο χρόνο των προηγούμενων στρατηγικών, αλλά μικρότερος σε σχέση με αυτόν της περίπτωσης Α, πιθανότατα λόγω της ύπαρξης μόνο ενός Μ/Σ ελέγχου.

Πίνακας 6.31 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 5 στην περίπτωση Β του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
15	0,012	–	-100	0,1600	+85,04
18	0,016	–	-100	0,1807	+85,64
21	0,008	–	-100	0,2195	+146,85
27	0,017	0,3369	-76,54	0,1795	+114,74
33	0,006	–	-100	0,2076	+128,95

Πίνακας 6.32 : Πίνακας ενεργειών διακοπών και εγκάρσιων αντισταθμίσεων για τη Στρατηγική Ελέγχου 5 στην περίπτωση Β του δικτύου των 34 ζυγών

Σενάρια	Ενέργειες χειρισμού διακοπών									Ενέργειες Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ	
	S8	S21	S24	S28	S34	S35	S36	S37	S38	Τελική λήψη	Μεταβολή λήψης
15										17	3
18			-1	-1				1	1	17	3
21				-1				1		17	3
27			-1	-1				1	1	18	4
33	-1		-1	-1			1	1	1	17	3

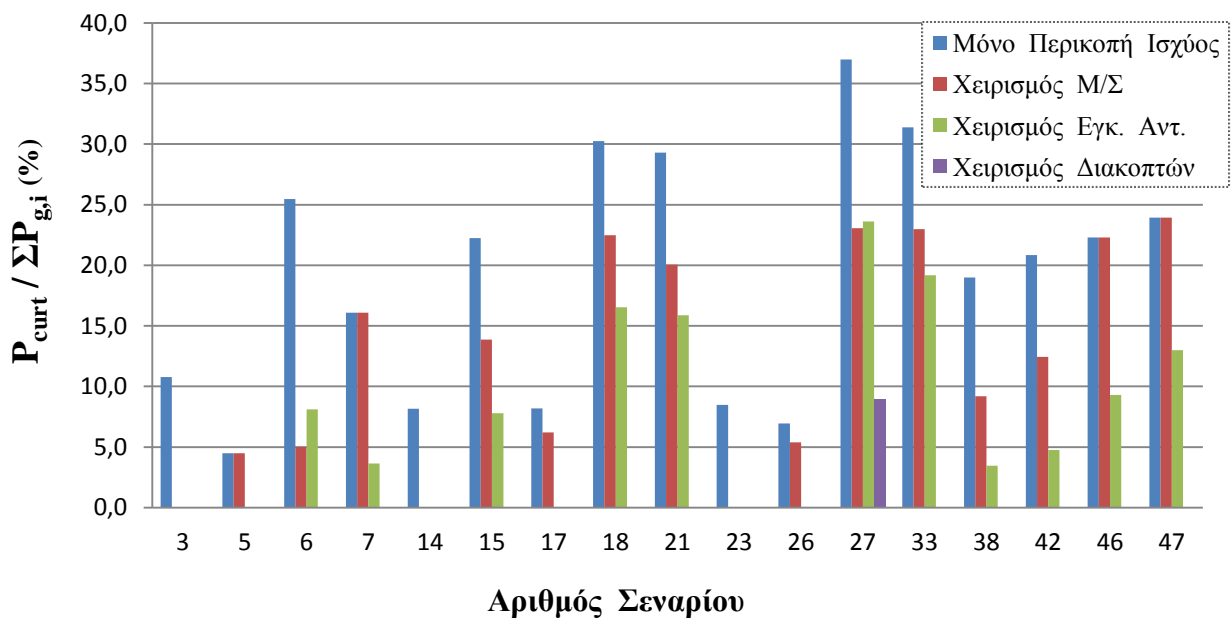
Πίνακας 6.33 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 5 στην περίπτωση Β του δικτύου των 34 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας	0%	
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος	1,7%	
E_{curt}	(MWh)	49,19
	(%) · E_g	0,55
E_{loss}	(MWh)	445,23
	(%) · E_g	5,01
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)	82,09	

6.2.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

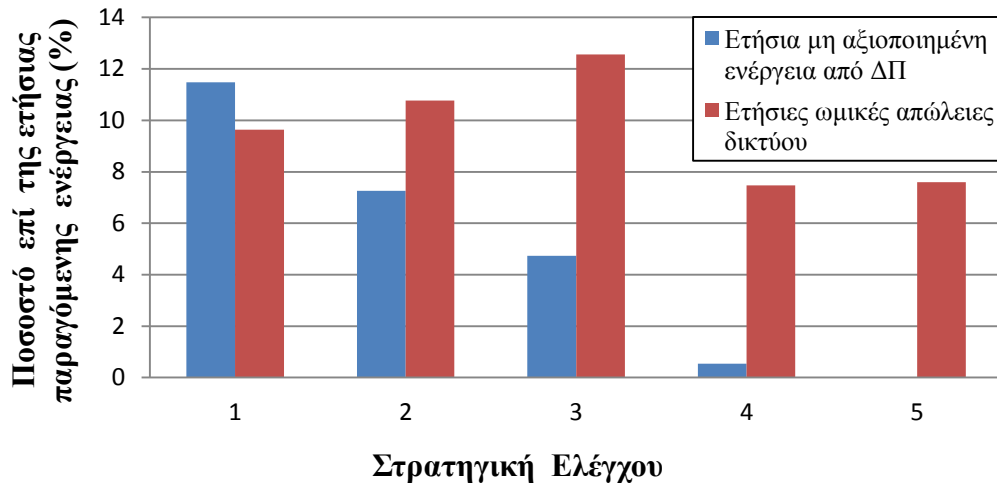
- *Περίπτωση Α*

Τα αποτελέσματα των τεσσάρων αμιγών στρατηγικών ελέγχου (1 – 4) του δικτύου των 34 ζυγών για τη περίπτωση Α φαίνονται συνολικά στο σχήμα 6.4. Σε αυτό παρουσιάζεται για κάθε σενάριο η περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ ως ποσοστό επί της συνολικής παραγόμενης ενεργού ισχύος στο δίκτυο για το σενάριο αυτό. Είναι εμφανές ότι ο χειρισμός των διακοπών αλλαγής τοπολογίας του δικτύου είναι αυτός που φέρει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες αμιγείς στρατηγικές ελέγχου, ακολουθούμενος από τον χειρισμό των αντισταθμίσεων και στη συνέχεια των Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ. Ο συνδυασμένος έλεγχος αντισταθμίσεων και διακοπών βέβαια είναι ο πιο αποτελεσματικός αλλά δεν έχει παρασταθεί στο σχήμα 6.4, αφού μηδενίζει την περικοπή ενεργού ισχύος σε κάθε σενάριο.



Σχήμα 6.4 : Ποσοστό της παραγόμενης ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ που υφίσταται περικοπή με τις στρατηγικές 1 – 4 για την περίπτωση Α του δικτύου των 34 ζυγών

Στο σχήμα 6.5 φαίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα κάθε στρατηγικής ελέγχου για τα ετήσια μεγέθη του δικτύου 34 ζυγών. Χωρίς κανένα έλεγχο των στοιχείων του δικτύου η μη αξιοποιημένη ενέργεια (E_{curt}) ανέρχεται περίπου στο 11,5% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας από ΔΠ (E_g). Με χειρισμό των Μ/Σ ή των εγκάρσιων αντισταθμίσεων μολονότι η τιμή της E_{curt} μειώνεται στο 7,3% και 5,8% αντίστοιχα της E_g παρατηρείται μέτρια αύξηση των ωμικών απωλειών (E_{loss}) ενώ με χειρισμό των διακοπών σημειώνεται πτώση της E_{curt} στο 0,5% της E_g με παράλληλη ελαχιστοποίηση των απωλειών. Τέλος, συνδυάζοντας τον έλεγχο Μ/Σ και διακοπών επιτυγχάνεται ο μηδενισμός της E_{curt} με αμελητέα αύξηση των απωλειών σε σχέση με τον αποκλειστικό έλεγχο διακοπών.



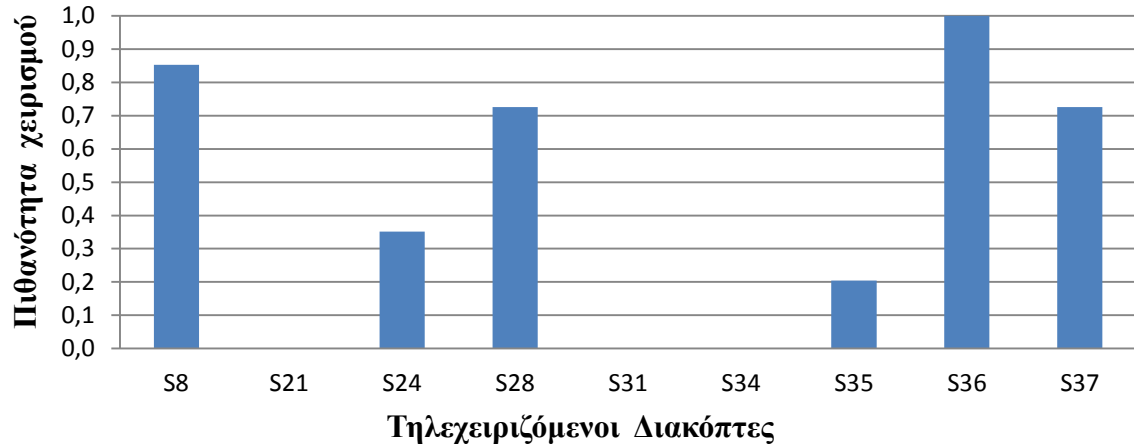
Σχήμα 6.5 : Ετήσιες τιμές ενέργειας για τις στρατηγικές ελέγχου στην περίπτωση Α του δικτύου 34 ζυγών

Με βάση τα αποτελέσματα των εφαρμογών είναι φανερή η υπεροχή του χειρισμού των διακοπών αλλαγής τοπολογίας του δικτύου έναντι των υπολοίπων στοιχείων. Το μοναδικό της μειονέκτημα είναι ότι αποτελεί μια πιο χρονοβόρα μέθοδο η επίλυση της οποίας μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα για δίκτυα με περισσότερους ζυγούς και μεγαλύτερο αριθμό ελέγξιμων διακοπών. Για το λόγο αυτό είναι πολύ σημαντική η κατάλληλη επιλογή των διακοπών που θα επιλεγθούν για την επαναδιαμόρφωση του δικτύου.

Με σκοπό τη διευκόλυνση μελλοντικών επιλύσεων του μοντέλου σε ένα δίκτυο είναι δυνατή η καταγραφή των διακοπών που αλλάζουν κατάσταση για δεδομένα σενάρια λειτουργίας και δημιουργία ενός αρχείου χειρισμών. Το αρχείο αυτό είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για την ελαχιστοποίηση του χρόνου επίλυσης του μοντέλου σε ένα δεδομένο δίκτυο με τους εξής τρόπους :

- Αφαίρεση των διακοπών με χαμηλό ποσοστό συμμετοχής στην επαναδιαμόρφωση του δικτύου από το σύνολο ελέγξιμων στοιχείων.
- Εάν σε ένα ικανοποιητικά μεγάλο ποσοστό περιπτώσεων κάποια ζεύγη διακοπών αλλάζουν από κοινού κατάσταση, είναι δυνατόν να τοποθετηθούν επιπλέον περιορισμοί στο μοντέλο επίλυσης του προβλήματος. Με αυτούς θα είναι δυνατόν το άνοιγμα ενός διακόπτη απομόνωσης να συνοδεύεται απαραίτητα από το κλείσιμο του αντίστοιχου ανοικτού αποζεύκτη του ζεύγους του. Το αποτέλεσμα θα είναι δραστική μείωση του χώρου καταστάσεων του προβλήματος και κατά συνέπεια του χρόνου υπολογισμού.
- Καταγραφή βέλτιστων λύσεων για δεδομένες συνθήκες παραγωγής και ζήτησης και χρήση τους σε μελλοντικές παρόμοιες περιστάσεις.
- Εύρεση καινούριων βέλτιστων λύσεων βασιζόμενες σε παλαιές σε περιπτώσεις επέκτασης του δικτύου ή ενσωμάτωσης νέων μονάδων ΔΠ ή στοιχείων ελέγχου.

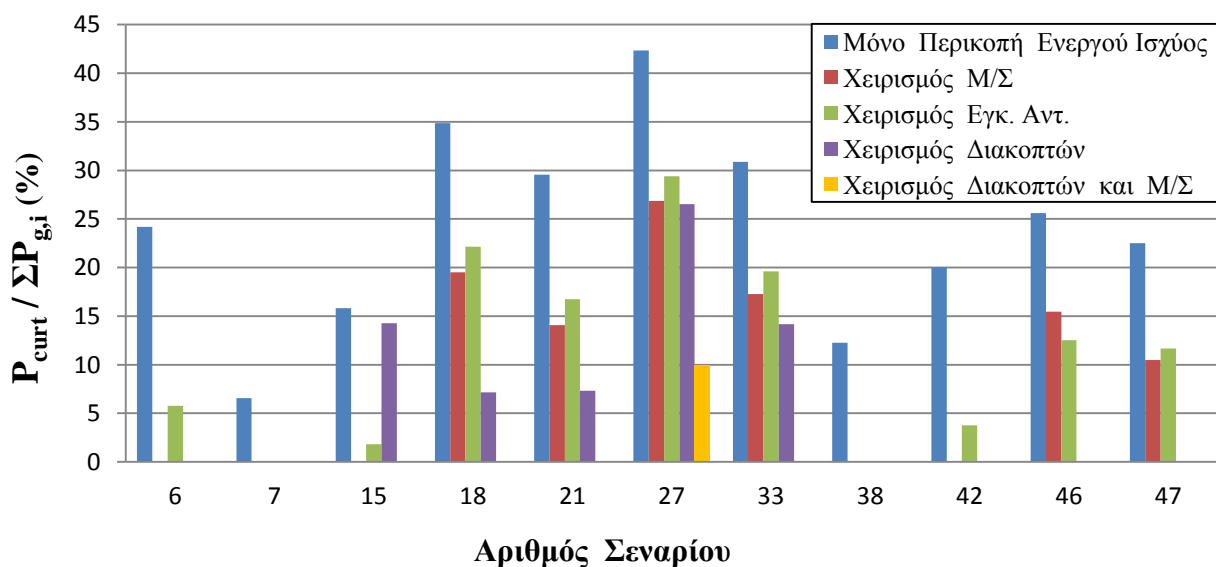
Στο σχήμα 6.6 φαίνεται η πιθανότητα αλλαγής κατάστασης καθενός από τους ελέγξιμους διακόπτες του δικτύου 34 ζυγών στην περίπτωση Α για το σύνολο των σεναρίων που απαίτησαν επαναδιαμόρφωση του δικτύου.



Σχήμα 6.6 : Πιθανότητα χειρισμού των εγκατεστημένων ελέγξιμων διακοπών για την περίπτωση A του δικτύου 34 ζυγών

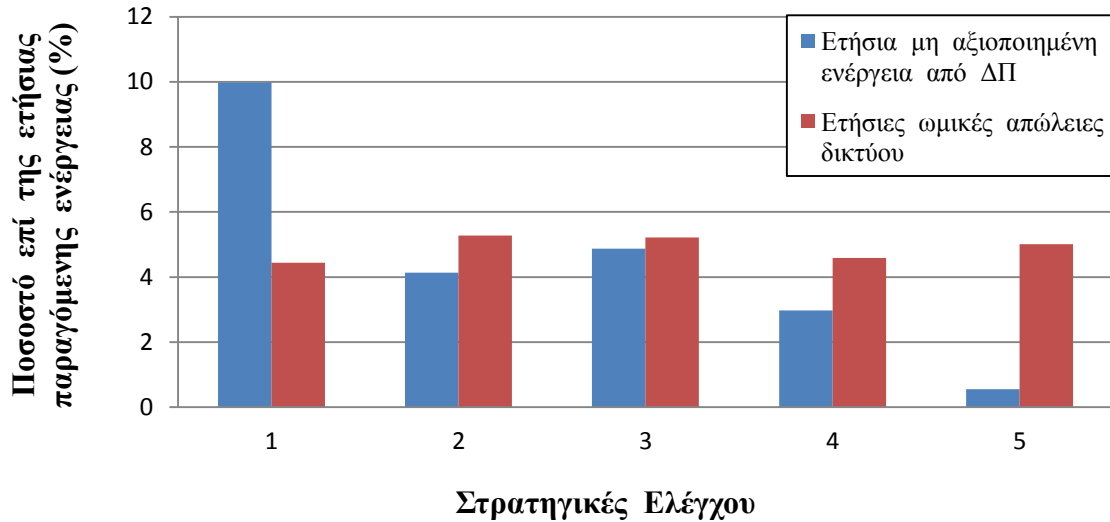
• **Περίπτωση B**

Τα αποτελέσματα των πέντε στρατηγικών ελέγχου του δικτύου των 34 ζυγών για τη περίπτωση B φαίνονται συνολικά στο σχήμα 6.7. Στην περίπτωση αυτή ο έλεγχος των Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ φαίνεται να αποφέρει καλύτερα αποτελέσματα από αυτόν των εγκάρσιων αντισταθμίσεων αλλά και οι δύο υστερούν σε σχέση με τον έλεγχο των διακοπών του δικτύου. Ωστόσο τα σενάρια στα οποία με αυτόν η τελική περικοπή ισχύος είναι μη μηδενική είναι περισσότερα από την περίπτωση A. Αυτό οφείλεται στο ότι από το μοντέλο εκλείπει ο έλεγχος Q-V των μονάδων ΔΠ που τους επιτρέπει την προσαρμογή της αέργου ισχύος τους στο δίκτυο. Συνεπώς, θεωρώντας λειτουργία υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος χάνεται μεγάλο μέρος της ευελιξίας του ελέγχου. Παρόλα αυτά, ακόμα και υπό αυτές τις συνθήκες ο συνδυασμένος έλεγχος διακοπών και Μ/Σ καταφέρνει να μηδενίσει την περικοπή ισχύος των μονάδων ΔΠ στην πλειοψηφία των σεναρίων.



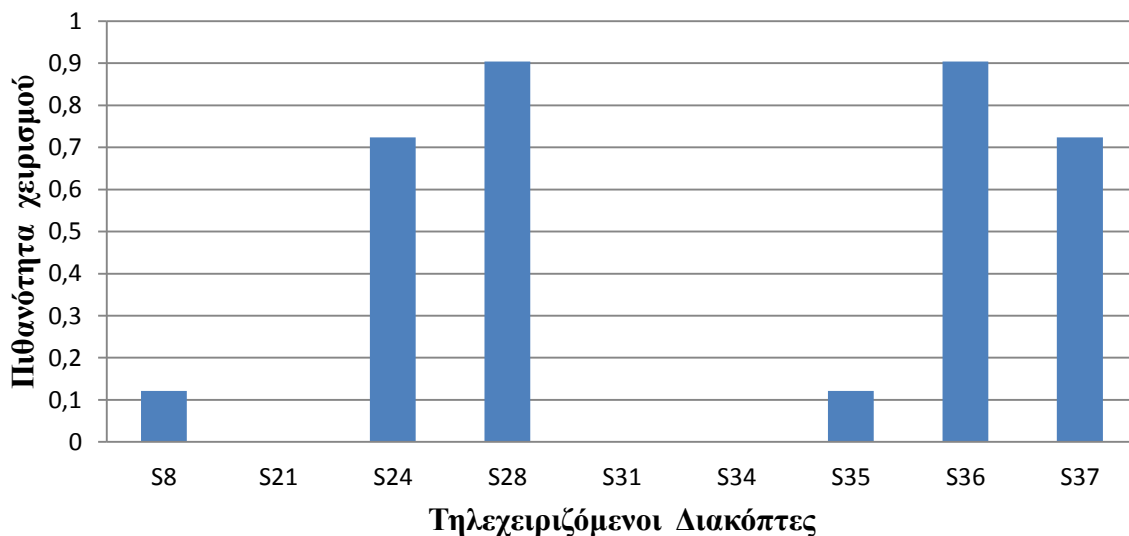
Σχήμα 6.7 : Ποσοστό της ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ που υφίσταται περικοπή με τις στρατηγικές 1 – 5 για την περίπτωση B του δικτύου 34 ζυγών

Τα αποτελέσματα κάθε στρατηγικής ελέγχου για τα ετήσια μεγέθη του δικτύου 34 ζυγών στην περίπτωση B φαίνονται συνοπτικά στο σχήμα 6.8. Εδώ φαίνεται ότι καμία τεχνική ελέγχου δε μηδενίζει την E_{curt} , αλλά η πιο αποτελεσματική την περιορίζει από το αρχικό 10% της E_g σε μόλις 0,5%. Οι ωμικές απώλειες κυμαίνονται για όλες στα ίδια επίπεδα, κοντά στο 5% – 6% της E_g .



Σχήμα 6.8 : Ετήσιες τιμές ενέργειας για τις στρατηγικές ελέγχου στην περίπτωση B του δικτύου 34 ζυγών

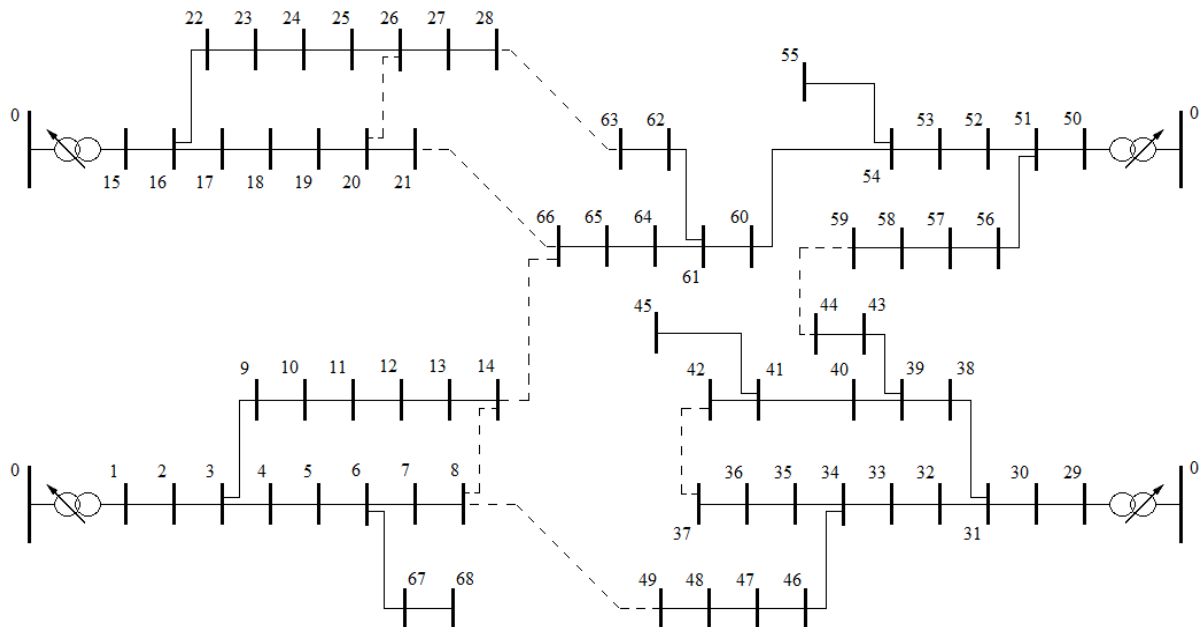
Στο σχήμα 6.9 δίνονται οι πιθανότητες χειρισμού των διακοπών για την περίπτωση B του δικτύου 34 ζυγών. Συγκρίνοντας τους πίνακες 6.8 και 6.9 φαίνεται ότι διαφορετική θέση των μονάδων ΔΠ στο ίδιο δίκτυο επηρεάζει σε ένα βαθμό τις ενέργειες χειρισμών. Ο διακόπτης S8 για παράδειγμα εμφανίζει πολύ μικρότερη πιθανότητα χειρισμού στην περίπτωση B. Παρόλα αυτά, ορισμένοι διακόπτες μπορεί να σημειώνουν πάντα υψηλή πιθανότητα χειρισμού λόγω της καίριας θέσης τους στο δίκτυο, όπως ο S36.



Σχήμα 6.9 : Πιθανότητα χειρισμού των εγκατεστημένων ελέγξιμων διακοπών για την περίπτωση A του δικτύου 34 ζυγών

6.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 69 ΖΥΓΩΝ

Το δίκτυο 69 ζυγών που εμφανίζεται στο Σχήμα 6.10 είναι ονομαστικής τάσης 11 kV. Τα δεδομένα των φορτίων και των γραμμών του δίνονται στο [6.3].



Σχήμα 6.10 : Δίκτυο διανομής 69 ζυγών

Τα θερμικά όρια όλων των γραμμών του δικτύου θεωρούνται ίσα με 8 MVA. Οι ανοικτοί υπό φορτίο αποζεύκτες εμφανίζονται με διακεκομμένες γραμμές, όπως και στο προηγούμενο δίκτυο. Ο ζυγός 0 θεωρείται και πάλι τερματικό σημείο του δικτύου μεταφοράς στον υποσταθμό υποβιβασμού και συνδέεται με τις τέσσερις κύριες γραμμές διανομής του δικτύου με τέσσερις όμοιους Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ. Τα χαρακτηριστικά των στοιχείων ελέγχου του δικτύου για τις εφαρμογές του μοντέλου φαίνονται στους πίνακες 6.34– 6.36. Επίσης, στον πίνακα 6.37 παρουσιάζονται τα δεδομένα των μονάδων ΔΠ που έχουν θεωρηθεί συνδεδεμένες στο δίκτυο. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς (P_{inst}) είναι 5,1 MW.

Με την εφαρμογή της μεθόδου ομαδοποίησης των κ-μέσων, με βάση το ετήσιο αρχείο δεδομένων παρήχθησαν 50 νέα σενάρια λειτουργίας. Στον πίνακα 6.38 δίνονται για κάθε σενάριο η συνολική ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος ως ποσοστό επί του συνολικού εγκατεστημένου φορτίου στο δίκτυο καθώς και η ηλιακή και αιολική παραγωγή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ ως ποσοστό επί της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος. Η κάθε στρατηγική ελέγχου θα εφαρμοστεί στο σύνολο των σεναρίων και στη συνέχεια θα εξαχθούν βάσει των σχέσεων (6.1)–(6.4) οι τιμές των μεγεθών αξιολόγησης της κάθε στρατηγικής.

Πίνακας 6.34 : Δεδομένα διακοπών του δικτύου 69 ζυγών

Τηλεχειριζόμενοι Διακόπτες	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Είδος
S1	4	5	Διακόπτες Απομόνωσης
S2	3	9	
S3	18	19	
S4	16	22	
S5	32	33	
S6	31	38	
S7	52	53	
S8	51	56	
S9	61	62	
S10	65	66	
S11	21	66	Ανοικτοί Αποζεύκτες
S12	14	66	
S13	20	26	
S14	8	49	
S15	28	63	
S16	44	59	
S17	37	42	
S18	8	14	

Πίνακας 6.35 : Δεδομένα εγκάρσιων αντισταθμίσεων του δικτύου 69 ζυγών

Εγκάρσιες αντισταθμίσεις	Ζυγός	Q_{sh} (MVar)	Αριθμός λήψεων	Αρχική θέση
C1	5	1,2	5	2
C2	18	1	11	2
C3	34	1	11	2
C4	41	1	11	2
C5	53	1,2	5	2

Πίνακας 6.36 : Δεδομένα Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ του δικτύου 69 ζυγών

Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ	Ζυγός άκρου λήψεων	Ζυγός μη ελεγχόμενου άκρου	Αριθμός λήψεων	Αρχική θέση	Μεταβολή λόγου Μ/Σ ανά λήψη (α.μ.)
T1	0	1	25	13	0,01
T2	0	15	25	13	0,01
T3	0	29	25	13	0,01
T4	0	50	25	13	0,01

Πίνακας 6.37 : Δεδομένα μονάδων ΔΠ του δικτύου 69 ζυγών

Μονάδες ΔΠ	Ζυγός	Είδος	$P_{inst,i}$ (MW)	$cos\varphi_{lim,i}$
G1	64	Α/Γ	4	0,95
G2 – G4	5 – 7	Φ/Β	0,1	0,95
G5 – G8	25 – 28	Φ/Β	0,1	0,95
G9 – G12	39, 40, 57, 58	Φ/Β	0,1	0,95

Πίνακας 6.38 : Σενάρια ζήτησης φορτίου, ηλιακής και αιολικής παραγωγής για το δίκτυο των 69 ζυγών

A/A	Πιθανότητα εμφάνισης	Συνολική ζήτηση (%)	Ηλιακή παραγωγή (%)	Αιολική παραγωγή (%)	A/A	Πιθανότητα εμφάνισης	Συνολική ζήτηση (%)	Ηλιακή παραγωγή (%)	Αιολική παραγωγή (%)
1	0,019	52,65	17,14	2,24	26	0,009	72,48	18,45	4,06
2	0,066	47,55	0,56	0,68	27	0,014	31,90	0,59	50,60
3	0,017	56,14	60,91	39,70	28	0,011	52,68	64,44	60,29
4	0,013	66,34	4,46	70,76	29	0,011	78,92	57,19	25,65
5	0,013	33,70	0,77	72,22	30	0,008	81,50	59,88	89,41
6	0,016	78,22	56,53	20,85	31	0,017	56,06	36,54	5,58
7	0,031	62,33	0,90	15,20	32	0,028	30,14	0,25	12,75
8	0,022	56,71	58,08	1,70	33	0,011	67,05	51,92	67,12
9	0,015	72,97	54,48	44,64	34	0,012	65,36	20,42	24,00
10	0,010	53,83	66,57	84,18	35	0,014	56,12	3,42	96,80
11	0,077	27,77	0,21	0,66	36	0,006	61,36	43,65	90,45
12	0,017	51,95	2,04	65,44	37	0,016	73,33	2,65	49,72
13	0,010	70,46	31,56	58,73	38	0,053	68,82	0,45	0,92
14	0,058	57,73	0,83	0,94	39	0,018	43,43	47,82	1,79
15	0,021	51,50	3,31	29,14	40	0,013	37,15	24,13	1,81
16	0,011	43,63	1,94	98,03	41	0,008	49,81	24,59	73,73
17	0,010	80,96	61,96	58,49	42	0,006	72,08	3,36	95,53
18	0,025	30,45	0,65	25,87	43	0,011	72,75	55,50	3,21
19	0,012	45,72	48,75	30,38	44	0,077	37,81	0,53	0,76
20	0,018	36,36	1,14	35,91	45	0,016	66,11	1,58	33,69
21	0,028	82,08	0,12	1,27	46	0,012	29,79	0,28	98,00
22	0,012	54,46	19,50	50,68	47	0,012	65,17	42,99	29,90
23	0,019	52,49	1,89	45,58	48	0,013	48,28	45,96	56,40
24	0,027	44,43	1,08	15,42	49	0,015	56,70	58,18	19,30
25	0,013	47,30	29,33	34,65	50	0,005	40,13	44,42	92,66

6.3.1 Στρατηγική Ελέγχου 1 : Έλεγχος δικτύου αποκλειστικά με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ

Στη στρατηγική αυτή ο μόνος τρόπος για τη διατήρηση της ομαλής λειτουργίας του δικτύου είναι η μείωση της παραγόμενης ενεργού ισχύος από τις μονάδες ΔΠ. Τόσο οι διακόπτες όσο και οι Μ/Σ και οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις του δικτύου διατηρούν τις αρχικές τους θέσεις, οπότε στο μοντέλο του προβλήματος τίθενται $s_{sw} = p_{sw} = t_{sw} = 0$.

Το πρόβλημα του δικτύου επιλύθηκε για όλα τα σενάρια και αυτά στα οποία εμφανίζεται περικοπή της ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για το δίκτυο φαίνονται στον πίνακα 6.39. Αυτή τη φορά δεν προέκυψαν προβλήματα με περιπτώσεις μεγάλης ζήτησης και μικρής παραγωγής, δηλαδή δεν υπήρξαν σενάρια που να οδηγήσουν το δίκτυο σε λειτουργία εκτός των επιτρεπόμενων ορίων τάσης.

Έχοντας διαθέσιμες τις τιμές όλων των μεταβλητών του δικτύου για κάθε σενάριο είναι δυνατός ο υπολογισμός των βασικών μεγεθών για την εν λόγω στρατηγική, τα οποία καταγράφονται στον πίνακα 6.40.

Πίνακας 6.39 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 1 στο δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφανίσης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	$P_{loss,i}$ (MW)
4	0,013	0,3132	0,4121
5	0,013	0,7750	0,3059
10	0,010	0,8051	0,4416
12	0,017	0,3791	0,3249
16	0,011	1,2249	0,5187
27	0,014	0,2723	0,1955
28	0,011	0,2684	0,2864
30	0,008	0,5735	0,5942
33	0,011	0,2370	0,3763
35	0,014	1,0243	0,5643
36	0,006	0,8304	0,5242
41	0,008	0,6079	0,3616
42	0,006	0,7710	0,6350
46	0,012	1,4141	0,4642
48	0,013	0,2248	0,2556
50	0,005	1,1712	0,4560

Πίνακας 6.40 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 1 στο δίκτυο των 69 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας		0%
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος		17,2%
E_{curt}	(MWh)	971,41
	(%) · E_g	9,54
E_{loss}	(MWh)	1068,28
	(%) · E_g	10,49
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)		2,15

6.3.2 Στρατηγική Ελέγχου 2 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στο σταθμό υποβιβασμού

Με αυτή τη στρατηγική ελέγχου, πέρα από τη ρύθμιση της ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ, ο διαχειριστής έχει τη δυνατότητα μεταβολής των λήψεων των Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στον υποσταθμό υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ για αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού τους. Κατά συνέπεια οι αρχικοί ζυγοί των γραμμών του δικτύου διανομής μπορούν πλέον να μεταβάλλουν την ανά μονάδα τιμή της τάσης τους σε σχέση με τον τελικό ζυγό του δικτύου μεταφοράς. Έτσι είναι δυνατόν να αντιμετωπιστούν οι εμφανιζόμενες διαταραχές στα επίπεδα τάσης του δικτύου. Με σκοπό οι διακόπτες και οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις να μην αλλάζουν την κατάσταση λειτουργίας τους, στο μοντέλο τέθηκε $s_{sw} = p_{sw} = 0$.

Επιλύοντας το πρόβλημα για τα 50 σενάρια προέκυψαν διαφορές σε σχέση με τη στρατηγική ελέγχου 1 μόνο σε όσα απαιτούσαν περικοπή της ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ. Αυτά εμφανίζονται στον πίνακα 6.41. Παρατηρείται αξιοσημείωτη μείωση της $P_{curt,i}$, η οποία στα περισσότερα σενάρια λαμβάνει μηδενική τιμή, που όμως συνοδεύεται από επιβάρυνση στις απώλειες του δικτύου.

Στον πίνακα 6.42 παρουσιάζονται οι χειρισμοί των Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στον υποσταθμό υποβιβασμού. Εύλογα, μόνο ο Μ/Σ της γραμμής διανομής όπου είναι συνδεδεμένη η ανεμογεννήτρια παρουσιάζει μεταβολή στις λήψεις του, ενώ οι υπόλοιποι παραμένουν στις αρχικές τους θέσεις. Διαπιστώνεται γενικά ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της $P_{curt,i}$ στα σενάρια με χρήση της στρατηγικής 1, τόσο μεγαλύτερη είναι και η αύξηση του λόγου μετασχηματισμού που απαιτείται για την αντιμετώπισή της. Ο αυξημένος λόγος μετασχηματισμού μεταξύ του ζυγού αναφοράς και του αρχικού ζυγού της γραμμής διανομής έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των τιμών τάσης όλων των ζυγών της γραμμής και έτσι επιτρέπει την εισροή περισσότερης ενεργού ισχύος από τις μονάδες ΔΠ χωρίς την εκδήλωση υπερτάσεων.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου 2 για το δίκτυο των 69 ζυγών καταγράφονται στον πίνακα 6.43. Η ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια έχει μειωθεί κατά 83% σε σχέση με την τιμή της χωρίς τον έλεγχο Μ/Σ, ενώ οι απώλειες έχουν σημειώσει μία μικρή αύξηση της τάξης του 24%.

Πίνακας 6.41 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 2 στο δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
4	0,013	–	-100	0,4982	+20,88
5	0,013	–	-100	0,5306	+73,44
10	0,010	–	-100	0,7119	+61,19
12	0,017	–	-100	0,4138	+27,36
16	0,011	0,4351	-64,48	0,8066	+55,49
27	0,014	–	-100	0,2505	+28,16
28	0,011	–	-100	0,3472	+21,22
30	0,008	–	-100	0,7981	+34,31
33	0,011	–	-100	0,4295	+14,14
35	0,014	0,2496	-75,63	0,8532	+51,21
36	0,006	–	-100	0,8084	+54,22
41	0,008	–	-100	0,5333	+47,46
42	0,006	0,0850	-88,98	0,8959	+41,08
46	0,012	0,6409	-54,68	0,7343	+58,17
48	0,013	–	-100	0,2995	+17,20
50	0,005	0,4001	-65,83	0,7241	+58,79

Πίνακας 6.42 : Πίνακας χειρισμών Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ για τη Στρατηγική Ελέγχου 2 στην περίπτωση Α στο δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Ενέργειες χειρισμού Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ			
	T1	T2	T3	T4
4, 27, 28, 33, 48				2
12, 30				3
16, 35, 36, 41, 42, 46, 50				4
5, 10				5

Πίνακας 6.43 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 2 στο δίκτυο των 69 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας		0%
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος		4,8%
E_{curt}	(MWh)	168,24
	(%) · E_g	1,65
E_{loss}	(MWh)	1322,06
	(%) · E_g	12,98
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)		2,87

6.3.3 Στρατηγική Ελέγχου 3 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς των εγκάρσιων αντισταθμίσεων των ζυγών

Σε αυτό το πλάνο ελέγχου οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις που βρίσκονται στο δίκτυο έχουν τη δυνατότητα αυξομείωσης της χωρητικότητάς τους και κατά συνέπεια της αέργου ισχύος τους με σκοπό την εξισορρόπηση των επιπέδων τάσης στα διάφορα σημεία του δικτύου. Οι Μ/Σ και οι διακόπτες μένουν στις αρχικές τους θέσεις, οπότε στο μοντέλο τίθεται $s_{sw} = t_{sw} = 0$.

Τα αποτελέσματα για τα αρχικά σενάρια περικοπής ενεργού ισχύος με χρήση της στρατηγικής ελέγχου 3 δίνονται στον πίνακα 6.44. Οι προκύπτουσες τιμές είναι υποδεέστερες αυτών της στρατηγικής 2, αφού επιτυγχάνεται μικρότερη μείωση της $P_{curt,i}$ για αντίστοιχη περίπτωση αύξηση στις απώλειες ενεργού ισχύος.

Οι χειρισμοί των εγκάρσιων αντισταθμίσεων που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε σενάριο δίνονται στον πίνακα 6.45. Οι βασικές αντισταθμίσεις που συμμετέχουν στους χειρισμούς είναι οι C1 και C5, ενώ C2 και C4 παραμένουν αμετάβλητες.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου 3 στο δίκτυο των 69 ζυγών καταγράφονται στον πίνακα 6.46. Η ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια εμφανίζει μείωση κατά 40% σε σχέση με τη στρατηγική 1 ενώ οι απώλειες παρουσιάζουν αύξηση κατά 14%.

Πίνακας 6.44 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 3 στο δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
4	0,013	–	-100	0,5256	+27,54
5	0,013	0,5206	-32,83	0,4020	+31,40
10	0,010	0,5289	-34,31	0,5660	+28,16
12	0,017	0,1228	-67,60	0,4229	+30,17
16	0,011	0,9371	-23,49	0,6568	+26,61
27	0,014	–	-100	0,2666	+36,40
28	0,011	–	-100	0,3789	+32,30
30	0,008	0,2308	-59,75	0,7598	+27,87
33	0,011	–	-100	0,4725	+25,56
35	0,014	0,7304	-28,69	0,7097	+25,78
36	0,006	0,5420	-34,73	0,6633	+26,54
41	0,008	0,3446	-43,31	0,4690	+29,69
42	0,006	0,4683	-39,26	0,7911	+24,58
46	0,012	1,1345	-19,78	0,5919	+27,50
48	0,013	–	-100	0,3330	+30,29
50	0,005	0,8925	-23,80	0,5835	+27,94

Πίνακας 6.45 : Πίνακας χειρισμών των εγκάρσιων αντισταθμίσεων για τη Στρατηγική Ελέγχου 3 στο δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Ενέργειες χειρισμού εγκάρσιων αντισταθμίσεων				
	C1	C2	C3	C4	C5
4, 10, 12, 27, 28, 33, 36, ,41, 42, 48					-1
5, 16, 35, 46, 50	-1				-1
30			1		-1

Πίνακας 6.46 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 3 στο δίκτυο των 69 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας		0%
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος		11%
E_{curt}	(MWh)	568,15
	(%) · E_g	5,58
E_{loss}	(MWh)	1238,67
	(%) · E_g	12,16
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)		2,88

6.3.4 Στρατηγική Ελέγχου 4 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς διακοπών των γραμμών

Με αυτή τη στρατηγική ο διαχειριστής του ΔΔ έχει τη δυνατότητα τηλεχειρισμού διακοπών με σκοπό την αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου και κατά συνέπεια των κατευθύνσεων των ροών ισχύος μέσα σε αυτό. Στο μοντέλο αυτό οι Μ/Σ και οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις δε μεταβάλλουν τις λήψεις τους, άρα τίθεται $t_{sw} = p_{sw} = 0$.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου 3 στα αρχικά σενάρια περικοπής ενεργού ισχύος του δικτύου παρουσιάζονται στον πίνακα 6.47. Στα περισσότερα από αυτά παρατηρείται πλήρης εξάλειψη της $P_{curt,i}$ αλλά σχεδόν σε όλα εμφανίζεται αύξηση στις απώλειες του δικτύου.

Οι ενέργειες χειρισμού των διακοπών του δικτύου εμφανίζονται στον πίνακα 6.48. Από τους 18 συνολικά διακόπτες που θεωρήθηκαν ελέγξιμοι μόνο 8 ήταν αυτοί που συμμετείχαν σε τουλάχιστον ένα σενάριο. Παρατηρώντας τις ενέργειες χειρισμών των διακοπών είναι εμφανής η λειτουργία τους ανά ζεύγη διακοπών απομόνωσης και ανοικτών αποζευκτών, όπως το {S4, S15} και το {S2, S11}.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου 4 στο δίκτυο των 69 ζυγών καταγράφονται στον πίνακα 6.49. Είναι συγκρίσιμα με αυτά του ελέγχου Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ, αφού η ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια λόγω περικοπής μειώνεται κατά 80% ενώ οι απώλειες αυξάνονται κατά 16%. Όπως και στο δίκτυο 34 ζυγών παρατηρείται σημαντική αύξηση του χρόνου υπολογισμού σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα ελέγχου.

Πίνακας 6.47 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 4 στο δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
4	0,013	–	-100	0,4109	-0,30
5	0,013	0,2158	-72,15	0,4015	+31,24
10	0,010	–	-100	0,7157	+62,06
12	0,017	–	-100	0,3710	+14,19
16	0,011	0,4346	-64,52	0,7102	+36,91
27	0,014	–	-100	0,2290	+17,16
28	0,011	–	-100	0,3733	+30,33
30	0,008	–	-100	0,7844	+32,01
33	0,011	–	-100	0,3999	+6,29
35	0,014	–	-100	0,8269	+46,54
36	0,006	–	-100	0,7817	+49,13
41	0,008	–	-100	0,4920	+36,05
42	0,006	–	-100	0,7490	+17,94
46	0,012	0,8979	-36,51	0,5743	+23,71
48	0,013	–	-100	0,2891	+13,10
50	0,005	0,5637	-51,87	0,6515	+42,86

Πίνακας 6.48 : Πίνακας ενεργειών των τηλεχειριζόμενων διακοπών για τη Στρατηγική Ελέγχου 4 στο δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Ενέργειες χειρισμού διακοπών							
	S2	S3	S4	S6	S11	S12	S15	S16
4, 12, 27, 28, 30			-1				1	
33, 48	-1				1			
36, 41, 42	-1		-1		1		1	
5, 10, 16, 35, 46, 50	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1

Πίνακας 6.49 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 4 στο δίκτυο των 69 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας	0%	
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος	4,1%	
E_{curt}	(MWh)	186,47
	(%) · E_g	1,83
E_{loss}	(MWh)	1241,32
	(%) · E_g	12,19
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)	112,27	

6.3.5 Στρατηγική Ελέγχου 5 : Συνδυασμένος χειρισμός των στοιχείων του δικτύου

Με αυτή τη στρατηγική είναι δυνατός ο ταυτόχρονος χειρισμός διαφορετικών στοιχείων ελέγχου του δικτύου, δηλαδή Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ, εγκάρσιων αντισταθμίσεων αλλά και διακοπών αλλαγής τοπολογίας. Για την παρουσίαση αυτού του είδους ελέγχου επιλέχθηκε ο συνδυασμός ανά δύο των στοιχείων του δικτύου. Κατά συνέπεια, εκτελέστηκε συνδυασμένος έλεγχος διακοπών και εγκάρσιων αντισταθμίσεων (θέτοντας $t_{sw} = 0$), αντισταθμίσεων και Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ (θέτοντας $s_{sw} = 0$) και διακοπών και Μ/Σ (θέτοντας $p_{sw} = 0$).

6.3.5.1 Στρατηγική 5α : Έλεγχος διακοπών αλλαγής τοπολογίας και εγκάρσιων αντισταθμίσεων

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του συνδυασμένου ελέγχου διακοπών και εγκάρσιων αντισταθμίσεων στο δίκτυο των 69 ζυγών δίνονται στον πίνακα 6.50. Ήδη έχει επιτευχθεί μηδενισμός της περικοπής ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ σε ορισμένα σενάρια με χειρισμούς αποκλειστικά του ενός ή του άλλου είδους στοιχείων. Συνεπώς, στον πίνακα περιέχονται πληροφορίες μόνο για τα σενάρια στα οποία καμία από τις δύο σχετικές στρατηγικές δεν κατάφερε να μηδενίσει την περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ του δικτύου.

Οι απαιτούμενοι χειρισμοί των στοιχείων ελέγχου σε κάθε σενάριο εμφανίζονται στον πίνακα 6.51. Εδώ στο σύνολο των χειριζόμενων διακοπών συμμετέχει ο S7 αντί του S3. Εξετάζοντας τις ενέργειες χειρισμών των στοιχείων φαίνεται ότι με τον συνδυασμένο έλεγχο δίνεται η δυνατότητα μειωμένης τιμής της $P_{curt,i}$ με μικρότερο αριθμό χειρισμών σε σχέση με τις προηγούμενες στρατηγικές ελέγχου (π.χ. σενάριο 5).

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου διακοπών και εγκάρσιων αντισταθμίσεων στο δίκτυο των 69 ζυγών καταγράφονται στον πίνακα 6.52. Παρατηρείται μείωση της ετήσιας μη αξιοποιημένης ενέργειας κατά 94% σε σχέση με την αρχική της τιμή και αύξηση των απωλειών κατά 25%.

Πίνακας 6.50 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 5α στο δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
5	0,013	–	-100,00	0,5020	+64,08
16	0,011	–	-100,00	0,8704	+67,80
46	0,012	0,4940	-65,07	0,7286	+56,95
50	0,005	0,1407	-87,99	0,8160	+78,93

Πίνακας 6.51 : Πίνακας ενεργειών διακοπών και εγκάρσιων αντισταθμίσεων για τη Στρατηγική Ελέγχου 5α στο δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Ενέργειες χειρισμού διακοπών								Ενέργειες χειρισμού αντισταθμίσεων				
	S2	S4	S6	S7	S11	S12	S15	S16	C1	C2	C3	C4	C5
5	-1	-1	-1			1	1	1					-1
16, 46, 50	-1	-1		-1	1	1	1			-1			-1

Πίνακας 6.52 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 5α στο δίκτυο των 69 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας	0%	
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος	1,7%	
E_{curt}	(MWh)	62,72
	(%) · E_g	0,61
E_{loss}	(MWh)	1327,32
	(%) · E_g	13,03
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)	134,90	

6.3.5.2 Στρατηγική 5β : Έλεγχος εγκάρσιων αντισταθμίσεων και Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του συνδυασμένου ελέγχου εγκάρσιων αντισταθμίσεων και Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στο δίκτυο των 69 ζυγών δίνονται στον πίνακα 6.53. Και πάλι εμφανίζονται μόνο τα αποτελέσματα για τα κοινά σενάρια των επιμέρους στρατηγικών ελέγχου που έχουν μη μηδενική περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ.

Στον πίνακα 6.54 παρουσιάζονται οι χειρισμοί Μ/Σ και αντισταθμίσεων του δικτύου. Το γεγονός ότι οι ενέργειες των στοιχείων φέρουν μεγάλη ομοιότητα με αυτές των επιμέρους στρατηγικών ελέγχου σημαίνει ότι ο συνδυασμένος έλεγχος του δικτύου θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σε δύο στάδια : Αρχικά έλεγχος με ελεύθερες μόνο τις μεταβλητές των Μ/Σ και, μετά την εξαγωγή των βέλτιστων τιμών τους, χρήση τους ως δεδομένα εισόδου για εκτέλεση ελέγχου με αντισταθμίσεις. Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου εγκάρσιων αντισταθμίσεων και Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στο δίκτυο των 69 ζυγών καταγράφονται στον πίνακα 6.55. Η ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια έχει μειωθεί κατά 95% σε σχέση με την αρχική της τιμή, ενώ οι ετήσιες απώλειες του δικτύου έχουν σημειώσει αύξηση κατά 25%.

Πίνακας 6.53 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 5β στο δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
16	0,011	0,1530	-87,51	0,9750	+87,97
35	0,014	–	-100	1,0034	+77,82
42	0,006	–	-100	0,9622	+51,51
46	0,012	0,3045	-78,47	0,9179	+97,72
50	0,005	0,0793	-93,23	0,9016	+97,71

Πίνακας 6.54 : Πίνακας ενεργειών διακοπών και εγκάρσιων αντισταθμίσεων για τη Στρατηγική Ελέγχου 5β στο δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Ενέργειες χειρισμού εγκάρσιων αντισταθμίσεων					Ενέργειες χειρισμού Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ			
	C1	C2	C3	C4	C5	T1	T2	T3	T4
42					-1				3
16, 35, 50					-1				4
46	-1				-1				5

Πίνακας 6.55 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 5β στο δίκτυο των 69 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας		0%
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος		0%
E_{curt}	(MWh)	52,81
	(%) · E_g	0,51
E_{loss}	(MWh)	1411,37
	(%) · E_g	13,86
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)		3,82

6.3.5.3 Στρατηγική 5γ : Έλεγχος διακοπών αλλαγής τοπολογίας και Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του συνδυασμένου ελέγχου διακοπών και Μ.Σ με ΣΑΤΥΦ στο δίκτυο των 69 ζυγών δίνονται στον πίνακα 6.56. Με αυτό το είδος ελέγχου επιτυγχάνεται μηδενισμός της $P_{curt,i}$ σε όλα τα σενάρια με αύξηση των απωλειών σχεδόν αντίστοιχη με τις προηγούμενες μεθόδους.

Ο πίνακας 6.57 περιέχει τους χειρισμούς των στοιχείων του δικτύου για κάθε σενάριο. Παρατηρείται ότι το ζεύγος {S4, S15} συμμετέχει σε όλα τα σενάρια ενώ άλλα

ζεύγη, όπως το {S7, S11} χρησιμοποιούνται μόνο σε σενάρια μεγαλύτερης περικοπής ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ. Προφανώς ο Μ/Σ T4 που συμμετέχει σε όλα τα σενάρια ανήκει στη γραμμή που φέρει τη μεγαλύτερη ποσότητα ενεργού ισχύος από ΔΠ.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου διακοπών και Μ.Σ με ΣΑΤΥΦ στο δίκτυο των 69 ζυγών καταγράφονται στον πίνακα 6.58. Η ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια έχει μηδενιστεί, ενώ οι ετήσιες απώλειες είναι αυξημένες κατά 23% σε σχέση με την αρχική τιμή της στρατηγικής ελέγχου 1.

Πίνακας 6.56 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 5γ στο δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
16	0,011	–	-100	0,9295	+79,20
35	0,014	–	-100	0,8426	+49,32
42	0,006	–	-100	0,8185	+28,90
46	0,012	–	-100	0,8322	+79,27
50	0,005	–	-100	0,8617	+88,95

Πίνακας 6.57 : Πίνακας ενεργειών διακοπών και εγκάρσιων αντισταθμίσεων για τη Στρατηγική Ελέγχου 5γ στο δίκτυο των 69 ζυγών

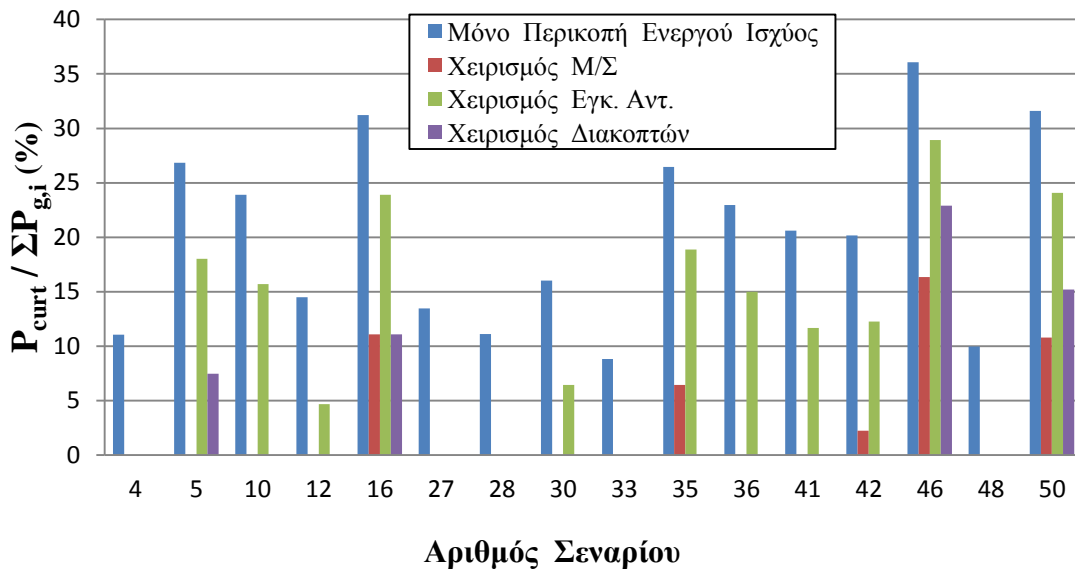
Σενάρια	Ενέργειες χειρισμού διακοπών						Ενέργειες χειρισμού Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ			
	S2	S4	S7	S11	S12	S15	T1	T2	T3	T4
42		-1				1				1
35	-1	-1			1	1				1
16		-1				1				4
50	-1	-1			1	1				4
46	-1	-1	-1	1	1	1				5

Πίνακας 6.58 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 5γ στο δίκτυο των 69 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας		0%
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος		0%
E_{curt}	(MWh)	0
	(%) · E_g	0
E_{loss}	(MWh)	1313,50
	(%) · E_g	12,90
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)		129,46

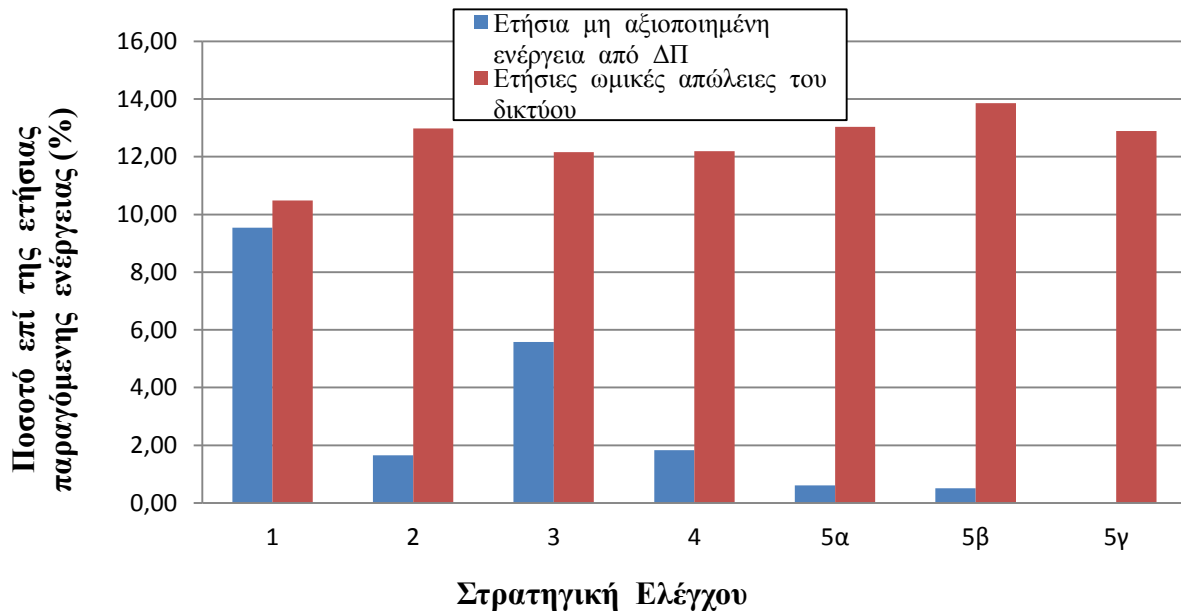
6.3.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα των στρατηγικών ελέγχου 1 – 4 του δικτύου των 69 ζυγών παρουσιάζονται συνολικά στο σχήμα 6.11. Οι πιο αποτελεσματικές μέθοδοι ελέγχου είναι οι χειρισμοί Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ και διακοπών, με καθένα από τους δύο να δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε διαφορετικές περιπτώσεις. Ειδικά σε σενάρια με ιδιαίτερα μεγάλο ποσοστό περικοπής ενεργού ισχύος μεγαλύτερη μείωση στην περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ φαίνεται να έχει ο έλεγχος των Μ/Σ έναντι των διακοπών.



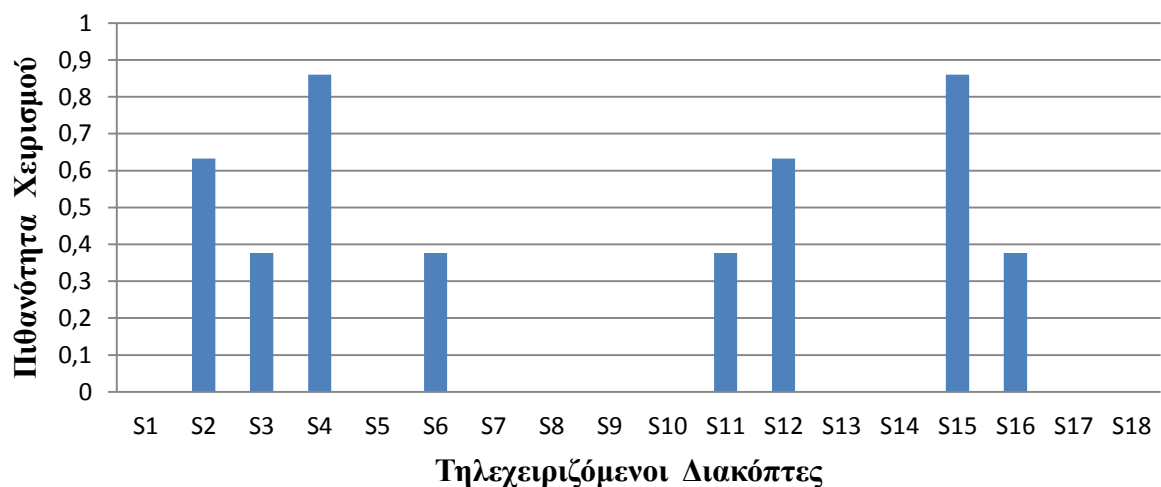
Σχήμα 6.11 : Ποσοστό της παραγόμενης ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ που υφίσταται περικοπή με τις στρατηγικές 1 – 4 για το δίκτυο 69 ζυγών

Καμία από τις αμιγείς στρατηγικές ελέγχου δεν οδηγεί σε μηδενισμό του ποσοστού περικοπής ενεργού ισχύος σε κάθε σενάριο. Ο συνδυασμός τους όμως δίνει ευνοϊκότερα αποτελέσματα. Στο σχήμα 6.12 δίνονται τα ετήσια μεγέθη του δικτύου 69 ζυγών για όλες τις στρατηγικές ελέγχου. Από αυτό διαπιστώνεται ότι οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις αν και μειώνουν την E_{curt} από το 9,5% στο 5,5% της E_g υστερούν σε σχέση με τους διακόπτες και τους Μ/Σ, οι οποίοι για αντίστοιχη αύξηση στις απώλειες πετυχαίνουν μείωση της E_{curt} σε τιμές κάτω του 2% της E_g . Επίσης, συνδυάζοντας στοιχεία ελέγχου, μόνο ο χειρισμός Μ/Σ και διακοπών εκμηδενίζει την E_{curt} με μικρή αύξηση των απωλειών.



Σχήμα 6.12 : Ετήσιες τιμές ενέργειας για όλες τις στρατηγικές ελέγχου στο δίκτυο 69 ζυγών

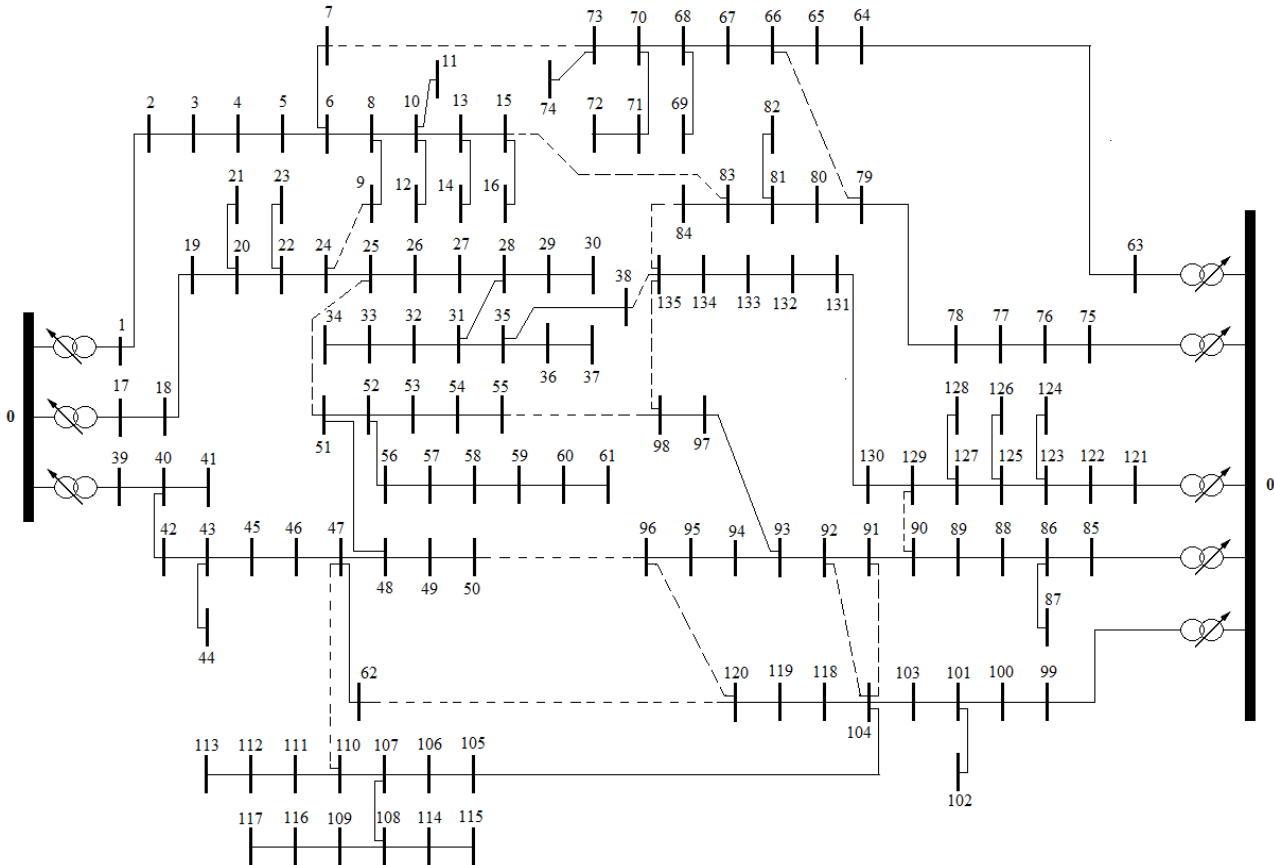
Στο σχήμα 6.13 παρουσιάζονται οι πιθανότητες χειρισμών των διακοπών του δικτύου 69 ζυγών. Είναι αξιοσημείωτο ότι από το σύνολο των διακοπών που θεωρήθηκαν ελέγξιμοι λιγότεροι από τους μισούς κατέληξαν να χρησιμοποιηθούν. Από το σχήμα 6.13 φαίνεται ξεκάθαρα η λειτουργία των διακοπών σε ζεύγη, με καθέναν από τους διακόπτες απομόνωσης να συγκεντρώνει αντίστοιχη πιθανότητα χειρισμού με έναν από τους ανοικτούς αποζεύκτες. Επομένως, μέθοδοι βελτίωσης του μοντέλου θα ήταν η σύζευξη διακοπών, όπως S4 και S15 αλλά και η απομάκρυνση από το σύνολο ελέγξιμων στοιχείων των διακοπών που δε σημείωσαν μεταβολές. Η επίλυση του μοντέλου για τη στρατηγική 4 επαναλήφθηκε μετά από αφαίρεση των διακοπών που δε σημείωσαν κανένα χειρισμό και ολοκληρώθηκε σε μόλις 71 (s), σημειώνοντας επιτάχυνση της τάξης του 36%.



Σχήμα 6.13 : Πιθανότητα χειρισμού των εγκατεστημένων ελέγξιμων διακοπών για το δίκτυο 69 ζυγών

6.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ 136 ΖΥΓΩΝ

Το δίκτυο 136 ζυγών εμφανίζεται στο Σχήμα 6.14. Πρόκειται για ένα πραγματικό σύστημα διανομής της Βραζιλίας και είναι ονομαστικής τάσης 13,8 kV [6.4].



Σχήμα 6.14 : Δίκτυο διανομής 136 ζυγών

Τα θερμικά όρια όλων των γραμμών του δικτύου θεωρούνται ίσα με 8 MVA. Όπως και στα δύο προηγούμενα δίκτυα, ο ζυγός 0 θα θεωρηθεί τερματικό σημείο του δικτύου μεταφοράς στον υποσταθμό υποβιβασμού και η σύνδεσή του με τις κύριες γραμμές διανομής του δικτύου γίνεται με οκτώ όμοιους Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ. Τα χαρακτηριστικά των στοιχείων ελέγχου του δικτύου για τις εφαρμογές του μοντέλου φαίνονται στους πίνακες 6.59– 6.61. Επίσης, στον πίνακα 6.62 παρουσιάζονται τα δεδομένα των μονάδων ΔΠ που έχουν θεωρηθεί συνδεδεμένες στο δίκτυο. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς (P_{inst}) είναι 12 MW.

Με την εφαρμογή της μεθόδου ομαδοποίησης των κ-μέσων, με βάση το ετήσιο αρχείο δεδομένων παρήχθησαν 50 νέα σενάρια λειτουργίας. Στον πίνακα 6.63 δίνονται για κάθε σενάριο η συνολική ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος ως ποσοστό επί του συνολικού εγκατεστημένου φορτίου στο δίκτυο καθώς και η ηλιακή και αιολική παραγωγή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ ως ποσοστό επί της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος. Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί θα είναι ανάλογη αυτής των προηγούμενων δικτύων.

Πίνακας 6.59 : Δεδομένα διακοπών του δικτύου 136 ζυγών

Τηλεχειριζόμενοι Διακόπτες	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Είδος
S1	3	4	Διακόπτες Απομόνωσης
S2	19	20	
S3	22	24	
S4	28	31	
S5	40	42	
S6	48	51	
S7	65	66	
S8	78	79	
S9	88	89	
S10	92	93	
S11	104	105	
S12	130	131	
S13	7	73	Ανοικτοί Αποζεύκτες
S14	9	24	
S15	15	83	
S16	25	51	
S17	38	135	
S18	47	110	
S19	50	96	
S20	55	98	
S21	62	120	
S22	66	79	
S23	84	135	
S24	90	129	
S25	91	104	
S26	92	104	
S27	96	120	
S28	98	135	

Πίνακας 6.60 : Δεδομένα εγκάρσιων αντισταθμίσεων του δικτύου 136 ζυγών

Εγκάρσιες αντισταθμίσεις	Ζυγός	Q_{sh} (MVar)	Αριθμός λήψεων	Αρχική θέση
C1	13	1	11	2
C2	32	1	11	3
C3	55	1	11	2
C4	70	1	11	3
C5	82	1	11	3
C6	94	1	11	3
C7	108	1	11	2

Πίνακας 6.61 : Δεδομένα Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ του δικτύου 136 ζυγών

Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ	Ζυγός άκρου λήψεων	Ζυγός μη ελεγχόμενου άκρου	Αριθμός λήψεων	Αρχική θέση	Μεταβολή λόγου Μ/Σ ανά λήψη (α.μ.)
T1	0	1	25	13	0,01
T2	0	17	25	13	0,01
T3	0	39	25	13	0,01
T4	0	63	25	13	0,01
T5	0	75	25	13	0,01
T6	0	85	25	13	0,01
T7	0	99	25	13	0,01
T8	0	121	25	13	0,01

Πίνακας 6.62 : Δεδομένα μονάδων ΔΠ του δικτύου 136 ζυγών

Μονάδες ΔΠ	Ζυγός	Είδος	$P_{inst,i}$ (MW)	$\cos\phi_{lim,i}$
G1	117	A/Γ	5	0,95
G2	135	A/Γ	5	0,95
G3 – G5	5 – 7	Φ/B	0,1	0,95
G6 – G9	25 – 28	Φ/B	0,1	0,95
G10, G11	39, 57	Φ/B	0,1	0,95
G12 – G14	76 – 78	Φ/B	0,1	0,95
G15 – G18	92 – 95	Φ/B	0,1	0,95
G19 – G22	124 – 127	Φ/B	0,1	0,95

Πίνακας 6.63 : Σενάρια ζήτησης φορτίου, ηλιακής και αιολικής παραγωγής για το δίκτυο των 136 ζυγών

A/A	Πιθανότητα εμφάνισης	Συνολική ζήτηση (%)	Ηλιακή παραγωγή (%)	Αιολική παραγωγή (%)	A/A	Πιθανότητα εμφάνισης	Συνολική ζήτηση (%)	Ηλιακή παραγωγή (%)	Αιολική παραγωγή (%)
1	0,093	0,4026	0,0045	0,0095	26	0,011	0,8086	0,5693	0,9606
2	0,014	0,4017	0,4323	0,0185	27	0,011	0,5657	0,6529	0,9417
3	0,048	0,6567	0,0053	0,0045	28	0,012	0,4871	0,3331	0,4478
4	0,020	0,3344	0,0079	0,7262	29	0,027	0,6293	0,0087	0,1294
5	0,008	0,7870	0,5953	0,7499	30	0,012	0,6805	0,2232	0,2319
6	0,018	0,5122	0,0168	0,4066	31	0,010	0,7229	0,2980	0,6170
7	0,011	0,5530	0,6239	0,1949	32	0,010	0,6444	0,5029	0,5980
8	0,013	0,6850	0,0226	0,6042	33	0,016	0,7828	0,0087	0,2251
9	0,022	0,6166	0,0148	0,2807	34	0,022	0,4607	0,0101	0,1823
10	0,026	0,5887	0,0292	0,9858	35	0,015	0,5440	0,3359	0,0373
11	0,009	0,3512	0,5136	0,9523	36	0,015	0,5816	0,5763	0,3660
12	0,015	0,6848	0,5575	0,0179	37	0,016	0,7327	0,0250	0,4368
13	0,009	0,5936	0,6611	0,5257	38	0,012	0,5529	0,3954	0,9277
14	0,079	0,5251	0,0084	0,0092	39	0,009	0,6158	0,5788	0,5493
15	0,027	0,3078	0,0027	0,1435	40	0,013	0,6049	0,4475	0,1943
16	0,008	0,5024	0,4653	0,6885	41	0,011	0,7548	0,6075	0,3822
17	0,012	0,4813	0,1849	0,2746	42	0,014	0,4992	0,2447	0,7255
18	0,017	0,4127	0,1941	0,0159	43	0,029	0,3230	0,0044	0,2996
19	0,089	0,2845	0,0022	0,0073	44	0,008	0,4418	0,5520	0,5038
20	0,012	0,4545	0,4816	0,2960	45	0,010	0,6880	0,4353	0,4048
21	0,012	0,5580	0,1705	0,4933	46	0,018	0,5272	0,5598	0,0148
22	0,009	0,7931	0,5561	0,2047	47	0,015	0,4960	0,0170	0,6063
23	0,010	0,5391	0,6596	0,7297	48	0,017	0,6226	0,1686	0,0228
24	0,015	0,5897	0,0376	0,7712	49	0,026	0,3459	0,0088	0,9850
25	0,017	0,3245	0,0080	0,4765	50	0,029	0,8018	0,0055	0,0148

6.4.1 Στρατηγική Ελέγχου 1 : Έλεγχος δικτύου αποκλειστικά με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ

Στη στρατηγική αυτή ο μόνος τρόπος για τη διατήρηση της ομαλής λειτουργίας του δικτύου είναι η μείωση της παραγόμενης ενεργού ισχύος από τις μονάδες ΔΠ. Τόσο οι διακόπτες όσο και οι Μ/Σ και οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις του δικτύου διατηρούν τις αρχικές τους θέσεις, οπότε στο μοντέλο του προβλήματος τίθενται $s_{sw} = p_{sw} = t_{sw} = 0$.

Τα σενάρια στα οποία εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για το δίκτυο με τη χρήση της στρατηγικής ελέγχου 1 φαίνονται στον πίνακα 6.64. Κατά την επίλυση δεν προέκυψαν προβλήματα με περιπτώσεις μεγάλης ζήτησης και μικρής παραγωγής, δηλαδή δεν υπήρξαν σενάρια που οδήγησαν το δίκτυο σε τιμές τάσης κατώτερες του επιτρεπόμενου ορίου.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου 1 για το δίκτυο των 136 ζυγών καταγράφονται στον πίνακα 6.65. Αν και το σύνολο της εγκατεστημένης ενεργού ισχύος από ΔΠ είναι μεγαλύτερο στο δίκτυο αυτό σε σχέση με τα δύο προηγούμενα, η διείσδυση ΔΠ σε σχέση με το εγκατεστημένο φορτίο είναι μικρότερη. Αυτός είναι και ο λόγος που το ποσοστό της ενεργού ισχύος των μονάδων που περικόπτεται είναι μικρότερο ποσοστό της συνολικής παραγόμενης ενεργού ισχύος του δικτύου από ότι στα υπόλοιπα δύο δίκτυα.

Πίνακας 6.64 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 1 στο δίκτυο των 136 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	$P_{loss,i}$ (MW)
4	0,020	0,3201	0,3275
10	0,026	0,9119	0,5092
11	0,009	1,4045	0,4166
26	0,011	0,1567	0,5957
27	0,011	0,7563	0,4762
38	0,012	0,7226	0,4677
49	0,026	1,5828	0,4293

Πίνακας 6.65 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 1 στο δίκτυο των 136 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας		0%
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος		11,5%
E_{curt}	(MWh)	893,62
	(%) · E_g	3,19
E_{loss}	(MWh)	1333,84
	(%) · E_g	4,76
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)		3,64

6.4.2 Στρατηγική Ελέγχου 2 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στο σταθμό υποβιβασμού

Με αυτή τη στρατηγική ελέγχου, πέρα από τη ρύθμιση της ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ, ο διαχειριστής έχει τη δυνατότητα μεταβολής των λήψεων των Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στον υποσταθμό υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ για αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού τους. Κατά συνέπεια οι αρχικοί ζυγοί των γραμμών του δικτύου διανομής μπορούν πλέον να μεταβάλλουν την ανά μονάδα τιμή της τάσης τους σε σχέση με τον τελικό ζυγό του δικτύου μεταφοράς. Έτσι είναι δυνατόν να αντιμετωπιστούν οι εμφανιζόμενες υπερτάσεις του δικτύου. Επιθυμώντας οι διακόπτες και οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις να μην αλλάζουν την κατάσταση λειτουργίας τους, στο μοντέλο τίθεται $s_{sw} = p_{sw} = 0$.

Τα αποτελέσματα εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου 2 στα αρχικά σενάρια περικοπής της ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ καταγράφονται στον πίνακα 6.66. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται πολύ μικρή μείωση της $P_{curt,i}$ σε σχέση με τη στρατηγική 1. Σε κανένα σενάριο δεν επιτυγχάνεται μηδενισμός της, ενώ ειδικά στα σενάρια 4, 11 και 49 δεν σημειώνει καμία μεταβολή.

Στον πίνακα 6.67 παρουσιάζονται οι ενέργειες χειρισμών των Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στον υποσταθμό υποβιβασμού οι οποίες εντοπίζονται στους Μ/Σ των κύριων γραμμών διανομής όπου βρίσκονται συνδεδεμένες οι δύο ανεμογεννήτριες. Σε όλα τα σενάρια παρατηρείται μετάβαση των Μ/Σ σε υψηλότερες λήψεις, με σκοπό τον υποβιβασμό της τάσης των γραμμών σε σχέση με το ζυγό μεταφοράς και κατά συνέπεια περιορισμό της περικοπής ενεργού ισχύος του δικτύου.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου 2 για το δίκτυο των 136 ζυγών καταγράφονται στον πίνακα 6.68. Παρατηρείται αμελητέα μεταβολή τόσο στην ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια όσο και στις ωμικές απώλειες του δικτύου.

Πίνακας 6.66 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 2 στο δίκτυο των 136 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
4	0,020	0,3201	0	0,3275	0
10	0,026	0,7537	-17,35	0,5390	+5,86
11	0,009	1,4045	0	0,4166	0
26	0,011	0,1003	-76,01	0,7592	+27,44
27	0,011	0,5495	-27,35	0,5790	+21,59
38	0,012	0,5615	-22,29	0,5401	+15,48
49	0,026	1,5828	0	0,4293	0

Πίνακας 6.67 Πίνακας χειρισμών Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ για τη Στρατηγική Ελέγχου 2 στην περίπτωση Α στο δίκτυο των 136 ζυγών

Σενάρια	Ενέργειες χειρισμού Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
4, 11, 49								
10							1	
27, 38							1	1
26							2	1

Πίνακας 6.68 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 2 στο δίκτυο των 136 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας	0%	
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος	11,5%	
E_{curt}	(MWh)	815,58
	(%) · E_g	2,91
E_{loss}	(MWh)	1374,85
	(%) · E_g	4,91
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)	4,17	

6.4.3 Στρατηγική Ελέγχου 3 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς των εγκάρσιων αντισταθμίσεων των ζυγών

Σε αυτό το πλάνο ελέγχου οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις που βρίσκονται στο δίκτυο έχουν τη δυνατότητα αυξομείωσης της χωρητικότητάς τους και κατά συνέπεια της αέργου ισχύος τους με σκοπό την εξισορρόπηση των επιπέδων τάσης στα διάφορα σημεία του δικτύου. Οι Μ/Σ και οι διακόπτες μένουν στις αρχικές τους θέσεις, οπότε στο μοντέλο τίθεται $s_{sw} = t_{sw} = 0$.

Στον πίνακα 6.69 φαίνονται τα αποτελέσματα αυτής της στρατηγικής ελέγχου στα σενάρια λειτουργίας του δικτύου. Μόνο σε ένα από αυτά επιτυγχάνεται μηδενισμός, ενώ στα περισσότερα η μείωση της $P_{curt,i}$ είναι πολύ μικρή. Οι απώλειες του δικτύου αυξάνονται σε κάθε περίπτωση.

Οι χειρισμοί των εγκάρσιων αντισταθμίσεων σε κάθε σενάριο δίνονται στον πίνακα 6.70. Φαίνεται ότι κυρίαρχο ρόλο στη μείωση της ενεργού ισχύος των μονάδων που περικόπτεται παίζει η C7, αφού χαμηλώνει τη λήψη της σε κάθε σενάριο.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου 3 στο δίκτυο των 136 ζυγών καταγράφονται στον πίνακα 6.71. Η ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια μειώνεται στην περίπτωση αυτή κατά μόλις 15% ενώ οι απώλειες του δικτύου αυξάνονται κατά 5%.

Πίνακας 6.69 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 3 στο δίκτυο των 136 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
4	0,020	0,1902	-40,58	0,3484	+6,38
10	0,026	0,7768	-14,82	0,5373	+5,52
11	0,009	1,2743	-9,27	0,4379	+5,12
26	0,011	-	-100	0,6305	+5,83
27	0,011	0,6217	-17,80	0,5035	+5,74
38	0,012	0,5883	-18,59	0,4947	+5,77
49	0,026	1,4527	-8,22	0,4505	+4,94

Πίνακας 6.70 : Πίνακας χειρισμών των εγκάρσιων αντισταθμίσεων για τη Στρατηγική Ελέγχου 3 στο δίκτυο των 136 ζυγών

Σενάρια	Ενέργειες χειρισμού εγκάρσιων αντισταθμίσεων						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
10, 26							-1
4				1			-1
11, 49		-1					-1
27, 38						-1	-1

Πίνακας 6.71 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 3 στο δίκτυο των 136 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας	0%	
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος	10,3%	
E_{curt}	(MWh)	759,98
	(%) · E_g	2,71
E_{loss}	(MWh)	1403,76
	(%) · E_g	5,01
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)	4,58	

6.4.4 Στρατηγική Ελέγχου 4 : Έλεγχος δικτύου με περικοπή ενεργού ισχύος μονάδων ΔΠ και με χειρισμούς διακοπών των γραμμών

Με αυτή τη στρατηγική ο διαχειριστής του ΔΔ έχει τη δυνατότητα τηλεχειρισμού διακοπών με σκοπό την αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου και κατά συνέπεια των

κατευθύνσεων των ροών ισχύος μέσα σε αυτό. Στο μοντέλο αυτό οι Μ/Σ και οι εγκάρσιες αντισταθμίσεις δε μεταβάλλουν τις λήψεις τους, άρα τίθεται $t_{sw} = p_{sw} = 0$.

Τα αποτελέσματα του ελέγχου διακοπών στο δίκτυο δίνονται στον πίνακα 6.72. Σε όλα τα σενάρια επιτυγχάνεται μηδενισμός της $P_{curt,i}$ ενώ η μεταβολή των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ποικίλλει ανάλογα με το σενάριο.

Οι ενέργειες χειρισμού των διακοπών του δικτύου εμφανίζονται στον πίνακα 6.73. Μόνο 13 από τους 28 ελέγξιμους διακόπτες χρησιμοποιήθηκαν συνολικά για την επαναδιαμόρφωση του δικτύου στα δεδομένα σενάρια. Το σενάριο 49, που εμφάνισε τη μεγαλύτερη τιμή $P_{curt,i}$ με τη στρατηγική ελέγχου 1 είναι αυτό που χρησιμοποιεί τους περισσότερους διακόπτες. Σε αυτό το σενάριο ένα μεγάλο μέρος του δικτύου ενσωματώνεται στην γραμμή διανομής με το ζυγό 118, όπου είναι συνδεδεμένη μία από τις δύο ανεμογεννήτριες.

Τα τελικά αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου 4 στο δίκτυο των 136 ζυγών καταγράφονται στον πίνακα 6.74. Η ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια έχει μειωθεί κατά 100% ενώ οι απώλειες εμφανίζουν αύξηση κατά 6%.

Πίνακας 6.72 : Σενάρια όπου εμφανίζεται περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ για τη Στρατηγική Ελέγχου 4 στο δίκτυο των 136 ζυγών

Σενάριο i	Πιθανότητα εμφάνισης p_i	$P_{curt,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{curt,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)	$P_{loss,i}$ (MW)	Μεταβολή $P_{loss,i}$ σε σχέση με Σ.Ε. 1 (%)
4	0,020	–	-100	0,3240	-1,07
10	0,026	–	-100	0,5844	+14,77
11	0,009	–	-100	0,7507	+80,20
26	0,011	–	-100	0,4066	-31,75
27	0,011	–	-100	0,5056	+6,18
38	0,012	–	-100	0,5328	+13,91
49	0,026	–	-100	0,6719	+56,51

Πίνακας 6.73 : Πίνακας ενεργειών των τηλεχειριζόμενων διακοπών για τη Στρατηγική Ελέγχου 4 στο δίκτυο των 136 ζυγών

Σενάρια	Ενέργειες χειρισμού διακοπών												
	S1	S3	S5	S7	S8	S9	S10	S14	S15	S16	S18	S19	S22
4, 10, 26, 38			-1				-1				1	1	
11, 27	-1	-1	-1			-1		1		1	1	1	
49	-1	-1	-1	-1	-1	-1		1	1	1	1	1	1

Πίνακας 6.74 : Αποτελέσματα μοντέλου για τη Στρατηγική Ελέγχου 4 στο δίκτυο των 136 ζυγών

Συνολική Πιθανότητα Παραβίασης Ορίων Λειτουργίας		0%
Συνολική Πιθανότητα Περικοπής Ενεργού Ισχύος		2,6%
E_{curt}	(MWh)	0
	(%) · E_g	0
E_{loss}	(MWh)	1422,14
	(%) · E_g	5,08
Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (s)		265,23

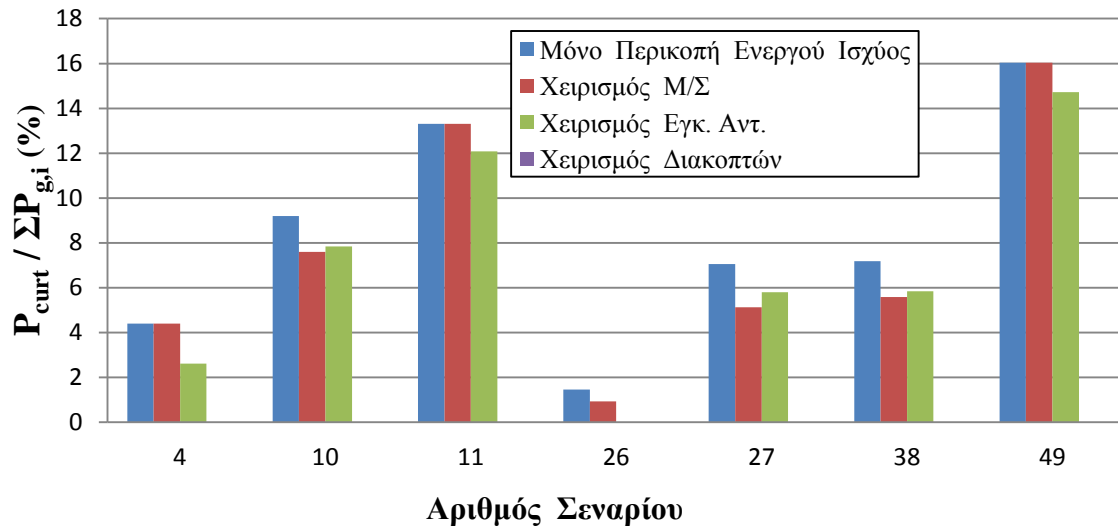
6.4.5 Στρατηγική Ελέγχου 5 : Συνδυασμένος χειρισμός των στοιχείων του δικτύου

Εφόσον με χρήση της στρατηγικής 4 επετεύχθη πλήρης μηδενισμός της περικοπής ισχύος των μονάδων ΔΠ, ο συνδυασμένος έλεγχος διακοπών με άλλα στοιχεία του δικτύου θα δώσει στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων τα ίδια αποτελέσματα.. Επίσης, βάσει των επιδόσεων των στρατηγικών με χρήση Μ/Σ και εγκάρσιων αντισταθμίσεων στο παρόν δίκτυο είναι αμφίβολο να προκύψει βέλτιστη λύση αντίστοιχη αυτής της στρατηγικής 4.

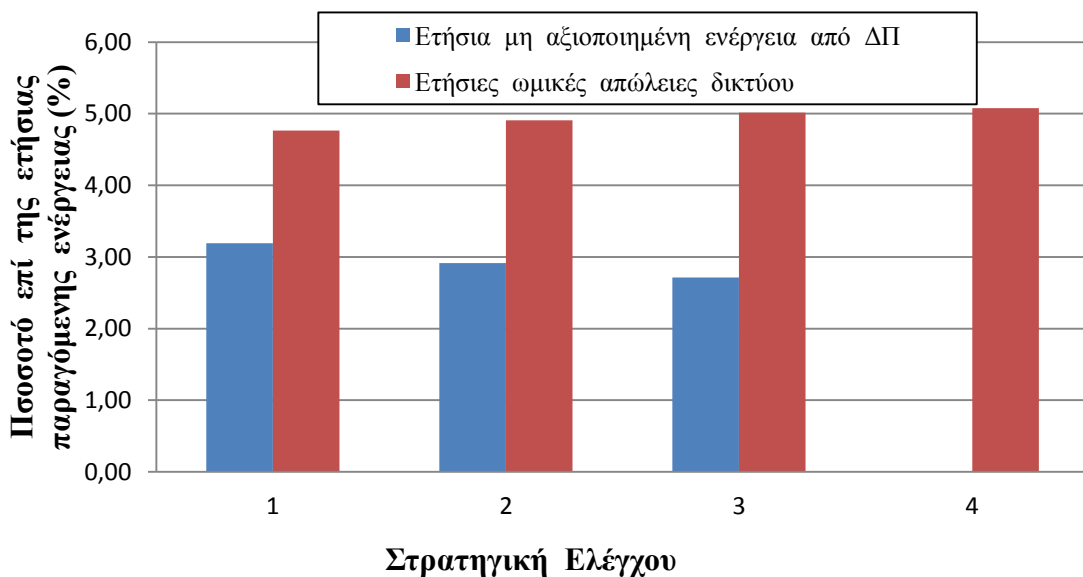
6.4.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στο σχήμα 6.15 δίνονται συνολικά τα αποτελέσματα των στρατηγικών ελέγχου 1 – 4 για το δίκτυο των 136 ζυγών. Σε αυτό είναι εμφανής η αδυναμία των χειρισμών τόσο των Μ/Σ όσο και των εγκάρσιων αντισταθμίσεων να περιορίσουν την περικοπή ενεργού ισχύος. Αντίθετα, οι διακόπτες για άλλη μια φορά δίνουν το βέλτιστο αποτέλεσμα, μηδενίζοντας πλήρως την $P_{curt,i}$ σε κάθε σενάριο.

Τα ετήσια μεγέθη των στρατηγικών ελέγχου για το δίκτυο δίνονται στο σχήμα 6.16. Παρατηρείται ότι σε αντίθεση με τα προηγούμενα δίκτυα η ετήσια μη αξιοποιημένη ενέργεια αποτελεί μόλις το 3% της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι η διείσδυση ΔΠ στο εν λόγω δίκτυο είναι μικρότερη από ότι στα προηγούμενα. Στο σχήμα μπορεί να φανεί η ελάχιστη μείωση της E_{curt} με χρήση των στρατηγικών 2 και 3 και ο μηδενισμός της με της στρατηγική 4 με αμελητέα αύξηση των απωλειών σε σχέση με τη στρατηγική 1.

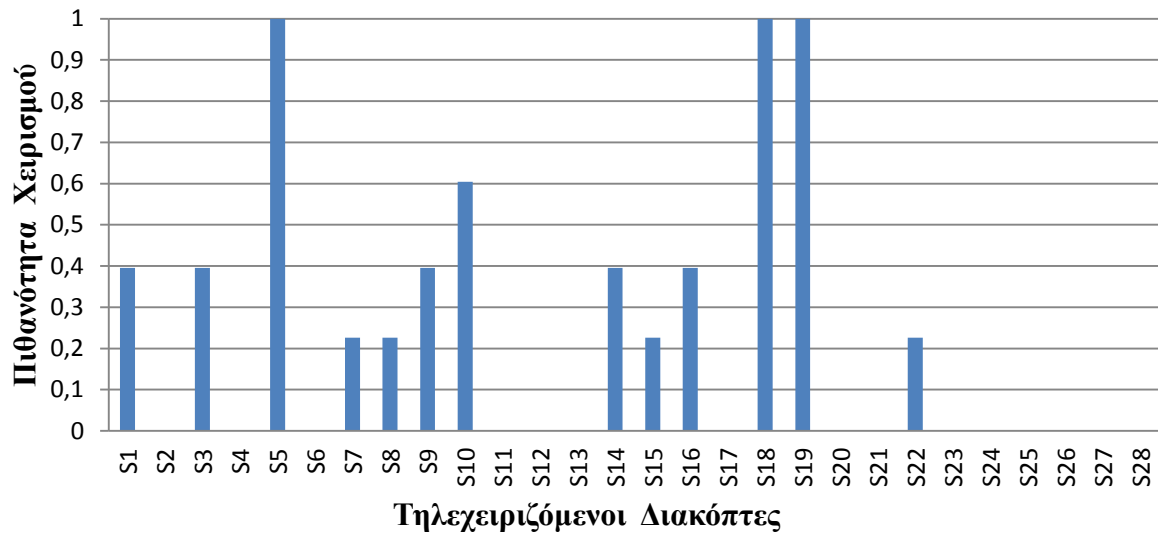


Σχήμα 6.15 : Ποσοστό της παραγόμενης ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ που υφίσταται περικοπή με τις στρατηγικές 1 – 4 για το δίκτυο 136 ζυγών



Σχήμα 6.16 : Ετήσιες τιμές ενέργειας για όλες τις στρατηγικές ελέγχου στο δίκτυο 136 ζυγών

Στο σχήμα 6.17 καταγράφονται οι πιθανότητες χειρισμού των διακοπών του δικτύου 136 ζυγών. Όπως και στο δίκτυο 69 ζυγών, και εδώ χρησιμοποιούνται λιγότεροι από τους μισούς διακόπτες ελέγχου που ορίστηκαν στο μοντέλο. Δεν είναι σίγουρο ότι όσοι δε σημείωσαν κάποια ενέργεια χειρισμού είναι διακόπτες που δε θα συμμετάσχουν ποτέ στην επαναδιαμόρφωση, αλλά η αφαίρεσή τους από το μοντέλο θα οδηγήσει σε πολύ μικρότερο χρόνο επίλυσης χωρίς ιδιαίτερη συνέπεια στον εντοπισμό τοπικών βέλτιστων του προβλήματος. Η επίλυση του μοντέλου επαναλήφθηκε για τη στρατηγική 4 χωρίς τους διακόπτες που δε σημείωσαν κανένα χειρισμό και ολοκληρώθηκε παρέχοντας τα ίδια αποτελέσματα σε χρόνο μόλις 154 (s), παρουσιάζοντας βελτίωση της τάξης του 42%.



Σχήμα 6.17 : Πιθανότητα χειρισμού των εγκατεστημένων ελέγξιμων διακοπών για το δίκτυο 136 ζυγών

6.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [6.1] T. Kannungo, D. M. Mount, N. S. Netanyahu, C. D. Piatko, R. Silverman and A. Y. Wu, "An efficient k-means clustering algorithm: Analysis and implementation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 24, no. 7, pp. 881–892, Jul. 2002.
- [6.2] M. E. Baran and F. F Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1497, Apr. 1989.
- [6.3] D. Das, "Reconfiguration of distribution system using fuzzy multi-objective approach," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 28, no. 5, pp. 331–338, June 2006.
- [6.4] J. R. S. Mantovani, F. Casari, R. A. Romero, "Reconfiguracao de sistemas de distribuicao radiais utilizando o criterio de queda de tensao," *SBA Controle & Automacao*, vol. 11, no. 3, pp. 150–159, Sep. 2000.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης των δικτύων (Optimal Network Reconfiguration Problem) στο οποίο αναζητείται το σύνολο των χειρισμών που πρέπει να γίνουν στα στοιχεία ελέγχου ενός δικτύου ώστε να το οδηγήσουν στη βέλτιστη κατάσταση λειτουργίας, δηλαδή αυτή για την οποία ελαχιστοποιείται η τιμή μιας αντικειμενικής συνάρτησης. Η αντικειμενική συνάρτηση που επιλέχθηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση σχεδιάστηκε με σκοπό την ελαχιστοποίηση αφενός της περικοπής ενεργού ισχύος των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΔΠ) στα δίκτυα διανομής και αφετέρου του αριθμού των απαιτούμενων χειρισμών για τα στοιχεία ελέγχου των δικτύων.

Η διεσπαρμένη παραγωγή αποτελεί μια σχετικά καινούρια πρακτική της οποίας η χρήση εξαπλώνεται όλο και περισσότερο στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε διεθνές επίπεδο. Ο λόγος είναι τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα που προσφέρει στα δίκτυα όπως η ελαχιστοποίηση των απωλειών τους, η μείωση εισροής ισχύος από το επίπεδο της μεταφοράς και η παροχή εφεδρείας σε περιπτώσεις απότομης διακοπής της ηλεκτροδότησης. Η αρχική κατασκευή των δικτύων διανομής όμως δεν προέβλεπε την ενσωμάτωση ΔΠ σε αυτά. Συνεπώς, εάν δεν επιβληθεί κατάλληλος έλεγχος στις συνδεδεμένες μονάδες ΔΠ μπορούν να προκύψουν ποικίλες διαταραχές της ομαλής λειτουργίας των δικτύων. Η πιο συνήθης μέθοδος ελέγχου των μονάδων ΔΠ έχει υπάρξει μέχρι πρόσφατα η ρύθμιση της ενεργού ισχύος που αυτές παρέχουν στο δίκτυο. Σύμφωνα με το ισχύον μοντέλο, ένα μέρος της παραγόμενης ενεργού ισχύος περικόπτεται όταν προβλέπεται ότι θα δημιουργήσει προβλήματα λειτουργίας στο δίκτυο, όπως παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών ή των θερμικών ορίων των γραμμών. Ωστόσο, στα περισσότερα ισχύοντα ρυθμιστικά πλαίσια επιβάλλεται η καταβολή αντιτίμου από τους διαχειριστές των δικτύων διανομής στους ιδιοκτήτες των μονάδων ΔΠ ακόμη και για την παραγόμενη ενέργεια που μολονότι παρήχθησε υπέστη περικοπή. Κατά συνέπεια είναι προς όφελος των διαχειριστών των δικτύων διανομής να γίνεται περικοπή του ελάχιστου δυνατού ποσού της παραγόμενης ενέργειας των εγκατεστημένων μονάδων ΔΠ. Με αυτό το σκοπό αναζητήθηκαν εναλλακτικές τεχνικές ελέγχου των δικτύων. Ένας από αυτούς περιλαμβάνει την εγκατάσταση τηλεχειριζόμενου εξοπλισμού στα δίκτυα με σκοπό την κατάλληλη επαναδιαμόρφωσή τους χωρίς διακοπή της λειτουργίας τους ώστε να ελαχιστοποιείται το ποσό της περικοπής ενεργού ισχύος από τις μονάδες ΔΠ.

Με αυτό τον τρόπο προέκυψε το πρόβλημα βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης των δικτύων που μελετάται στην παρούσα εργασία. Η διατύπωσή του βασίστηκε στο μοντέλο της βέλτιστης ροής ισχύος (Optimal Power Flow – OPF) το οποίο υπέστη διάφορες τροποποιήσεις :

- Έγινε αντικατάσταση των μη γραμμικών περιορισμών του (π.χ. ημιτονοειδείς) με ένα συνδυασμό γραμμικών και τετραγωνικών περιορισμών, κάτι που άλλαξε την κατάταξη του προβλήματος από πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού (Non-Linear Problem – NLP) σε πρόβλημα τετραγωνικών περιορισμών (Quadratically Constrained Problem – QCP). Το μοντέλο απέκτησε έτσι ευνοϊκότερα χαρακτηριστικά σχετικά με τη συμπεριφορά του κατά την επίλυση.
- Έγινε ενσωμάτωση εξισώσεων ελέγχου ποικίλων στοιχείων του δικτύου. Τα στοιχεία αυτά χαρακτηρίζονται από διακριτή συμπεριφορά, με αποτέλεσμα την εισαγωγή δυαδικών και ακέραιων μεταβλητών στο μοντέλο, καθιστώντας το πλέον ένα πρόβλημα μικτών ακεραίων (Mixed Integer Problem – MIP). Επομένως, το συνολικό πρόβλημα μετατράπηκε σε ένα MIQLP (Mixed Integer Quadratically Constrained Problem). Τα στοιχεία που επιλέχθηκαν για ενσωμάτωση ήταν διακόπτες αλλαγής τοπολογίας του δικτύου, εγκάρσιες αντισταθμίσεις και Μ/Σ με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ).
- Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος επιλέχθηκε μεταξύ διαφόρων υποψηφίων με στόχο να ελαχιστοποιεί την περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ αλλά και τον αριθμό των χειρισμών του εξοπλισμού ελέγχου του δικτύου, εγγυώμενη παράλληλα την κατά το δυνατόν ομοιόμορφη κατανομή της περικοπτόμενης ενεργού ισχύος στις εγκατεστημένες μονάδες ΔΠ.

Το διατυπωθέν πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης υλοποιήθηκε στο λογισμικό GAMS μέσω του οποίου ορίστηκε για την επίλυσή του η χρήση του "λύτη" (solver) BONMIN. Για την ανάγνωση και τη μαζική επεξεργασία δεδομένων από αρχεία Excel χρησιμοποιήθηκε κώδικας που συνετάχθη στο λογισμικό MATLAB και λειτούργησε ως διαμεσολαβητής μεταξύ των δεδομένων και του μοντέλου επίλυσης.

Στη συνέχεια το προτεινόμενο μοντέλο εφαρμόστηκε σε δίκτυα 34, 69 και 136 ζυγών δοκιμάζοντας ποικίλες στρατηγικές ελέγχου από την πλευρά του διαχειριστή του δικτύου για εύρεση της αποτελεσματικότερης (θεωρήθηκε σε όλες δεδομένος ο Q–V έλεγχος της αέργου ισχύος των μονάδων ΔΠ). Αυτές ήταν :

- *Στρατηγική έλεγχου 1* : Έλεγχος μόνο της περικοπής ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ του δικτύου, που είναι το επικρατέστερο ισχύον μοντέλο ελέγχου των δικτύων διανομής διεθνώς. Τα αποτελέσματα αυτής της στρατηγικής χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά για αξιολόγηση των υπόλοιπων στρατηγικών.
- *Στρατηγική έλεγχου 2* : Έλεγχος της ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και των Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ στους υποσταθμούς του δικτύου.
- *Στρατηγική έλεγχου 3* : Έλεγχος της ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και των εγκάρσιων αντισταθμίσεων στους ζυγούς του δικτύου.
- *Στρατηγική έλεγχου 4* : Έλεγχος της ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και των διακοπών αλλαγής τοπολογίας του δικτύου.
- *Στρατηγική έλεγχου 5* : Έλεγχος της ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ και συνδυασμένος χειρισμός των στοιχείων του δικτύου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η καλύτερη στρατηγική ελέγχου των δικτύων με έλεγχο ενός είδους στοιχείων είναι ο χειρισμός των διακοπών αλλαγής τοπολογίας. Αν και πιο χρονοβόρα από τις υπόλοιπες, αυτή η στρατηγική ελέγχου πέτυχε τη μικρότερη δυνατή περικοπή ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ σε συνδυασμό με μικρές ωμικές απώλειες στο δίκτυο. Από τις στρατηγικές συνδυασμένου ελέγχου η πιο αποτελεσματική αποδείχθηκε ο ταυτόχρονος χειρισμός διακοπών αλλαγής τοπολογίας και Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ, ο οποίος σε όσες περιπτώσεις δοκιμάστηκε έδωσε καλύτερα αποτελέσματα από τον αμιγή έλεγχο διακοπών.

Τέλος, με στόχο τη βελτίωση του προτεινόμενου μοντέλου προτάθηκαν ορισμένες μέθοδοι ελάττωσης του υπολογιστικού χρόνου χρησιμοποιώντας τα δεδομένα παρελθοντικών εκτελέσεων για μείωση των μεταβλητών ελέγχου και άρα του χώρου καταστάσεων του προβλήματος.

7.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία υποστηρίζει πλήθος επεκτάσεων προς ποικίλες κατευθύνσεις. Ορισμένες από αυτές είναι οι ακόλουθες :

- Το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης όπως διατυπώθηκε σε αυτή την εργασία εμφανίζει μη κυρτό (non-convex) χώρο καταστάσεων. Είναι δυνατή η κατάλληλη μαθηματική τροποποίηση των εξισώσεων του ώστε να διατυπωθεί ως κυρτό (convex) πρόβλημα, το οποίο παρουσιάζει βελτιωμένα χαρακτηριστικά υπολογισμού σε σχέση με την μη-κυρτή μορφή του.
- Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο κεντρικού ελέγχου των στοιχείων του δικτύου. Με την σταδιακή εξέλιξη της τεχνολογίας των micro grids αρχίζει να γίνεται επιτακτική η χρήση αποκεντρωμένων τεχνικών ελέγχου που ρυθμίζουν τοπικά τη λειτουργία των δικτύων. Το παρόν μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την ανάπτυξη μιας τέτοιας μεθόδου ελέγχου.
- Είναι δυνατή η τροποποίηση του στόχου βελτιστοποίησης του προβλήματος με σκοπό την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του μοντέλου για ποικίλες αντικειμενικές συναρτήσεις. Πιθανές επιλογές όρων της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου διανομής ή του συντελεστή χρησιμοποίησης των γραμμών του δικτύου.
- Με τη στατιστική ανάλυση παρελθοντικών βέλτιστων επαναδιαμορφώσεων του δικτύου σε περιπτώσεις διαταραχών είναι δυνατή η κατάταξη συγκεκριμένων σεναρίων ζήτησης – παραγωγής του δικτύου σε ομάδες με γνωστές βέλτιστες λύσεις, εκμηδενίζοντας κατ' αυτό τον τρόπο τον χρόνο υπολογισμού του μοντέλου.
- Με το πλήθος διαφορετικών τοπολογιών λειτουργίας και άρα ροών ισχύος σε ένα δίκτυο που χρησιμοποιεί το παρόν μοντέλο επαναδιαμόρφωσης είναι απαραίτητη η μελέτη για κατάλληλη τροποποίηση των ρυθμίσεων των μέσων προστασίας του σε κάθε περίπτωση.