



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

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΩΝ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΧΑΜΗΛΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ
ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιάσων-Ηρακλής Αβραμίδης

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Βασίλειος Ευαγγελόπουλος, Υποψήφιος Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2017



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

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΩΝ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΧΑΜΗΛΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ
ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιάσων-Ηρακλής Αβραμίδης

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Βασίλειος Ευαγγελόπουλος, Υποψήφιος Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Ιουνίου 2017

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

.....
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Ιούνιος 2017

.....
Ιάσων-Ηρακλής Αβραμίδης
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright (copyright emblem) Ιάσων Αβραμίδης, 2017
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 το συγγραφέα.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των επιπτώσεων στα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης των τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα (Low Carbon Technologies-LCT), όπως των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ή των συσκευών κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, των οποίων η λειτουργία δεν συνοδεύεται από υψηλά επίπεδα εκπομπών άνθρακα. Συγκεκριμένα, η μελέτη εστιάζεται κυρίως σε θέματα αξιοπιστίας εξυπηρέτησης καταναλωτών (τήρησης ορίων μέτρου τάσης) και θερμικής αντοχής των επιμέρους στοιχείων του δικτύου. Τυχόν προβλήματα που προκύπτουν αντιμετωπίζονται χωρίς άμεση επίδραση του χειριστή ούτε μέσω μοντέρνων συσκευών (ηλεκτρονικά ισχύος), αλλά με εσωτερικές μεθόδους, όπως ο δυναμικός έλεγχος κατανάλωσης, σε μια προσπάθεια μετάβασης από το "έξυπνο" δίκτυο, σε ένα οικονομικότερο και εν γένει αποδοτικότερο δίκτυο το οποίο "προλαβαίνει" πιθανά προβλήματα. Δηλαδή, δεν είναι επιθυμητή η επί τόπου αντιμετώπιση των προβλημάτων αλλά η καθολική πρόληψη αυτών.

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι προσομοίωσης συνδυάζοντας τα προγραμματιστικά περιβάλλοντα MATLAB και OpenDSS για την υλοποίηση των στόχων της εργασίας. Πρέπει να τονισθεί πως αυτό που ενδιαφέρει είναι η μελέτη και ο κατάλληλος χειρισμός υπαρχόντων δικτύων και όχι η βέλτιστη ανάπτυξη τους ή η βέλτιστη τοποθέτηση και λειτουργία των LCT. Αναζητούνται σχέσεις μεταξύ του επιπέδου διείσδυσης των LCT και της λειτουργίας του δικτύου, επικεντρώνοντας ειδικότερα στην τάση, το ρεύμα και την ισχύ, δηλαδή τα βασικά μεγέθη που "αναδεικνύουν" τις επιπτώσεις των LCT. Για τη μελέτη λειτουργίας του δικτύου επιστρατεύεται η μέθοδος της πιθανοτικής ροής ισχύος η οποία επιλύεται με τη μέθοδο Monte Carlo. Για τις προβληματικές καταστάσεις που προκύπτουν εφαρμόζονται επιπρόσθετα μέτρα και πιο συγκεκριμένα ο δυναμικός έλεγχος κατανάλωσης, ο οποίος υλοποιείται μέσω διάφορων προσεγγίσεων. Στόχος των επιπλέον μέτρων είναι να ομαλοποιηθεί η ενεργειακή κατανάλωση, προκειμένου να μειωθεί η επίδραση των LCT όσο το δυνατόν περισσότερο. Αφού επανακαθοριστεί η νέα κατανάλωση, η λειτουργία του δικτύου μελετάται και πάλι μέσω της πιθανοτικής ροής ισχύος.

Για την αξιολόγηση των μεθόδων της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα ευρύ φάσμα LCT αλλά και φορτίων, όλα εκ των οποίων συνοδεύονταν από συγκεκριμένη αβεβαιότητα και τυχαιότητα, ώστε οι συνθήκες να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικές από άποψη καιρικών συνθηκών αλλά και ανθρώπινου παράγοντα. Τα χρησιμοποιούμενα LCT περιλαμβάνουν τόσο παραγωγή όσο και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να καλυφθεί όλο το μελετώμενο φάσμα. Τα κριτήρια επιλογής LCT ήταν η ευκολία εγκατάστασης για τον καταναλωτή, τα υπέρ και τα κατά κάθε τεχνολογίας, καθώς και μελέτες για την πιθανή μελλοντική κατάσταση των δικτύων. Τα υπό μελέτη δίκτυα περιλαμβάνουν αρκετούς κόμβους και αρκετά χιλιόμετρα γραμμών διανομής, επομένως ως κριτήριο μεγέθους χρησιμοποιείται μόνο ο αριθμός των φορτίων. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα μεγέθη δικτύου: μικρό (23 φορτία), μεσαίο (55 φορτία), μεγάλο (112 φορτία), και αρκετά μεγάλο (175 φορτία), από προϋπάρχουσα τράπεζα πραγματικών τοπολογιών δικτύων του Ηνωμένου Βασιλείου. Τα επίπεδα διείσδυσης των LCT ξεκινούν από 0% και φτάνουν μέχρι και το 100%. Τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται και συγκρίνονται ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα, επίπεδο διείσδυσης, δυναμικός έλεγχος κατανάλωσης, πιθανοτική ροή ισχύος, μέθοδος Monte Carlo, εξυπηρέτηση καταναλωτή

ABSTRACT

The scope of this Diploma Thesis is to study the impact on low voltage distribution networks of Low-Carbon Technologies (LCT), i.e., renewable energy sources or electrical energy consumption appliances, whose operation is not accompanied by high levels of carbon emissions. Specifically, the study focuses mainly on matters of service reliability (compliance with voltage limits) and thermal endurance of the various grid parts. Any problems that arise are addressed without direct influence from the operator or via modern devices (power electronics), but with internal processes such as dynamic demand management, in an attempt to move from the "smart grid", to the grid that "anticipates" potential problems making it cheaper and generally more efficient. In short, what is desired is not on-the-spot management of arising problems, but their total prevention altogether.

In this work, multiple simulation algorithms were developed in a combined MATLAB and OpenDSS programming environment to achieve the objectives of the Thesis. It should be stressed that what matters is the study and proper operation of existing grids rather than the optimal development and optimal installation and operation of LCT. Relationships between LCT penetration level and grid operation are explored, focusing in particular on the voltage, current and power, the main aspects compiling the problem. For the grid operation study, the method of probabilistic power flow is employed, which is solved by the Monte Carlo method. For any problematic situations that arise, additional measures are implemented, specifically dynamic demand management, which is achieved through several approaches. The purpose of these additional measures is to normalize energy consumption in order to reduce LCT impact as much as possible. Having redefined the new consumption, grid operation is once again defined through the probabilistic power flow method.

For the evaluation of the methods of the Thesis, a wide range of LCT and consumer loads was used, all of which were accompanied by a certain uncertainty and randomness, in order the conditions to be as realistic as possible in terms of weather conditions and human factor. The LCT used include both electricity production and consumption so as to cover the full range of the study. The LCT selection criteria were ease of installation for the consumer, pros and cons of each technology, and studies on the possible future state of distribution networks. The studied networks are plentiful in both buses and kilometers of distribution lines, hence as size criterion only the number of loads was used. Four grid sizes were used: small (23 loads), medium (55 loads), large (112 loads), and quite big (175 loads) from an existing database of actual UK distribution network topologies. The LCT penetration levels range from 0% to 100%. The final results are presented and compared and useful conclusions are drawn.

KEYWORDS

LCT and penetration level, dynamic demand management, probabilistic power flow, Monte Carlo method, customer service

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2016-2017 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιάκη, επίκουρου καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το θέμα αυτό, αλλά και για την όλη υποστήριξή του κατά τη φοίτησή μου, καθώς και κατά τις αιτήσεις μου για μεταπτυχιακές σπουδές. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα, Βασίλη Ευαγγελόπουλο, ο οποίος με καθοδήγησε όσο καλύτερα μπορούσε στα πρώτα μου βήματα, και χωρίς τον οποίο η εργασία αυτή δεν θα μπορούσε ποτέ να έχει ξεκινήσει ή να έχει ολοκληρωθεί. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την ευρύτερη οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αμέριστη και άνευ όρων συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια, ειδικά τους Στήβεν και Χριστίνα, που δεν ξέρω πως θα αντέξουν πλέον μόνοι τους. Ακόμη, την αγάπη μου στο Roger, ο οποίος μακάρι να καταλάβαινε πόσο συνέβαλλε στην ψυχική μου ισορροπία όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ και όλη μου την αγάπη στον Αλέξανδρο, στον οποίο αφιερώνω την εργασία αυτή, μαζί με τη φράση του Bertrand Russell: "The fundamental cause of trouble is that in the modern world the stupid are cocksure while the intelligent are full of doubt." Μακάρι να μπορούσα να προσφέρω παραπάνω...

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.1 Εισαγωγή	15
1.2 Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	15
1.3 Τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα (LCT)	16
1.4 Επίδραση των LCT στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ)	17
1.5 Αντικείμενο και δομή της εργασίας	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΙΣΧΥΟΣ	19
2.1 Εισαγωγή	19
2.2 Διατύπωση του προβλήματος της ροής ισχύος	19
2.2.1 Μαθηματικό υπόβαθρο και συνθήκες του προβλήματος	22
2.2.2 Μέθοδοι επίλυσης	26
2.3 Αβεβαιότητες στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	26
2.3.1 Εισαγωγή	27
2.3.2 Καιρικές συνθήκες	27
2.3.3 Συμπεριφορά καταναλωτών	28
2.3.4 Ανάπτυξη του δικτύου	28
2.3.5 Αναπάντεχες καταστάσεις	29
2.4 Η πιθανοτική ροή ισχύος	29
2.4.1 Περιγραφή της μεθόδου	30
2.4.2 Ιστορική αναδρομή	31
2.5 Επίλυση της πιθανοτικής ροής ισχύος	31
2.5.1 Η μέθοδος Monte Carlo	31
2.5.2 Άλλες μέθοδοι	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ	35
3.1 Εισαγωγή	35
3.2 Το πρόβλημα "παραγωγή εναντίον κατανάλωσης"	36
3.3 Τρόποι ελέγχου της κατανάλωσης	37
3.4 Εφαρμογή της μεθόδου στις μελέτες δικτύων	39
3.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	40
3.5.1 Για τους παραγωγούς/προμηθευτές	40
3.5.2 Για τους καταναλωτές	41
3.5.3 Για το δίκτυο	41

3.5.4	Για το περιβάλλον	42
3.6	Σημερινή κατάσταση	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ		45
4.1	Εισαγωγή	45
4.2	Δίκτυα	45
4.2.1	Υποσταθμός	46
4.2.2	Γραμμές και ζυγοί/κόμβοι	46
4.2.3	Μετρητές	46
4.3	Οικιακά φορτία	46
4.4	Φωτοβολταϊκά	47
4.5	Ανεμογεννήτριες	49
4.6	Ηλεκτρικές αντλίες θερμότητας	52
4.7	Συσσωρευτές	52
4.8	Ηλεκτρικά οχήματα	55
4.9	Πιθανοτική συμπεριφορά των στοιχείων	57
4.10	Δεκτικότητα καταναλωτών	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ		61
5.1	Εισαγωγή	61
5.2	Το περιβάλλον της MATLAB	61
5.3	Το περιβάλλον του OpenDSS	62
5.4	Η αμοιβαία συνεργασία MATLAB και OpenDSS	65
5.5	Ο αλγόριθμος της προσομοίωσης	67
5.5.1	Υπολογισμοί ροής ισχύος	68
5.5.2	Υπολογισμοί για έλεγχο κατανάλωσης	69
5.6	Η τεχνική διαδικασία της προσομοίωσης	70
5.6.1	Εισαγωγή δεδομένων	70
5.6.2	Προσομοίωση και εξαγωγή αποτελεσμάτων	70
5.6.3	Σύνοψη και επεξεργασία αποτελεσμάτων	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ		73
6.1	Εισαγωγή	73
6.1.1	Βασικά στοιχεία	73
6.1.2	Δείκτες προσομοίωσης	73
6.2	Δεδομένα δικτύων	75
6.2.1	Δεδομένα δικτύου N2F5 με 23 φορτία	75
6.2.2	Δεδομένα δικτύου N1F1 με 55 φορτία	76

6.2.3	Δεδομένα δικτύου N2F3 με 112 φορτία	77
6.2.4	Δεδομένα δικτύου N2F1 με 175 φορτία	79
6.3	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα χωρίς έλεγχο κατανάλωσης	81
6.3.1	Ανεμογεννήτριες	81
6.3.2	Φωτοβολταϊκά	81
6.3.3	Ηλεκτρικές αντλίες θερμότητας	83
6.3.4	Δείκτες LLHF και LLT	85
6.4	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα με έλεγχο κατανάλωσης	87
6.4.1	Ανεμογεννήτριες	87
6.4.2	Φωτοβολταϊκά στο δίκτυο N2F3	87
6.4.3	Ηλεκτρικές αντλίες θερμότητας στο δίκτυο N2F3	89
6.4.4	Φωτοβολταϊκά στο δίκτυο N2F1	91
6.4.5	Ηλεκτρικές αντλίες θερμότητας στο δίκτυο N2F1	92
6.4.6	Δείκτης LLHF	94
6.4.7	Δείκτης LLT	96
6.5	Αποτελέσματα στο δίκτυο N2F5 των 23 φορτίων χωρίς έλεγχο κατανάλωσης	97
6.5.1	Ανεμογεννήτριες	97
6.5.2	Φωτοβολταϊκά	98
6.5.3	Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας	98
6.5.4	Συμπεράσματα	98
6.6	Αποτελέσματα στο δίκτυο N1F1 των 55 φορτίων χωρίς έλεγχο κατανάλωσης	98
6.6.1	Ανεμογεννήτριες	99
6.6.2	Φωτοβολταϊκά	99
6.6.3	Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας	99
6.6.4	Συμπεράσματα	99
6.7	Αποτελέσματα στο δίκτυο N2F3 των 112 φορτίων χωρίς έλεγχο κατανάλωσης	100
6.7.1	Ανεμογεννήτριες	100
6.7.2	Φωτοβολταϊκά	100
6.7.3	Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας	100
6.7.4	Συμπεράσματα	101
6.8	Αποτελέσματα στο δίκτυο N2F3 των 112 φορτίων με έλεγχο κατανάλωσης	101
6.8.1	Φωτοβολταϊκά	101
6.8.1.1	Strategic Load Growth	101
6.8.1.2	Valley Filling	101
6.8.1.3	Flexible Load	102
6.8.2	Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας	102
6.8.2.1	Load Shifting	102

6.8.2.2	Strategic Conservation	102
6.8.2.3	Flexible Load	102
6.8.3	Συγκρίσεις και συμπεράσματα	103
6.9	Αποτελέσματα στο δίκτυο N2F1 των 175 φορτίων χωρίς έλεγχο κατανάλωσης	103
6.9.1	Ανεμογεννήτριες	103
6.9.2	Φωτοβολταϊκά	104
6.9.3	Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας	104
6.9.4	Συμπεράσματα	104
6.10	Αποτελέσματα στο δίκτυο N2F1 των 175 φορτίων με έλεγχο κατανάλωσης	105
6.10.1	Φωτοβολταϊκά	105
6.10.1.1	Strategic Load Growth	105
6.10.1.2	Valley Filling	105
6.10.1.3	Flexible Load	106
6.10.2	Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας	106
6.10.2.1	Load Shifting	106
6.10.2.2	Strategic Conservation	106
6.10.2.3	Flexible Load	106
6.10.3	Συγκρίσεις και συμπεράσματα	106
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		109
7.1	Αντικείμενο της εργασίας	109
7.2	Αποτελέσματα χωρίς έλεγχο κατανάλωσης	109
7.3	Αποτελέσματα με έλεγχο κατανάλωσης	110
7.3.1	Φωτοβολταϊκά	110
7.3.2	Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας	110
7.4	Πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις	111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		112
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α		117
A.1	Συντομεύσεις-Ακρωνύμια	117
A.2	Αντιστοίχιση ελληνικών-αγγλικών όρων	118

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) καλείται το σύνολο εγκαταστάσεων (σταθμοί, υποσταθμοί, ρυθμιστικές μονάδες κ.α.) και μέσων (ζυγοί, γραμμές μεταφοράς, μετασχηματιστές κ.α.) που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε καταναλωτές. Η καλή λειτουργία των ΣΗΕ απαιτείται τόσο από τους καταναλωτές, όσο από τους παραγωγούς. Οι καταναλωτές απαιτούν την εξασφάλιση σταθερής τάσης και συχνότητας με υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης. Οι παραγωγοί απαιτούν ικανοποίηση της ζήτησης και ελαχιστοποίηση του κόστους. Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω απαιτήσεων συνθέτουν τη βέλτιστη λειτουργία του ΣΗΕ.

Κάθε ΣΗΕ αποτελείται από τρία βασικά υποσυστήματα : παραγωγή, μεταφορά, διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια καλείται να διανύσει μια τεράστια διαδρομή μεταξύ σημείου παραγωγής και σημείου κατανάλωσης, το οποίο παρουσιάζει αρκετά προβλήματα. Επειδή η αποθήκευσή της σε μεγάλες ποσότητες είναι πάρα πολύ ακριβή, άρα δύσκολη για τον παραγωγό, πρέπει να παράγεται ταυτόχρονα με την απαίτησή της, προς ελαχιστοποίηση της σπατάλης [1].

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται υπό τεράστιες τάσεις σε μεγάλους σταθμούς παραγωγής. Τα κυριότερα καύσιμα που χρησιμοποιούνται είναι το πετρέλαιο ή ο λιγνίτης (θερμικοί σταθμοί) και το νερό (υδροηλεκτρικοί σταθμοί). Τα τελευταία χρόνια γίνεται έντονη προσπάθεια για την ένταξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), εκμεταλλευόμενες πάντα διαθέσιμα και φιλικά προς το περιβάλλον υλικά, όπως ο αέρας, ο ήλιος κ.α.

Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται μέσω γραμμών υψηλής και υπερυψηλής τάσης (ΥΤ, ΥΥΤ), από τα εργοστάσια παραγωγής μέχρι τους υποσταθμούς (κομβικά σημεία του δικτύου), από τους οποίους ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης (ΜΤ), τα οποία διανέμουν την ενέργεια στους καταναλωτές μέσω υποσταθμών διανομής και γραμμών χαμηλής τάσης (ΧΤ).

Η διαμόρφωση των ΣΗΕ καθορίζεται ουσιαστικά τόσο από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και από την χωροταξική κατανομή της, σε επίπεδα που κυμαίνονται από μερικές ώρες, μέχρι αρκετά χρόνια. Η ανάπτυξή τους γίνεται βάσει προβλέψεων για τη μελλοντική ζήτηση των εξυπηρετούμενων περιοχών. Τα υπάρχοντα ΣΗΕ είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος συχνότητας 50 Hz για την Ευρώπη και 60 Hz για την Αμερική. Οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής ΜΤ έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής ΧΤ έχουν και ουδέτερο αγωγό.

1.2 ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΔΗΕ) είναι το τελευταίο κομμάτι κάθε ΣΗΕ και σκοπός του είναι η εξυπηρέτηση των ηλεκτρικών φορτίων (καταναλωτών) στο τέλος των εκατοντάδων τελικών απολήξεών του. Τα φορτία αυτά είναι τα περισσότερα οικιακά/εμπορικά (ΧΤ), μερικά βιομηχανικά (ΜΤ) και ελάχιστα ειδικών εφαρμογών (ΥΤ, ΥΥΤ), αν και τα τελευταία τροφοδοτούνται κατά βάση απευθείας από την παραγωγή ή/και τη μεταφορά. Τα δίκτυα των προμηθευτών ηλεκτρικής ενέργειας φθάνουν κατά γενικό κανόνα

μέχρι το όριο της ιδιοκτησίας των καταναλωτών τους, όπου και εγκαθίστανται οι διατάξεις μετρήσεως της παρεχόμενης ενέργειας. Από το σημείο αυτό, για την τροφοδότηση των συσκευών καταναλώσεως υπάρχει ένα εσωτερικό δίκτυο διανομής, του οποίου προφανώς η έκταση και σύνθεση εξαρτάται από την έκταση και το είδος της εγκατάστασης του καταναλωτή [2].

Η ιδιαιτερότητα ενός ΔΔΗΕ είναι η μεταβλητότητα. Τα φορτία του (μεμονωμένα ή ομαδικά) μεταβάλλονται συνέχεια λόγω παραγόντων χρονικών (ώρα, εποχή), χωρικών (τοποθεσία), αλλά και αστάθμητων (βλάβες παντός φύσεως). Επιπλέον, η τιμή και η συμπεριφορά ενός φορτίου εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το είδος του. Στην εξίσωση υπεισέρχεται φυσικά και ο ανθρώπινος παράγοντας, όχι μόνο ως μια νέα μεταβλητή, αλλά και ως βασικός ρυθμιστής των προαναφερθέντων παραγόντων.

1.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΧΑΜΗΛΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ (LCT)

Τη σημερινή εποχή, η ηλεκτροπαραγωγή γίνεται με διάφορους τρόπους. Ο πιο διαδεδομένος, κυρίως λόγω του χαμηλού του κόστους, είναι η χρήση ορυκτών καυσίμων. Σύμφωνα με στοιχεία του έτους 2014, στην κορυφή της σχετικής λίστας βρίσκεται ο λιγνίτης και τα διάφορα παράγωγά του (39% της ηλεκτροπαραγωγής), με το φυσικό αέριο να ακολουθεί σε αρκετά μικρότερο ποσοστό (22%) [3]. Εν ολίγοις, τα συμβατικά αυτά καύσιμα είναι υπεύθυνα για την κάλυψη άνω του 50% της συνολικής ενέργειας του πλανήτη, που ξεπερνά τις 22 PWh. Τα βασικά μειονεκτήματα των μεθόδων αυτών είναι η γενικώς χαμηλή τους απόδοση, που απαιτεί την εξόρυξη υπερόγκων ποσών, και τα υψηλά ποσοστά εκπομπών βλαβερών αερίων (διοξείδιο του άνθρακα-CO₂, χλωροφθοράνθρακες-CFCs). Όχι μόνο προκαλούν άμεσες βλάβες στο περιβάλλον (υπερθέρμανση του πλανήτη, τοξικά για τον άνθρωπο αέρια), αλλά και μελλοντικές μακροπρόθεσμες ζημιές (αδυναμία ανανέωσης φυσικών πόρων, οικονομικές ζημιές στον τομέα της συμβατικής ενέργειας). Στην προσπάθεια να αντιμετωπισθούν τα φαινόμενα αυτά, αποφασίστηκε η χρήση των λεγόμενων τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα (Low Carbon Technologies-LCT).

Ο αναγνώστης ίσως να είναι πιο εξοικειωμένος με τον όρο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.), οι οποίες και μεν ανήκουν στο φάσμα των LCT, δεν το συνθέτουν όμως εξ ολοκλήρου. Γενικά, με τον όρο LCT εννοείται μια τεχνολογία η οποία παράγει ενέργεια με ελάχιστες ή και καθόλου (προς το παρόν μη εφικτό) άμεσες εκπομπές άνθρακα οποιασδήποτε μορφής [4]. Οι Α.Π.Ε. ικανοποιούν φυσικά τον παραπάνω ορισμό, έχοντας και το επιπλέον προνόμιο της λειτουργίας με ανανεώσιμο “καύσιμο”. Αυτό που ενδιαφέρει είναι η επίτευξη συγκεκριμένου επιπέδου εκπομπών, ανεξάρτητα από τα αν το καύσιμο είναι φυσικό ή όχι. Προς αποφυγή παρανοήσεων, να σημειωθεί πως οποιαδήποτε τεχνολογία δύναται να παραγάγει οποιαδήποτε μορφή ενέργειας (πχ. θερμική) συνοδευόμενη από χαμηλές εκπομπές άνθρακα, ακόμη και αν αυτή καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια, μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως LCT, όπως για παράδειγμα οι ηλεκτρικές αντλίες θερμότητας (EHP), οι οποίες συναντώνται πλέον σε εκατομμύρια σπίτια. Βέβαια, επειδή ως επί το πλείστον τα LCT στοχεύουν στην ηλεκτρική υποβοήθηση των καταναλωτών, συνήθως αυτά αντιπροσωπεύονται από τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα πιο διαδεδομένα LCT, τα οποία είναι οι Α.Π.Ε., είναι οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΥΗΣ), οι ανεμογεννήτριες (WG) και τα φωτοβολταϊκά (PV). Χρησιμοποιούνται ευρέως στα ΣΗΕ, όντας φθηνά, αξιόπιστα και έχοντας το καθένα μια ανεξάντλητη πηγή “καυσίμου”. Ακολουθούν οι πηγές γεωθερμικής ενέργειας (GTE) και οι πηγές ενέργειας θαλάσσιων κυμάτων (SCE), οι οποίες αν και λιγότερο διαδεδομένες στη χρήση τους, προβλέπονται ως το επόμενο μεγάλο βήμα στον τομέα της ανανεώσιμης ενέργειας [5]. Να σημειωθεί εδώ πως μολονότι όλες ανεξαιρέτως οι ΑΠΕ προκαλούν παραδόξως τοπικά περιβαλλοντικά προβλήματα (πχ. θέρμανση σε περιοχές με WG λόγω “χειραγώγισης” του αέρα), τα προβλήματα αυτά είναι ελάχιστα, μηδαμινής κλίμακας, αλλά και τοπικά περιορισμένα, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζουν πρακτικά.

Καθαρὰ LCT αποτελούν οι εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας (NE), οι συνδυαστικές μονάδες ενέργειας/θερμότητας (CHP), είτε εργοστασιακές, είτε οικιακές (μCHP), τα ηλεκτρικά οχήματα (EV), οι αποθηκευτές ηλεκτρικής ενέργειας και CO₂ (ESD). Η πυρηνική ενέργεια, αν και αρκετά διαδεδομένη και περιβαλλοντικά φιλική, συνοδεύεται από τεράστια κόστη κατασκευής και συντήρησης και από κινδύνους σε περίπτωση ατυχημάτων ή διαρροών. Επιπλέον, η χρήση της συναντάται στη μαζική παραγωγή και όχι στην υποστήριξη όπως τα υπόλοιπα LCT.

Το βασικό ερώτημα είναι το κατά πόσο μπορεί προσωπικά ο καταναλωτής να υιοθετήσει μια οικολογική στάση, χωρίς όμως να προκαλεί προβλήματα στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο. Για το λόγο αυτό, στην εργασία αυτή, έμφαση δίνεται σε LCT τα οποία μπορούν να υπάρχουν σε μια κατοικία, όπως πχ. μερικά τετραγωνικά φωτοβολταϊκά ή μια μικρή ανεμογεννήτρια. Μεγάλες εγκαταστάσεις τέτοιων τεχνολογιών (αιολικά, φωτοβολταϊκά πάρκα) ξεφεύγουν από το πλαίσιο των εξατομικευμένων τεχνολογιών χαμηλής εκπομπής άνθρακα.

1.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ LCT ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΣΗΕ)

Ο κύριος λόγος χρησιμοποίησης των LCT είναι η μείωση των εκπομπών άνθρακα, κάτι το οποίο έχει πλέον θεσμοθετηθεί από τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, αλλά και την Ευρωπαϊκή Ένωση [6]. Πέραν όμως της περιβαλλοντικής σκοπιάς, αλλά και των οικονομικών κινήτρων για προμηθευτές και καταναλωτές, η υιοθέτηση των LCT βελτιώνει σημαντικά τη λειτουργία των ΣΗΕ. Καθώς η εγκατάστασή τους γίνεται κοντά στα φορτία, αυξάνονται οι ποιότητα ισχύος και αξιοπιστία παροχής, ενώ μειώνονται οι απώλειες και το ρίσκο υπερφόρτισης λόγω ροής φορτίου από υψηλές τάσεις. Επιπλέον, σε αντίθεση με τις συμβατικές πηγές, τα LCT βελτιώνουν την τοπική ευστάθεια του δικτύου, ενώ πιθανές βλάβες τους περιορίζονται τοπικά. Μπορεί εδώ ο αναγνώστης να αναρωτηθεί για ποιο λόγο η χρήση τους δεν είναι πιο εκτεταμένη. Πέραν των οικονομικών συμφερόντων μεγάλων πετρελαϊκών εταιριών, αλλά και του γενικά υψηλού κόστους εγκατάστασης τους, υπάρχουν και εγγενή προβλήματα λειτουργίας που δημιουργούνται με την διείσδυση των LCT στα ΣΗΕ, τα σημαντικότερα από τα οποία θα μελετηθούν στην παρούσα εργασία.

Η ικανότητα παραγωγής (ή κατανάλωσης) των LCT εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από τις περιβαλλοντικές και καιρικές συνθήκες των εκάστοτε περιοχών εγκατάστασης. Ο παράγοντας αβεβαιότητας είναι σημαντικός, ειδικά σε μικρά χρονικά διαστήματα, όπου η πρόβλεψη του καιρού (ώρα και της παραγόμενης ισχύος) είναι δύσκολη. Ως εκ τούτου, δεδομένου ότι πρέπει να υπάρχει πάντα κάποια σταθερότητα στην παραγωγή, υπάρχει ένα ανώτατο όριο κάλυψης ζήτησης από LCT. Ένα άλλο πρόβλημα είναι η ένταξή τους στα ΣΗΕ. Τα LCT (προς το παρόν) εισάγονται στα υπάρχοντα δίκτυα, των οποίων ο σχεδιασμός είχε γίνει μη λαμβάνοντας υπόψιν μελλοντικές προσθήκες διανεμημένων πηγών. Η ένταξή τους δημιουργεί μη συμβατικές καταστάσεις λειτουργίας, ενώ σε περίπτωση ιδιαίτερα αυξημένης διείσδυσης δημιουργούνται θέματα ποιότητας ισχύος, αξιοπιστίας, προστασίας εξοπλισμού και χρόνου αποκατάστασης σε περίπτωση βλάβης. Ακόμη, τα θέματα αυτά εξαρτώνται αποκλειστικά από τοπικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες, είναι δηλαδή πολλών διαφορετικών ειδών.

Εκτός των τοπικών προβλημάτων, η αυξημένη διείσδυση των LCT μπορεί επιπλέον να δημιουργήσει θέματα στη συνολικά λειτουργία του δικτύου. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αδυναμία αποτελεσματικής αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες. Η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να καταναλωθεί (σε φορτίο ή να γειωθεί) άμεσα, καθώς η ανεξέλεγκτη παρουσία της στο δίκτυο δημιουργεί σωρεία προβλημάτων. Τα σημαντικότερα από αυτά αποτελούν η υπερφόρτιση γραμμών και μετασχηματιστών (Μ/Σ) σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, οι υπερτάσεις (και σπανιότερα οι υποτάσεις) σε περιπτώσεις υπερπαραγωγής ενέργειας, η ανάστροφη ροή ισχύος από χαμηλά προς υψηλά επίπεδα τάσεις που εισάγει θέματα προστασίας, και η επιπλέον συνεισφορά σε μεταβατικές καταστάσεις (βραχυκυκλώματα/ανοικτοκυκλώματα), τόσο ως ενίσχυση των φαινομένων αυτών, όσο και ως επηρεασμός υγιών γραμμών.

1.5 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η σταδιακή ένταξη των LCT στα ΣΗΕ είναι πλέον μία πραγματικότητα και μάλιστα έχει θεσμοθετηθεί και επίσημα από σειρά σχετικών τοπικών, ευρωπαϊκών και παγκόσμιων διατάξεων (πχ Συνάντηση του Παρισίου του 2016). Η παρουσία τους επιτρέπει όλο και μεγαλύτερη αυτόνομη και αυτονομία από τον καταναλωτή, ενώ αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα όπλα στον αγώνα για την προστασία του περιβάλλοντος και την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. Παρά ταύτα, καθίσταται σαφές ότι η ανεξέλεγκτη χρήση τους δεν είναι προς το παρόν εφικτή, ενώ προκειμένου να αντιμετωπισθεί αυτό, απαιτούνται ενέργειες σημαντικού κόστους, οικονομικού και μη. Το κρίσιμο ζήτημα, υπό την παρούσα τεχνολογία που διαθέτουμε, είναι να βρεθεί η ιδανική ισορροπία μεταξύ της χρήσης LCT και απαραίτητων μέτρων που να επιτρέπουν τη χρήση αυτή αποδοτικά, με απώτερο σκοπό την γενική αρμονική λειτουργία του δικτύου.

Η εργασία αυτή θα επιχειρήσει να αναδείξει τα βασικότερα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν από τη χρήση των LCT, χρησιμοποιώντας κυρίως τα πιο διαδεδομένα LCT, προκειμένου να είναι ουσιαστικής αξίας. Θα γίνει επιπλέον μια προσπάθεια αντιμετώπισης των προβλημάτων αυτών, με μια από τις πιο μοντέρνες μεθόδους που είναι διαθέσιμες, η οποία μάλιστα δύναται να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε ΣΗΕ, το δυναμικό έλεγχο κατανάλωσης. Τελικός στόχος της εργασίας, είναι να μπορέσει ενδεχομένως να παραγάγει μια ικανοποιητική μελέτη ισορροπίας μεταξύ χρήσης LCT και εξωτερικής υποχρεωτικής επέμβασης.

Η εργασία χωρίζεται σε 9 κεφάλαια. Το 1^ο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή και παρουσιάζει μια συνοπτική περιγραφή των ζητημάτων που πραγματεύεται η παρούσα μελέτη. Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η έννοια της ροής ισχύος, το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης. Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μέθοδος του δυναμικού ελέγχου κατανάλωσης, το βασικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την αντιμετώπιση της επίδρασης των LCT στα δίκτυα διανομής. Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι συνθήκες και τα δεδομένα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν. Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα προγραμματιστικά εργαλεία των προσομοιώσεων και τα χαρακτηριστικά τους. Στο 6^ο κεφάλαιο, το σημαντικότερο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, τόσο για κάθε δίκτυο, όσο και συνολικά. Στο 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύνοψη των συμπερασμάτων και προτείνονται πιθανές επεκτάσεις της εργασίας. Στο 8^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε. Το 9^ο κεφάλαιο αποτελεί το παράρτημα, στο οποίο παρουσιάζονται τα διάφορα ακρωνύμια που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή. Όσον αφορά το θεωρητικό κομμάτι, περιλαμβάνονται αναλυτικότερα τα απαραίτητα που σχετίζονται με τη μελέτη, ενώ όσον αφορά το πρακτικό κομμάτι, έγινε προσπάθεια για τη μέγιστη δυνατή εξαγωγή και παρουσίαση των πληροφοριών.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάλυση των ροών ισχύος είναι η πιο διαδομένη μέθοδος ανάλυσης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ). Στην πράξη, πραγματοποιείται συνήθως σε ΣΗΕ απλοποιημένης μορφής, δηλαδή σε αυτά που παρουσιάζουν τριφασική συμμετρία, ή αναπαρίστανται από μονογραμμικά διαγράμματα στο ανά μονάδα (α.μ.) σύστημα. Η ανάλυση γίνεται σε καταστάσεις κανονικής (σταθερής) λειτουργίας. Ζητούμενο της ανάλυσης ροών ισχύος είναι ο υπολογισμός των μιγαδικών τάσεων, δηλαδή των μέτρων των τάσεων και των γωνιών των τάσεων, σε όλους τους ζυγούς του ΣΗΕ. Η επίλυση του προβλήματος των ροών ισχύος ισοδυναμεί με την επίλυση ενός μη γραμμικού συστήματος εξισώσεων, το οποίο επιλύεται με τη βοήθεια αριθμητικών μεθόδων. Λόγω του μεγέθους των ΣΗΕ, η επίλυση του προβλήματος των ροών ισχύος γίνεται με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών και κατάλληλων προγραμμάτων.

2.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

2.2.1 Μαθηματικό Υπόβαθρο και Συνθήκες του Προβλήματος

Γενικά, η λειτουργία ενός ΣΗΕ είναι πλήρως γνωστή όταν είναι γνωστή σε κάθε ζυγό η μιγαδική του τάση. Συνεπώς, στόχος του προβλήματος της ανάλυσης ροών ισχύος είναι να προσδιοριστούν οι μιγαδικές τάσεις σε όλους τους ζυγούς του ΣΗΕ.

Στα ΣΗΕ, ο κάθε ζυγός φέρει χαρακτηρισμό ανάλογα των χαρακτηριστικών του. Συγκεκριμένα, ορίζονται τρία είδη ζυγών, απαραίτητα για την επίλυση του προβλήματος των ροών ισχύος [7]:

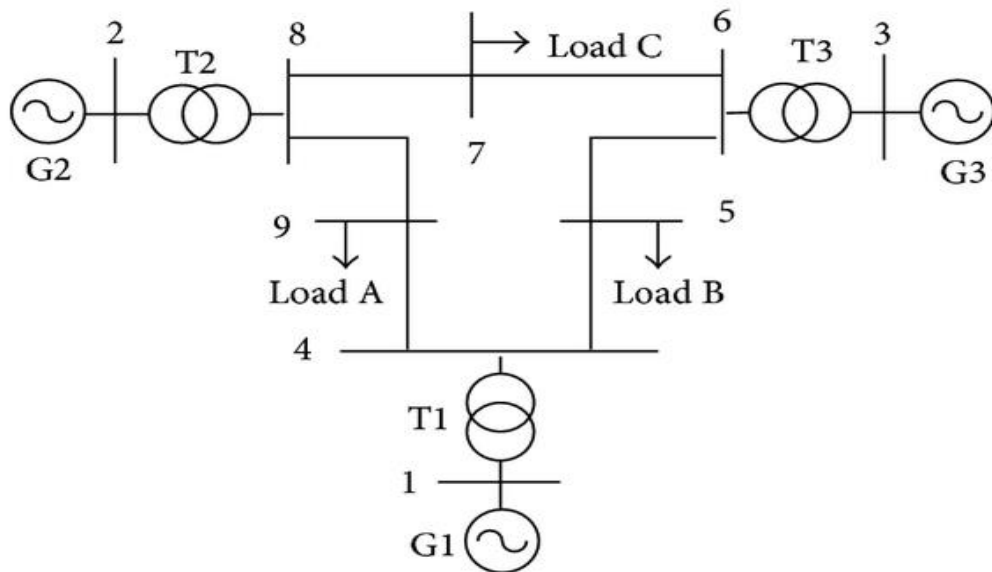
- Ζυγός ταλάντωσης ή slack bus: Πρόκειται ουσιαστικά για τον ζυγό ελέγχου του συστήματος, που χρησιμοποιείται ως αναφορά. Ως ζυγός ταλάντωσης ορίζεται ο ζυγός του οποίου είναι γνωστό το μέτρο και η γωνία της τάσης. Ο ζυγός ταλάντωσης χρησιμοποιείται για την εξισορρόπηση της ισχύος (P και Q) στις μελέτες ροών ισχύος, παράγοντας ή απορροφώντας ισχύ (P και/ή Q). Υπάρχει πάντα ένας και μοναδικός ζυγός ταλάντωσης.
- Ζυγός παραγωγής ή PV bus: Πρόκειται ουσιαστικά για ζυγό γεννήτριας (αν και δύναται να καταναλώνει και φορτίο) και δουλειά του είναι να παράγει σταθερή ενεργό ισχύ υπό συγκεκριμένη τάση. Ως ζυγός παραγωγής ορίζεται ο ζυγός του οποίου είναι γνωστά το μέτρο της τάσης και η έγχυση ενεργού ισχύος. Δύναται να υπάρχουν άνω του ενός ζυγοί παραγωγής.
- Ζυγός φορτίου ή PQ bus: Πρόκειται ουσιαστικά για ζυγό κατανάλωσης ή διασυνδετικό (αν και δύναται να προμηθεύει ισχύ) και έχει ρόλο συνήθως παθητικό. Ως ζυγός φορτίου ορίζεται ο ζυγός του οποίου είναι γνωστή η έγχυση μιγαδικής ισχύος. Δύναται να υπάρχουν άνω του ενός ζυγοί φορτίου.

Τα παραπάνω συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1. Μετά την εκτέλεση της ροής ισχύος, όλα τα μεγέθη του Πίνακα 2.1 είναι γνωστά για όλους τους ζυγούς.

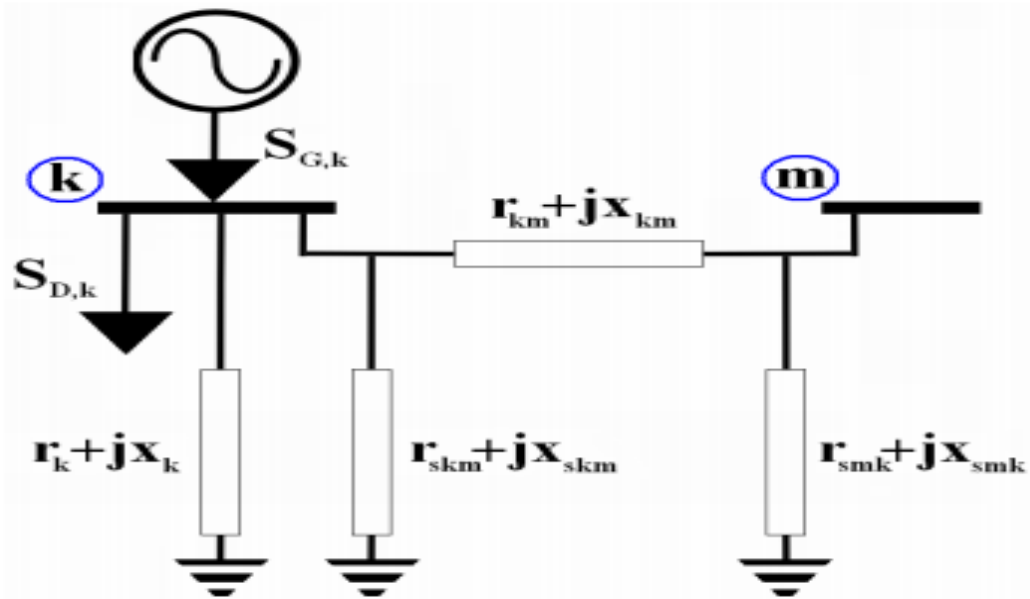
Πίνακας 2.1: Στοιχεία ζυγών (μεταβλητές εισόδου και εξόδου) ενός ΣΗΕ στις μελέτες ροής ισχύος

Είδος ζυγού	Μέτρο Τάσης, V	Γωνία Τάσης, δ	Ενεργός Ισχύς, P	Άεργος Ισχύς, Q
Αναφοράς	Γνωστή	Γνωστή	Άγνωστη	Άγνωστη
Παραγωγής	Γνωστή	Άγνωστη	Γνωστή	Άγνωστη
Φορτίου	Άγνωστη	Άγνωστη	Γνωστή	Γνωστή

Η πραγματική και η άεργος ισχύς δεν είναι εκ των προτέρων γνωστές σε όλους τους ζυγούς του ΣΗΕ. Η "καθαρή" κυκλοφορία μιγαδικής ισχύος στο ΣΗΕ δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, όπως άγνωστες παραμένουν και οι απώλειες του συστήματος μέχρι να ολοκληρωθεί η μελέτη ροών ισχύος. Είναι απαραίτητη η ύπαρξη του ζυγού ταλάντωσης, με τη μιγαδική του ισχύ άπροσδιόριστη, προκειμένου ο ζυγός ταλάντωσης να προμηθεύει την διαφορά μεταξύ της συνολικής καταναλισκόμενης ισχύος των φορτίων και των απωλειών ισχύος και της άπροσδιόριστης ισχύος στους υπόλοιπους ζυγούς, η οποία και υπολογίζεται από τη μελέτη ροών ισχύος. Προκειμένου η συμβολή του ζυγού ταλάντωσης να είναι ένα μικρό ποσοστό της ονομαστικής του ικανότητας (όπως αναμένεται), ως ζυγός ταλάντωσης θεωρείται συνήθως αυτός που είναι συνδεδεμένος στον μεγαλύτερο διαθέσιμο σταθμό παραγωγής.



Σχήμα 2.1: Αναπαράσταση τυπικού ΣΗΕ (10 ζυγοί)



Σχήμα 2.2 : Αναπαράσταση γενικής διάταξης σύνδεσης 2 ζυγών

Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η γενική διάταξη σύνδεσης 2 τυχαίων ζυγών k, m ενός τυχαίου ΣΗΕ, όπως αυτό που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Με $S_{G,k}$ συμβολίζεται η παραγόμενη στο ζυγό k μιγαδική ισχύς, με $S_{D,k}$ η καταναλισκόμενη στον ζυγό k μιγαδική ισχύς, με $r_{km} + jX_{km}$ η μεταξύ των ζυγών k, m μιγαδική αντίσταση, με $r_k + jX_k$ η εγκάρσια μιγαδική αντίσταση του ζυγού k και με $r_{skm} + jX_{skm}, r_{smk} + jX_{smk}$ οι εγκάρσιες αντιδράσεις της γραμμής $k-m$. Η μεθοδολογία αναπτύσσεται για τους δύο αυτούς τυχαίους ζυγούς και επεκτείνεται αναλόγως και στο υπόλοιπο ΣΗΕ. Τα βήματα που ακολουθούνται για την κατασκευή του μαθηματικού πλαισίου και την επίλυσή του είναι τα παρακάτω [8]:

1. Ορίζοντας ως αγωγιμότητα $y = \frac{1}{r + jx} = g + jb$, κατασκευάζεται η μήτρα

αγωγιμοτήτων Y , ως: $Y_Z =$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & \dots & Y_{1k} & Y_{1m} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & \dots & Y_{2k} & Y_{2m} & \dots & Y_{2n} \\ \cdot & & \cdot & & & & & \cdot \\ \cdot & & & & & & & \cdot \\ Y_{k1} & Y_{k2} & \dots & \dots & Y_{kk} & Y_{km} & \dots & Y_{kn} \\ \cdot & & & & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & & & & & \cdot & \cdot \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & \dots & Y_{nk} & Y_{nm} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

όπου:

$$Y_{km} = -y_{km} = -g_{km} - jb_{km}$$

$$Y_{kk} = y_k + \sum_{m \neq k} (y_{skm} + y_{km})$$

2. Κατασκευάζονται οι εξισώσεις ροής ισχύος στο ζυγό k , ως:

$$P_k = P_{G,k} - P_{D,k} = V_k^2 \left[g_k + \sum_{m \neq k} (g_{skm} + g_{km}) \right] - V_k \sum_{m \neq k} V_m \left[g_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) + b_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) \right] \quad (2.1)$$

$$Q_k = Q_{G,k} - Q_{D,k} = -V_k^2 \left[b_k + \sum_{m \neq k} (b_{skm} + b_{km}) \right] - V_k \sum_{m \neq k} V_m \left[g_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) - b_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) \right] \quad (2.2)$$

3. Κατασκευάζονται οι επαναληπτικές εξισώσεις ροής φορτίου στο ζυγό k , ως:

Ζυγοί PV, PQ:

$$\Delta P_k^{(n)} = P_k - (V_k^{(n)})^2 \left[g_k + \sum_{m \neq k} (g_{skm} + g_{km}) \right] + V_k^{(n)} \sum_{m \neq k} V_m^{(n)} \left[g_{km} \cos(\delta_k^{(n)} - \delta_m^{(n)}) + b_{km} \sin(\delta_k^{(n)} - \delta_m^{(n)}) \right] \quad (2.3)$$

Ζυγοί PQ:

$$\Delta Q_k^{(n)} = Q_k - (V_k^{(n)})^2 \left[b_k + \sum_{m \neq k} (b_{skm} + b_{km}) \right] + V_k^{(n)} \sum_{m \neq k} V_m^{(n)} \left[g_{km} \sin(\delta_k^{(n)} - \delta_m^{(n)}) - b_{km} \cos(\delta_k^{(n)} - \delta_m^{(n)}) \right] \quad (2.4)$$

4. Επιλέγεται το μαθηματικό μοντέλο με όποια αριθμητική μέθοδο επιθυμεί ο μελετητής, υπολογίζοντας έτσι όλες τις άγνωστες τάσεις και γωνίες, ορίζοντας συνθήκη τερματισμού μέσω των αποδεκτών σφαλμάτων ϵ , ως:

$$\text{Ζυγοί PV: } |\Delta P_k^{(n)}| \leq \epsilon_{pv} \quad \text{και} \quad \text{Ζυγοί PQ: } |\Delta P_k^{(n)}| \leq \epsilon_p, \quad |\Delta Q_k^{(n)}| \leq \epsilon_Q$$

5. Υπολογίζονται οι τιμές ενεργού και αέργου ισχύος για το ζυγό ταλάντωσης, καθώς και αέργου ισχύος των ζυγών παραγωγής μέσω των εξισώσεων (2.1), (2.2), ενώ οι ροές ισχύος μεταξύ ζυγών k, m υπολογίζονται μέσω των εξισώσεων (2.5), (2.6):

$$P_{km} = V_k^2 [g_{skm} + g_{km}] - V_k V_m [g_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) + b_{km} \sin(\delta_k - \delta_m)] \quad (2.5)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 [b_{skm} + b_{km}] - V_k V_m [g_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) - b_{km} \cos(\delta_k - \delta_m)] \quad (2.6)$$

2.2.2 Μέθοδοι Επίλυσης

Υπάρχουν διάφορες αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης της ροής ισχύος. Να σημειωθεί εδώ ότι η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται κάθε φορά από τις ανάγκες του προβλήματος και τις υπολογιστικές δυνατότητες που υπάρχουν. Τα αποτελέσματα που παράγουν παρουσιάζουν ασήμαντα μικρές αποκλίσεις. Οι βασικότερες εκ των μεθόδων είναι οι:

- Μέθοδος Newton-Raphson
- Μέθοδος Gauss-Seidel
- Ταχεία Αποξενωμένη Μέθοδος Newton-Raphson (Fast Decoupled Method)
- Μέθοδος DC ροής ισχύος
- Μέθοδος Ολομορφικής Ενσωμάτωσης (Holomorphic Embedding Method)

Newton-Raphson

Η μέθοδος Newton-Raphson είναι ίσως η διασημότερη εκ των αριθμητικών μεθόδων. Είναι γενικώς αρκετά γρήγορη, παρόλο που εμπλέκει αρκετές εξισώσεις. Μετά τους μαθηματικούς υπολογισμούς, μπορεί να συνοψισθεί στις παρακάτω εξισώσεις [8]:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = -J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

, όπου $\Delta\theta$, ΔV είναι οι άγνωστες μεταβλητές και τα ΔP , ΔQ προκύπτουν ως:

$$\Delta P_i = -P_i + \sum_{k=1}^N |V_i||V_k| (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (2.8)$$

$$\Delta Q_i = -Q_i + \sum_{k=1}^N |V_i||V_k| (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (2.9)$$

ενώ με J συμβολίζεται η μήτρα μερικών παραγώγων (Ιακοβιανή): $J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial \Delta |V|} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial \Delta |V|} \end{bmatrix}$

Το γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων λύνεται για την επόμενη πρόβλεψη ($m+1$) των τάσεων και των γωνιών τάσης βασισμένο στα:

$$\theta^{m+1} = \theta^m + \Delta\theta \text{ (οι γωνίες σε rad)} \quad (2.10)$$

$$|\Delta V|^{m+1} = |\Delta V|^m + \Delta|V| \quad (2.11)$$

Αλγόριθμος

1. Αρχική εκτίμηση άγνωστων μεγεθών (συνήθως μοναδιαίες τάσεις στο α.μ. σύστημα και μηδενικές γωνίες τάσεων).
2. Επίλυση των εξισώσεων (2.8), (2.9).
3. Γραμμικοποίηση συστήματος μέσω της J για τις πιο πρόσφατες τιμές.
4. Επίλυση της εξίσωσης (2.7).
5. ‘‘Ενημέρωση’’ τάσεων και γωνιών, μέσω των (2.10), (2.11).
6. Εάν δεν ικανοποιούνται οι συνθήκες τερματισμού, πήγαινε στο βήμα 2.

Gauss-Seidel

Η μέθοδος Gauss-Seidel είναι η δεύτερη πιο χρησιμοποιούμενη εκ των αριθμητικών μεθόδων. Παρόλο που στοχεύει ευθέως στον υπολογισμό των αγνώστων μεγεθών, είναι σχετικά πιο αργή. Μετά τους μαθηματικούς υπολογισμούς, μπορεί να συνοψισθεί στις παρακάτω εξισώσεις [8]:

Ζυγί παραγωγής:

$$Q_k^{(n)} = -V_k^2 \left[b_k + \sum_{m \neq k} (b_{skm} + b_{km}) \right] - V_k \sum_{m < k} V_m^{(n+1)} \left[g_{km} \sin(\delta_k^{(n)} - \delta_m^{(n+1)}) - b_{km} \cos(\delta_k^{(n)} - \delta_m^{(n+1)}) \right] - V_k \sum_{m > k} V_m^n \left[g_{km} \sin(\delta_k^n - \delta_m^n) - b_{km} \cos(\delta_k^n - \delta_m^n) \right] \quad (2.12)$$

$$\delta_k^{(n+1)} = \text{Arg} \left\{ \frac{1}{\left[g_k + \sum_{m \neq k} (g_{skm} + g_{km}) \right] + j \left[b_k + \sum_{m \neq k} (b_{skm} + b_{km}) \right]} \left[\frac{P_k - jQ_k^{(n)}}{V_k \angle -\delta_k^{(n)}} + \sum_{m < k} (g_{km} + jb_{km}) \tilde{V}_m^{(n+1)} + \sum_{m > k} (g_{km} + jb_{km}) \tilde{V}_m^{(n)} \right] \right\} \quad (2.13)$$

Ζυγί φορτίου:

$$\tilde{V}_k^{(n+1)} = \left\{ \frac{1}{\left[g_k + \sum_{m \neq k} (g_{skm} + g_{km}) \right] + j \left[b_k + \sum_{m \neq k} (b_{skm} + b_{km}) \right]} \left[\frac{P_k - jQ_k}{(\tilde{V}_k^n)^*} + \sum_{m < k} (g_{km} + jb_{km}) \tilde{V}_m^{(n+1)} + \sum_{m > k} (g_{km} + jb_{km}) \tilde{V}_m^n \right] \right\} \quad (2.14)$$

Αλγόριθμος

1. Αρχική εκτίμηση αγνώστων μεγεθών (συνήθως μοναδιαίες τάσεις στο α.μ. σύστημα και μηδενικές γωνίες τάσεων).
2. Επίλυση των εξισώσεων (2.12), (2.13), (2.14) με τη σειρά αυτή, καθώς υπάρχει σειριακή τροφοδότηση (η λύση τους είναι και αυτόματη ενημέρωση των αγνώστων μεγεθών).
3. Εάν δεν ικανοποιούνται οι συνθήκες τερματισμού, πήγαινε στο βήμα 2.

Fast Decoupled

Η μέθοδος Fast Decoupled είναι μια απλοποιημένη εκδοχή της Newton-Raphson. Η αντιστροφή της J γίνεται μία μόνο φορά, ενώ ισχύουν κάποιες επιπλέον παραδοχές (μοναδιαία τάση ζυγών, μηδενική διαφορά φάσεων μεταξύ ζυγών). Η μέθοδος αυτή είναι πολύ γρηγορότερη Newton-Raphson (πρακτικό για εποπτεία σε πραγματικό χρόνο), θυσιάζοντας όμως ακρίβεια από ένα σημείο και μετά. Μετά τους μαθηματικούς υπολογισμούς, μπορεί να συνοψισθεί στις παρακάτω εξισώσεις (βασισμένες σε αυτές της Newton-Raphson) [8]:

$$[\Delta\theta] = [B']^{-1} \left[\frac{\Delta P}{V} \right] \quad (2.15)$$

$$[\Delta V] = [B'']^{-1} \left[\frac{\Delta Q}{V} \right] \quad (2.16)$$

Οι μήτρες B', B'' υπολογίζονται ως:

1. Μηδενισμός πραγματικών μερών μήτρας αγωγιμοτήτων $[Y]$
2. Πολλαπλασιασμός με το -1
3. α. Για τον πίνακα B' διαγράφονται η στήλη και η γραμμή του ζυγού ταλάντωσης
β. Για τον πίνακα B'' διαγράφονται επιπλέον οι στήλες και γραμμές των ζυγών παραγωγής

Αλγόριθμος

1. Αρχική εκτίμηση άγνωστων μεγεθών (συνήθως μοναδιαίες τάσεις στο α.μ. σύστημα και μηδενικές γωνίες τάσεων).
2. Επίλυση των εξισώσεων (2.8), (2.9).
3. Επίλυση των (2.15), (2.16) και "ενημέρωση" τάσεων και γωνιών.
4. Εάν δεν ικανοποιούνται οι συνθήκες τερματισμού, πήγαινε στο βήμα 2.

DC ροή ισχύος

Η μέθοδος της DC ροής ισχύος αποτελεί την πιο απλή διαθέσιμη μέθοδο. Όντας γραμμική είναι εξαιρετικά γρήγορη σε υπολογισμούς και εύκολη στη χρήση της, λόγω όμως αυτού, απαιτεί παραδοχές που δεν ανταποκρίνονται συνήθως στην πραγματικότητα, ενώ τα αποτελέσματά της είναι σε αξιοπρόσεκτο βαθμό ανακριβή. Για τους παραπάνω λόγους χρησιμοποιείται κυρίως σε πάρα πολύ απλά δίκτυα ή για εκπαιδευτικούς λόγους. Μετά τους μαθηματικούς υπολογισμούς, μπορεί να συνοψισθεί στην παρακάτω εξίσωση [9]:

$$P_{ij} = \frac{\delta_i \delta_j}{X_{ij}} \quad (2.17)$$

Η ροή ισχύος μεταξύ ζυγών P_{ij} είναι γνωστή και προκύπτει μόνο από τα φορτία και το είδος των ζυγών, ενώ όλες οι άγνωστες γωνίες $\delta_i, i = 1, 2, \dots, n$ υπολογίζονται από το γραμμικό σύστημα που προκύπτει από το συνδυασμό των εξισώσεων (2.17) (οι γωνίες σε rad).

Αλγόριθμος

1. Εφαρμογή παραδοχών (όλες οι τάσεις μοναδιαίες στο α.μ. σύστημα, μηδενικές ωμικές αντιστάσεις, μικρή διαφορά φάσεων, που να επιτρέπει τις προσεγγίσεις $\sin(a-b) \approx a-b$, $\cos(a-b) \approx 1$).
2. Υπολογισμός των ροών ενεργού ισχύος μεταξύ των ζυγών, βασισμένος μόνο στην εξυπηρέτηση φορτίων.
3. Επίλυση του συστήματος εξισώσεων που προκύπτει από τις (2.16).
4. Τερματισμός (η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για μία μόνο επανάληψη).

Holomorphic Embedding

Η μέθοδος Holomorphic Embedding είναι η πιο μοντέρνα που χρησιμοποιείται και αξιοποιεί προχωρημένες τεχνικές μιγαδικής ανάλυσης και όχι διαδοχικές επαναλήψεις. Βασίζεται στη βέλτιστη επιλογή αρχικών παραμέτρων, δύναται να ξεπεράσει προβλήματα των

συμβατικών μεθόδων (κατάρρευση τάσης, αδυναμία σύγκλισης λύσης) και καθώς εκτελείται μόνο μία φορά, είναι υπολογιστικά απλή. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε και κατοχυρώθηκε από τον Antonio Trias το 2012 [10]. Η μαθηματική διαδικασία εξαγωγής των τελικών εξισώσεων είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και περιγράφεται αναλυτικά στο [11]. Μετά τους μαθηματικούς υπολογισμούς, μπορεί να συνοψισθεί στις παρακάτω εξισώσεις:

$$\sum_k Y_{ik} V_k(s) + Y_i^{sh} V_i(s) = s \frac{S_i^*}{V_i^*(s^*)} \quad (2.18)$$

$$\sum_k Y_{ik} a_k[n] + Y_i^{sh} a_i[n] = S_i^* b_i^*[n-1], n = 0, 1, \dots, \infty \quad (2.19)$$

$$1 = V(s) V^{-1}(s) = \left(\sum_{n=0}^{\infty} a_n s^n \right) \left(\sum_{n=0}^{\infty} b_n s^n \right) \quad (2.20)$$

Με s συμβολίζεται η μιγαδική μεταβλητή της τάσης V , ενώ τα a, b προκύπτουν από την επέκταση όρων της τάσης, ως:

$$V(s) = \sum_{n=0}^{\infty} a[n] s^n \quad (2.21)$$

$$\frac{1}{V(s)} = \sum_{n=0}^{\infty} b[n] s^n \quad (2.22)$$

υπολογιζόμενα από την (2.18). Η (2.19) προκύπτει από την (2.17) και αποτελεί σύστημα γραμμικών εξισώσεων, το οποίο επιλύεται για να δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Αλγόριθμος

1. Συγγραφή αρχικής εξίσωσης τάσης-ισχύος (2.17).
2. Υπολογισμός των επεκτάσεων a, b από την (2.19).
3. Επίλυση του συστήματος εξισώσεων που προκύπτει από τις (2.18).
4. Τερματισμός (η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για μία μόνο επανάληψη).

2.3 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.3.1 Εισαγωγή

Η ροή ισχύος είναι μια μέθοδος στατική, αφορά δηλαδή μόνο τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή για την οποία εκτελείται. Τα φορτία, οι τάσεις, ακόμη και οι αντιστάσεις, δύναται να αλλάζουν κατά τη λειτουργία του ΣΗΕ, το οποίο αντιμετωπίζεται επιλύοντας τη ροή ισχύος εκ νέου με νέα δεδομένα εισόδου, άρα και εξόδου. Αυτό όμως προϋποθέτει πως ο μελετητής γνωρίζει κάθε στιγμή την είσοδο του συστήματος, κάτι το οποίο σπανίως συμβαίνει στην πραγματικότητα.

Υπάρχουν ποικίλοι παράγοντες που εμπεριέχουν μεγάλη δόση τυχαιότητας και αβεβαιότητας και είναι αδύνατον να μοντελοποιηθούν με απόλυτη ακρίβεια. Από τη στιγμή που απαιτείται μια ρεαλιστική ανάλυση της λειτουργίας ενός ΣΗΕ πρέπει αυτή να γίνει σε βάθος χρόνου, γεγονός το οποίο προμηνύει συνεχείς αλλαγές στη δικτυακή συμπεριφορά. Περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες έχουν άμεση επίδραση στο πως θα κινηθεί ο καταναλωτής από άποψη ζήτησης, όσο και στο πως θα λειτουργήσουν τα LCT, και κυριότερα οι ΑΠΕ, των οποίων η συμπεριφορά εξαρτάται αποκλειστικά από τον καιρό. Επιπλέον, ο καιρός ενδέχεται να προκαλέσει αναπάντεχες καταστάσεις όπως

βραχυκυκλώματα, τα οποία οδηγούν σε καταστάσεις μη φυσιολογικής λειτουργίας του ΣΗΕ. Ακόμη, όταν η μελέτη γίνεται σε βάθος χρόνου κάποιων μηνών ή ετών, το ΣΗΕ αναπτύσσεται, εντάσσοντας νέους καταναλωτές, νέα LCT, ή διάφορες διανεμημένες μονάδες (ΑΠΕ ή συμβατικές) που λειτουργούν αυτόνομα. Όλα τα παραπάνω περιπλέκουν ιδιαίτερα τα πράγματα, σε σημείο που μια απλή ροή ισχύος δεν αρκεί για την ανάλυση που απαιτείται.

Η είσοδος του χρόνου (με τη μορφή της εποχικότητας, της ημερήσιας συμπεριφοράς και της τεχνολογικής εξέλιξης) εισάγει τεράστια αβεβαιότητα στη λειτουργία του ΣΗΕ, η οποία πρέπει να μοντελοποιηθεί όσο το δυνατόν καλύτερα, προκειμένου να επιτευχθεί μια ρεαλιστική ανάλυση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα είδη αβεβαιοτήτων που αφορούν τα ΣΗΕ και τους παράγοντες που είναι υπεύθυνοι για αυτές.

2.3.2 Καιρικές Συνθήκες

Με τον όρο καιρικές συνθήκες εννοούνται όλες οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν σε μια περιοχή όπως η ηλιοφάνεια, η ταχύτητα του ανέμου, η υγρασία ή ό,τι άλλο πληροί το παραπάνω κριτήριο. Έμφαση θα δοθεί στη συμπεριφορά του ήλιου και του αέρα, παράγοντες που καθορίζουν τη λειτουργία δύο εκ των LCT που θα χρησιμοποιηθούν, των φωτοβολταϊκών και των ανεμογεννητριών. Να σημειωθεί εδώ ότι παρόλο που ο ακριβής υπολογισμός της ισχύος εξόδου των τεχνολογιών αυτών εμπεριέχει πάρα πολλούς παράγοντες, η μελέτη θα εστιάσει μόνο σε αυτούς που υπόκεινται καιρικής μεταβολής και όχι σε αυτούς που αν και σημαντικοί, παραμένουν γνωστοί και σταθεροί από τη στιγμή εγκατάστασης των τεχνολογιών αυτών (πχ. εδαφική κλίση ηλιακής κυψέλης ή μορφολογία έλικας ανεμογεννήτριας).

Όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά, ο βασικός καιρικός παράγοντας που επηρεάζει τη λειτουργία τους είναι προφανώς η ηλιοφάνεια (μέγιστη απόδοση κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου καταγράφονται τόσο η εντονότερη ηλιοφάνεια, όσο και η υψηλότερη θερμοκρασία, τουλάχιστον όσον αφορά το Ηνωμένο Βασίλειο [6]). Η τεχνολογία αυτή μπορεί να κυμανθεί από την απόλυτη αχρηστία (βραδινές ώρες, περιοχές ελάχιστης ηλιοφάνειας) έως την υπερβολικά υψηλή (σε βαθμό επικινδυνότητας) έγχυση ισχύος στο ΣΗΕ (πχ. μεσημεριανές ώρες στη Γερμανία), το οποίο προκαλεί πέραν όλων των άλλων και εκτεταμένα θέματα με την ευστάθεια του δικτύου. Η αστάθεια που τα συνοδεύει μπορεί ανά πάσα στιγμή να αλλάξει την κατάσταση του ΣΗΕ, κάτι το οποίο επιτάσσει την ανάγκη για καλή μοντελοποίηση.

Όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες, ο βασικός καιρικός παράγοντας που επηρεάζει τη λειτουργία τους είναι η ταχύτητα του ανέμου (μέγιστη απόδοση κατά τους χειμερινούς μήνες, όπου καταγράφονται τόσο οι ισχυρότεροι άνεμοι, όσο και η χαμηλότερη θερμοκρασία, τουλάχιστον όσον αφορά το Ηνωμένο Βασίλειο [12]). Μολονότι η τεχνολογία αυτή συνοδεύεται από αστάθεια, όπως και τα φωτοβολταϊκά, είναι σημαντικά σταθερότερη σε διάστημα ημερήσιο, λόγω των χαρακτηριστικών του αέρα. Όμως, σε μεγάλη συγκέντρωση, είναι επίσης επιρρεπής σε προβλήματα ηλεκτρικής φύσεως. Επιπλέον η πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου είναι δύσκολη, απόδειξη του ότι και πάλι απαιτείται επαρκώς καλή μοντελοποίηση.

2.3.3 Συμπεριφορά Καταναλωτών

Σε ένα ΣΗΕ δύναται να συνδέονται πολλών ειδών τεχνολογίες. Το σίγουρο πάντως είναι ότι θα υπάρχουν πάντα καταναλωτές και επομένως η μεγαλύτερη βαρύτητα δίνεται πάντα στη βέλτιστη μοντελοποίησή τους. Η συμπεριφορά του φορτίου εξαρτάται από σωρεία παραγόντων, συγκεκριμένα:

- Εποχικότητα/καιρός-Η κατανάλωση σχετίζεται άμεσα με την εποχή η οποία μελετάται, αφού οι καταναλωτές έχουν μεγαλύτερες ανάγκες το χειμώνα και το καλοκαίρι (λόγω θερμοκρασίας) σε σχέση με το φθινόπωρο και την άνοιξη. Θα απασχολήσει έντονα στην παρούσα εργασία.

- Ώρα της ημέρας (πρωί, μεσημέρι, απόγευμα, βράδυ)-Η κατανάλωση σχετίζεται άμεσα με τη χρονική στιγμή που μελετάται, αφού οι καταναλωτές παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά ανά ώρα της ημέρας.
- Είδος του φορτίου (βιομηχανικό, οικιακό, εμπορικό)-Η συμπεριφορά βιομηχανικών, εμπορικών και οικιακών καταναλωτών διαφέρει κατά πολύ, καθώς όχι μόνο υπάρχουν διαφοροποιήσεις στο ύψος της ζήτησης, αλλά και στις ώρες λειτουργίας. Ακόμη, ο αριθμός των φάσεων, καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το είδος του φορτίου.
- Ενεργειακές ανάγκες του φορτίου-Προφανώς δύο φορτία ίδιου τύπου δεν είναι ποτέ ίδια, καθώς δύναται μια βιομηχανία να είναι πολύ μεγαλύτερη μιας άλλης ή ένα σπίτι να στεγάζει μια πλήρη οικογένεια, σε αντίθεση με την κατοικία ενός εργένη.
- Οικονομική δυνατότητα του καταναλωτή-Είναι προφανές πως δεν έχει κάθε καταναλωτής τις ίδιες οικονομικές δυνατότητες, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται σε κάποιο βαθμό η τελική του ζήτηση.
- Τυχαιότητα-Δεν είναι τίποτε παραπάνω από μια αναπάντεχη συμπεριφορά του καταναλωτή ή κάποια αθέλητη κατανάλωση όπως π.χ. κάποιο φως που ξεχάσθηκε αναμμένο. Από την πλευρά του εξωτερικού παρατηρητή, η τυχαιότητα αυτή μοιάζει ανεξήγητη χωρίς περαιτέρω πληροφορίες. Είναι πάρα πολύ δύσκολο να μοντελοποιηθεί επαρκώς, με την επίδρασή της να κυμαίνεται όμως από ελάχιστη έως περιορισμένη. Θα απασχολήσει ελάχιστα στην παρούσα εργασία.

Καθώς εμπλέκονται τόσο πολλοί παράγοντες στον καθορισμό της συμπεριφοράς του φορτίου, όλοι εκ των οποίων έχουν καθοριστική συμμετοχή (άλλοι λιγότερη, άλλοι περισσότερη), είναι κομβικό να μην αγνοηθεί κανένας εξ αυτών. Για το λόγο αυτό, πρέπει το μοντέλο που θα κατασκευαστεί για το φορτίο να μην βασίζεται σε παλιότερα μοντέλα, αλλά σε πραγματικά δεδομένα κατανάλωσης. Επομένως, πρέπει κάθε φορά ανεξαιρέτως να χρησιμοποιείται μοντέλο το οποίο θα βασίζεται αποκλειστικά στα διαθέσιμα δεδομένα.

2.3.4 Ανάπτυξη του Δικτύου

Η ανάπτυξη του δικτύου, δηλαδή η επέκτασή του, εμπεριέχει σημαντική αβεβαιότητα, καθώς δεν είναι γνωστό το πως αυτή θα πραγματοποιηθεί, τι διάρκεια θα έχει και τι θα περιλαμβάνει. Προφανώς, ο παράγοντας αυτός είναι μειωμένης σημασίας, καθώς έχει νόημα να ληφθεί υπόψη μόνο αν η μελέτη γίνεται σε βάθος ετών, ενώ καλό θα ήταν να ήταν γνωστός ο ακριβής τρόπος με τον οποίο θα γίνει η ανάπτυξη, καθώς αυτή γίνεται σχεδιασμένα και με συγκεκριμένο πλάνο, όχι τυχαία [13].

Το πρόβλημα με την ανάπτυξη του δικτύου είναι η εισαγωγή νέων δεδομένων με την προσθήκη όλο και περισσότερων καταναλωτών και LCT. Παρόλο που έχει προηγηθεί μοντελοποίηση των προηγούμενων, η συνεχής εισαγωγή τους προσθέτει όλο και περισσότερη αβεβαιότητα στο μοντέλο, το οποίο και δυσχεραίνει την ανάλυση, όχι όμως σε πολύ μεγάλο βαθμό. Σε κάθε περίπτωση, η ανάλυση τη παρούσας εργασίας περιορίζεται στην ημερήσια λειτουργία του δικτύου, και επομένως δεν θα ληφθεί υπόψη η ανάπτυξη του δικτύου.

2.3.5 Αναπάντεχες Καταστάσεις

Με τον όρο “αναπάντεχες καταστάσεις” εννοείται οτιδήποτε ενδέχεται να συμβεί κατά την κανονική λειτουργία του ΣΗΕ που κατατάσσεται ως μη φυσιολογικό. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει κάποια διαταραχή ηλεκτρικής ή μηχανικής φύσης, κάποιο ακραίο καιρικό φαινόμενο ή κάποια αναπάντεχη συμπεριφορά από πλευράς καταναλωτών. Οι καταστάσεις αυτές είναι εξαιρετικά δύσκολο να μοντελοποιηθούν και ακόμη δυσκολότερο να συμπεριληφθούν σε μελέτες όπως η παρούσα, κυρίως λόγω της τυχαιότητας και της ποικιλόμορφης επίδρασης που ενδέχεται να έχουν στο δίκτυο.

Ειδικότερα, ένα τέτοιο ενδεχόμενο μπορεί να είναι μια ασύμμετρη/μεταβατική κατάσταση όπως ένα βραχυκύκλωμα/ανοικτοκύκλωμα που διασπά την ηλεκτρική αρμονία του ΣΗΕ, ή μπορεί να είναι κάποια βλάβη του εξοπλισμού του δικτύου, το οποίο δύναται να προκαλέσει απώλεια μέρους του ΣΗΕ για σημαντικό διάστημα. Σε κάθε πάντως περίπτωση, τα βραχυκυκλώματα/ανοικτοκυκλώματα και οι βλάβες, τόσο εσωτερικές, όσο και λόγω καιρού, είναι φαινόμενα σχετικά σπάνια και περιορισμένα, με ημερήσια πιθανότητα συνήθως κάτω του 1% [14]. Επομένως, κρίθηκε μη απαραίτητη η συμπερίληψή τους στην εργασία αυτή, κυρίως λόγω της ελάχιστης επίδρασης που έχουν σε επίπεδο ημέρας.

2.4 Η ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ

2.4.1 Περιγραφή της Μεθόδου

Η πιθανοτική ροή ισχύος (probabilistic power flow-PPF) είναι η φυσιολογική επέκταση της κλασσικής ροής ισχύος, η οποία λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα και τη στατιστική φύση των δεδομένων μεγεθών, δηλαδή των φορτίων και της παραγωγής. Υπολογίζει τα άγνωστα μεγέθη ως τυχαίες μεταβλητές με μία μέση τιμή, τυπική απόκλιση και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Είναι ένας τρόπος υπολογισμού όλων των πιθανών καταστάσεων του συστήματος, που αντιστοιχούν σε όλες τις δυνατές στατιστικές μεταβολές των φορτίων και της παραγωγής μέσω μίας μόνο ανάλυσης ροής ισχύος.

Σύμφωνα με την ντετερμινιστική μέθοδο, η επίλυση ροών ισχύος απαιτεί συγκεκριμένες τιμές δεδομένων και τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται (διάνυσμα κατάστασης) αντιστοιχούν αποκλειστικά στο συγκεκριμένο σύστημα δεδομένων (διάνυσμα εισόδου και διάνυσμα ελέγχου). Κάθε αλλαγή των δεδομένων απαιτεί καινούρια επίλυση για τον υπολογισμό της νέας κατάστασης. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος της PPF μπορεί να είναι αναλυτικές, αριθμητικές ή συνδυασμός και των δύο. Οι αριθμητικές μέθοδοι έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι απλές και εφαρμόζονται χωρίς καμία παραδοχή, ενώ οι αναλυτικές επειδή χρησιμοποιούν πιο σύνθετη μοντελοποίηση συνήθως απαιτούν να γίνουν σοβαρές παραδοχές και απλοποιήσεις.

Φυσικά, τα ΣΗΕ τα οποία υπόκεινται σε αβεβαιότητες δύναται να αναλυθούν με πληθώρα ντετερμινιστικών μεθόδων. Η PPF χρησιμοποιείται συνήθως για τις αναλύσεις αυτές επειδή χτίζει πάνω σε προϋπάρχουσα ηλεκτρική μέθοδο, αλλά και για λόγους παράδοσης. Επιγραμματικά επισημαίνονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της σε σχέση με τις ντετερμινιστικές μεθόδους [15]:

Πλεονεκτήματα:

- Αυξημένο πλήθος πληροφοριών για την ικανοποιητική λειτουργία ή τον σχεδιασμό του συστήματος.
- Εύκολη εκτίμηση των αποτελεσμάτων.
- Δυνατότητα απεικόνισης των επιθυμητών συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας με γραφικές παραστάσεις.
- Δυνατότητα εξαγωγής των ντετερμινιστικών αποτελεσμάτων μέσω της πιθανοτικής μεθόδου.

Μειονεκτήματα:

- Αναγκαία γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροής ισχύος γύρω από κάποιο σημείο που απέχει πολύ ή λίγο από το λειτουργικό σημείο του συστήματος. Τα αποτελέσματα είναι περισσότερο ακριβή γύρω από αυτό το σημείο και λιγότερο ακριβή όσο απομακρύνονται από αυτό.
- Αύξηση του αριθμού των δεδομένων σε σχέση με τη ντετερμινιστική μέθοδο και η δυσκολία προσδιορισμού τους με στατιστικές παραμέτρους.

- Μεγάλο πλήθος σημείων που συνιστά τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των αγνώστων μεγεθών και καθιστά αναγκαία τη χρησιμοποίηση αριθμητικής μεθόδου για την παράστασή τους

Συνεπώς, η PPF δεν είναι τίποτε παραπάνω από τη ροή ισχύος, με τη διαφορά ότι επιπλέον υπάρχουν μεγέθη των οποίων η τιμή είναι μια τυχαία μεταβλητή και πρέπει να προσδιοριστεί όσο το δυνατόν καλύτερα. Οι διάφορες μέθοδοι επίλυσης που έχουν προταθεί και χρησιμοποιούνται ως τώρα προσεγγίζουν την τυχαιότητα με διαφορετικό τρόπο.

2.4.2 Ιστορική Αναδρομή

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι παραδόξως σχετικά πρόσφατη, με τις απαρχές της στη δεκαετία του 1970. Σήμερα, η βασική της δομή είναι η ίδια με αυτή της πρώτης απόπειρας, έχουν όμως πραγματοποιηθεί πολλές τεχνικές αλλαγές για να φτάσει στην σημερινή της μορφή. Επιγραμματικά η ιστορική εξέλιξη της μεθόδου είναι η ακόλουθη [15]:

- 1973, Barbara Borkowska: Πρώτη προσέγγιση βασισμένη στη D.C. ανάλυση ροής ισχύος, με βασική υπόθεση την ανεξαρτησία των τυχαίων μεταβλητών του προβλήματος. Ο αλγόριθμος υπολογίζει τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της πραγματικής ροής οποιασδήποτε γραμμής, και του ισοζυγίου ισχύος στο ζυγό αναφοράς του συστήματος.
- 1974, Allan, Borkowska, Grigg: Πρακτική εφαρμογή της μεθόδου για να φανεί η τεράστια διαφορά πληροφοριών που αποκτώνται σε σχέση με την ντετερμινιστική ανάλυση.
- 1975, Dorazo, Klitin, Sasson: Ανάπτυξη της ‘‘στοχαστικής ροής ισχύος’’ με χρήση του κεντρικού οριακού θεωρήματος και την εισαγωγή ‘‘περιοριστικών περιοχών’’.
- 1975, Heydt, Katz: Ανάπτυξη με στατιστικό τρόπο, επιπλέον εισαγωγή στη μέθοδο την αλληλεπίδραση γειτονικών συστημάτων.
- 1976, Allan, Shakarchi: Επέκταση της πιθανοτικής D.C. ροής ισχύος σύμφωνα με τη βασική θεμελίωση της Borkowska, με τη χρήση δύο ισοδύναμων μορφών γραμμικοποίησης των εξισώσεων ροής ισχύος. Ο αλγόριθμος υπολογίζει τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των πραγματικών και άεργων ροών ισχύος, των τάσεων και των αέργων εγχύσεων
- 1977, Allan, Shakarchi: Δύο επιπλέον και βελτιωμένες μορφές γραμμικοποίησης, με χρήση εξαρτημένων τυχαίων μεταβλητών. Τα επιπλέον ευρήματα συνεισφέρουν στην περαιτέρω ανάπτυξη της AC ροής ισχύος. Το νέο μοντέλο αρχίζει να χρησιμοποιείται για τη λήψη βραχυπρόθεσμων αποφάσεων σε πραγματικά ΣΗΕ. .
- 1977, Aboytes: Ανάπτυξη τεχνικών για την εκτέλεση της ροής ισχύος μετά από αιφνίδιες αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου, όπως απώλεια γραμμών, φορτιών και γεννητριών. Οι τεχνικές αυτές μελετώνται και βελτιώνονται περαιτέρω τα επόμενα χρόνια, μέσω εισαγωγής συντελεστών βαρύτητας και επιπλέον περιορισμών.
- 1980, Armando Martins Leite da Silva: Πρώτη χρήση της μεθόδου Monte Carlo στην PPF, τόσο για την εκτέλεσή της, όσο και για την επιβεβαίωση/διάψευση παραδοχών και δεδομένων που χρησιμοποιούνταν ως τότε. Εισαγωγή του μετασχηματισμού Fourier για την εκτέλεση των συνελιξέων, που βελτιώνει δραστικά τη διαδικασία.

- 1984, A.M. Leite da Silva, Arienti, Allan: Βελτιστοποίηση της μεθόδου πιθανοτικής ροής ισχύος που θεωρεί εξάρτηση μεταξύ των δεδομένων εγχύσεων των ζυγών για την εφαρμογή της σε προβλήματα ισοζυγίου ισχύος στο σύστημα, λαμβάνοντας υπόψη οικονομικούς και λειτουργικούς περιορισμούς
- 1985, A.M. Leite da Silva, Allan, Soares, Arienti: Επέκταση της διατύπωσης των Allan, Grigg, Garcia για τη μεταβλητή τοπολογία του δικτύου έτσι ώστε να εφαρμόζεται στην πιθανοτική A.C. ανάλυση.

2.5 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

2.5.1 Η Μέθοδος Monte Carlo

Οι μέθοδοι Monte Carlo (ή μέθοδος Monte Carlo όταν μιλάμε για μία από αυτές) είναι μια μεγάλη κατηγορία υπολογιστικών αλγορίθμων, διαφορετικών μεταξύ τους, με κοινή όμως βάση τις επαναλαμβανόμενες τυχαίες δειγματοληψίες, για την απόκτηση αριθμητικών αποτελεσμάτων. Η βασική τους ιδέα έγκειται στην εισαγωγή τυχαιότητας σε επίλυσεις προβλημάτων που μπορεί να είναι ντετερμινιστικά. Δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικές όταν υπάρχει πληθώρα δεδομένων, ενώ σε αντίθετη περίπτωση, όπου υπάρχει μεγάλη δόση αβεβαιότητας, παραγάγουν εξαιρετικά αποτελέσματα. Γενικά, αν και οι μέθοδοι Monte Carlo ποικίλλουν, τείνουν να ακολουθούν ένα πολύ συγκεκριμένο μοτίβο [16]:

1. Ορισμός πιθανών εισροών.
2. Δημιουργία τυχαίων εισόδων τυχαία από την κατανομή πιθανότητας που ισχύει ανά περιοχή εισροών.
3. Εκτέλεση ντετερμινιστικού υπολογισμού για τις επιλεγμένες εισόδους.
4. Εξαγωγή συνολικών αποτελεσμάτων.

Γενικά η μέθοδος Monte Carlo αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους στατιστικής δειγματοληψίας, λόγω της αποτελεσματικότητάς της και της μεγάλης ευελιξίας που παρουσιάζει στη μελέτη ιδιαίτερα πολύπλοκων συστημάτων με πολλούς βαθμούς ελευθερίας (που περιέχουν δηλαδή πολλαπλές στοχαστικές μεταβλητές), όντας ικανή να δώσει ακριβή αποτελέσματα. Έτσι, επιτρέπεται η αξιολόγηση ντετερμινιστικών μοντέλων (όπως η ροή ισχύος) μέσω εκατοντάδων προσομοιώσεων, χρησιμοποιώντας ως είσοδο ένα σύνολο τυχαίων αριθμών. Ουσιαστικά, κάθε προσομοίωση αποτελεί και μία πειραματική παρατήρηση. Καθώς απαιτείται τεράστιος αριθμός τέτοιων παρατηρήσεων για να εξαχθούν ασφαλώς τα όποια συμπεράσματα, η μέθοδος Monte Carlo ανταποκρίνεται στην πράξη πολύ καλύτερα από άλλες μεθόδους (μειωμένα σφάλματα) και επιτρέπει μεγάλη ακρίβεια στη μελέτη. Από την άλλη, ο ογκώδης αριθμός προσομοιώσεων, που δεν είναι τίποτε άλλο από την πολλαπλή εκτέλεση του πλήρους πειράματος, κάνει τη μέθοδο πολύ αργή υπολογιστικά. Τόσο η πολυπλοκότητα του πειράματος, όσο και ο απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων, δυσχεραίνουν πάρα πολύ τη συνολική λειτουργία του συστήματος.

Γενικώς, η χρήση τους συνοψίζεται σε τρεις βασικές κατηγορίες διακριτών προβλημάτων:

1. Βελτιστοποίηση
2. Αριθμητική ολοκλήρωση
3. Τυχαίες επιλογές από κατανομές πιθανοτήτων

Όσον αφορά τη συνεργασία με την PPF, η χρησιμοποιούμενη μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo αποτελεί μια τεχνική στοχαστικής δειγματοληψίας από γνωστές κατανομές (εδώ τα προφίλ φορτίων και LCT) για την παρατήρηση αριθμητικών αποτελεσμάτων. Τα διαδοχικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την ντετερμινιστική επίλυση της ροής ισχύος, ουσιαστικά αποτελούν πιθανές καταστάσεις του ίδιου συστήματος και συνθέτουν τη συνάρτηση

πυκνότητας πιθανότητας των ζητούμενων μεγεθών. Θεωρητικά δεν υπάρχουν περιοριστικές παραδοχές στην μέθοδο Monte-Carlo και υπάρχει σημαντική ευελιξία, με τη δυνατότητα χρησιμοποίησης των ακριβών μη γραμμικών εξισώσεων ροής ισχύος, τη θεώρηση εξάρτησης μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών, καθώς επίσης και τη διαφορετική τοπολογία δικτύου και διαφορετικές τιμές στις παραμέτρους ελέγχου του συστήματος. Τα παραπάνω αποτελούν ένα τρόπο ελέγχου της ακρίβειας και της ορθότητας των παραδοχών των αναλυτικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται [17].

Η γενική κατηγορία των μεθόδων Monte Carlo μπορεί να περιγράψει μαθηματικά ως εξής: Έστω στοχαστική μεταβλητή X και $V=E(X)$ η αναμενόμενη τιμή της (ο μέσος όρος των αναμενόμενων παρατηρήσεων). Μετά την εκτέλεση της μεθόδου, έχει παραχθεί ένα σύνολο τυχαίων τιμών X_1, X_2, \dots, X_n από την κατανομή πιθανότητας της μεταβλητής X . Μπορούν πλέον να υπολογιστούν προσεγγιστικά η αναμενόμενη τιμή V της μεταβλητής X ως ακολούθως:

$$V \cong \bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k \quad (2.23)$$

και με βάση το θεώρημα των μεγάλων αριθμών, για ικανοποιητικά μεγάλο n (ιδανικά $n \rightarrow \infty$), ο μέσος όρος που υπολογίστηκε ταυτίζεται με την αναμενόμενη τιμή της κατανομής ($\bar{V}_n \rightarrow V$). Οι τιμές των X_k είναι προφανώς τυχαίες και σίγουρα θα διαφέρουν ανά υπολογισμό, η τιμή όμως V δεν είναι τυχαία και είναι η αναμενόμενη τιμή, που μπορεί να προσεγγιστεί με σχετικά μεγάλη ακρίβεια όσο αυξάνεται το πλήθος των τυχαίων αριθμών.

Πιο συγκεκριμένα, για την επίλυση της πιθανοτικής ροής ισχύος, η μέθοδος Monte Carlo εκφράζεται ως ακολούθως: Αφού καθοριστεί η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για κάθε στοχαστική μεταβλητή εισόδου του ΣΗΕ (συμπεριφορά φορτίων ζυγών, ταχύτητα ανέμου, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, διανεμημένη παραγωγή) επιλύονται οι κανονικές εξισώσεις της απλής ροής ισχύος, δηλαδή γίνεται μια προσομοίωση, για κάθε σύνολο τιμών των τυχαίων μεταβλητών. Για την παραγωγή των τυχαίων αριθμών χρησιμοποιούνται συνήθως ειδικές γεννήτριες τυχαίων αριθμών που βασίζονται στην κατανομή πιθανότητας που ακολουθεί η κάθε στοχαστική μεταβλητή. Έστω λοιπόν,

$X = [P_D, Q_D, P_G, Q_G, \dots]$: διάνυσμα εισόδου

$Y = [\delta, V, S_{ij}, P_{slack}, \dots]$: διάνυσμα εξόδου

$Y = h(X)$: $h(\cdot)$ η διαδικασία επίλυσης της ροής ισχύος

Τελικά, για κάθε σύνολο τυχαίων τιμών των στοχαστικών μεταβλητών εισόδου (διανύσματα εισόδου) X_1, X_2, \dots, X_n προκύπτουν οι τυχαίες τιμές των μεταβλητών εξόδου (διανύσματα εξόδου) Y_1, Y_2, \dots, Y_n και στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή ως η αναμενόμενη τιμή της κατάστασης του ΣΗΕ [17]:

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_k \quad (2.24)$$

2.5.2 Άλλες Μέθοδοι

Λόγω της ανάγκης η PPF να παράγει όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι PPF, η κάθε μια με διαφορετικά στοιχεία και χαρακτηριστικά. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά διάφορες από τις μεθόδους (εκτός της Monte Carlo) που χρησιμοποιούνται για την επίλυση της πιθανοτικής ροής ισχύος, (χωρίς εμβάθυνση στους μαθηματικούς υπολογισμούς) οι οποίες τυγχάνουν επιστημονικής αναγνώρισης:

- Μέθοδος εκτίμησης σημείου (Point Estimate Method-PEM): Η χρήση της απαντάται στον υπολογισμό στατιστικών ροπών μιας τυχαία ποσότητας/μεταβλητής, η οποία είναι συνάρτηση μιας ή περισσότερων στοχαστικών μεταβλητών. Η PEM μοιράζεται κάποιες από τις αδυναμίες της Monte Carlo, κυρίως το γεγονός ότι ο υπολογιστικός φόρτος της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των στοχαστικών μεταβλητών εισόδου. Σε ρεαλιστικά προβλήματα ΣΗΕ, κάτι τέτοιο είναι φυσικά κομβικό. Εν ολίγοις, η PEM παίρνει όλη τη στατιστική πληροφορία που παρέχουν οι πρώτες κεντρικές ροπές των στοχαστικών μεταβλητών εισόδου του συστήματος σε K σημεία για κάθε μεταβλητή και στη συνέχεια, λαμβάνει τη στατιστική πληροφορία για τις μεταβλητές εξόδου. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της μεθόδου, (2-point estimate, 3-point estimate κ.α.) ανάλογα με τον αριθμό των προσομοιώσεων και των αναγκών του προβλήματος. Πάντως, έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος σε σχέση με τη Monte Carlo [17].
- Ευρετική μέθοδος (Heuristic method): Πρόκειται για μια ιδιαίτερη προσέγγιση του προβλήματος, στην οποία επιστρατεύονται αυστηρά πρακτικές μέθοδοι, οι οποίες μπορεί να μην εγγυώνται βελτιστοποίηση, όμως είναι πολύ ταχύτερες και επαρκώς ικανοποιητικές σε πρακτικά προβλήματα. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με αλγόριθμους βελτιστοποίησης, οι οποίοι δύναται να λειτουργήσουν με λίγα δεδομένα (τα απολύτως απαραίτητα) και ασχολούνται με την ουσία και όχι τη λεπτομέρεια. Τέτοιες μέθοδοι χρησιμοποιούνται συνήθως για μια αρχική επισκόπηση σύνθετων ΣΗΕ, όπως έξυπνα δίκτυα με αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ [18].
- Ανάλυση με Tensors: Τα Tensors αποτελούν γεωμετρικά αντικείμενα που περιγράφουν γραμμικές σχέσεις μεταξύ γραμμικών φορέων, όπως οι τανυστές. Πολύ απλοϊκά, τα Tensors είναι το εργαλείο της γεωμετρικής μετάβασης στο 3D (ή και σε υψηλότερο) επίπεδο (1D-διάνυσμα, 2D-πίνακας) και μπορούν να θεωρηθούν ως μια οργανωμένη πολυδιάστατη δομή αριθμητικών τιμών. Στη μελέτη ροής ισχύος, τα Tensors, σε συνδυασμό με φασματικές στοχαστικές μεθόδους, έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να εκπροσωπήσουν ένα μεγάλο σύνολο δειγμάτων δεδομένων. Οι πιο πρόσφατες τέτοιες μέθοδοι βασίζονται στην εναλλασσόμενη ελαχιστοποίηση, και παρόλο που εγγυώνται βέλτιστες λύσεις μόνο τοπικά, είναι πολύ αποδοτικές για πρακτικές περιπτώσεις [19].
- Δειγματοληψία λατινικού υπερκύβου (Latin Hypercube Sampling-LHS): Πρόκειται για στατιστική μέθοδο που αποσκοπεί στη δημιουργία σχεδόν εξ ολοκλήρου τυχαίων δειγμάτων παραμέτρων από πολυδιάστατες κατανομές. Χρησιμοποιείται πολύ συχνά για την κατασκευή πειραμάτων H/Y ή για την ολοκλήρωση Monte Carlo. Στα πλαίσια της στατιστικής, ένα τετράγωνο πλέγμα καλείται λατινικό αν και μόνο αν υπάρχει ένα μόνο δείγμα σε κάθε σειρά και στήλη. Ο υπερκύβος είναι η γενίκευση της έννοιας αυτής σε όσες διαστάσεις (μεταβλητές εισόδου) απαιτούνται. Για την PPF, χρησιμοποιείται συνήθως υποστηρικτικά, αν και πρόσφατα έχουν γίνει προσπάθειες για να χρησιμοποιηθεί αυτούσια η συγκεκριμένη μέθοδος. Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι πως δεν απαιτεί περισσότερα δείγματα για περισσότερες διαστάσεις, ότι τυχαία δείγματα μπορούν να ληφθούν μόνο ένα κάθε φορά και ότι υπάρχει πλήρης ανεξαρτησία κατά τη δειγματοληψία [20].
- Τροποποιημένες μέθοδοι Monte Carlo: Εν συντομία, πρόκειται για τις κλασσικές μεθόδους Monte Carlo, οι οποίες επιδέχονται συγκεκριμένες τροποποιήσεις,

προσθήκες ή περιορισμούς. Η μεθοδολογία που περιεγράφηκε προηγουμένως παραμένει ως έχει, με τις λειτουργικές συνθήκες να έχουν πλέον τροποποιηθεί [16].

ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ**3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Ο όρος "έλεγχος κατανάλωσης" αναφέρεται στη διαμόρφωση της συμπεριφοράς του φορτίου σε σχέση με τη δυνατότητα παραγωγής, δηλαδή στην επιβολή του ενεργειακού προφίλ από τον παραγωγό. Συνοπτικά, στόχος της μεθόδου αυτής είναι η ζήτηση να προσαρμοστεί κατάλληλα ώστε να εξυπηρετεί καλύτερα την προσφορά, και όχι το αντίθετο, δηλαδή η προσφορά να προσαρμοστεί κατάλληλα ώστε να εξυπηρετεί καλύτερα τη ζήτηση, στο οποίο βασίζεται μέχρι σήμερα η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας [21].

Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες είναι εξαιρετικά δύσκολη. Έτσι, παραδοσιακά οι επιχειρήσεις ηλεκτρισμού ισοσταθμίζουν την προσφορά με τη ζήτηση με συνεχή μεταβολή του ρυθμού παραγωγής των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, προσθέτοντας ή αφαιρώντας μονάδες παραγωγής και εισάγοντας ή εξάγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Όμως, υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί και ηλεκτρικά όρια αναφορικά με το τι μπορεί να επιτευχθεί από την πλευρά της προσφοράς, καθώς ορισμένες μονάδες παραγωγής μπορεί να απαιτούν πολύ χρόνο για να φτάσουν σε επίπεδα υψηλών ισχύων, άλλες μονάδες μπορεί να είναι λειτουργικά πολύ ακριβές, ενώ μπορεί εκτάκτως η ζήτηση να είναι μερικές φορές μεγαλύτερη από την ικανότητα όλων των διαθέσιμων μονάδων παραγωγής.

Μέσα σε ένα λειτουργικό πλαίσιο διαμόρφωσης της κατανάλωσης, υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους οι επιχειρήσεις ηλεκτρισμού μπορούν να σηματοδοτούν τα "αιτήματά" τους στους πελάτες τους, όπως οι αυξημένες τιμές ενέργειας σε περιόδους αιχμής, και οι ειδικές εκπτώσεις για αυτούς που ακολουθούν συγκεκριμένο ενεργειακό προγραμματισμό. Ο πελάτης μπορεί να προσαρμόσει τη ζήτηση ισχύος μέσω της αναβολή κάποιων εργασιών που απαιτούν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, ή μπορεί να αποφασίσει να πληρώσει υψηλότερη τιμή για την ενέργεια που θα καταναλώσει. Άλλοι πελάτες ενδέχεται να στραφούν μερικώς σε εναλλακτικές πηγές, όπως τοπικές γεννήτριες ντίζελ ή κάποια LCT (τεχνολογία χαμηλών εκπομπών άνθρακα).

Από πολλές απόψεις, ο δυναμικός έλεγχος κατανάλωσης, ή αλλιώς η ανταπόκριση της ζήτησης, μπορεί να οριστεί απλά ως ένα σύστημα τεχνοοικονομικής διαχείρισης για την ηλεκτρική τροφοδοσία. Η διαχείριση αυτή επιτυγχάνεται συνήθως μέσω οικονομικών κινήτρων, με τη μη "συμμόρφωση" των χρηστών να έχει σαν αποτέλεσμα τη διαμόρφωση "κυμάτων" υψηλών τιμών, είτε άμεσα, είτε συνυπολογιζόμενα στις γενικές ρήτρες [21].

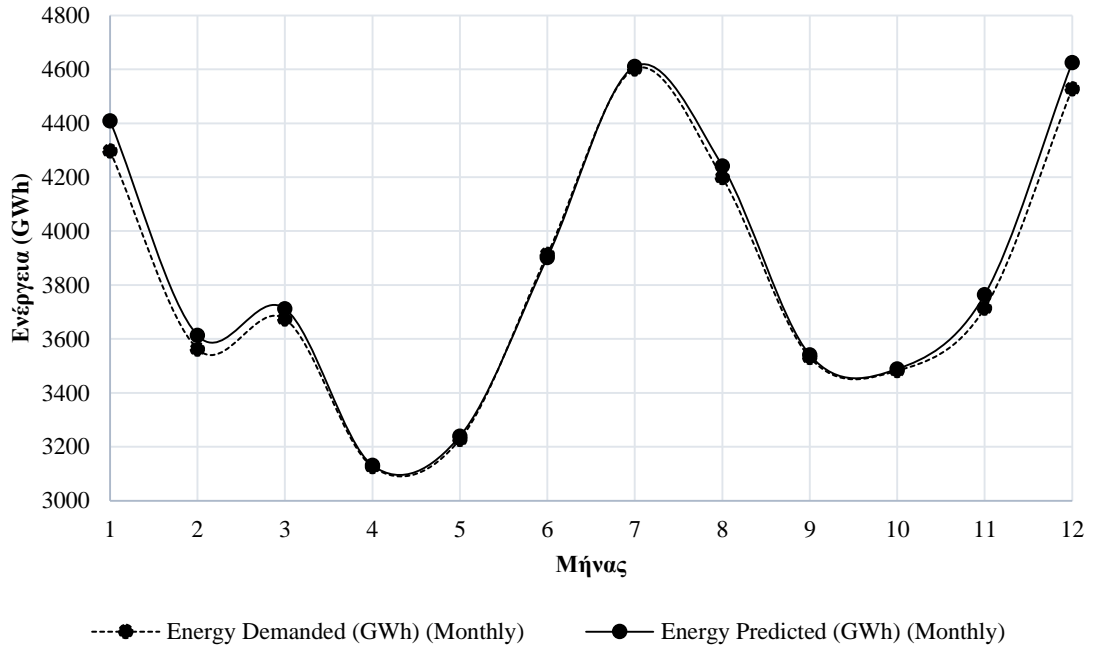
Για λόγους καθαρά προστασίας και αξιοπιστίας, σε ιδιαίτερες περιπτώσεις, μπορεί να επιστρατευθούν ακόμη και αθέμιτα για τον καταναλωτή μέσα, σε περίπτωση που τα πρωταρχικά κίνητρα αποτύχουν να τον κινητοποιήσουν επαρκώς. Σε πρακτικό επίπεδο, σε περιόδους καυσώνων το καλοκαίρι ή πολύ χαμηλών θερμοκρασιών τον χειμώνα, η ζήτηση είναι εκτάκτως εξαιρετικά υψηλή και σε περίπτωση που η πρόβλεψη φορτίου είναι άστοχη υπάρχει σοβαρός κίνδυνος για τους παραγωγούς και κατά επέκταση για ολόκληρο το ΣΗΕ, να υπάρξει κατάρρευση τάσης. Τέτοια φαινόμενα αντιμετωπίζονται με προγραμματισμένες, μεγάλου μεγέθους, διακοπές ρεύματος (blackouts) σε διάφορες περιοχές για να αντιμετωπιστούν οι ηλεκτρικές βυθίσεις. Στόχος της προτεινόμενης μεθόδου είναι να αποφεύγονται, όσο είναι δυνατόν, τέτοια φαινόμενα.

3.2 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ "ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΑΝΤΙΟΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ"

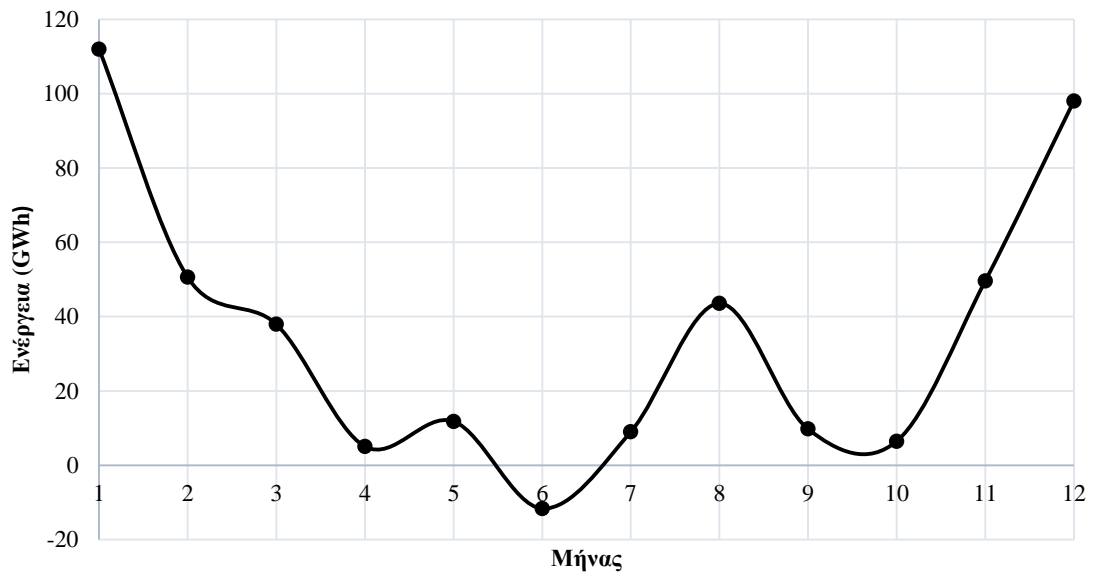
Το ζήτημα για κάθε αγαθό, είτε αυτό είναι η ηλεκτρική ενέργεια είτε όχι, είναι να μπορέσει να βρεθεί το ισοζύγιο παραγωγής-κατανάλωσης προκειμένου να επιτευχθεί βελτιστοποίηση της λειτουργίας της συγκεκριμένης αγοράς. Επειδή ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα προϊόν διαφορετικό από τα υπόλοιπα καταναλωτικά αγαθά, είναι δύσκολη η επίτευξη του ισοζυγίου παραγωγής και κατανάλωσης κάθε χρονική στιγμή.

Δεν είναι γενικά θεμιτό σε καμία περίπτωση να υπερπαράγεται ενέργεια (συμπεριλαμβανομένων των συμφωνημένων εξαγωγών), τόσο από άποψη άμεσου κόστους για τους σταθμούς παραγωγής, όσο και από άποψη προστασίας του ΣΗΕ, το οποίο είναι πολύ ευαίσθητο στην παρουσία μεγάλων ποσών περίσσειας ενέργειας. Από την άλλη, είναι προφανώς επίσης απαγορευτικό να υποπαράγεται ενέργεια, τόσο από άποψη οικονομική (ζημιών), όσο και από άποψη εξυπηρέτησης των καταναλωτών, η οποία πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πληρέστερη. Λογικό λοιπόν θα ήταν να προσδιοριστεί το ζητούμενο ισοζύγιο, προκειμένου η λειτουργία του συστήματος να είναι η βέλτιστη δυνατή. Όμως, από τα παραπάνω, φαίνεται πως το βάρος πέφτει στον προμηθευτή της ενέργειας και όχι στον καταναλωτή, ο οποίος ουσιαστικά καθορίζει το ισοζύγιο σχεδόν αποκλειστικά. Αυτό είναι αποτέλεσμα της ιδιαίτερης φύσης του προϊόντος, του οποίου η ζήτηση λειτουργεί σχεδόν ανεξάρτητα της προσφοράς [21].

Η μέχρι σήμερα στρατηγική είναι η προσπάθεια εξυπηρέτησης της ζήτησης μεταβάλλοντας την προσφορά. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της πρόβλεψης φορτίου και του ανάλογου χειρισμού των παραγωγικών δυνατοτήτων προς προσαρμογή στην πρόβλεψη αυτή. Η διαδικασία αυτή εκτελείται μέσω του Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού, ο οποίος πραγματοποιείται σε ωριαία βάση. Όμως, παρά τα ομολογουμένως εξαιρετικά μοντέλα πρόβλεψης που υπάρχουν, η συγκεκριμένη μέθοδος πάσχει.



Σχήμα 3.1: Ενεργειακή Ζήτηση (Πραγματική και Προβλεπόμενη) στο Ελληνικό Δίκτυο το 2016



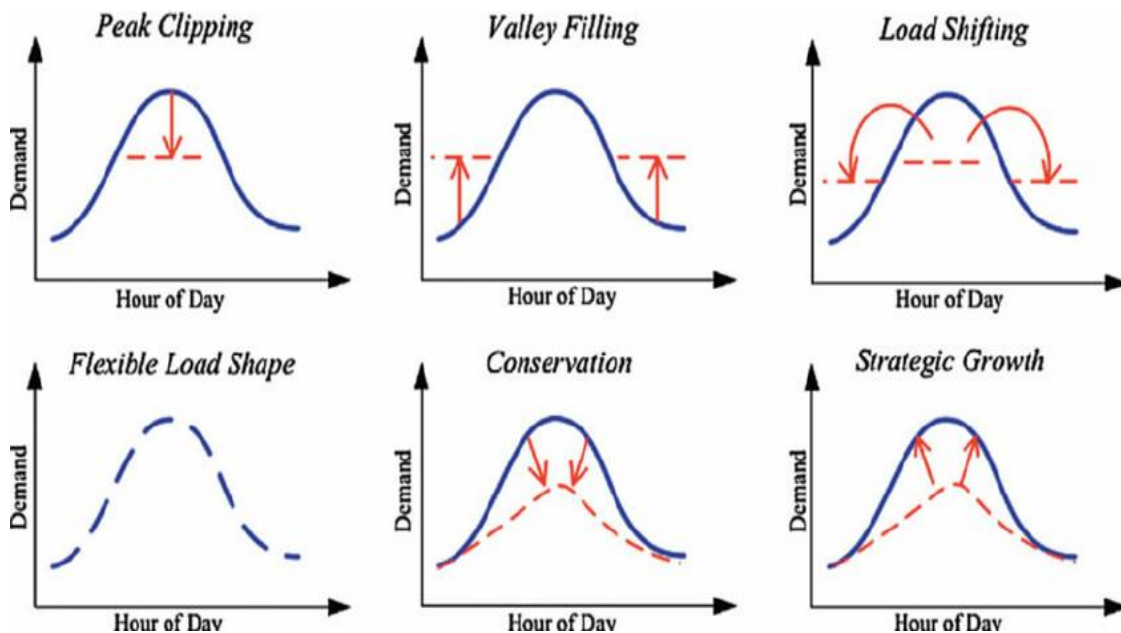
Σχήμα 3.2: Διαφορά Πραγματικής και Προβλεπόμενης Ενεργειακής Ζήτησης στο Ελληνικό Δίκτυο το 2016

Στα Σχήματα 3.1 και 3.2 παρουσιάζονται τα ενεργειακά αποτελέσματα για το ελληνικό δίκτυο το έτος 2016 [22]. Αποτελούν μια μικρογραφία μεγαλύτερων χωρών όπως οι Η.Π.Α. ή το Η.Β., με στόχο να αναδείξουν το πρόβλημα που υπάρχει στην παρούσα χρησιμοποιούμενη μέθοδο διαχείρισης του ηλεκτρικού δικτύου. Όπως φαίνεται, υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ πρόβλεψης ζήτησης και πραγματικής ζήτησης ανά μήνα. Σε κάποιους μήνες, οι διαφορές αυτές μπορεί να είναι πολύ μικρές, ενώ σε άλλους μήνες είναι αξιοσημείωτες. Σε κάθε περίπτωση, παρατηρείται πως οι αποκλίσεις είναι της τάξης των δεκάδων GWh, το οποίο μεταφράζεται χρηματικά σε ποσά των αρκετών εκατομμυρίων ευρώ. Πάρα λοιπόν το γεγονός ότι τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι πολύ ακριβή (σφάλμα 0% έως 3%), οι χρηματικές απώλειες ως ποσό είναι σημαντικότερες.

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι γενικά από τη φύση της πιο ρευστή, ενώ η προσφορά πολύ πιο "δυσκίνητη" στις πιθανές μεταβολές της. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη μετάβασης στο αντίθετο άκρο της μεθόδου που αξιοποιείται μέχρι σήμερα. Πρόκειται για την προσπάθεια σταθεροποίησης της προσφοράς και της μεταβολής της ζήτησης για να εξυπηρετεί τις ανάγκες της προσφοράς, προκειμένου το "βάρος" προσδιορισμού του ισοζυγίου να πέφτει πλέον στον καταναλωτή, και όχι στον προμηθευτή. Αυτό πραγματοποιείται κυρίως μέσω χρηματοοικονομικών εργαλείων και επιβολής νέων κανονισμών λειτουργίας των φορτίων.

3.3 ΤΡΟΠΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Ο έλεγχος της κατανάλωσης γίνεται βασικά μέσω ειδικών καταναλωτικών κινήτρων, όπως για παράδειγμα η ευνοϊκότερη μεταχείριση (ειδικοί όροι μεταξύ επιχείρησης ηλεκτρισμού και πελάτη) ή οι οικονομικές μοχλεύσεις (τιμή ενέργειας αντιστρόφως ανάλογη της επιθυμητής στάθμης κατανάλωσης). Σε κάθε πάντως περίπτωση, το προφίλ της ζήτησης δεν είναι το επιθυμητό, οπότε στόχος των προμηθευτών που επιστρατεύουν τη μέθοδο αυτή είναι η μεταβολή του προφίλ της ζήτησης προς το εξιδανικευμένο επιθυμητό προφίλ. Υπάρχουν έξι (6) βασικές μέθοδοι χειραγώγησης του φορτίου, οι οποίες είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες και μπορούν να εφαρμοστούν ατομικά ή και συνδυαστικά σε ένα δίκτυο, προς βελτιστοποίηση της εξωτερικής επέμβασης. Οι εν λόγω μέθοδοι είναι οι ακόλουθες [23]:



Σχήμα 3.3: Μέθοδοι ελέγχου κατανάλωσης

1. Αποκοπή αιχμής (peak clipping): Πρόκειται για την πρώτη από τις τρεις κλασσικές μεθόδους ελέγχου της κατανάλωσης. Βασίζεται στη μείωση του φορτίου κατά τις περιόδους αιχμής. Παρόλο που πολλές επιχειρήσεις ηλεκτρισμού θεωρούν τη μέθοδο αυτή αρνητική από πλευράς κέρδους, η εφαρμογή της μέσω οικονομικής κατανομής, μόνο σε ημέρες ιδιαίτερα υψηλών αιχμών, μειώνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος και την εξάρτηση από έκτακτα καύσιμα.
2. Πλήρωση ‘‘κοιλάδων’’(valley filling): Πρόκειται για τη δεύτερη από τις τρεις κλασσικές μεθόδους ελέγχου της κατανάλωσης. Βασίζεται στην αύξηση της κατανάλωσης σε ώρες χαμηλής ζήτησης. Χρησιμοποιείται όταν υπάρχει αυξημένη ανάγκη (από την πλευρά των προμηθευτών) κατανάλωσης ή όταν το μακροπρόθεσμο κόστος είναι μικρότερο της μέσης τιμής της ενέργειας. Η εφαρμογή της επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους, από τους οποίους ο κυριότερος είναι η μετατόπιση από συμβατικά φορτία (ορυκτών καυσίμων) σε ηλεκτρικά φορτία που λειτουργούν κατά τις ώρες μειωμένης ζήτησης (συσκευές HVAC).
3. Μεταβολή φορτίου (load shifting): Πρόκειται για την τελευταία από τις τρεις κλασσικές μεθόδους ελέγχου της κατανάλωσης. Βασίζεται στην καλύτερη διασπορά της κατανάλωσης, μειώνοντάς τη κατά τις ώρες αιχμής και αυξάνοντάς τη κατά τις ώρες ελάχιστης ζήτησης. Η εφαρμογή της συναντάται συνήθως με τη βοήθεια αποθηκευτικών συσκευών θερμότητας και ηλεκτρισμού, των οποίων η λειτουργία ρυθμίζεται για να επιτευχθεί το επιθυμητό προφίλ φορτίου.
4. Ευέλικτο φορτίο (flexible loadshape/energy efficiency): Πρόκειται για την πλέον μοντέρνα μέθοδο ελέγχου της κατανάλωσης, που σχετίζεται με την αξιοπιστία του δικτύου και τον σχεδιασμό/προγραμματισμό υπό περιορισμούς. Η χρήση επιστρατεύει τη λεγόμενη δυναμική τιμολόγηση και προϋποθέτει το ΣΗΕ να είναι ‘‘έξυπνο’’ (αλληλεπίδραση παραγωγού και καταναλωτή), καθώς και αλλαγή του πλαισίου τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Συνοπτικά, αφού γίνει πρόβλεψη του ημερησίου καταναλωτικού προφίλ, αποστέλλονται στον καταναλωτή (συνήθως ανά ώρα) οι τιμές ενέργειας και αυτός αντιδρά ανάλογα. Ο ευέλικτος τρόπος τιμολόγησης της ενέργειας έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικός στην αντιμετώπιση των ηλεκτρικών παθογενειών, ακόμη και με μικρή συμμετοχή καταναλωτών, ενώ προσεγγίζει καλύτερα τη σταθερή (flat) κατανάλωση [24].
5. Στρατηγική εξοικονόμηση (strategic conservation/dynamic energy management): Πρόκειται για μοντέρνα μέθοδο, που βασίζεται στην ενεργειακή αποδοτικότητα, με στόχο την καθολική μείωση της κατανάλωσης και τη μεταβολή του συνολικού προφίλ ζήτησης. Η ιδέα της μεθόδου είναι η βελτιστοποίηση της απόδοσης των ήδη υπαρχόντων συσκευών εξοικονόμησης ενέργειας ανά καταναλωτή. Παραδείγματα περιλαμβάνουν τη βέλτιστη ρύθμιση συσκευών, τόσο ηλεκτρικά, όσο και καιρικά.
6. Στρατηγική αύξηση φορτίου (strategic growth/dynamic energy management): Πρόκειται επίσης για μοντέρνα μέθοδο, που βασίζεται στην καθολική αύξηση της κατανάλωσης και τη μεταβολή του συνολικού προφίλ ζήτησης. Αυτό επιτυγχάνεται σπάνια μέσω οικονομικών κινήτρων και πιο συνηθισμένα μέσω του εξηλεκτρισμού του δικτύου, δηλαδή την ένταξη νέων τεχνολογιών που βασίζονται σε ηλεκτρικά καύσιμα και όχι ορυκτά, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα, οι βιομηχανικές διαδικασίες θέρμανσης ή τα συστήματα αυτοματισμού.

3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΤΙΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ

Στην παρούσα εργασία θα πρέπει ανάλογα της περίπτωσης να βρεθεί και ο κατάλληλος τρόπος επέμβασης στο υπάρχον προφίλ κατανάλωσης. Για το λόγο αυτό, απαιτείται βαθύτερη ανάλυσή τους και μελέτη του τρόπου εφαρμογής τους.

- **Υπόταση:** Το γεγονός ότι παρατηρείται υπόταση υποδεικνύει την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και την ανάγκη μείωσής της. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι peak clipping, load shifting, strategic conservation, και flexible load. Η peak clipping, παρόλο που θεωρητικά θα ήταν αποτελεσματική, δεν θα έχει πρακτικά σημαντικά αποτελέσματα, καθώς η υπόταση δεν είναι φαινόμενο που παρατηρείται μόνο κατά την αιχμή φορτίου. Η load shifting είναι εξαιρετικά εύκολο να εφαρμοστεί με τη χρήση αποθηκευτικών συσκευών (συσσωρευτές). Η strategic conservation είναι μια πολύ καλή μέθοδος, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί όμως μικροσκοπικά, δηλαδή ανά επίπεδο οικίας, απαιτώντας έτσι πιο λεπτομερή ανάλυση. Τέλος, η flexible load, η οποία είναι μια οικονομική μέθοδος, είναι φυσικά η καλύτερη δυνατή μέθοδος, αλλά και η πιο πολύπλοκη.
- **Υπέρταση:** Το γεγονός ότι παρατηρείται υπέρταση υποδεικνύει την αυξημένη παραγωγή ενέργειας, σε συνδυασμό με μειωμένη κατανάλωση και άρα την ανάγκη αύξησής της. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι valley filling, strategic load growth, και flexible load. Η valley filling, όπως και η load shifting, μπορεί να εφαρμοστεί πολύ εύκολα με συσσωρευτές. Η strategic load growth θα μπορούσε θεωρητικά να αποτελέσει την ιδανική λύση, σε συνδυασμό με ένα ιδανικό επιπλέον φορτίο. Η βέλτιστη λύση θα ήταν η χρήση EV (ηλεκτρικών οχημάτων) με πρόγραμμα που θα καθόριζε πλήρως ο διαχειριστής του δικτύου, αλλά όπως φαίνεται και στο [25], οι εξατομικευμένες ώρες φόρτισης δεν συμβαδίζουν σε μεγάλο βαθμό με τις ώρες υπερπαραγωγής των PV (φωτοβολταϊκών) και επομένως δεν θα ήταν σωστή από πλευράς ρεαλισμού μια τέτοια χρήση των EV. Θα διερευνηθεί όμως το εγχείρημα αυτό, με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο προγραμματισμού, υπό τον περιορισμό της πραγματικής συμπεριφοράς των ιδιοκτητών EV. Τέλος, όπως και για την υπόταση, θα εφαρμοστεί η flexible load, της οποίας όμως η αποτελεσματικότητα αναμένεται μειωμένη, λόγω της αδυναμίας της να επέμβει στη συμπεριφορά των PV.

Με εξαίρεση τη μέθοδο flexible load, κατά την οποία γίνεται προσπάθεια μεταβολής του φορτίου μέσω συνεχών μεταβολών της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας, οι υπόλοιπες μέθοδοι απαιτούν ουσιαστικά αναδιαμόρφωση του ενεργειακού προγραμματισμού από την πλευρά του διαχειριστή του ΣΗΕ. Αυτό επιτυγχάνεται προσφέροντας σημαντικά οικονομικά κίνητρα στους καταναλωτές, όπως γενναιόδωρες μειώσεις για όσους ακολουθούν τον προγραμματισμό και ειδικές ρήτρες για όσους τον παραβαίνουν. Ανάλογα του τρόπου επέμβασης, είναι δεδομένο πως ο προγραμματισμός αυτός μπορεί να μη βρίσκει πάντα πλήρη ανταπόκριση, το οποίο πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη κατά τη μοντελοποίηση των διάφορων επεμβάσεων.

3.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

3.5.1 Για τους Παραγωγούς/Προμηθευτές

Το κίνητρο για τους παραγωγούς/προμηθευτές να ενσωματώσουν στη λειτουργία τους την ιδέα του δυναμικού ελέγχου κατανάλωσης είναι στην πραγματικότητα τεράστιο. Για παράδειγμα, μόνο για την εξυπηρέτηση της αιχμής φορτίου, που συμβαίνει μόνο λίγες φορές τον χρόνο, απαιτείται η κατασκευή σταθμών παραγωγής και γραμμών μεταφοράς υψηλότερων δυνατοτήτων, που λειτουργούν τον υπόλοιπο χρόνο σε πολύ μικρότερο ποσοστό των προδιαγραφών τους [26]. Αυτό δεν είναι απλά εξαιρετικά ακριβό για τους παραγωγούς, αλλά μέρος του βάρους σηκώνουν και οι καταναλωτές. Για παράδειγμα, υπολογίζεται ότι στις Η.Π.Α., το 10% έως το 20% της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται από τις 100 ώρες τον χρόνο όπου σημειώνεται η αιχμή φορτίου [27]. Η μέθοδος DRDM είναι ένας εξαιρετικός τρόπος για τις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας να μειώσουν τις ογκώδεις κεφαλαιακές δαπάνες

τους, κρατώντας έτσι ταυτόχρονα τις τιμές χαμηλότερα. Υπάρχουν ωστόσο όρια στις μειώσεις αυτές, καθώς οι καταναλωτές χάνουν την αξία της ενέργειας που δεν καταναλώνεται, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η αξιοπιστία του προμηθευτή.

Το βασικότερο μέλημα των προμηθευτών ενέργειας, αλλά και του διαχειριστή του δικτύου, είναι η μείωση της μεταβλητότητας της κατανάλωσης που παρατηρείται τόσο στην οικιακή, όσο και στην εμπορική χρήση. Οι κύριοι άξονες του εγχειρήματος αυτού είναι τρεις [26]:

1. Αχρησιμοποίητες ή υποχρησιμοποιούμενες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν μη αποδοτική χρήση του εγκατεστημένου κεφαλαίου.
2. Το μέγεθος κάθε δικτύου (και γενικότερα κάθε ΣΗΕ) καθορίζεται με βάση τη μέγιστη αιχμή που θα κληθεί αυτό να αντιμετωπίσει (σε συνδυασμό με αρκετή επιπλέον ισχύ για να αντιμετωπιστούν έκτακτα φαινόμενα).
3. Η εξομάλυνση της κατανάλωσης θα έχει ως αποτέλεσμα την μειωμένη ανάγκη για κατασκευή και χρήση εφεδρειών, ενώ οι υπάρχουσες μονάδες θα λειτουργούν συχνότερα και αποδοτικότερα.

Η επίτευξη των παραπάνω στόχων έχει ως αποτέλεσμα τη μεγάλη μείωση του μεγέθους των επενδύσεων που απαιτούνται στο δίκτυο, καθώς και του συνολικού λειτουργικού κόστους. Επιπλέον, η μείωση των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας επιδρά θετικά στα έξοδα των καταναλωτών, ενώ αυξάνει το περιθώριο κέρδους των παραγωγών και των προμηθευτών. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η βελτίωση του καταναλωτικού προφίλ προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στον τομέα των εισαγωγών/εξαγωγών ηλεκτρικής ενέργειας, προσφέροντας μεγαλύτερα κίνητρα για ενεργειακές ανταλλαγές μεταξύ γειτονικών χωρών [28].

3.5.2 Για τους Καταναλωτές

Ο καταναλωτής μπορεί σε πρώτη φάση να μη μπορεί να συνειδητοποιήσει το κέρδος του από το εγχείρημα αυτό, σε αντίθεση με τις αρνητικές επιπτώσεις, οι οποίες είναι στην αρχή πολύ πιο ξεκάθαρες. Σε κάθε περίπτωση, η διαδικασία κατανόησης είναι σχετικά πολυπλοκότερη για τον καταναλωτή, με επιπτώσεις τόσο επικερδής, όσο και ζημιογόνες.

Το πρόγραμμα αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά βελτιωμένη σχέση με τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας, προσφέροντας έτσι τη δυνατότητα για εγγραφή σε άλλες υπηρεσίες, όπως τα σχέδια για διαχείριση ενέργειας, την ενεργειακή προμήθεια, και τις επιλογές χρέωσης [29]. Επιπλέον, ο καταναλωτής αποκτά αυξημένη εποπτεία και έλεγχο της ενεργειακής του λειτουργίας. Γνωρίζοντας ακριβώς πόση ενέργεια καταναλώνει, παίρνει τον απόλυτο έλεγχο των εξόδων του, το οποίο με τη σειρά του "κάμπει" ενδεχόμενους ενδοιασμούς για την υιοθέτηση του προγράμματος. Επιπλέον, σε περιοχές με ακραίες θερμοκρασίες, όπου απαιτούνται ενισχυμένες υποδομές εξυπηρέτησης φορτίου, η εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να συνεισφέρει στη ρύθμιση της ενεργειακής ζήτησης πολύ αποτελεσματικότερα από τους μέχρι τώρα τρόπους, με αποτέλεσμα την αποφυγή ενεργειακών κρίσεων. Για παράδειγμα, εκτιμάται ότι μια μείωση της τάξης του 5% στη ζήτηση φορτίου θα είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των τιμών κατά 50% κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής της ενεργειακής κρίσης της Καλιφόρνια την περίοδο 2000-2001 [29]. Επίσης, καθώς κάποιες περιοχές ενδέχεται να έχουν μικρές ενεργειακές ανάγκες, ο καταναλωτής μπορεί να εκμεταλλευτεί το πρόγραμμα, εξοικονομώντας ο ίδιος χρήματα, λόγω της μειωμένης (λόγω προσαρμογής) τιμολόγησης.

Από την άλλη πλευρά, η ένταξη του απλού καταναλωτή στα προγράμματα αυτά ενέχει ορισμένα προβλήματα. Η σημερινή αγορά δυναμικού ελέγχου εστιάζεται κυρίως σε εμπορικά και βιομηχανικά ακίνητα ως κύρια πηγή εσόδων. Υπάρχει γενικά συμφωνία ότι ο ιδιοκτήτης μίας μέσης κατοικίας απλά δεν θα ενδιαφέρεται αρκετά, ούτε από άποψη χρηματοοικονομική, ούτε από άποψη περιβαλλοντική, να συμμετέχει σε ένα τέτοιο πρόγραμμα. Για παράδειγμα, μια μητέρα που είναι στο σπίτι με την οικογένειά της συνεχώς, πιθανώς να αρνηθεί να υιοθετήσει το νέο πρόγραμμα, καθώς ή το χρηματικό κίνητρο δεν θα είναι αρκετό, ή το νέο

πρόγραμμα θα διαταράξει τα καθημερινά της ενεργειακά πλάνα. Ακόμη, πολλοί άνθρωποι αρνούνται να αλλάξουν τη νοοτροπία τους, το οποίο πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη. Τέλος, σε περιοχές όπου οι ενεργειακές ανάγκες είναι υψηλές, ο καταναλωτής θα πρέπει σε ορισμένες περιπτώσεις, λόγω του προγράμματος, να υποστεί στερήσεις, είτε ενεργειακές, είτε οικονομικές, το οποίο τον αποξενώνει [29].

Επιπλέον, η μεταβλητότητα στην ηλεκτρική τιμολόγηση μπορεί να οδηγήσει σε σύγχυση τους οικιακούς πελάτες ως προς το γιατί η χρηματική εξοικονόμηση είναι διαφορετική για ημέρες όπου η διάρκεια και οι μειώσεις φορτίου είναι ταυτόσημες. Αυτό συμβαίνει επειδή η τιμολόγηση γίνεται με γνώμονα το συνολικό ηλεκτρικό σύστημα και όχι κάθε μεμονωμένο καταναλωτή. Από την άλλη, ο μέσος οικιακός καταναλωτής μπορεί να μην έχει τις απαραίτητες γνώσεις για να καταλάβει το πως η τιμολόγηση διαμορφώνεται με βάση τη συνολική ημερήσια ζήτηση, τη συνολική ημερήσια παραγωγή, και άλλους παράγοντες. Όσο περισσότερο ξενίζει ένα πρόγραμμα τον καταναλωτή, τόσο πιο δύσκολη θα είναι η υιοθέτησή του από αυτόν.

3.5.3 Για το Δίκτυο

Στην παρούσα κατάσταση, δεν υπάρχει ΣΗΕ στον κόσμο που να μην πλήττεται από προβλήματα εξυπηρέτησης καταναλωτών. Πρόκειται για μια κατάσταση της οποίας η ένταση είναι μεταβλητή ανά περίπτωση, αλλά είναι κοινή σε κάθε ΣΗΕ, είτε αυτό είναι απλό, είτε περιέχει LCT και διανεμημένες μονάδες, είτε πρόκειται για έξυπνο δίκτυο. Είναι βέβαιο πως θα υπάρξουν κάποτε βλάβες, ή καταστάσεις με αναπάντεχα χαμηλή ή υψηλή ζήτηση, το οποίο με τη σειρά του θα δημιουργήσει εκ νέου προβλήματα εξυπηρέτησης, ευστάθειας και συχνότητας. Όλα αυτά είναι προέκταση των ενδεχόμενων σφαλμάτων στην πρόβλεψη φορτίου του δικτύου.

Η μετάβαση από την πρόβλεψη φορτίου στη διαμόρφωση του φορτίου, πετυχαίνει πολύ αποτελεσματικότερη διαχείριση της διακινούμενης ενέργειας, έχοντας πλέον τη δυνατότητα εισαγωγής πολύ περισσότερων παραμέτρων στον σχεδιασμό. Η λειτουργία του ΣΗΕ γίνεται πολύ αρμονικότερη, με λιγότερα προβλήματα (θερμικά ή ηλεκτρικά) και με σημαντικά αυξημένη αξιοπιστία. Ο ικανοποιητικός έλεγχος της ισχύος μπορεί να αποτρέψει την παραβίαση των ορίων μεταφοράς των γραμμών, τα προβλήματα ευστάθειας, καθώς και τις επικίνδυνες αυξομειώσεις της τάσης σε διάφορα σημεία του δικτύου. Συμβατικά, τα φαινόμενα αυτά αντιμετωπίζονταν μέχρι σήμερα με πολύ απλοϊκά (πυκνωτές) ή με πολύπλοκα (ρυθμιστές συχνότητας) μέσα. Όμως, το μεγάλο μειονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι πως, σε αντίθεση με την προτεινόμενη μέθοδο, είναι τοπικά εστιασμένες. Επιπλέον, αξιοποιούνται για να αντιμετωπίσουν προβλήματα και όχι για να τα προλάβουν. Ο δυναμικός έλεγχος κατανάλωσης είναι μια μέθοδος καθολική για το ΣΗΕ, της οποίας η σχεδίαση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να πραγματοποιείται πρόληψη των έκτακτων γεγονότων, βασισμένη στην εμπειρία και στη μελέτη της ιστορικής εικόνας του δικτύου. Άρα, όσο μικρότερη είναι η εξωτερική επέμβαση σε ένα ΣΗΕ, τόσο αποδοτικότερη κρίνεται η λειτουργία του.

3.5.4 Για το Περιβάλλον

Ο δυναμικός έλεγχος κατανάλωσης έχει μόνο θετικά αποτελέσματα από περιβαλλοντική άποψη. Καταρχήν, η αποδοτική διαχείριση της ενέργειας (που μεταφράζεται σε εξοικονόμηση αρκετών kWh ανά κατοικία) μπορεί να μειώσει σε σημαντικό βαθμό τις ενεργειακές απώλειες που σημειώνονται, που δεν είναι τίποτα παραπάνω από ανούσιες εκπομπές CO₂. Ακόμη, η μείωση τόσο των αιχμών φορτίου, όσο και της γενικότερης ζήτησης, έχει σαν αποτέλεσμα τη σημαντικά μειωμένη ανάγκη για χρησιμοποίηση συμβατικών μονάδων παραγωγής (λιγνίτης, ορυκτά καύσιμα, ακόμη και φυσικό αέριο). Λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές εκπομπής CO₂ των συμβατικών καυσίμων (0.2 kg/kWh για το φυσικό αέριο, 0.34 kg/kWh για τα ορυκτά καύσιμα, 0.36 kg/kWh για το λιγνίτη), καθώς και το πόσες kWh εξοικονομούνται μόνο από έναν οικιακό καταναλωτή, μπορεί κανείς εύκολα να συμπεράνει πόσοι χιλιάδες tη CO₂ μπορούν να εξοικονομούνται ημερησίως για ένα ΣΗΕ. Εάν επιπλέον

αναλογιστεί κανείς τη συμμετοχή που έχει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη μόλυνση του περιβάλλοντος (άνω του 40% συμμετοχή στις εκπομπές άνθρακα [30]), τόσο περισσότερο αναδεικνύεται η τεράστια σημασία της γενικότερης εξοικονόμησης ενέργειας.

Πέραν της μείωσης εκπομπών άνθρακα λόγω της μειωμένης χρήσης συμβατικών καυσίμων, όσο μικρότερο και όσο πιο σταθερό είναι το συνολικό φορτίο, τόσο ευκολότερη είναι η εξυπηρέτησή του από ΑΠΕ, το οποίο αποτελεί και τη μεγαλύτερη σημερινή πρόκληση. Μέχρι σήμερα, η εξυπηρέτηση του φορτίου από ΑΠΕ σε μεγάλο βαθμό δεν είναι εφικτή, λόγω της παραγωγικής μεταβλητότητας που τις συνοδεύει. Υπό τις κατάλληλες καιρικές συνθήκες, οι ΑΠΕ μπορεί να αχρηστευθούν πλήρως. Ειδικά σε περιόδους υψηλής ζήτησης, όπου απαιτείται υψηλή επίδοση από τα παραγωγικά μέσα, κάτι τέτοιο είναι ανεπίτρεπτο. Όμως, ένα σταθερά μικρό φορτίο επιτρέπει την αυξημένη εξάρτηση από τις ΑΠΕ, το οποίο με τη σειρά του δημιουργεί μια ενεργειακή κατάσταση φιλικότερη προς το περιβάλλον.

3.6 ΣΗΜΕΡΙΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Η εφαρμογή της μεθόδου DRDM είναι προς το παρόν σχετικά περιορισμένη, καθώς βρίσκεται ακόμη σε δοκιμαστικό στάδιο. Πάντως, τα μέχρι τώρα αποτελέσματα είναι πολύ υποσχόμενα, όπως για παράδειγμα το εγχείρημα της Οκλαχόμα (συμμετοχή 100,000 νοικοκυριών), στην οποία ύστερα από την εφαρμογή της DRDM εξοικονομήθηκαν 2 kW ανά οικιακό καταναλωτή, το οποίο ξεπέρασε κάθε προηγούμενη προσδοκία [29].

Από την άλλη, το επιτυχημένο marketing των προγραμμάτων αυτών έχει μέχρι στιγμής αποδειχθεί δύσκολο. Οι έξυπνοι μετρητές και οι έξυπνοι θερμοστάτες (που απαιτούνται για την επιτυχή εφαρμογή των εν λόγω προγραμμάτων), εγείρουν ζητήματα προστασίας της ιδιωτικής ζωής. Πολλοί οικιακοί καταναλωτές υποστηρίζουν πως η συμμετοχή σε αυτού του είδους τα προγράμματα απαιτεί να μεταφέρονται υπερβολικά πολλές πληροφορίες στις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού. Σήμερα, πιστεύεται πως οι ενστάσεις αυτές αποτελούν σημαντική βάση δισταγμού για τη συμμετοχή των οικιακών καταναλωτών σε τέτοιες προσπάθειες.

Ενώ προφανώς καμία επιχείρηση ηλεκτρισμού δεν μπορεί να προβλέψει το μέλλον, το σίγουρο είναι ότι τα πλεονεκτήματα υιοθέτησης της μεθόδου υπερκαλύπτουν τα μειονεκτήματα που ενδέχεται να υπάρχουν. Παρά ταύτα, υπάρχει ένα τεράστιο κομμάτι του ενεργειακού τομέα που δεν συμμετέχει σήμερα σε προγράμματα δυναμικής ζήτησης και ενεργειακής απόδοσης. Η επικρατούσα άποψη σήμερα είναι πως η δυσκολία έγκειται στο να πεισθούν οι καταναλωτές για τα μακροπρόθεσμα προτερήματα, τα οποία περνούν συνήθως σε δεύτερη μοίρα σε σχέση με τις άμεσες αλλαγές [29]. Η μελλοντική επιτυχία του εγχειρήματος απαιτεί τη συλλογή πληροφοριών από τους καταναλωτές, τον κατάλληλο σχεδιασμό εφαρμογής και την πρέπουσα εκπαίδευση των συμμετεχόντων όσον αφορά τη διαδικασία, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το σίγουρο είναι πως η πρακτική εφαρμογή δεν είναι εύκολη και απαιτεί πολύ δουλειά, με βασικότερο χαρακτηριστικό τη συνεχή και αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ επιχειρήσεων ηλεκτρισμού, προμηθευτών ενέργειας και οικιακών καταναλωτών (που αποτελούν και το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού φορτίου). Είναι πάντως κοινώς αποδεκτό πως τα προσφερόμενα κίνητρα (εξοικονόμηση χρημάτων, αύξηση κερδών, φιλικότητα προς το περιβάλλον) είναι τέτοια που μπορούν να διευκολύνουν τη μετάβαση αυτή.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πραγματικά δεδομένα των υπό μελέτη δικτύων. Επίσης, το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει το απαραίτητο θεωρητικό της μαθηματικής μοντελοποίησης που ακολουθήθηκε για τα οικιακά φορτία, καθώς και για τα LCT που χρησιμοποιήθηκαν. Για τα σταθερά δεδομένα παρουσιάζονται τα πλήρη στοιχεία τους, ενώ όσον αφορά τη μοντελοποίηση όσων στοιχείων την απαιτούσαν, επεξηγείται αναλυτικά όλη η διαδικασία που ακολουθήθηκε.

4.2 ΔΙΚΤΥΑ

Χρησιμοποιούνται συνολικά 4 διαφορετικά μεγέθη δικτύων. Οφείλει να τονισθεί πως ως μοναδικό κριτήριο μεγέθους χρησιμοποιείται ο αριθμός των φορτίων του εκάστοτε δικτύου. Αυτό ενδεχομένως να παραξενέψει τον αναγνώστη, αν όμως αναλογιστεί ότι σε επίπεδο μελέτης οι γραμμές και οι κενοί ζυγοί μπορούν να συμπυκνωθούν (το οποίο και συμβαίνει) χωρίς βλάβη της γενικότητας, ο αριθμός φορτίων είναι αυτός που τελικά αντικατοπτρίζει το μέγεθος του κάθε δικτύου.

Τα δίκτυα κατηγοριοποιήθηκαν ως μικρό (23 φορτία), μεσαίο (55 φορτία), μεγάλο (112 φορτία) και τεράστιο (175 φορτία). Όσο περισσότερα είναι τα φορτία, τόσο περισσότερα θα είναι και τα LCT ανά επίπεδο διείσδυσης, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της μελέτης όλου του φάσματος μεγεθών των δικτύων. Γενικά, έχει παρατηρηθεί πως όσο μεγαλύτερο είναι ένα δίκτυο, τόσο περισσότερα θέματα ενδέχεται να εμφανίσει, τόσο σε επίπεδο κανονικής λειτουργίας, όσο και υπό μεταβατικές καταστάσεις [6]. Αναμένεται επομένως μια αναλογική σχέση μεταξύ αριθμού φορτίων και εμφανιζόμενων προβλημάτων.

Οι τοπολογίες των δικτύων που χρησιμοποιούνται είναι 100% πραγματικές. Πρόκειται για δίκτυα καταναλωτών (χαμηλής τάσης) που βρίσκονται στο Ηνωμένο Βασίλειο. Τα γεωγραφικά, μηχανικά και ηλεκτρικά τους δεδομένα αντλήθηκαν από μια (ουδεμία παρέμβαση) από υπάρχουσες τράπεζες δεδομένων [31].

Πρέπει εδώ να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στο γεγονός πως δεν ενδιαφέρει καθόλου αν το δίκτυο λειτουργεί βέλτιστα ή υπό ιδανικές συνθήκες. Μοναδική μέριμνα είναι να αποφανθεί εάν η μέθοδος ρύθμισης ανωμαλιών που έχει επιλεγεί αντιμετωπίζει με αποτελεσματικότητα τα προβλήματα που προκύπτουν, ανεξάρτητα από το εάν οι αρχικές συνθήκες που επελέγησαν δυσχεραίνουν έμφυτα τη θέση του δικτύου. Μάλιστα, εάν η λύση που προτείνεται είναι καλής ποιότητας, ενδεχομένως και να αναδεικνύεται ακόμη περισσότερο μέσα από αντίξοες συνθήκες. Το εάν η μέθοδος που προτείνεται, σε συνδυασμό με τη βέλτιστη δικτυακή λειτουργία, αποδίδει τα βέλτιστα δυνατά αποτελέσματα μπορεί να διερευνηθεί ως επέκταση της παρούσης μελέτης.

Να αναφερθεί, πως από αυτό τη σημείο και στο εξής, όλα τα μεγέθη και ο ηλεκτρικός εξοπλισμός είναι τριφασικός, ενώ όλες οι τιμές τάσεων που εμφανίζονται είναι πολικές, εκτός και αν αναφέρεται διαφορετικά.

4.2.1 Υποσταθμός

Κάθε υπό μελέτη δίκτυο ξεκινάει φυσικά από τον κεντρικό του υποσταθμό. Ο υποσταθμός υποβιβασμού ΜΤ/ΧΤ απεικονίζεται από την κεντρική πηγή τροφοδότησης (άπειρο ΣΗΕ) και το Μ/Σ υποβιβασμού τάσης. Η κεντρική πηγή μπορεί να θεωρηθεί ως μια εξιδανικευμένη γεννήτρια μηδενικής εσωτερικής αντίστασης (και αντίδρασης). Η συχνότητά της ρυθμίζεται σταθερή στα 50 Hz, ενώ η τάση της ρυθμίζεται επίσης σταθερή στο 1.05 α.μ., (αυτό επιλέγεται ώστε να υπάρχει ίσο περιθώριο για ανύψωση και πτώση τάσης για τα μελετώμενα LCT, ώστε να πραγματοποιηθεί σωστή σύγκριση, όπως αναφέρεται και στο [6]) με γωνία 0. Η ονομαστική της τάση είναι τα 11 kV.

Ο Μ/Σ είναι επίσης πάντα σταθερός για κάθε δίκτυο. Πρόκειται για Μ/Σ υποβιβασμού 11 kV/0.416 kV, ονομαστικής ισχύος 800 kVA. Η επιλεγόμενη σύνδεση είναι τρίγωνο-αστέρας, προκειμένου η πλευρά χαμηλής τάσης να συμβαδίζει με τις συνδεσμολογίες των φορτίων. Η εσωτερική αντίδραση του Μ/Σ είναι σταθερή στο 1 Ω.

4.2.2 Γραμμές και Ζυγοί/Κόμβοι

Οι ζυγοί δεν είναι τίποτα παραπάνω από του κόμβους του δικτύου, τα σημεία διασύνδεσης των γραμμών διανομής. Σε ορισμένους από αυτούς συνδέονται φορτία, οι περισσότεροι όμως είναι κενοί, αξιοποιούμενοι μόνο ως συνδετικοί κρίκοι. Η ονομαστική τάση των κόμβων ΧΤ είναι 400 V.

Οι γραμμές διανομής συνδέουν τους κόμβους του δικτύου και είναι ουσιαστικά ο δρόμος διακίνησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Λόγω της ύπαρξης πολλαπλών επιπέδων τάσης και ισχύος ανά δίκτυο, χρησιμοποιούνται άνω του ενός είδους γραμμές διανομής, ανάλογα πάντα των ηλεκτρικών αναγκών που καλούνται να καλύψουν. Στην παρούσα προσομοίωση, κάθε γραμμή διανομής χαρακτηρίζεται από 5 βασικές τιμές: αντίσταση και αντίδραση θετικής ακολουθίας, αντίσταση και αντίδραση μηδενικής ακολουθίας και μήκος γραμμής. Οι αντιστάσεις και αντιδράσεις εξαρτώνται κυρίως από τα επίπεδα τάσης και ισχύος. Το μήκος ενδέχεται να κυμαίνεται από μερικά μέτρα έως αρκετά χιλιόμετρα. Μολονότι οι γραμμές διανομής έχουν και εγκάρσιες αγωγιμότητες, λόγω του ότι αυτές παίρνουν γενικά πολύ μικρές τιμές, αγνοούνται. Οι γραμμές διανομής, όπως οι κόμβοι ΧΤ, είναι ονομαστικής τάσης 400 V.

4.2.3 Μετρητές

Το βασικότερο κομμάτι εξοπλισμού των δικτύων είναι οι μετρητές. Οι μετρητές είναι ειδικές συσκευές που τοποθετούνται σε σταθερά μέρη του δικτύου και μετρούν τις βασικές ηλεκτρικές ποσότητες που ενδιαφέρουν, τις πολικές τάσεις και τις τιμές της ισχύος. Οι μετρητές μπορούν θεωρητικά να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε σταθερό μέρος του δικτύου, πρακτικά τοποθετούνται μόνο στους κόμβους που περιέχουν φορτία, ώστε να μετρούν την τάση, η οποία είναι και το βασικό μέγεθος που ενδιαφέρει. Ένας ειδικού τύπου μετρητής, ο ενεργειακός μετρητής, τοποθετείται στο Μ/Σ του δικτύου προκειμένου να μελετηθεί το επίπεδο φόρτισης και η συμπεριφορά του ανά επίπεδο διείσδυσης. Οι μετρητές αποτυπώνουν το εκάστοτε στιγμιότυπο κατά το οποίο δίνεται μια τέτοια εντολή και αποτελούν το βασικό εργαλείο συλλογής πληροφοριών. Να σημειωθεί εδώ πως παρόλο που στις προσομοιώσεις οι συσκευές αυτές θεωρούνται ιδανικές, δυσλειτουργούν σε περίπτωση έντονων σφαλμάτων στο ΣΗΕ.

4.3 ΟΙΚΙΑΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

Κομβικό στοιχείο κάθε δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι καταναλωτές ή αλλιώς, τα φορτία. Στα πλαίσια των δικτύων διανομής χαμηλής τάσης, οι καταναλωτές αυτοί είναι κατά βάση οικιακοί, με όποιες διακυμάνσεις μπορεί αυτό να περιλαμβάνει (ενεργειακό μέγεθος σπιτιού, αριθμός ανθρώπων ανά σπίτι, ενεργειακή συμπεριφορά ανά άνθρωπο). Η ικανοποίηση της ζήτησης είναι βασικότατο για τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η εξυπηρέτηση των φορτίων κάθε χρονική στιγμή είναι το κύριο μέλημα του προμηθευτή. Και τα δύο,

προϋποθέτουν φυσικά την αρμονική λειτουργία του δικτύου, καθώς και την αποτελεσματική πρόβλεψη της συμπεριφοράς των καταναλωτών.

Προκειμένου να παραχθεί η καλύτερη προσομοίωση, κάθε LCT πρέπει εξεταστεί στην πιο “δύσκολη” για αυτό εποχή, για παράδειγμα τα φωτοβολταϊκά το καλοκαίρι, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι ισχυρότερη. Επομένως, πρέπει να υπάρχουν και τα αντίστοιχα φορτία που να ανταποκρίνονται στην εκάστοτε εποχή. Στην παρούσα μελέτη, η προσομοιώσεις γίνονται για 2 εποχές, χειμώνα και καλοκαίρι.

Τα μοντέλα φορτίων που χρησιμοποιούνται είναι μονοφασικά, ονομαστικής τάσης 230 V (τιμή αρκετά διαδεδομένη στο Ηνωμένο Βασίλειο), ονομαστικής ισχύος 1 kW, σταθερού συντελεστή ισχύος 0.95 επαγωγικό και κατασκευάζονται μέσω της μεθόδου που παρουσιάζεται αναλυτικά στο [6]. Υπάρχουν ήδη τα δεδομένα (προφίλ φορτίων) αυτά από καταναλωτές στο Ηνωμένο Βασίλειο για τα οικιακά φορτία, τόσο για το καλοκαίρι, όσο και για το χειμώνα. Τα δεδομένα αυτά αφορούν 100 φορτία, και θα πρέπει επομένως να επεκταθούν με όσο το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια. Έχει παρατηρηθεί πως τα οικιακά φορτία ακολουθούν την κανονική κατανομή, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας [17]. Στην αρχική επέκταση των φορτίων, με βάση μονάχα την προαναφερθείσα παρατήρηση, παρατηρήθηκε πως τα σφάλματα της επέκτασης ήταν ανεπίτρεπτα υψηλά (50%-70%) για τις αναμενόμενα δύσκολες περιόδους, όπως τη μέγιστη αιχμή και την ελάχιστη κατανάλωση. Για τον λόγο αυτό, προς παραγωγή πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων, επιλέχθηκε η ημέρα να χωρισθεί σε 3 χαρακτηριστικά τμήματα και να εφαρμοσθεί εκ νέου η προαναφερθείσα μέθοδος. Η απόφαση αυτή αποδείχθηκε σωστή, καθώς προσομοιώνονται τα πραγματικά φορτία με εξαιρετική ακρίβεια.

Συνοπτικά, για τα οικιακά φορτία, η ημέρα χωρίστηκε στα 5λεπτα 1-86, 87-199, 200-288, καθώς στα διαστήματα αυτά παρατηρήθηκαν 3 διαφορετικές στάθμες φορτίων. Η τεχνητή επέκταση στα διαστήματα αυτά γίνεται με τη βοήθεια γεννήτριας τυχαίων αριθμών, η οποία επιλέγει από κανονική κατανομή με συγκεκριμένη μέση τιμή και τυπική απόκλιση.

Στους Πίνακες 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται τα προφίλ των προαναφερθέντων φορτίων που χρησιμοποιήθηκαν για την τεχνητή επέκταση.

Πίνακας 4.1: Στοιχεία μοντελοποίησης θερινού φορτίου

Διάστημα (σε 5λεπτα)	Μέση τιμή μ (kW)	Τυπική απόκλιση σ (kW)
1-86	0.135972	0.054391
87-199	0.383727	0.075970
200-288	0.594929	0.111829

Πίνακας 4.2: Στοιχεία μοντελοποίησης χειμερινού φορτίου

Διάστημα (σε 5λεπτα)	Μέση τιμή μ (kW)	Τυπική απόκλιση σ (kW)
1-86	0.148259	0.051923
87-199	0.413728	0.071859
200-288	0.740347	0.170705

4.4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

Το πιο διαδεδομένο LCT παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΑΠΕ) είναι με διαφορά τα φωτοβολταϊκά συστήματα (PV). Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή, διατίθεται παντού και δεν στοιχίζει απολύτως τίποτα. Επιπλέον, με την κατάλληλη γεωγραφική κατανομή, τα PV μπορούν να εγκατασταθούν χωρίς να απαιτείται ενίσχυση του δικτύου διανομής. Ακόμη, αποτελούν ιδιαίτερα αξιόπιστη τεχνολογία, καθώς όχι μόνο έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής (20-30 χρόνια), αλλά παρουσιάζουν επιπλέον ελάχιστες ανάγκες για συντήρηση. Τα μεγαλύτερα ίσως πλεονεκτήματα των PV είναι ότι υπάρχει πάντα η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης ώστε να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών του δικτύου, ενώ διαθέτουν ευελιξία στις εφαρμογές τους, τόσο ως αυτόνομα συστήματα, όσο και ως υβριδικά συστήματα όταν συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας και συσσωρευτές. Τέλος,

είναι δυνατή η διασύνδεση με το δίκτυο ηλεκτροδότησης (διασυνδεδεμένο σύστημα), καταργώντας με τον τρόπο αυτό την ανάγκη για εφεδρεία και δίνοντας επιπλέον τη δυνατότητα στον χρήστη να πωλήσει τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια στον διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου [32].

Το κύριο μέγεθος προσδιορισμού της επίδοσης ενός φωτοβολταϊκού είναι η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται. Προφανώς, η ηλιακή ακτινοβολία διαφέρει ανά περιοχή και εξαρτάται κυρίως από το γεωγραφικό της πλάτος, τις καιρικές συνθήκες και την καθαρότητα του ουρανού. Γενικά, υπό φυσιολογικές συνθήκες, η ηλιακή ενέργεια είναι ανάλογη της απόστασης από τους πόλους, δηλαδή όσο στον Ισημερινό βρίσκεται ένα φωτοβολταϊκό, τόσο καλύτερη επίδοση θα έχει. Βασικό ρόλο στην πρόσληψη ηλιακής ακτινοβολίας παίζει φυσικά και η τοποθέτηση του φωτοβολταϊκού στοιχείου όσον αφορά την κατεύθυνση και τη γωνία εγκατάστασης. Τέλος, πρωταγωνιστικό ρόλο παίζει προφανώς η θέση του ηλίου, η οποία αντιστοιχίζεται πάντα σε κάποιο χρονικό σημείο της ημέρας (πχ. η θέση του ηλίου είναι ευνοϊκότερη για τους ηλιακούς συλλέκτες στις 12:00 σε σχέση με τις 21:00).

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, στην επιφάνεια της γης, μετριέται σε W/m^2 και εξαρτάται από όλους τους προαναφερθέντες παράγοντες. Θεωρώντας ιδανικές συνθήκες (καλοκαίρι, ηλιακές ακτίνες πλήρως κάθετες στο έδαφος, καθαρός ουρανός, μηδενική γωνία ηλιακού συλλέκτη) μπορεί να θεωρηθεί ως μέγιστη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας η τιμή $1000 W/m^2$. Η τιμή αυτή ονομάζεται ακτινοβολία ενός ήλιου και χρησιμοποιείται για την έκφραση της ισχύος αιχμής (ονομαστική ισχύς) των φωτοβολταϊκών διατάξεων.

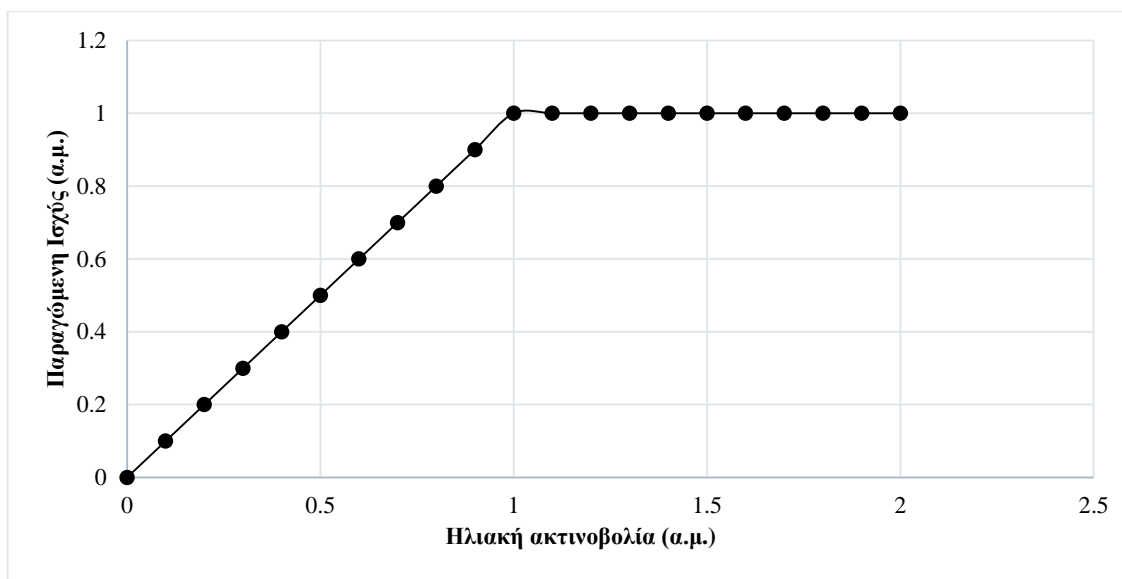
Τα φωτοβολταϊκά που χρησιμοποιούνται είναι μονοφασικά, ονομαστικής τάσης 230 V (ώστε να ‘‘συμβαδίζουν’’ με τα φορτία), ονομαστικής ισχύος 3 kW, σταθερού συντελεστή ισχύος 0.95 επαγωγικό, συντελεστή μετατροπής 1 (ωφέλιμο ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας).

Στην πραγματικότητα, ο ακριβής υπολογισμός της εξόδου ενός φωτοβολταϊκού είναι ιδιαίτερος σύνθετος και εξαρτάται, πλην των γεωγραφικών και καιρικών συνθηκών, από το ίδιο το φωτοβολταϊκό και πολλαπλούς εγγενείς ηλεκτρικούς παράγοντες (θερμοκρασία, ονομαστικές τάσεις κυκλωμάτων). Χάριν απλοποίησης (με ελάχιστο πραγματικό σφάλμα), θα θεωρηθεί πως η ισχύς εξόδου ενός φωτοβολταϊκού υπολογίζεται μέσω της συνάρτησης δύο κλάδων:

$$P_s = \begin{cases} P_{s,n} \frac{s}{s_n}, & \text{αν } 0 \leq s \leq s_n \\ P_{s,n}, & \text{αν } s \geq s_n \end{cases} \quad (4.1)$$

όπου P_s η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού (W)
 $P_{s,n}$ η ονομαστική ισχύς (ισχύς αιχμής) του φωτοβολταϊκού (W, εδώ 4000)
 s_n η ονομαστική ηλιακή ακτινοβολία του φωτοβολταϊκού (W/m^2 , εδώ 1000)
 s η ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2)

Η παραπάνω συνάρτηση γίνεται πιο κατανοητή με τη βοήθεια του Σχήματος 4.1:



Σχήμα 4.1: Παραγόμενη Ισχύς Φωτοβολταϊκού Συναρτήσεως της Φωτεινότητας

Το Σχήμα 4.1 είναι γενικό και δεν αντιπροσωπεύει κάποιο συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό. Αυτό που παρουσιάζεται είναι η παραγωγή ισχύος σε α.μ. σύστημα (με βάση την ονομαστική ισχύ του) συναρτήσεως της ηλιακής ακτινοβολίας σε α.μ. σύστημα (με βάση την ονομαστική ακτινοβολία του). Παρατηρείται η γραμμική σχέση που συνδέει την ακτινοβολία με την ισχύ εξόδου, έως ότου αυτή ‘‘πιάσει’’ την ονομαστική τιμή της, όπου η ηλιακή κυψέλη εισέρχεται σε κορεσμό και συνεχίζει να παράγει το μέγιστο δυνατό, ανεξαρτήτως της αύξησης εντάσεως της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό είναι και το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί στη μελέτη αυτή για να συσχετιστεί ο καιρός με την παραγόμενη από το φωτοβολταϊκό ισχύ.

Όπως προαναφέρθηκε, κάθε LCT πρέπει να δοκιμαστεί στην πιο δύσκολη για αυτό περίοδο, στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών το καλοκαίρι, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι και πιο έντονη. Υπήρχε φυσικά και πάλι μια υπάρχουσα δεξαμενή πραγματικών δεδομένων (έξοδοι φωτοβολταϊκών), όπως υπήρχε και η ανάγκη για επέκτασή της. Μελέτες έχουν δείξει πως η ηλιακή ακτινοβολία ακολουθεί κατανομή Weibull (και σπανιότερα Beta) [17]. Θεωρώντας λοιπόν ως s την ηλιακή ακτινοβολία, αυτή έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Σ.Π.Π.):

$$f(s) = \frac{k_s}{c_s^{k_s}} s^{(k_s-1)} \exp\left(-\left(\frac{s}{c_s}\right)^{k_s}\right), 0 \leq s < \infty \quad (4.2)$$

όπου k_s, c_s οι συντελεστές σχήματος και κλίμακας της ηλιακής ακτινοβολίας αντίστοιχα.

Προκειμένου όμως να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή επέκταση, υπολογίστηκε (από τα πραγματικά δεδομένα) και μόνο για τις ώρες μη συσκότισης, το μέσο προφίλ της ηλιακής ακτινοβολίας, από το οποίο εξήχθησαν η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση ($\mu=405.261 \text{ W/m}^2$, $\sigma=322.829 \text{ W/m}^2$). Μέσω ειδικής εφαρμογής του προγράμματος Matlab εξήχθησαν οι βέλτιστοι δυνατοί συντελεστές Weibull που παρήγαγαν τα πιο κοντινά αποτελέσματα. Με χρήση γεννήτριας τυχαίων αριθμών, η οποία επιλέγει από κατανομή Weibull με τους συντελεστές σχήματος και κλίμακας που υπολογίστηκαν, γίνεται η επέκταση των προφίλ της ηλιακής ακτινοβολίας, τα οποία μετατρέπονται σε προφίλ ισχύος μέσω της εξίσωσης (4.1).

4.5 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Οι ανεμογεννήτριες (WG), αποτελούν τη δεύτερη πιο διαδεδομένη ΑΠΕ παγκοσμίως. Όπως και τα PV, ‘‘τροφοδοτούνται’’ από μια ανεξάντλητη πηγή καυσίμου, η οποία μάλιστα

είναι διαθέσιμη σε όλη τη διάρκεια του 24ώρου. Ανάλογα με το μέγεθός τους έχουν και τις αντίστοιχες λειτουργίες, με τις μικρότερες να παίζουν υποστηρικτικό ρόλο σε οικιακές και μικρές καταναλωτικές ανάγκες και τις μεσαίου μεγέθους να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω ενίσχυση του δικτύου (πώληση περίσσειας ενέργειας σε εταιρίες ηλεκτρισμού). Οι μεγαλύτερες WG σε μεγάλες συγκεντρώσεις (αιολικά πάρκα) αποτελούν σημαντικά κέντρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιούνται από πολλές χώρες στην προσπάθεια μείωσης της εξάρτησής τους από τα συμβατικά καύσιμα. Οι λόγοι για τους οποίους τα PV προτιμώνται κατά γενικό κανόνα ως ΑΠΕ σε σχέση με τις WG είναι τα κόστη συντήρησης, η μεγαλύτερη δυσκολία ένταξης στο δίκτυο και η πιο σύνθετη λειτουργία των WG σε σχέση με τα PV [33].

Το κύριο μέγεθος προσδιορισμού της επίδοσης μίας ανεμογεννήτριας είναι η ταχύτητα του ανέμου που ‘‘χτυπάει’’ την προπέλα. Προφανώς, η ταχύτητα του ανέμου διαφέρει ανά περιοχή, ενώ η μοντελοποίησή της δεν είναι το ίδιο εύκολη με την ηλιακή ακτινοβολία. Πρωτίστως, ο άνεμος δεν έχει ‘‘νεκρές’’ ώρες όπως η ηλιακή ακτινοβολία (ώρες συσκότισης), ενώ δεν επηρεάζεται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες. Επιπλέον, βασικότατο ρόλο παίζει η τοπολογία της περιοχής εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας, η οποία δύναται ακόμη και να ενισχύσει ή να αποδυναμώσει τον άνεμο (πχ. μια ανεμογεννήτρια μεταξύ υψωμάτων μπορεί μέχρι και να αχρηστευθεί), αλλά και η κατεύθυνση ροής του ανέμου. Γενικά, υπό φυσιολογικές συνθήκες, η ταχύτητα του ανέμου εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από τη γενική τοπολογία της ευρύτερης περιοχής, χωρίς κάποιον άλλο ειδικό κανόνα, με αποτέλεσμα ακόμη και περιοχές της ίδιας χώρας να παρουσιάζουν τεράστιες διαφορές. Να αναφερθεί τέλος πως παρά τα παραπάνω, η τάξη μεγέθους της ταχύτητας του ανέμου σχετίζεται άμεσα με τις εποχιακές συνθήκες, καθώς έχει παρατηρηθεί πως αυτή είναι μέγιστη το χειμώνα και ελάχιστη το καλοκαίρι.

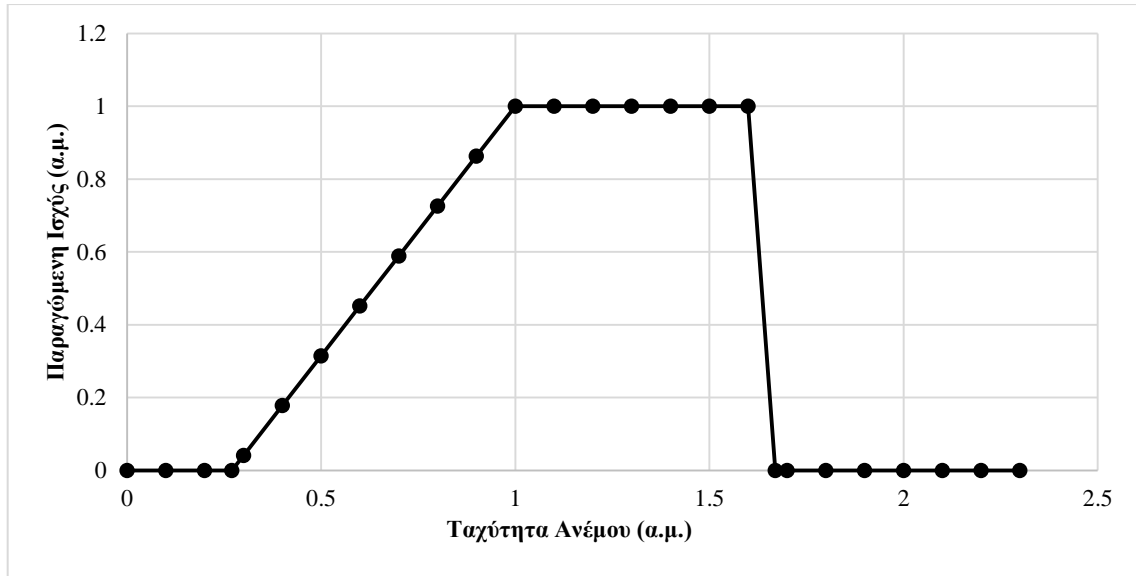
Η ταχύτητα του ανέμου μετριέται σε m/s, όπως και κάθε άλλο είδος ταχύτητας και εξαρτάται από τους προαναφερθέντες παράγοντες. Θεωρώντας ιδανικές συνθήκες (χειμώνας, ιδανική τοπολογία περιοχής, ροή ανέμου παράλληλα στην προπέλα) μπορεί να θεωρηθεί ως ονομαστική ταχύτητα του ανέμου τα 15 m/s. Η τιμή χρησιμοποιείται για την έκφραση της ισχύος αιχμής (ονομαστική ισχύς) των ανεμογεννητριών.

Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται είναι μονοφασικές, ονομαστικής τάσης 230 V (ώστε να ‘‘συμβαδίζουν’’ με τα φορτία), ονομαστικής ισχύος 1 kW, σταθερού συντελεστή ισχύος 0.95 επαγωγικό, συντελεστή μετατροπής 1 (ωφέλιμο ποσοστό ταχύτητας ανέμου).

Στην πραγματικότητα, ο ακριβής υπολογισμός της εξόδου μιας ανεμογεννήτριας είναι ιδιαίτερα σύνθετος και εξαρτάται, πλην των γεωγραφικών και εποχιακών συνθηκών, από την ίδια την ανεμογεννήτρια και πολλαπλούς εγγενής ηλεκτρομηχανικούς παράγοντες (διαμόρφωση προπέλας, ηλεκτρομαγνητικές απώλειες). Χάριν απλοποίησης (με ελάχιστο πραγματικά σφάλμα), θα θεωρηθεί πως η ισχύς εξόδου μιας ανεμογεννήτριας υπολογίζεται μέσω της συνάρτησης τριών κλάδων:

$$P_{WG} = \begin{cases} 0, & \text{αν } 0 \leq v \leq v_{in}, \text{ ή } v_{out} \leq v \\ P_{WG,n} \frac{(v - v_{in})}{(v_n - v_{in})}, & \text{αν } v_{in} \leq v \leq v_n \\ P_{WG,n}, & \text{αν } v_n \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (4.3)$$

P_{WG}	η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας (W)
$P_{WG,n}$	η ονομαστική ισχύς (ισχύς αιχμής) της ανεμογεννήτριας (W, εδώ 1000)
v_{in}	η ταχύτητα ανέμου ένταξης της ανεμογεννήτριας (m/s, εδώ 4)
v_{out}	η ταχύτητα ανέμου αποσύνδεσης της ανεμογεννήτριας (m/s, εδώ 25)
v_n	η ονομαστική ταχύτητα ανέμου της ανεμογεννήτριας (m/s, εδώ 15)
v	η ταχύτητα του ανέμου (m/s)



Σχήμα 4.2: Παραγόμενη Ισχύς Ανεμογεννήτριας Συναρτήσει της Ταχύτητας του Ανέμου

Το Σχήμα 4.2 είναι γενικό και δεν αντιπροσωπεύει κάποια συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια. Αυτό που παρουσιάζεται είναι η παραγωγή ισχύος σε α.μ. σύστημα (με βάση την ονομαστική ισχύ της) συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου σε α.μ. σύστημα (με βάση την ονομαστική ταχύτητά του). Επιπλέον υποθέσεις που έχουν παρθεί είναι πως η ταχύτητα ένταξης ισούται με το 0.27 της ονομαστικής ταχύτητας και πως η ταχύτητα αποσύνδεσης ισούται με το 1.67 της ονομαστικής ταχύτητας (βάσει των τιμών που θεωρήθηκαν στην (4.3)). Παρατηρείται πως έως ότου επιτευχθεί η ταχύτητα ένταξης, η ανεμογεννήτρια δεν παράγει ισχύ. Αφού ξεπεραστεί το ‘‘εμπόδιο’’ αυτό, παρατηρείται γραμμική σχέση μεταξύ ταχύτητας του ανέμου και ισχύος εξόδου, έως ότου επιτευχθεί η ονομαστική τιμή της, όπου η γεννήτρια εισέρχεται σε ‘‘κορεσμό’’ και συνεχίζει να παράγει το μέγιστο δυνατό. Όταν πλέον επικρατήσει η ταχύτητα αποσύνδεσης, όπου πλέον κινδυνεύει η ανεμογεννήτρια, αποσυνδέεται άμεσα, με αποτέλεσμα η παραγωγή να είναι εκ νέου μηδενική. Αυτό είναι και το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί στη μελέτη αυτή για να συσχετιστεί η ταχύτητα του ανέμου με την παραγόμενη από την ανεμογεννήτρια ισχύ.

Όπως προαναφέρθηκε, κάθε LCT πρέπει να δοκιμαστεί στην πιο δύσκολη για αυτό περίοδο, δηλαδή τον χειμώνα, όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι και πιο υψηλή. Στην περίπτωση αυτή όμως, επειδή δεν υπήρχε κάποια δεξαμενή πραγματικών δεδομένων (έξοδοι ανεμογεννητριών), έπρεπε να δημιουργηθεί μία εκ του μηδενός. Μελέτες έχουν δείξει πως η ταχύτητα του ανέμου ακολουθεί κατανομή Weibull (και σπανιότερα Raileigh) [17]. Θεωρώντας λοιπόν ως v την ηλιακή ακτινοβολία, αυτή έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Σ.Π.Π.):

$$f(v) = \frac{k_v}{c_v^{k_v}} v^{(k_v-1)} \exp\left(-\left(\frac{v}{c_v}\right)^{k_v}\right), 0 \leq v < \infty \quad (4.4)$$

όπου k_v, c_v οι συντελεστές σχήματος και κλίμακας της ταχύτητας του ανέμου αντίστοιχα.

Προκειμένου όμως να δημιουργηθεί ένα όσο το δυνατόν καλύτερο μοντέλο, βρέθηκε η μέση ταχύτητα του ανέμου το χειμώνα στο Ηνωμένο Βασίλειο και επιλέχθηκε κατάλληλος συντελεστής k_v , από το οποία εξήχθη ο συντελεστής c_v μέσω της εξίσωσης:

$$v_{\text{μέση}} = c_v \cdot \Gamma \cdot \left(1 + \frac{1}{k_v}\right) \quad (4.5)$$

Με χρήση γεννήτριας τυχαίων αριθμών, η οποία επιλέγει από κατανομή Weibull με τους υπολογισθέντες συντελεστές σχήματος και κλίμακας, γίνεται η δημιουργία των προφίλ της ταχύτητας του ανέμου, τα οποία μετατρέπονται σε προφίλ ισχύος μέσω της εξίσωσης (4.3).

4.6 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι ηλεκτρικές αντλίες θερμότητας (EHP) ή απλά αντλίες θερμότητας είναι συσκευές τροφοδοτούμενες από ηλεκτρικό ρεύμα, οι οποίες παράγουν θερμική ενέργεια (διαφόρων χρήσεων), αντλώντας θερμότητα από ένα ψυχρό χώρο και απελευθερώνοντάς την σε ένα θερμότερο. Ο όρος EHP χρησιμοποιείται πιο ευρέως για συσκευές θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (heating, ventilation, air conditioning-HVAC). Οι συσκευές αυτές βρίσκονται στην πραγματικότητα σε εκατομμύρια σπίτια σε όλο τον κόσμο, τόσο λόγω της ευκολίας χρήσης τους, όσο και λόγω του γεγονότος ότι είναι πολύ φθηνές στη λειτουργία τους (όχι στην εγκατάστασή τους) και αποδοτικές σε σχέση με τα συμβατικά μέσα θέρμανσης/ψύξης χώρων. Η άντληση της απαιτούμενης ενέργειας γίνεται συνήθως από εσωτερικούς ψύκτες ή ακόμα και από το έδαφος. Η αποτελεσματικότητα των συσκευών μπορεί να ξεπεράσει αυτή των κλασσικών μέχρι και 5 φορές [34].

Όπως και για τα δύο προηγούμενα LCT, έτσι κι αυτό πρέπει να μελετηθεί στην πιο “δύσκολη” για αυτό εποχή, η οποία έχει παρατηρηθεί πως είναι ο χειμώνας [6].

Οι EHP που χρησιμοποιούνται είναι μονοφασικές, ονομαστικής τάσης 230 V, ονομαστικής ισχύος 2 kW, σταθερού συντελεστή ισχύος 0.95 επαγωγικό. Υπάρχουν ήδη πραγματικά δεδομένα (προφίλ φορτίων) από χειμερινούς καταναλωτές στο Ηνωμένο Βασίλειο για τις EHP. Τα δεδομένα αυτά αφορούν 100 καταναλωτές, και θα πρέπει επομένως να επεκταθούν με όσο το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια. Έχει παρατηρηθεί πως οι EHP είναι ουσιαστικά ένα συμβατικό οικιακό φορτίο, και επομένως ακολουθεί επίσης την κανονική κατανομή, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Όπως και στην αρχική επέκταση των οικιακών φορτίων, με βάση μονάχα την προαναφερθείσα παρατήρηση, παρατηρήθηκε πως τα σφάλματα της επέκτασης ήταν ανεπίτρεπτα υψηλά (50%-70%) για τις αναμενόμενες δύσκολες περιόδους, όπως τη μέγιστη αιχμή και την ελάχιστη κατανάλωση. Για τον λόγο αυτό, προς παραγωγή πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων, επιλέχθηκε η ημέρα να χωριστεί σε 4 χαρακτηριστικά τμήματα και να εφαρμοσθεί εκ νέου η προαναφερθείσα μέθοδος. Η έμπνευση αυτή αποδείχθηκε σωστή, καθώς προσομοιώνονται οι πραγματικές συμπεριφορές με εξαιρετική ακρίβεια.

Συνοπτικά, για τα οικιακά φορτία, η ημέρα χωρίστηκε στα 5λεπτα 1-65, 66-100, 101-171, 172-288, καθώς στα διαστήματα αυτά παρατηρήθηκαν 4 διαφορετικές στάθμες κατανάλωσης. Η τεχνητή επέκταση στα διαστήματα αυτά γίνεται με τη βοήθεια γεννήτριας τυχαίων αριθμών, η οποία επιλέγει από κανονική κατανομή με συγκεκριμένη μέση τιμή και τυπική απόκλιση.

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα προφίλ των προαναφερθέντων φορτίων που χρησιμοποιήθηκαν για την τεχνητή επέκταση

Πίνακας 4.4: Στοιχεία μοντελοποίησης ηλεκτρικής αντλίας θερμότητας

Διάστημα (σε 5λεπτα)	Μέση τιμή μ (kW)	Τυπική απόκλιση σ (kW)
1-65	0.153262	0.030120
66-100	0.74588	0.131317
101-171	1.13896	0.50387
172-288	1.028304	0.528784

4.7 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

Οι συσσωρευτές (SD) μπορούν να θεωρηθούν απλά ως μπαταρίες που φορτίζουν και εκφορτίζουν ανάλογα με τον προγραμματισμό τους. Αυτοί μπορεί να είναι είτε οικιακοί, είτε μεγαλύτεροι που εγκαθίστανται από τον διαχειριστή του δικτύου. Σε κάθε περίπτωση, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα βασικά έξοδα αναλαμβάνει ο καταναλωτής, καθώς είτε παίρνει ο ίδιος την πρωτοβουλία της εγκατάστασης, είτε αναγκάζεται να αντιμετωπίσει αυξημένη τιμή ηλεκτρικής

ενέργειας, λόγω της ύπαρξης συσσωρευτών. Σε κάθε περίπτωση, καθώς αυτή η εργασία μελετά κυρίως την επίδραση των καταναλωτών στην λειτουργία του δικτύου, οι χρησιμοποιούμενοι συσσωρευτές θα είναι οικιακοί.

Το να ρυθμίζεται η συμπεριφορά του SD ανά μικρά χρονικά διαστήματα (για παράδειγμα ανά πεντάλεπτο) δεν είναι αποδοτικό και πρέπει αυτό να γίνεται για μεγαλύτερους χρονικούς ορίζοντες. Υπάρχει μεγάλη ευελιξία ως προς την εν λόγω ρύθμιση και μπορεί ο προγραμματισμός να γίνει με διάφορους τρόπους. Στην παρούσα μελέτη, οι SD δεν θα χρησιμοποιηθούν στην αρχική ανάλυση επίδρασης LCT στο δίκτυο, καθώς αφού επιτρέπεται η ρύθμισή τους, δεν υπάρχει περίπτωση να προγραμματιστούν επίτηδες με τέτοιο τρόπο ώστε να βλάπτουν το δίκτυο. Αντίθετα, θα χρησιμοποιηθούν στη μετέπειτα μελέτη που θα πραγματοποιηθεί με χρήση DRDM, για τις μεθόδους valley filling, load shifting. Η ρύθμισή τους θα γίνει από το διαχειριστή του δικτύου και όχι από τον καταναλωτή, καθώς ο πρώτος γνωρίζει την επικρατούσα ενεργειακή συμπεριφορά και χειρίζεται τον συσσωρευτή με τον τρόπο που αυτός κρίνει ότι θα βοηθήσει περισσότερο.

Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές τεχνολογίες SD, συγκεκριμένα ο Powerwall 2 της Tesla [35], με βάση το LCT που χρησιμοποιείται παράλληλα (PV, EHP αντίστοιχα). Τα στοιχεία τους παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.5 και 4.6:

Πίνακας 4.5: Στοιχεία συσσωρευτή Powerwall 2 (με PV)

Όνομαστικό μέγεθος	Τιμή
Ικανότητα αποθήκευσης	13.5 kWh BOTH
Όριο βάθους εκφόρτισης	12 kWh BOTH
Όνομαστική τιμή	5 kW
Ρυθμός φόρτισης	22%
Ρυθμός εκφόρτισης	18.6%
Ώρες φόρτισης	07:00-18:00
Ώρες εκφόρτισης	18:00-07:00
Όριο ρεύματος φόρτισης/εκφόρτισης	<20% ονομαστικών αμπερών

Πίνακας 4.6: Στοιχεία συσσωρευτή Powerwall 2 (με EHP)

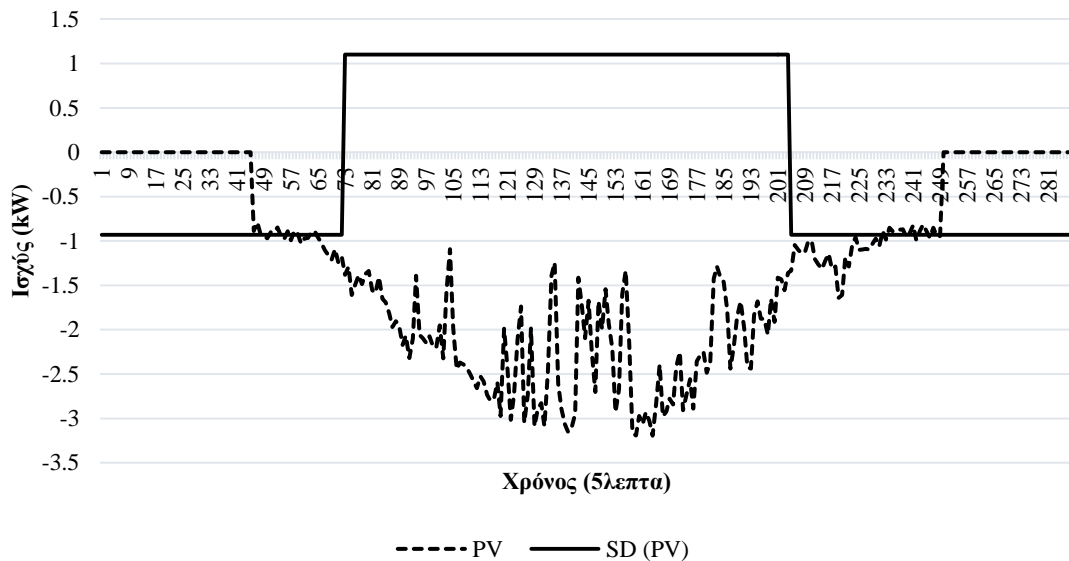
Όνομαστικό μέγεθος	Τιμή
Ικανότητα αποθήκευσης	13.5 kWh
Όριο βάθους εκφόρτισης	12 kWh
Όνομαστική τιμή	5 kW
Ρυθμός φόρτισης	20%
Ρυθμός εκφόρτισης	20%
Ώρες φόρτισης	00:00-08:00
Ώρες εκφόρτισης	08:00-12:00 & 17:00-21:00
Όριο ρεύματος φόρτισης/εκφόρτισης	<20% ονομαστικών αμπερών

Συνοπτικά, ένα μοντέλο της συμπεριφοράς ενός ιδανικού SD μπορεί να εκφραστεί κωδικοποιημένα μέσω της σχέσης (4.6) που παρουσιάζεται παρακάτω:

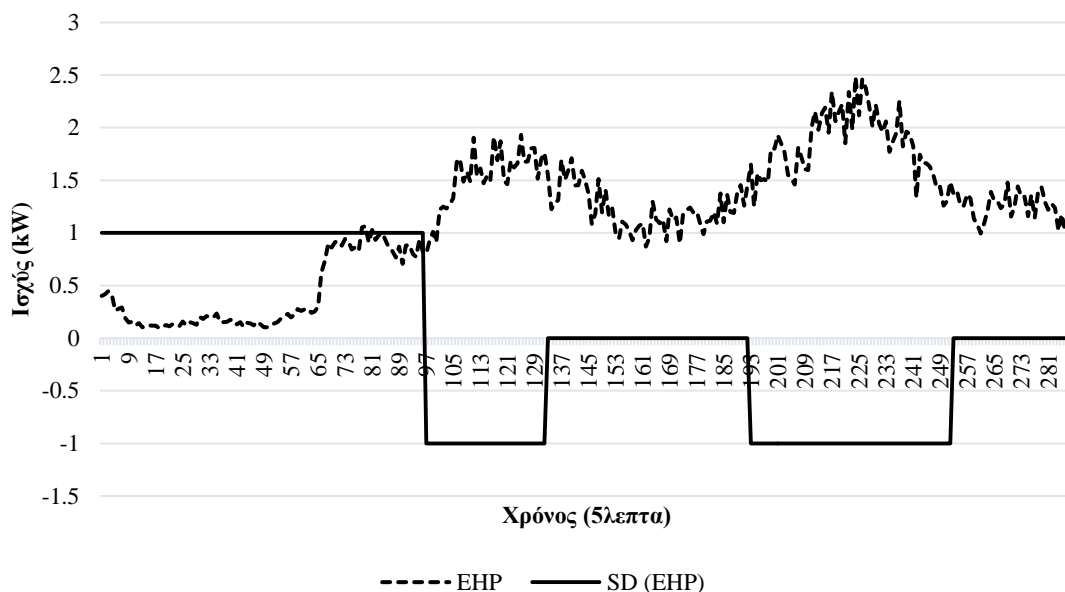
$$P_{SD} = \begin{cases} P_{SD,N} \cdot CR, & \text{αν } t = t_{charge}, E_{SD,current} \neq E_{SD,N} \\ 0, & \text{αν } E_{SD,current} = E_{SD,N} \\ -P_{SD,N} \cdot DR, & \text{αν } t = t_{discharge} \end{cases} \quad (4.6)$$

όπου	P_{SD}	η ισχύς (κατανάλωση) του συσσωρευτή
	$P_{SD,N}$	η ονομαστική ισχύς του συσσωρευτή
	$E_{SD,current}$	η επί του παρόντος αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια
	$E_{SD,N}$	η ονομαστική (μέγιστη) ηλεκτρική ενέργεια του συσσωρευτή
	t_{charge}	μια χρονική στιγμή φόρτισης
	$t_{discharge}$	μια χρονική στιγμή εκφόρτισης
	CR	ο ρυθμός φόρτισης
	DR	ο ρυθμός εκφόρτισης

Να σημειωθεί επιπλέον ότι κατά τις προσομοιώσεις η σχέση (4.6) βάσει των εικόνων που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.3 και 4.4 (ανάλογα με το υπό μελέτη κάθε φορά LCT). Επιπλέον, θεωρείται δεδομένο ότι κάθε SD ξεκινά και τελειώνει το 24ωρό του φορτισμένος στο ίδιο σημείο, ενώ δεν πρέπει ποτέ να πέσει κάτω από τη στάθμη έκτακτης ανάγκης (περίπου 10% της μέγιστης χωρητικότητας), καθώς οι SD δεν αποφορτίζονται πλήρως ώστε να μην μειώνεται ο κύκλος ζωής τους [36]. Τέλος, να αναφερθεί ακόμη ότι οι SD θα χρησιμοποιηθούν μετά την πρωταρχική ανάλυση, ως μέσο αντιμετώπισης τυχόν προβλημάτων που προκύπτουν, ακολουθώντας την ίδια αρχή με τα μελετώμενα LCT, η διείσδυσή τους δηλαδή είναι πάντα ίδια με αυτή των LCT. Τέλος, στα Σχήματα 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται (σε σχέση με τα PV και τα EHP αντίστοιχα) τα εμπλεκόμενα προφίλ ισχύος των SD, που αφορούν τις μεθόδους valley filling, load shifting.



Σχήμα 4.3: Προφίλ Ισχύος Αποθηκευτών (SD) και Φωτοβολταϊκών (PV)



Σχήμα 4.4: Προφίλ Ισχύος Αποθηκευτών (SD) και Ηλεκτρικών Αντλιών Θερμότητας (EHP)

4.8 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Τα ηλεκτρικά οχήματα (EV) μπορούν όπως και οι SD να θεωρηθούν απλά ως μπαταρίες, οι οποίες και πάλι φορτίζουν και εκφορτίζουν ανάλογα με τον προγραμματισμό τους. Τα EV δεν είναι φυσικά τίποτα παραπάνω από αυτοκίνητα, τα οποία χρησιμοποιούν ως καύσιμο ηλεκτρική ενέργεια αντί για πετρέλαιο, βενζίνη ή φυσικό αέριο. Συνδέονται στο δίκτυο και φορτίζονται συγκεκριμένες ώρες της ημέρας. Μολονότι ο προγραμματισμός φόρτισης/χρησιμοποίησης γίνεται συνήθως από τον καταναλωτή, στην παρούσα μελέτη αυτός θα γίνει από το διαχειριστή του δικτύου με βάση τις ενεργειακές ανάγκες που υπάρχουν. Φυσικά, σε αντίθεση με τους SD, ο προγραμματισμός δεν θα έχει πλήρη ανταπόκριση, καθώς η χρήση ενός οχήματος είναι πολύ πιο απαραίτητη. Αντί αυτού, όσον αφορά τον προγραμματισμό και την αντίστοιχη ανταπόκριση (που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5), το πως αυτά προκύπτουν αναλύονται στην Ενότητα 4.10.

Το να ρυθμίζεται η συμπεριφορά των EV ανά μικρά χρονικά διαστήματα (για παράδειγμα ανά πεντάλεπτο) δεν είναι πρακτικό και πρέπει αυτό να γίνεται για μεγαλύτερους χρονικούς ορίζοντες. Υπάρχει μεγάλη ευελιξία ως προς την εν λόγω ρύθμιση και μπορεί ο προγραμματισμός να γίνει με διάφορους τρόπους. Στην παρούσα μελέτη, τα EV δεν θα χρησιμοποιηθούν στην αρχική ανάλυση επίδρασης LCT στο δίκτυο, καθώς όπως και οι SD, αφού επιτρέπεται η ρύθμισή τους, δεν υπάρχει περίπτωση να προγραμματιστούν επίτηδες με τέτοιο τρόπο ώστε να βλάπτουν το δίκτυο (εφαρμόζοντας τον εν λόγω προγραμματισμό, εξαλείφονται πλήρως τα αρνητικά αποτελέσματα για τα EV που παρουσιάζονται στο [6]). Αντίθετα, θα χρησιμοποιηθούν στη μετέπειτα μελέτη που θα πραγματοποιηθεί με χρήση DRDM, για τη μέθοδο strategic load growth. Η ρύθμισή τους θα γίνει από τον διαχειριστή του δικτύου και όχι από τον καταναλωτή, καθώς ο πρώτος γνωρίζει την επικρατούσα ενεργειακή συμπεριφορά και χειρίζεται το EV με τον τρόπο που αυτός κρίνει ότι θα βοηθήσει περισσότερο.

Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια EV με το [6], τα οποίοι μάλιστα χρησιμοποιήθηκαν σε πραγματικά δίκτυα του Ηνωμένου Βασιλείου, των οποίων τα στοιχεία παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7:

Πίνακας 4.7: Στοιχεία μοντελοποίησης ηλεκτρικού οχήματος

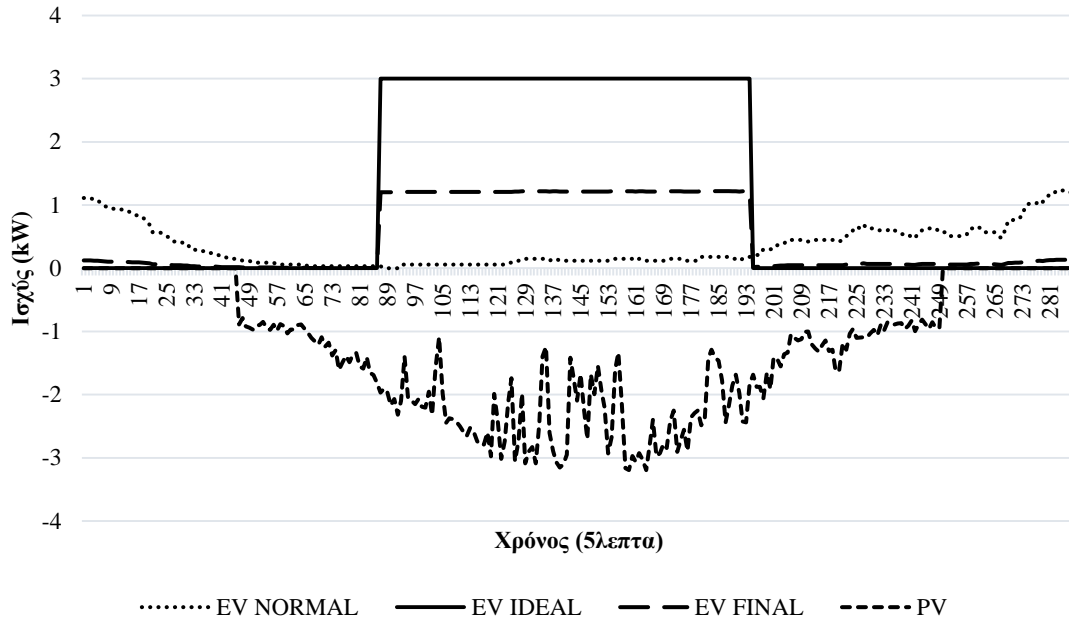
Ονομαστικό μέγεθος	Τιμή
Ονομαστική ισχύς	3 kW
Ενεργειακή χωρητικότητα	24 kWh
Ρυθμός φόρτισης	100%
Ωρες φόρτισης καταναλωτών που δεν ακολουθούν τον προγραμματισμό	Τυχαίες, ακολουθούν την κατανομή που παρουσιάζεται στο [6]
Ωρες φόρτισης καταναλωτών που ακολουθούν τον προγραμματισμό	8:00-16:00 (πεντάλεπτα 96-192)

Συνοπτικά, ένα μοντέλο της συμπεριφοράς ενός ιδανικού EV μπορεί να εκφραστεί κωδικοποιημένα μέσω της σχέσης (4.7) που παρουσιάζεται παρακάτω:

$$P_{EV} = \begin{cases} P_{EV,N} \cdot CR, & \text{αν } t = t_{charge}, E_{EV,current} \neq E_{EV,N} \\ 0, & \text{αν } t = t_{use} \text{ ή } t = t_{null} \end{cases} \quad (4.7)$$

όπου	P_{EV}	η ισχύς (κατανάλωση) του ηλεκτρικού οχήματος
	$P_{EV,N}$	η ονομαστική ισχύς του ηλεκτρικού οχήματος
	$E_{EV,current}$	η επί του παρόντος αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια
	$E_{EV,N}$	η ονομαστική (μέγιστη) ηλεκτρική ενέργεια ηλεκτρικού οχήματος
	t_{charge}	μια χρονική στιγμή φόρτισης
	t_{use}	μια χρονική στιγμή χρήσης
	t_{null}	μια χρονική στιγμή όπου δεν πραγματοποιείται χρήση ή φόρτιση
	CR	ο ρυθμός φόρτισης

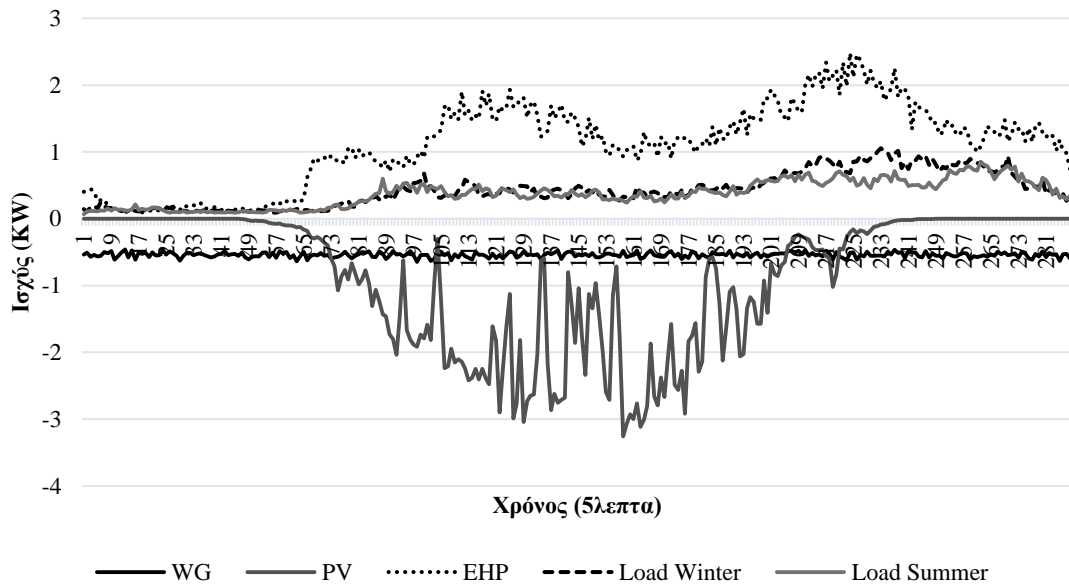
Να σημειωθεί επιπλέον ότι κατά τις προσομοιώσεις η σχέση (4.7) βάσει της εικόνας που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5. Ακόμη, να αναφερθεί ακόμη ότι τα EV θα χρησιμοποιηθούν μετά την πρωταρχική ανάλυση, ως μέσο αντιμετώπισης τυχόν προβλημάτων που προκύπτουν, ακολουθώντας την ίδια αρχή με τα μελετώμενα LCT, η διείσδυσή τους δηλαδή είναι πάντα ίδια με αυτή του μελετούμενου LCT. Τέλος, στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζονται (σε σχέση με τη συμπεριφορά των PV) τα 3 εμπλεκόμενα προφίλ ισχύος των EV, που αφορούν τη μέθοδο strategic load growth: πραγματικό, ιδανικό και τελικό.



Σχήμα 4.5: Προφίλ Ισχύος Ηλεκτρικών Οχημάτων (EV) και Φωτοβολταϊκών (PV)

4.9 ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

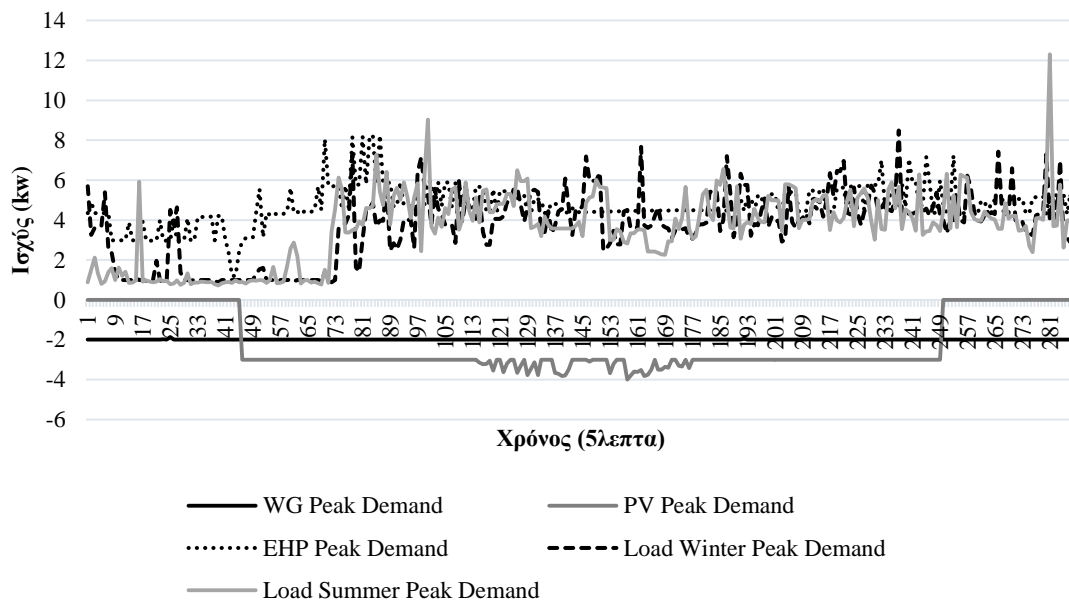
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται γραφικά οι συμπεριφορές των φορτίων και των LCT που θα χρησιμοποιηθούν στις προ επέμβασης προσομοιώσεις, όπως αυτές περιγράφησαν αναλυτικά στις προηγούμενες ενότητες. Να σημειωθεί πως οι συμπεριφορές αυτές είναι πιθανοτικές, περιέχουν δηλαδή τις προαναφερθείσες αβεβαιότητες, ενώ ως μέτρο έχει παρθεί ο μέσος όρος των διαθέσιμων ηλεκτρικών προφίλ, που αριθμούνται στα 200.



Σχήμα 4.6: Μέσος Όρος Συμπεριφοράς της Ισχύος των Στοιχείων του Δικτύου

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται ο μέσος όρος της πιθανοτικής συμπεριφοράς, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας (χωρισμένη σε διακριτά διαστήματα των 5 λεπτών), όλων των φορτίων και των LCT που χρησιμοποιούνται στη μελέτη. Παρουσιάζονται συγκεντρωτικά, παρόλο που δεν αναφέρονται στην ίδια εποχή, για να αποκτήσει ο αναγνώστης μια πλήρη εικόνα των

διάφορων καταστάσεων που θα μελετηθούν. Αναλυτικότερα, από την πλευρά των φορτίων, τόσο τα χειμερινά όσο και τα θερινά φορτία καταναλώνουν κατά μέσο όρο μέχρι 1 kW, με την κατανάλωση να αυξάνεται από την ημέρα στη νύχτα. Η κατανάλωση το καλοκαίρι και τον χειμώνα είναι σε μεγάλο βαθμό ίδια, με εξαίρεση τις βραδινές ώρες όπου η κατανάλωση κινείται σε ελαφρώς υψηλότερα επίπεδα το χειμώνα σε σχέση με το καλοκαίρι. Οι ανεμογεννήτριες δεν παρουσιάζουν μεγάλες εξάρσεις, κυρίως λόγω της φύσης του ανέμου, και έχουν σχετικά μεγάλη ομοιομορφία στη λειτουργία τους, κινούμενες, κατά μέσο όρο, στη σταθερή παραγωγή των περίπου 0.5 kW σε όλη τη διάρκεια του 24ώρου. Τα φωτοβολταϊκά λειτουργούν ουσιαστικά μόνο τις ώρες με ηλιοφάνεια, από την ανατολή μέχρι τη δύση του ηλίου. Λόγω της μεγάλης τυχαιότητας που εμπεριέχεται στην ηλιοφάνεια, παρατηρείται σημαντική σποραδικότητα και μικρή σταθερότητα στη λειτουργία τους, κινούμενα πάντως στην περιοχή παραγωγής μεταξύ 1 και 4 kW. Τέλος, οι ηλεκτρικές αντλίες θερμότητας δεν φαίνεται να ακολουθούν κάποιο συνολικό μοντέλο συμπεριφοράς, μένοντας εκτός λειτουργίας για περίπου μισή ημέρα, ενώ το υπόλοιπο διάστημα “πιάνουν” πολύ γρήγορα την κατανάλωση των 1.5 με 2 kW, στα οποία και λειτουργούν με κάποια σταθερότητα. Διαφαίνεται από το Σχήμα 4.6 η σημασία “τεμαχισμού” του διαστήματος μελέτης σε όσο το δυνατόν μικρότερα χρονικά διαστήματα, καθώς όλα τα στοιχεία, ακόμα και αυτά με μικρές μόνο διακυμάνσεις, παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά σε κάθε διαφορετική χρονική στιγμή.



Σχήμα 4.7 Πιθανοτική Χρονική Εξέλιξη της Αιχμής Ισχύος των Στοιχείων του Δικτύου

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέγιστης δυνατής αιχμής ισχύος (παραγωγή ή κατανάλωση) όλων των φορτίων και LCT που χρησιμοποιούνται στη μελέτη, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας (χωρισμένη σε διακριτά διαστήματα των 5 λεπτών). Το σχήμα αυτό χρησιμοποιείται για να παρουσιάσει τις μέγιστες δυνατότητες του κάθε στοιχείου. Βασικός του όμως σκοπός είναι να αναδείξει τη μη σημασία ενδεχόμενων μεμονωμένων συμπεριφορών, βασιζόμενο κυρίως στο προηγούμενο διάγραμμα, το οποίο αποδεικνύει πως όσον αφορά τη συνολική λειτουργία του ΣΗΕ, ακραία φαινόμενα απορροφώνται, καθώς η συμπεριφορά του δικτύου είναι συνολική και κάθε ατομικός καταναλωτής έχει ελάχιστη επίδραση στην συνολική λειτουργία του ΣΗΕ. Όσον αφορά τα LCT παραγωγής, καθώς η ισχύς εξόδου καθορίζεται από συγκεκριμένα μοντέλα, αυτή δεν δύναται να ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή, δηλαδή 2 kW για τις ανεμογεννήτριες και 4 kW για τα φωτοβολταϊκά. Για τα πρώτα, η αιχμή παραμένει σχεδόν εξ ολοκλήρου ίσου με την ονομαστική, ενώ για τα δεύτερα, αυτή βρίσκεται στα 3 kW υπό φυσιολογική ηλιοφάνεια και στην ονομαστική της τιμή για τη μέγιστη δυνατή ηλιοφάνεια. Από την άλλη, τα καταναλωτικά φορτία αλλά και οι αντλίες θερμότητας (που είναι ουσιαστικά

φορτία) δεν έχουν περιορισμούς ως προς την ισχύ τους και μπορούν να ξεπεράσουν κατά πάρα πολύ την ονομαστική τους ισχύ. Συγκεκριμένα, οι αντλίες και τα χειμερινά φορτία δύναται να φτάσουν μέχρι και τα 8 kW (4πλάσιο και 8πλάσιο αντιστοίχως της ονομαστικής ισχύος), ενώ τα θερινά φορτία, που κινούνται σχεδόν όπως και τα χειμερινά, φαίνεται να μπορούν να ‘πιάσουν’, έστω και για λίγο, μέχρι και τα 12 kW (12πλάσιο της ονομαστικής ισχύος). Πάντως, όπως προαναφέρθηκε, είναι προφανές πως οι ακραίες τιμές ορισμένων στοιχείων που παρατηρούνται απομονώνονται λόγω της φυσιολογικής λειτουργίας των υπολοίπων.

4.10 ΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΩΝ

Στην ενότητα αυτή, κρίνεται βασικό να δειχθεί κατά πόσο οι προτεινόμενες μέθοδοι επέμβασης στο δίκτυο είναι ρεαλιστικές. Επιπλέον, θα επεξηγηθεί πως προκύπτει ο προγραμματισμός της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 4.8, ο οποίος εμπεριέχει και την περισσότερη λεπτομέρεια, λόγω της φύσης του συγκεκριμένου LCT.

Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας διεξήχθη έρευνα επί των προτεινόμενων μεθόδων ελέγχου της κατανάλωσης, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο αυτές είναι δυνητικά εφικτό να εφαρμοστούν. Η έρευνα διεξήχθη μέσω μέσων κοινωνικής δικτύωσης και απευθείας ερωτήσεων. Συγκεκριμένα, ρωτήθηκαν συνολικά 750 άτομα, ηλικιών 17-70 ετών, για όσον το δυνατόν μεγαλύτερη πληρότητα. Αφού προηγήθηκε πολύ συνοπτική περιγραφή της ιδέας κάθε μεθόδου, οι συμμετέχοντες ρωτήθηκαν απλώς εάν θα εφάρμοζαν έναν επιθυμητό προγραμματισμό (όποιος κι αν είναι αυτός) που προτείνεται εάν υπήρχε κάποιο ικανό οικονομικό κίνητρο (χωρίς να δοθούν επιπλέον λεπτομέρειες για τον προγραμματισμό). Οι δυνατές απαντήσεις ήταν "Ναι" (θα εφάρμοζαν τον προγραμματισμό), "Όχι" (δεν θα εφάρμοζαν τον προγραμματισμό), και "Δεν Ξέρω/Δεν Απαντώ" (δεν γνώριζαν/δεν ήθελαν να απαντήσουν). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 4.8:

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα έρευνας επί των μεθόδων επέμβασης.
Απαντήσεις στο ερώτημα: "θα δεχόσασταν να εφαρμόσετε τους εν λόγω προγραμματισμούς εάν υπήρχε επαρκές οικονομικό κίνητρο";

"Εργαλείο" Επέμβασης	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΔΞ/ΔΑ
Ηλεκτρικά Οχήματα (Καθημερινές/Σαββατοκύριακα)	639 (85%)/ 727 (97%)	84 (11%)/ 7 (1%)	27 (4%)/ 27 (4%)
Ηλεκτρικοί Αποθηκευτές	731 (97.5%)	11 (1.5%)	8 (1%)
Διαχείριση Ενέργειας (Μείωση κατανάλωσης/Διαχείριση φορτίου)	739 (98.5%)	8 (1%)	3 (0.5%)
Δυναμική Τιμολόγηση Ενέργειας	608 (81%)	80 (11%)	60 (8%)

Όσον αφορά τις μεθόδους που αφορούν τους ηλεκτρικούς αποθηκευτές και την εξοικονόμηση ενέργειας, καθίσταται σαφές ότι η 100% ανταπόκριση που υποτέθηκε κατά τις προσομοιώσεις είναι πράγματι ρεαλιστική. Όσον αφορά τη μέθοδο του μεταβλητού φορτίου, φαίνεται πως η υιοθέτησή της είναι εφικτή μέχρι και για διεισδύσεις της τάξης του 80%, τόσο λόγω άρνησης εφαρμογής της, όσο και λόγω της γενικότερης μεταβλητότητας (άρα και αβεβαιότητας) που τη συνοδεύει. Τέλος, η μέθοδος επέμβασης που αντιστοιχεί στα ηλεκτρικά οχήματα βασίστηκε στα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα: καθώς η καθημερινή φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος δεν είναι μια ρεαλιστική υπόθεση, τουλάχιστον για τις εργάσιμες ημέρες, εφαρμόζεται ένα ιδιαίτερα συντηρητικό μοντέλο εφαρμογής, με βάση το οποίο οι καταναλωτές που δέχτηκαν να εφαρμόσουν τον προγραμματισμό χωρίζονται σε πέντε (5) ισάριθμες ομάδες, μία εκ των οποίων φορτίζει κάθε εργάσιμη μέρα τα οχήματά της, ενώ όλες οι ομάδες φορτίζουν τα οχήματά τους τις μη εργάσιμες ημέρες. Συνεπώς, κατά μέσο όρο, σε καθημερινή βάση, 40% των καταναλωτών εφαρμόζουν τον προγραμματισμό, 11% των καταναλωτών δεν τον εφαρμόζουν και το υπόλοιπο 49% δεν φορτίζουν καθόλου τα οχήματά τους. Έτσι προκύπτει και το Σχήμα 4.5.

Σε κάθε πάντως περίπτωση, διαφαίνεται από τα παραπάνω πως η πλειονότητα των καταναλωτών (άνω του 90%) είναι πολύ δεκτική στην επέμβαση στο φορτίο τους από ηλεκτρικές εταιρίες, εάν το οικονομικό κίνητρο είναι σημαντικό.

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή των λογισμικών που αναπτύχθηκαν για την εκτέλεση των διάφορων πιθανοτικών ροών ισχύος, καθώς και για τη μετέπειτα εισαγωγή του δυναμικού ελέγχου κατανάλωσης στις προσομοιώσεις αυτές. Συγκεκριμένα, γίνεται μια σύντομη περιγραφή των περιβαλλόντων ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκαν (MATLAB και OpenDSS) και των βασικών λειτουργιών τους. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι απαιτήσεις του συστήματος για τα συγκεκριμένα προγράμματα, και παρουσιάζεται η πλήρης διαδικασία που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση, δηλαδή ο τρόπος εισαγωγής δεδομένων, η επεξεργασία τους και τα αποτελέσματα που εξάγονται. Τέλος, παρουσιάζεται η λειτουργία των αρχείων (m-files) και η δομή των λογισμικών.

5.2 ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΗΣ MATLAB

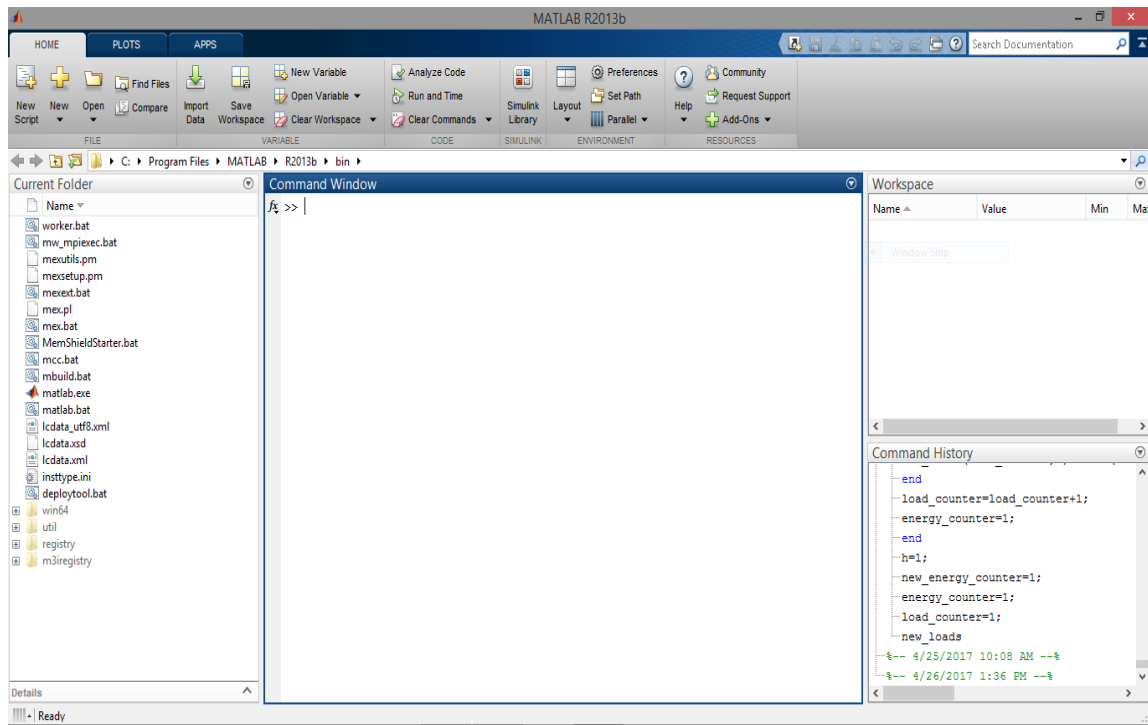
Το περιβάλλον της MATLAB (έκδοση R2013a) χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των νέων δεδομένων υπό δυναμικό έλεγχο κατανάλωσης, καθώς και για την υποστήριξη των επαναληπτικών διαδικασιών που είναι πολύ δύσκολο να προγραμματιστούν στο OpenDSS.

Η MATLAB είναι μια γλώσσα τέταρτης γενιάς διαδραστικού περιβάλλοντος που επιτρέπει στο χρήστη να κάνει τεχνικούς υπολογισμούς. Η κύρια χρήση της απαντάται στην επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, από πολύ απλά έως πολύπλοκα, προσφέροντας επιπλέον μια τεράστια γκάμα εργαλείων, από οικονομικά έως και βιολογικά. Πέραν της απλής επίλυσης προβλημάτων, η MATLAB κατέχει σημαντικές δυνατότητες προγραμματισμού, εφάμιλλες (και κατά περίπτωση ανώτερες) των συμβατικών γλωσσών όπως η C++ ή η Python, έχοντας όμως το μειονέκτημα της ταχύτητας λειτουργίας: όταν το πρόγραμμα είναι σημαντικής υπολογιστικής πολυπλοκότητας, η MATLAB είναι πιο αργή. Ένα ακόμα τεράστιο πλεονέκτημά της είναι η δυνατότητα διασύνδεσης με εξωτερικά λογισμικά, το οποίο επιτρέπει εξωτερικό προγραμματισμό και χρήση της MATLAB μόνο για υπολογισμούς χωρίς επιπλέον επιβάρυνση, αναλαμβάνει δηλαδή σημαντικότερο υποστηρικτικό ρόλο. Η δυνατότητα αυτή, μεταξύ άλλων, θα αξιοποιηθεί στο έπακρο στην παρούσα εργασία.

Οι βασικές εντολές της χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις εντολές ελέγχου ροής (if) και τις εντολές επαναληπτικών διαδικασιών (for, while). Σε επόμενη ενότητα θα φανεί η ανάγκη για τη χρήση των εντολών αυτών. Συνοπτικά η γλώσσα MATLAB έχει τις ακόλουθες δυνατότητες, όλες εκ των οποίων θα αξιοποιηθούν στις προσομοιώσεις της εργασίας αυτής:

- Μαθηματικούς/αριθμητικούς υπολογισμούς
- Ανάπτυξη αλγορίθμων
- Μοντελοποίηση και αναπαράσταση
- Ανάλυση και γραφική παρουσίαση δεδομένων

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται μια βασική επισκόπηση του λειτουργικού συστήματος της MATLAB, ενώ αμέσως μετά περιγράφονται τα βασικότερα μέρη του:



Σχήμα 5.1: Το περιβάλλον της MATLAB

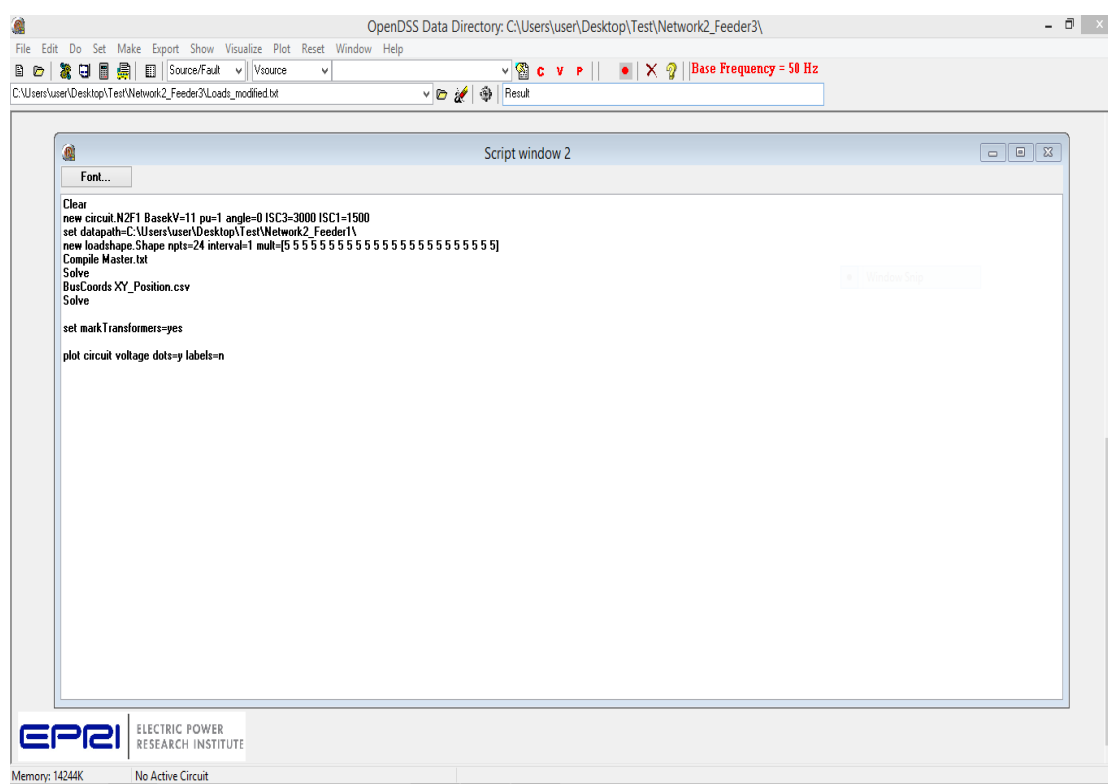
- **Command window (παράθυρο εντολών):** Μέσα στο παράθυρο αυτό γράφονται οι εντολές, δίνεται η εντολή εκτέλεσής τους και εμφανίζονται τα αποτελέσματα των πράξεων, δηλαδή γίνονται όλες οι αλληλεπιδράσεις του χρήστη με το πρόγραμμα
- **Command history (ιστορικό εντολών):** Σε αυτό το παράθυρο φαίνονται οι εντολές που εκτέλεσε ο χρήστης και αν θέλει μπορεί να τις αντιγράψει ή να τις σύρει (drag and drop) στο παράθυρο εντολών.
- **Workspace (χώρος εργασίας):** Ο χώρος διεκπεραίωσης των πράξεων είναι ο βασικός χώρος λειτουργίας του προγράμματος. Ο χώρος αυτός βρίσκεται στη μνήμη του υπολογιστή και μέσα σε αυτόν εκτελούνται οι πράξεις και ταυτόχρονα διατηρούνται όλα τα αποτελέσματά τους, με σκοπό να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επόμενες πράξεις.
- **Current directory (τρέχων κατάλογος):** Είναι το σημείο αναφοράς των αρχείων του προγράμματος. Αν είναι επιθυμητό να κληθεί μια συνάρτηση ή ένα m-file πρέπει να βρίσκεται στον τρέχοντα κατάλογο.

Να σημειωθεί για λόγους πληρότητας πως η αποθήκευση όλων των εντολών και του γενικότερου κώδικα όλων των προσομοιώσεων γίνονται σε ενιαία αρχεία που μπορούν να καλούνται άμεσα (ολόκληρα ή υπορουτίνες αυτών) από το παράθυρο εντολών. Τα αρχεία αυτά, τα επονομαζόμενα m-files, μπορεί να κατασκευάσει εύκολα ο χρήστης μέσω MATLAB.

5.3 ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ OPENDSS

Το περιβάλλον του OpenDSS (Open Distributed System Simulator) χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για τον υπολογισμό της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος σε κάθε σημείο ενδιαφέροντος στα υπό εξέταση δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Η λειτουργία του ανάγεται στην εισαγωγή των δεδομένων ενός ΣΗΕ και της εκτέλεσης μιας επαναληπτικής μεθόδου για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων (συνήθως Newton-Raphson, μπορεί όμως να αλλάξει). Ένα βασικό του πλεονέκτημα, που το καθιστά ανώτερο από άλλες πλατφόρμες (π.χ. Matpower), είναι η πολύ εύκολη εισαγωγή πολλαπλών αρχείων (txt. Files, csv. Files) τεράστιου όγκου πληροφοριών, επιτρέποντας έτσι την κατασκευή ΣΗΕ εκατοντάδων ζυγών με λίγες μόνο

γραμμές κώδικα [37]. Οι όποιες μεταβολές (προσθήκες/αφαιρέσεις) μπορούν να γίνουν με την ίδια ευκολία. Επιπλέον, υπάρχει τεράστια ποικιλία δυνατοτήτων προσομοίωσης, από απλές (ροή ισχύος στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας), μέχρι πολύπλοκες (όλων των ειδών τα βραχυκυκλώματα/ανοικτοκυκλώματα, μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας). Ακόμη, υπάρχει η δυνατότητα αναπαράστασης πολλών “πλευρών” του δικτύου, όπως σχηματική αναπαράσταση, διαγράμματα πυκνότητας τάσεων, ρεύματος και ισχύος και χρονικές εξελίξεις των εν λόγω μεγεθών, όλα εκ των οποίων θα ήταν αρκετά πιο δύσκολο να πραγματοποιηθούν με πιο συμβατικά εργαλεία. Το μεγαλύτερο όμως πλεονέκτημα του OpenDSS είναι η δυνατότητα εκτέλεσης ασύμμετρων ροών ισχύος, το οποίο αποτελεί μια λογική απαίτηση, καθώς τόσο τα οικιακά φορτία, όσο και τα LCT μπορούν να είναι μονοφασικά, διφασικά ή τριφασικά. Η δυνατότητα αυτή δεν υπάρχει σε αρκετά λογισμικά ροής ισχύος, τα οποία κάνουν συνήθως χρήση του α.μ. συστήματος (υποθέτοντας τριφασική συμμετρία του ΣΗΕ) για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών του μεγεθών. Να σημειωθεί για λόγους πληρότητας ότι το λογισμικό OpenDSS είναι διαθέσιμο δωρεάν στον ιστότοπο <https://sourceforge.net/projects/electricdss/>.



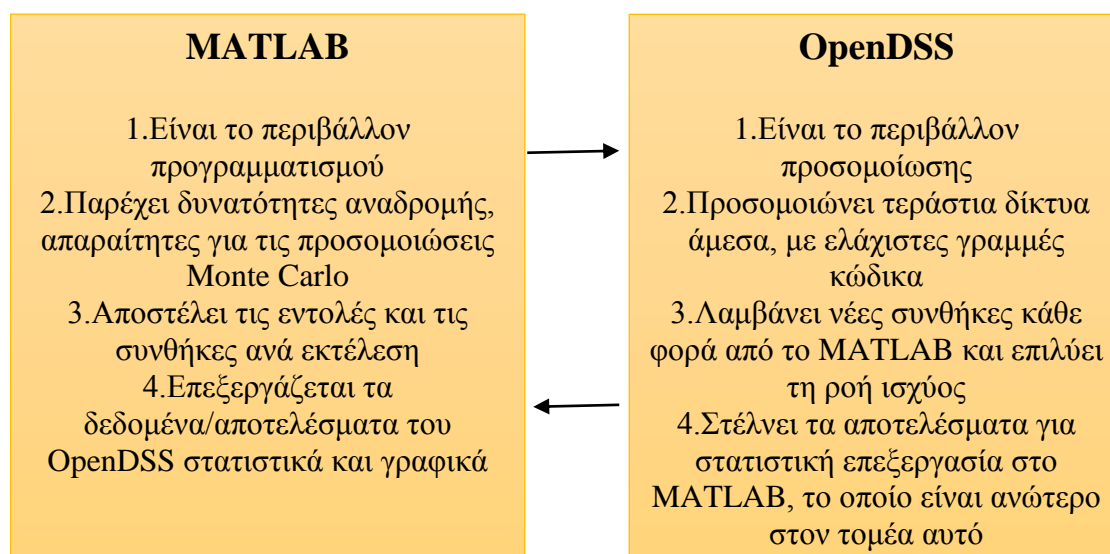
Σχήμα 5.2: Το περιβάλλον του OpenDSS

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η βασική επιφάνεια εργασίας του OpenDSS. Η σχεδίαση του ΣΗΕ γίνεται στην επιφάνεια προγραμματισμού (script window), είτε μέσω εισαγωγής έτοιμων αρχείων (πραγματικά ΣΗΕ, προϋπάρχοντα αρχεία μη πραγματικών ΣΗΕ), είτε στοιχείο-στοιχείο (συνήθως για μικρότερα ΣΗΕ ή για εξάσκηση). Για κάθε στοιχείο που δημιουργείται, ο χρήστης μπορεί να είναι από εξονυχιστικά ακριβής (πχ. αντίδραση μηδενικής ακολουθίας φορτίου) μέχρι απλά βασικός (οι μη απαραίτητες τιμές που δεν προσδιορίζονται λαμβάνουν προκαθορισμένη από το πρόγραμμα τιμή). Ο συνολικός κώδικας περνάει στη συνέχεια από τη διαδικασία της μεταγλώττισης (compile) και αν δεν υπάρχει κάποιο λάθος (συντακτικό ή υπολείπεται κάποια απαραίτητη τιμή) μπορεί πλέον να εκτελεστεί, δηλαδή να πραγματοποιηθεί η ροή ισχύος. Να σημειωθεί πως απαιτείται σε κάθε περίπτωση να ορισθεί και το είδος της ροής ισχύος που απαιτείται από το χρήστη (στατική, δυναμική, ασύμμετρη, με ύπαρξη βραχυκυκλώματος κλπ.) [37].

Στο πάνω μέρος της επιφάνειας εργασίας εμφανίζεται το σύνολο των δυνατοτήτων του OpenDSS, καθώς και συντομεύσεις των βασικότερων από αυτές. Συνοπτικά, οι δυνατότητες του λογισμικού είναι οι παρακάτω:

- File: Βασικές λειτουργίες όπως αποθήκευση, διαγραφή, μεταγλώττιση (compile), ανακατεύθυνση αρχείου.
- Edit: Υποστηρικτικές λειτουργίες επέμβασης επί του αρχείου καθώς και εγγραφή (recording) του αρχείου.
- Do: Λειτουργίες εκτέλεσης επί του κώδικα του ΣΗΕ, όπως υπολογισμός βασικών επιπέδων τάσης, δειγματοληψία από τους μετρητές ή διαμοιρασμός φορτίων.
- Set: Λειτουργίες καθορισμού μονίμως σταθερών μεγεθών, όπως η συχνότητα του ΣΗΕ, το είδος του φορτίου ή το ποσοστό ανάπτυξης του ΣΗΕ στο πεδίο του χρόνου.
- Make: Τρεις λειτουργίες σύνοψης, κατασκευή λίστας ζυγών, δημιουργία αντίστοιχου συστήματος θετικής ακολουθίας, κατασκευή μήτρας Y.
- Export: Εξαγωγή στοιχείων ή αποτελεσμάτων, όπως τάσεις, συντεταγμένες ζυγών, ρευμάτων σφάλματος ή υπερφορτίσεων σε αρχείο csv.
- Show: Λειτουργίες καταγραφής στοιχείων ή αποτελεσμάτων (συνήθως σε αρχείο txt.), όπως τάση, αμφίδρομη ροή ισχύος ή λήψη του ΣΑΤΥΦ.
- Visualize: Τρεις λειτουργίες τριφασικής αναπαράστασης τάσης, ρεύματος και ισχύος από και προς την κεντρική πηγή τροφοδότησης.
- Plot: Λειτουργίες απεικόνισης, όπως σχηματική αναπαράσταση του ΣΗΕ, συμπεριφορά ενός φορτίου ή σχεδίαση του προφίλ της τάσης.
- Reset: Λειτουργίες μηδενισμού διαφόρων στοιχείων, όπως των μετρητών, των βραχυκυκλωμάτων ή όλων των στοιχείων.
- Window: Λειτουργίες επαναδιαμόρφωσης της επιφάνειας εργασίας.
- Help: Βοήθεια για εντολές, δυνατότητες του OpenDSS και γενικά για το λογισμικό.

5.4 Η ΑΜΟΙΒΑΙΑ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ MATLAB-OPENDSS



Σχήμα 5.3: Απεικόνισή της διεπικοινωνίας των χρησιμοποιούμενων λογισμικών

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται συνοπτικά η συνεργατική διεπικοινωνία που χρησιμοποιούν τα λογισμικά MATLAB και OpenDSS. Η δυνατότητα αυτή είναι κομβική για τη διενέργεια της μελέτης που θα πραγματοποιηθεί. Να σημειωθεί στο σημείο αυτό πως δεν θα ήταν δυνατή η εκτέλεση της προσομοίωσης Monte Carlo με τη χρήση μόνο ενός από τα προγράμματα, καθώς κάτι τέτοιο όμως θα ήταν είτε εξαιρετικά πολύπλοκο και χρονοβόρο, είτε πρακτικά ακατόρθωτο (ασύμμετρη ροή ισχύος). Η δυνατότητα συνδυαστικής λειτουργίας των δύο λογισμικών απλοποιεί εξαιρετικά τα πράγματα, εκμεταλλευόμενη τις δυνατότητες του ενός για να απαλείψει τις αδυναμίες του άλλου. Αξίζει η επεξήγηση των σημείων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.3 για καλύτερη κατανόηση της συνεργασίας, καθώς και της ανάγκης για αυτή.

Η MATLAB είναι μια κλασική γλώσσα προγραμματισμού, σχεδιασμένη με έμφαση στις αυξημένες μαθηματικές δυνατότητες. Μολονότι θα μπορούσε θεωρητικά να εκτελέσει τη δουλειά του OpenDSS, αυτό θα απαιτούσε τη μαθηματικοποίηση ενός μεγάλου όγκου πληροφοριών (τα δίκτυα διανομής), καθώς και την ανάγκη ανάπτυξης κώδικα για τη μαθηματική μέθοδο που θα είχε χρησιμοποιηθεί, δηλαδή την ασύμμετρη τριφασική ροή ισχύος. Μια επαναληπτική μέθοδος που θα λειτουργούσε για εκατοντάδες κόμβους θα ήταν φυσικά απαγορευτικού βαθμού πολυπλοκότητας. Από την άλλη, το OpenDSS δεν αντιμετωπίζει μεν τους περιορισμούς αυτούς στις προσομοιώσεις, είναι όμως μια γλώσσα στατική, προσομοιώνει δηλαδή μία μοναδική κατάσταση λειτουργίας. Καθώς έχει σχεδιαστεί για ακριβώς αυτό τον σκοπό, μπορεί να εκτελέσει την ασύμμετρη τριφασική ροή ισχύος σε μερικά δέκατα του δευτερολέπτου, ακόμη και για τα πιο σύνθετα δίκτυα, τόσο από πλευράς σύνθεσης, όσο και από πλευράς συμπεριφοράς των στοιχείων τους. Όμως, πρόκειται για γλώσσα στατική, δεν μπορεί παρά να προσομοιώσει μία και μοναδική λειτουργική κατάσταση κάθε φορά. Προκειμένου να υπάρξει μεταβολή των συνθηκών, όσο απλή και αν είναι αυτή, απαιτείται εξωτερική επέμβαση από τον χρήστη. Εύκολα γίνεται αντιληπτό πως σε μια διαδικασία Monte Carlo, στην οποία μάλιστα εμπλέκονται χιλιάδες τυχαίες επιλογές και αλλαγές, δεν είναι δυνατόν ο χρήστης να παρεμβαίνει ‘‘χειροκίνητα’’ κάθε φορά, καθώς τότε η όλη διαδικασία (για συγκεκριμένο συνδυασμό LCT, δικτύου και επιπέδου διείσδυσης) θα απαιτούσε πάρα πολλές ώρες για να ολοκληρωθεί, ενώ μέσω συνεργασίας MATLAB και OpenDSS, η όλη προσομοίωση Monte Carlo απαιτεί κάτω του ενός λεπτού. Η συνεργασία των δύο λογισμικών επιτρέπει την εύκολη υπερπήδηση των εμποδίων που θα υπήρχαν εάν χρησιμοποιούταν ένα μόνο από αυτά.

Πέραν όμως της καθαρής διαδικασίας της προσομοίωσης, η συνεργασία των δύο λογισμικών είναι απαραίτητη στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων και των στοιχείων που

προκύπτουν. Το MATLAB μπορεί να συμπύξει, να ομαδοποιήσει και να διαχειριστεί τα αποτελέσματα σε πολλαπλές μορφές και πολύ αποδοτικότερα από άλλα λογισμικά και ειδικά το OpenDSS, το οποίο δεν μπορεί από μόνο του να παράγει αποτελέσματα πολλαπλών καταστάσεων. Από τη άλλη, το OpenDSS έχει αυξημένες δυνατότητες απεικόνισης ηλεκτρικών δεδομένων που θα ήταν διαφορετικά αδύνατον να απεικονισθούν μέσω του MATLAB, όπως για παράδειγμα η υπό κλίμακα πραγματική μορφολογία του δικτύου, η ανά περιοχή πυκνότητα ισχύος, ή η διασπορά της τάσης. Η συνεργασία των δύο λογισμικών επιτρέπει την πλήρη εκμετάλλευση των προσφερόμενων δυνατοτήτων για μέγιστη εξαγωγή πληροφοριών από τις προσομοιώσεις. Τέλος, να τονισθεί για μία ακόμη φορά πως το μεγάλο πλεονέκτημα της όλης διαδικασίας είναι η αρμονική συνύπαρξη και λειτουργία των δυο λογισμικών και όχι η ανεξάρτητη συμπληρωματικότητα, όπως έχουν άλλα προγράμματα.

Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται το αρχικό κομμάτι του κώδικα που χρησιμοποιείται για μία από τις προσομοιώσεις του δικτύου N2F5 προς καλύτερη κατανόηση της συνεργασίας των δύο λογισμικών σε επίπεδο προγραμματιστικό. Η φράση 'DSSText.Command' υποδεικνύει την εκκίνηση χρήσης εντολής αποκλειστικά του OpenDSS, η οποία γίνεται φυσικά μέσω του MATLAB. Ό,τι βρίσκεται εντός των '' αποτελεί μια τέτοια εντολή (εντολή ηλεκτρικού χαρακτήρα), ενώ ό,τι βρίσκεται εκτός των '' αποτελεί εντολή του MATLAB (μαθηματική εντολή). Σημαντικό να παρατηρήσει κανείς το τεράστιο πλεονέκτημα που δημιουργεί η διεπικοινωνία των λογισμικών, που είναι φυσικά η χρήση συνδυαστικών εντολών, που χρησιμοποιούν χαρακτηριστικά και των δύο λογισμικών, και των οποίων οι εγγενείς δυνατότητες είναι πολύ ανώτερες από αυτές των συμβατικών εντολών. Παρατηρεί κανείς πως άπαξ και ορισθεί η σύνδεση των λογισμικών, είναι δυνατός ο πλήρης έλεγχος του OpenDSS μέσω MATLAB.

```

DSSObj=actxserver('OpenDSSEngine.DSS'); %Σύνδεση με το OpenDSS
DSSText=DSSObj.Text; %Ορισμός κειμένου διεπαφής
Monte_Carlo=1; %Define the Monte Carlo run counter
i=1; j=1; k=1; l=1; m=1; n=1; o=1; %Ορισμός μετρητών εσωτερικών βρόχων
LCT_buses=zeros([1 6]); %Ορισμός του μετρητή κόμβων LCT
buses=[124 125 139 142 149 151 159 160 161 167 173 178 194 200 216 222 232 238 243 256 268
274 308]; %Ορισμός των κόμβων καταναλωτών
for Monte_Carlo=1:100 %Ορισμός κεντρικού βρόχου Monte Carlo στις 100 επαναλήψεις
DSSText.Command='Clear'; %Εκκαθάριση προηγούμενης μνήμης OpenDSS
DSSText.Command='new circuit.N2F5 BasekV=11 pu=1 angle=0 ISC3=3000 ISC1=1500';
%Ορισμός νέου δικτύου
DSSText.Command=['set casename=Run',num2str(Monte_Carlo)]; %Ορισμός ονόματος
λειτουργικής κατάστασης.
DSSText.Command='Set DefaultBaseFrequency=50'; %Ορισμός συχνότητας στα 50Hz
DSSText.Command='set datapath=C:\Users\user\Desktop\Test\Network2_Feeder5\';
%Ορισμός της τοποθεσίας των αρχείων εισόδου
DSSText.Command='compile LineCode.txt'; %Ορισμός κώδικα γραμμών μεταφοράς
DSSText.Command='compile Lines.txt'; %Ορισμός γραμμών μεταφοράς
DSSText.Command='compile Transformers.txt'; %Ορισμός μετασχηματιστή
DSSCircuit=DSSObj.ActiveCircuit; %Ορισμός μεταβλητής μελετούμενου δικτύου
DSSSolution=DSSCircuit.Solution; %Ορισμός μεταβλητής αναμενόμενης λύσης
ControlQueue=DSSCircuit.CtrlQueue; %Ορισμός μεταβλητής ουράς δεδομένων ελέγχου
Load_profile_column=randperm(100,23); %Επιλογή τυχαίων προφίλ φορτίων από την υπάρχουσα
δεξαμενή
for i=1:23 %Βρόχος ορισμού προφίλ φορτίων
DSSText.Command = ['new loadshape.Shape_',num2str(i), ' npts=288 minterval=5
mult=(file=Summer_Load_Profiles_Test.csv,column=',num2str(Load_profile_column(i)),');
end
DSSText.Command='compile Loads.txt'; %Ορισμός φορτίων, η συμπεριφορά των οποίων
καθορίζεται από τον προηγούμενο βρόχο

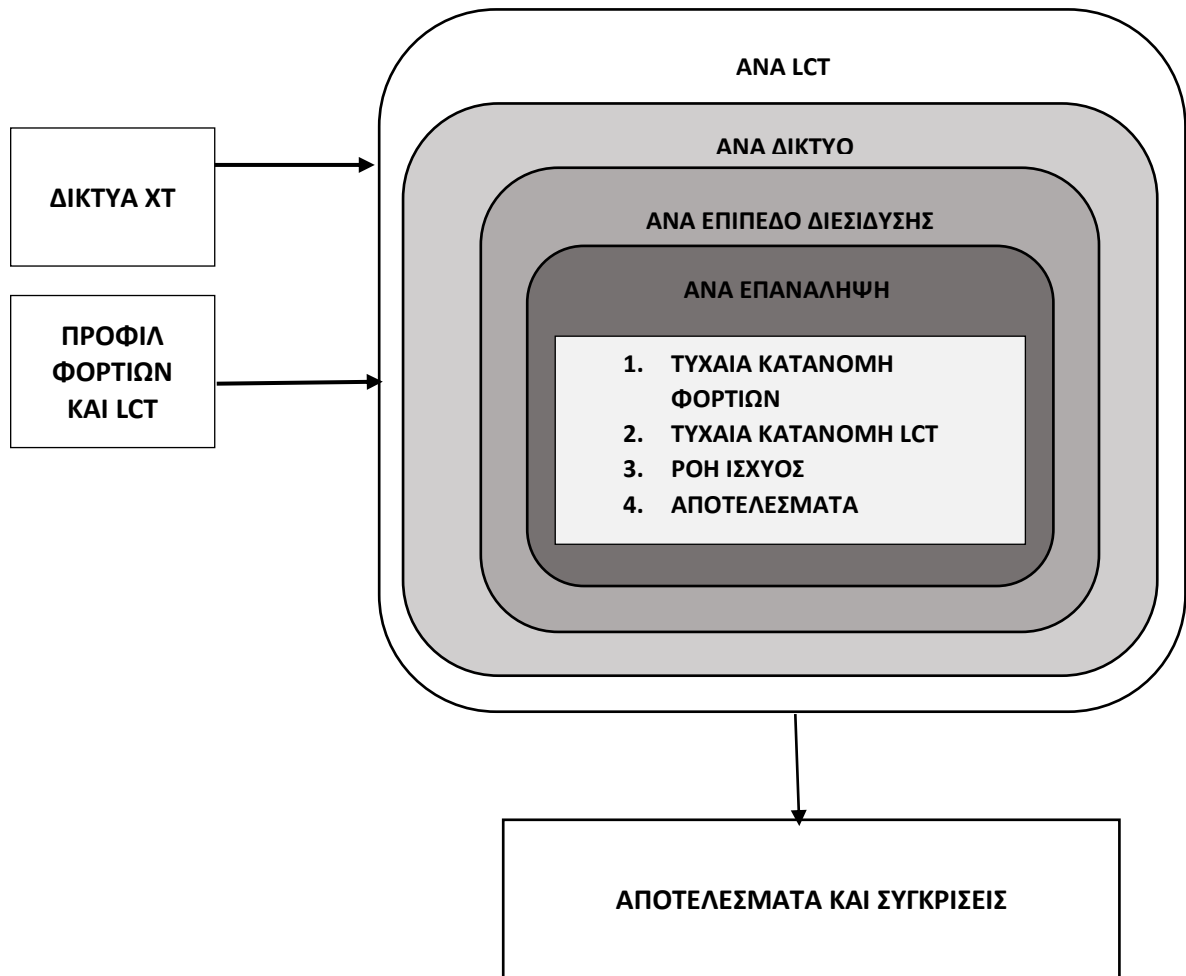
```

Σχήμα 5.4: Παράδειγμα χρήσης του OpenDSS μέσω της MATLAB

5.5 Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Η συνολική προσομοίωση (ο συνδυασμός των επιμέρους βημάτων της) είναι σχετικά πολύπλοκη μέθοδος πολλών βημάτων, οπότε κρίθηκε απαραίτητο να παρουσιαστεί αναλυτικά ανά τμήμα, το οποίο και πραγματοποιείται στις παρακάτω υποενότητες.

5.5.1 Υπολογισμοί Ροής Ισχύος



Σχήμα 5.5: Αλγόριθμος εκτέλεσης προσομοίωσης Monte Carlo ([6])

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται συνοπτικά ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση της προσομοίωσης Monte Carlo (των 100 επαναλήψεων) προς υπολογισμό των ζητούμενων ηλεκτρικών μεγεθών που μελετήθηκαν. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.5, τα σταθερά δεδομένα εισόδου είναι τα στοιχεία των δικτύων ΧΤ και τα προφίλ φορτίων και LCT, ενώ τα δεδομένα εξόδου είναι προφανώς τα συνολικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Για την καλύτερη κατανόησή του, ο αλγόριθμος (όχι ο κώδικας) παρουσιάζεται κωδικοποιημένα παρακάτω:

Αλγόριθμος 1

1. Ξεκίνα την προσομοίωση Monte Carlo
2. Όρισε $i=1$
3. Επέλεξε το LCT που θα μελετηθεί
4. Επέλεξε το δίκτυο στο οποίο θα μελετηθεί το επιλεγθέν LCT
5. Όρισε $n = (\text{αριθμός ζυγών φορτίου του επιλεγθέντος δικτύου})$
6. Επέλεξε το επίπεδο διείσδυσης του LCT # 0 μέχρι 1, με βήμα του 0.1
7. Όρισε $p = n * (\text{επίπεδο διείσδυσης})$
8. Για i από 1 έως 100
9. Ξεκίνα την επανάληψη υπ' αριθμόν i
10. Επέλεξε τυχαία n προφίλ φορτίων και κατάνεμέ τα τυχαία στους ζυγούς φορτίου
11. Επέλεξε τυχαία $n * p$ προφίλ LCT και κατάνεμέ τα τυχαία σε $n * p$ ζυγούς φορτίου
12. Εκτέλεσε τη ροή ισχύος παίρνοντας ταυτόχρονα μετρήσεις
13. Εξήγαγε τα αποτελέσματα
14. Αήξε την επανάληψη υπ' αριθμόν i
15. Αήξε την προσομοίωση Monte Carlo

Να σημειωθεί τέλος ότι η επίλυση της ροής ισχύος γίνεται σε κάθε επανάληψη από το πρόγραμμα OpenDSS. Η μέθοδος επίλυσης που χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι η Newton-Raphson.

5.5.2 Υπολογισμοί για Έλεγχο Κατανάλωσης

Η όλη ιδέα του δυναμικού ελέγχου κατανάλωσης περιστρέφεται γύρω από την επαναδιαμόρφωση του ενεργειακού προφίλ των καταναλωτών όσο πιο κοντά στην επιθυμητή μορφή προκειμένου να ικανοποιούνται οι στόχοι. Όσον αφορά την παρούσα εργασία, η μέθοδος αυτή έχει ρόλο υποστηρικτικό, που ουσιαστικά θα επαναδιαμορφώνει τις συνθήκες εκτέλεσης του Αλγορίθμου 1. Η συνολική μέθοδος έχει διάφορους τρόπους εφαρμογής, ανάλογα με τον τρόπο επέμβασης που επιλέγεται, όπως αυτοί αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3. Ειδικότερα, ανάλογα με τη μέθοδο επέμβασης που επιλέγεται, ο Αλγόριθμος 1 μεταβάλλεται ως εξής:

Αλγόριθμος Strategic Load Growth

1. Εκτέλεσε τα βήματα 1 μέχρι 11 του Αλγορίθμου 1
2. Επέλεξε τυχαία $n * p$ ζυγούς φορτίου και εγκατέστησε σε αυτούς EV
3. Επέβαλε σε όλα τα EV το προκαθορισμένο προφίλ τους για την περίπτωση των PV
4. Εκτέλεσε τα βήματα 12 μέχρι 15 του Αλγορίθμου 1

Αλγόριθμος Valley Filling

1. Εκτέλεσε τα βήματα 1 μέχρι 11 του Αλγορίθμου 1
2. Επέλεξε τυχαία $n * p$ ζυγούς φορτίου και εγκατέστησε σε αυτούς τα SD
3. Επέβαλε σε όλα τα SD το προκαθορισμένο προφίλ τους για την περίπτωση των PV
4. Εκτέλεσε τα βήματα 12 μέχρι 15 του Αλγορίθμου 1

Αλγόριθμος Load Shifting

1. Εκτέλεσε τα βήματα 1 μέχρι 11 του Αλγορίθμου 1
2. Επέλεξε τυχαία $n * p$ ζυγούς φορτίου και εγκατέστησε σε αυτούς τα SD
3. Επέβαλε σε όλα τα SD το προκαθορισμένο προφίλ τους για την περίπτωση των EHP
4. Εκτέλεσε τα βήματα 12 μέχρι 15 του Αλγορίθμου 1

Αλγόριθμος Strategic Conservation

1. *Εξήγαγε τα νέα προφίλ κατανάλωσης μέσω του προγράμματος DRQDT*
2. *Εκτέλεσε τον Αλγόριθμο 1*

Αλγόριθμος Flexible Load

1. *Εκτέλεσε τον Αλγόριθμο 1*
2. *Όρισε το αναμενόμενο ημερήσιο προφίλ της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας*
3. *Σύγκρισε τα ωριαία ενεργειακά αποτελέσματα του δικτύου με τις προκαθορισμένες αποδεκτές ενεργειακές ωριαίες τιμές*
4. *Καθόρισε τις αναμενόμενες αλλαγές τιμών και τις οικονομικές ελαφρύνσεις/πρόστιμα βάσει των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το Βήμα 3 (σημείωση: ο καθορισμός αυτός γίνεται με βάση τη μέθοδο που αναπτύσσεται στο [38])*
5. *Επέλεξε τυχαία $n * p$ ζυγούς φορτίου που θα ακολουθήσουν τη μέθοδο flexible load*
6. *Επανακαθόρισε το καταναλωτικό προφίλ των φορτίων των ζυγών αυτών βάσει του Βήματος 4*
7. *Εκτέλεσε τον Αλγόριθμο 1 χρησιμοποιώντας τα προφίλ που προκύπτουν από το Βήμα 6*

5.6 Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Επιγραμματικά και για λόγους πληρότητας περιγράφεται η συνολική τεχνική διαδικασία της προσομοίωσης που ακολουθήθηκε, από τα αρχικά δεδομένα μέχρι τα τελικά αποτελέσματα.

5.6.1 Εισαγωγή Δεδομένων

Με εξαίρεση την εκτέλεση των προσομοιώσεων και την τοπογραφική σχεδίαση των ΣΗΕ, το OpenDSS δεν εκτελεί κάποια επιπλέον λειτουργία. Η διαχείριση των δεδομένων, καθώς και ο έλεγχος του λογισμικού, γίνεται αποκλειστικά μέσω της MATLAB, με τη βοήθεια εντολών που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 5.4. Τα δεδομένα των ΣΗΕ (χαρακτηριστικά γραμμών διανομής και κόμβων, ενεργειακοί μετρητές, κεντρικός Υ/Σ) υπάρχουν σε μορφή αρχείων txt (παράδειγμα γραμμής διανομής: New Line.LINE21 Bus1=20 Bus2=22 phases=3 Linecode=2c_.007 Length=0.041976 Units=m) και εισάγονται στο OpenDSS μέσω της εντολής compile (ή της εντολής redirect). Τα τεχνικά δεδομένα φορτίων και LCT ακολουθούν την ίδια λογική.

Τα προφίλ φορτίων και LCT υπάρχουν σε μορφή αρχείων csv και εισάγονται μέσω της εντολής file=filename.csv, όπου filename το όνομα του αντίστοιχου αρχείου. Κάθε τέτοιο αρχείο απαρτίζεται από 200 στήλες των 288 στοιχείων έκαστο, με την επιλογή των στηλών να γίνεται τυχαία μέσω ειδικά διαμορφωμένης γεννήτριας τυχαίων αριθμών. Τέλος, λοιπά στοιχεία προγραμματιστικής φύσης (δείκτες, μετρητές) εισάγονται απευθείας στη MATLAB με απλούς ορισμούς (πχ. $i=1$;). Να τονισθεί ακόμη μία φορά πως η διαδικασία αυτή εκτελείται 100 φορές ανά δίκτυο, LCT και επίπεδο διείσδυσης LCT, με διαφορετικά πάντα στοιχεία, άρα και αποτελέσματα.

5.6.2 Προσομοίωση και Εξαγωγή Δεδομένων

Ύστερα από την εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων και τον καθορισμό των συνθηκών προσομοίωσης, εκτελείται η τελική προσομοίωση από το OpenDSS (μέσω MATLAB) με την εντολή solve. Πριν την εκτέλεση της προσομοίωσης, σχεδιάζεται το ΣΗΕ μέσω της εντολής plot, το οποίο και πραγματοποιείται άμεσα. Η ίδια η εκτέλεση από το OpenDSS είναι σχεδόν ακαριαία, ενώ δεν παρατηρείται καμία ουσιαστική διαφορά ανά διαφορετικό μέγεθος δικτύου στους χρόνους εκτέλεσης. Αφού εκτελεσθεί η προσομοίωση, τα

αποτελέσματα (δηλαδή τάση, ρεύμα, ισχύς ανά φάση που καταγράφουν οι ενεργειακοί μετρητές ανά φορτίο) εξάγονται ως αρχεία csv. προς ευκολότερη επεξεργασία τους. Να σημειωθεί πως ο συνολικός αριθμός αρχείων που προκύπτουν ανά δίκτυο, ανά LCT και ανά επίπεδο διείσδυσης υπολογίζεται ως (100 επαναλήψεις Monte Carlo) * (αριθμός ενεργειακών μετρητών/φορτίων δικτύου). Στο σύνολο όλων των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν στην εργασία αυτή, το σύνολο όλων των αρχείων csv που αφορούν αποτελέσματα ανέρχεται στα 3,098,700.

Η συνολική διαδικασία της προσομοίωσης, παρά τις αστραπιαίες υπολογιστικές δυνατότητες του OpenDSS, είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα, το οποίο αποδίδεται κυρίως στη MATLAB. Ενδεικτικά, ο πραγματικός χρόνος εκτέλεσης που την αφορά, από την εκκίνηση της προγραμματιστικής διαδικασίας μέχρι και την ολοκλήρωση μίας πλήρους προσομοίωσης, για ένα δίκτυο, ένα LCT και ένα επίπεδο διείσδυσης, είναι ο παρακάτω:

- 1 πλήρης προσομοίωση Monte Carlo: 5-15 δευτερόλεπτα (ανάλογο του μεγέθους του δικτύου)

Γίνεται εύκολα αντιληπτό πως η χρονική διάρκεια δεν είναι μικρή, με το μικρότερο μόλις δίκτυο (23 φορτία) να απαιτεί από 2 έως 4 λεπτά για να προσομοιωθεί, ενώ το μεγαλύτερο (175 φορτία) μπορεί να απαιτήσει από ένα τέταρτο μέχρι και μισή ώρα. Στο σύνολο όλων των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν στην εργασία αυτή, το σύνολο του χρόνου εκτέλεσης που αφορά μόνο τις εκτελέσεις Monte Carlo κυμαίνεται μεταξύ 36 και 110 ωρών.

5.6.3 Σύνοψη και Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

Προφανώς, η επεξεργασία ενός τόσο μεγάλου αριθμού αρχείων είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και θα πρέπει επομένως να συνοψισθούν προς ευκολότερη προσπέλαση. Θα πρέπει να κατασκευαστούν ενιαία αρχεία ανά ενεργειακό μετρητή που να καταγράφουν τη συνολική συμπεριφορά των καταναλωτών από τις 100 προσομοιώσεις Monte Carlo, τα οποία είναι πολύ ευκολότερα στην προσπέλαση και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Οι διαδικασίες αυτές (σύνοψη αρχείων και προσπέλασή τους) γίνονται επίσης μέσω MATLAB. Ο τρόπος με τον οποίο επιτεύχθηκαν τα παραπάνω δεν ήταν σε καμία περίπτωση ο βέλτιστος δυνατός, ήταν όμως αποτελεσματικός. Οι χρόνοι εκτέλεσης που αφορούν τις δύο αυτές διαδικασίες (πάντα ανά δίκτυο, LCT και επίπεδο διείσδυσης) είναι οι παρακάτω:

- 1 πλήρης σύνοψη αποτελεσμάτων ανά καταναλωτή: 70-80 δευτερόλεπτα
- 1 πλήρης επεξεργασία αποτελεσμάτων ανά καταναλωτή: 20-30 δευτερόλεπτα

Επομένως, το μικρότερο μόλις δίκτυο απαιτεί από 35 έως 45 λεπτά για να προσομοιωθεί, ενώ το μεγαλύτερο είναι σημαντικά πιο χρονοβόρο, απαιτώντας 4.5 με 5.5 ώρες. Στο σύνολο όλων των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν στην εργασία αυτή, το σύνολο του χρόνου εκτέλεσης που αφορά τη σύνοψη και επεξεργασία των αποτελεσμάτων κυμαίνεται μεταξύ 660 και 806 ωρών, δηλαδή περίπου ένα μήνα. Η όλη διαδικασία διήρκεσε περίπου 1.5 μήνα.

Στο ενεργειακό κομμάτι, με τον όρο επεξεργασία αποτελεσμάτων εννοείται η καταμέτρηση των φορών που παρατηρείται προβληματική κατάσταση για τον καταναλωτή (υπέρταση/υπόταση) ή/και για το δίκτυο και τον Υ/Σ (θερμική καταπόνηση) και η εξαγωγή του μέσου όρου.

Αντιλαμβάνεται κανείς πως ένας βέλτιστος τρόπος επεξεργασίας των προαναφερθέντων αρχείων θα επιτύχανε σημαντική μείωση του χρόνου εκτέλεσης, κάτι τέτοιο όμως δεν αποτελεί σε καμία περίπτωση αντικείμενο της εργασίας. Φυσικά, σε περίπτωση που ο αριθμός των προσομοιώσεων ήταν (ή θα είναι σε κάποια μελλοντική παρεμφερή εργασία) σημαντικά υψηλότερος, θα προέκυπτε υποχρεωτικά η ανάγκη για κάποια αποδοτικότερη μέθοδο.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

6.1.1 Βασικά Στοιχεία

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί και το ουσιαστικότερο της εργασίας αυτής. Στόχος είναι να ελεγχθεί το κατά πόσο τηρούνται τα όρια τάσης τα οποία έχουν καθιερωθεί. Στην περίπτωση αυτή, ακολουθείται το μοντέλο EN50160, το οποίο ορίζει ως ανώτατη τάση (υπέρταση) το 1.1 α.μ. (εδώ 253 V), κατώτατη τάση (υπόταση) το 0.85 α.μ. (εδώ 195.5 V) και μερική ανοχή υπότασης το 0.9 α.μ. (εδώ 207 V), με μέγιστο χρόνο ανοχής 5% (1.2 ώρες) επί της συνολικής ημερήσιας λειτουργίας (24 ώρες). Αυτό που ενδιαφέρει είναι η επισκόπηση της κατάστασης τόσο από την πλευρά κάθε μεμονωμένου καταναλωτή, όσο και από την πλευρά του συνολικού δικτύου.

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα πλήρη αποτελέσματα των προσομοιώσεων για όλα τα δίκτυα, όλα τα LCT, και όλες τις μεθόδους λειτουργίας. Τα αποτελέσματα και τα αντίστοιχα συμπεράσματα παρουσιάζονται κατά σειρά αυξανόμενου μεγέθους δικτύου προκειμένου να διαφανεί η σταδιακή εξέλιξή τους καθώς δυσχεραίνουν οι λειτουργικές συνθήκες όλο και περισσότερο. Να σημειωθεί εδώ πως οι διάφοροι κωδικοί που αναθέτονται στα δίκτυα απαιτούν προσωπικές επιλογές του συγγραφέα και δεν εμπεριέχουν επιπλέον πληροφορίες.

Πριν παρουσιασθούν τα αποτελέσματα, να τονισθεί πως μελετώνται 3 βασικές παράμετροι: ο μέσος αριθμός προβληματικών περιόδων που εμφανίζονται, η μέση χρονική διάρκεια (ποσοστό επί 24ώρου) και το ποσοστό καταναλωτών που αντιμετωπίζουν προβλήματα εξυπηρέτησης φορτίου για τουλάχιστον ένα πεντάλεπτο (διάστημα μελέτης), δηλαδή αυτών των οποίων παραβιάζονται τα όρια τάσης που έχουν τεθεί. Επιπλέον, κρίνεται αναγκαίο να μελετηθεί η δυνατότητα του υποσταθμού και του δικτύου να ανταπεξέλθουν στις εκάστοτε λειτουργικές συνθήκες. Για τον λόγο αυτό, εισάγονται στη μελέτη ακόμη 2 δείκτες: το ποσοστό φόρτισης του πρώτου κλάδου της γραμμής τροφοδοσίας του δικτύου και το ποσοστό φόρτισης του μετασχηματιστή τροφοδοσίας. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται διακρίνονται ανά LCT. Κάθε ένα LCT μελετάται ξεχωριστά και δεν υπάρχουν περιπτώσεις συνδυασμών αυτών. Τέλος, είναι βασικό ο αναγνώστης να γνωρίζει πως τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης είναι σχετικά. Εάν τα εμπλεκόμενα μεγέθη (φορτία, LCT, χαρακτηριστικά του δικτύου, κ.λπ.) είχαν διαφορετικές τιμές, τα αποτελέσματα που θα εξάγονταν θα ήταν ενδεχομένως διαφορετικά από τα παρόντα.

6.1.2 Δείκτες Προσομοίωσης

Για την αναπαράσταση των αποτελεσμάτων, θα χρησιμοποιηθούν συνολικά οι ακόλουθοι 5 δείκτες:

1. Μέσος Αριθμός Προβληματικών Περιόδων (Average Problematic Cases-APC): Εκτελούνται συνολικά 100 προσομοιώσεις Monte Carlo, οι οποίες είναι ημερήσιες και χωρίζονται σε 288 διακριτά διαστήματα (5λεπτα). Αθροίζονται τα προβληματικά διαστήματα (παραβίαση ορίων τάσης) από όλες τις προσομοιώσεις και διαιρούνται με το 100 προς εξαγωγή του μέσου όρου, που είναι ο μέσος όρος των προβληματικών

περιόδων. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται μια εικόνα για το πόσες φορές διαταράσσεται η αρμονική λειτουργία του δικτύου. Να σημειωθεί ότι ο δείκτης αυτός είναι καθολικός, αντιπροσωπεύει δηλαδή τη συνολική εικόνα του ΣΗΕ, ανεξαρτήτως των μεμονωμένων καταστάσεων των καταναλωτών. Πρόκειται για καθαρό αριθμό.

2. Μέση Χρονική Διάρκεια Προβληματικών Περιόδων (Average Problematic Time-APT): Είναι άμεσο προϊόν του δείκτη APC, καθώς προκύπτει ως ο λόγος των προβληματικών χρονικών περιόδων προς τη συνολική χρονική διάρκεια λειτουργίας. Στην πραγματικότητα, δεν εμπεριέχει κάποια νέα πληροφορία, εκφράζει όμως τον δείκτη APC στο πεδίο του χρόνου, το οποίο είναι βασικότατο κατά την ανάλυση. Ο δείκτης είναι καθολικός, αντιπροσωπεύει δηλαδή τη συνολική εικόνα του ΣΗΕ, ανεξαρτήτως των μεμονωμένων καταστάσεων των καταναλωτών. Εκφράζεται σε επί τοις εκατό ποσοστό.
3. Ποσοστό Καταναλωτών με Προβλήματα Τάσης (Customers with Voltage Problems-CVP): Πρόκειται για τον σημαντικότερο δείκτη της μελέτης αυτής. Αντιπροσωπεύει τον λόγο των καταναλωτών που παρουσιάζουν πρόβλημα στην εξυπηρέτησή τους (πρόβλημα τάσης) προς τον συνολικό αριθμό καταναλωτών του δικτύου. Το τεράστιο πλεονέκτημα που έχει σε σχέση με τους προηγούμενους δείκτες είναι πως πρώτον, δεν επηρεάζεται καθόλου από ακραίες καταστάσεις (πχ. εξαιρετικά ανώμαλες συμπεριφορές φορτίων), ενώ έχει χαρακτηριστικά τόσο καθολικού δείκτη (συνολική εικόνα λειτουργίας), όσο και μεμονωμένου δείκτη (κατάσταση κάθε ξεχωριστού καταναλωτή). Εκφράζεται σε επί τοις εκατό ποσοστό.
4. Ποσοστό Φόρτισης του Πρώτου Κλάδου της Γραμμής Τροφοδοσίας (Loading Level at Head of Feeder-LLHF): Πρόκειται για τον δείκτη που αντιπροσωπεύει την κατάσταση φόρτισης του πρώτου κλάδου της γραμμής τροφοδοσίας του δικτύου. Εκφράζει την καταπόνηση που υφίσταται ο πρώτος κλάδος της γραμμής τροφοδοσίας και αποτελεί το κριτήριο αξιολόγησης της γενικής καταπόνησης του δικτύου. Υπολογίζεται ως ο λόγος του μέγιστου ωριαίου ρεύματος που διαρρέει τον πρώτο κλάδο της γραμμής τροφοδοσίας προς την αντοχή του (σε A). Το ρεύμα αντικαθίσταται πολύ συχνά από την αντίστοιχη ισχύ, μέσω της εξίσωσης $MVA = \frac{\sqrt{3} * kV * amps}{1000}$. Εκφράζεται σε επί τοις εκατό ποσοστό ([39]).
5. Ποσοστό Φόρτισης του Μετασχηματιστή Τροφοδοσίας (Loading Level of Transformer-LLT): Πρόκειται για τον δείκτη που αντιπροσωπεύει τη θερμική κατάσταση του κεντρικού Μ/Σ του Υ/Σ. Εκφράζει τον βαθμό στον οποίο καλείται να δουλέψει ο Μ/Σ για να ανταπεξέλθει στην εξυπηρέτηση του δικτύου. Βασική διαφορά σε σχέση με τους υπόλοιπους δείκτες είναι πως η καταπόνηση του Μ/Σ εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από το είδος του LCT, και όχι από τη τοπολογία του δικτύου. Υπολογίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ωριαίας φαινόμενης ισχύος προς την ονομαστική ισχύ του Μ/Σ. Εκφράζεται σε επί τοις εκατό ποσοστό ([40]).

Το ιδανικό φυσικά είναι οι δείκτες APC, APT και CVP να είναι μηδενικοί και οι δείκτες LLHF και LLT να μην ξεπερνούν το 100%, επιτρέποντας βέβαια μια ανοχή 10%. Για τις καταστάσεις που κρίνεται ότι οι δείκτες παίρνουν μη αποδεκτές τιμές θα υπάρξει επιπλέον επέμβαση στο δίκτυο, μέσω της μεθόδου DRDM. Τέλος, να τονισθεί ότι ο βασικός δείκτης που θα σηματοδοτεί την ανάγκη για περαιτέρω επέμβαση θα είναι ο CVP, καθώς οι APC και APT μπορούν να είναι παραπλανητικοί, ο LLHF έχει σημαντική ανεκτικότητα ως προς την τιμή του, ενώ ο LLT εξαρτάται μόνο από τα LCT και μπορεί να μειωθεί κατάλληλα με την αναβάθμιση του κεντρικού Μ/Σ.

6.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΩΝ

Η μεθοδολογία της εργασίας αυτής εφαρμόζεται στα ακόλουθα τέσσερα δίκτυα:

1. Δίκτυο N2F5: πρόκειται για δίκτυο 23 φορτίων. Τα δεδομένα του παρουσιάζονται στην Ενότητα 6.2.1.
2. Δίκτυο N1F1: πρόκειται για δίκτυο 55 φορτίων. Τα δεδομένα του παρουσιάζονται στην Ενότητα 6.2.2.
3. Δίκτυο N2F3: πρόκειται για δίκτυο 112 φορτίων. Τα δεδομένα του παρουσιάζονται στην Ενότητα 6.2.3.
4. Δίκτυο N2F1: πρόκειται για δίκτυο 175 φορτίων. Τα δεδομένα του παρουσιάζονται στην Ενότητα 6.2.4.

6.2.1 Δεδομένα Δικτύου N2F5 με 23 Φορτία

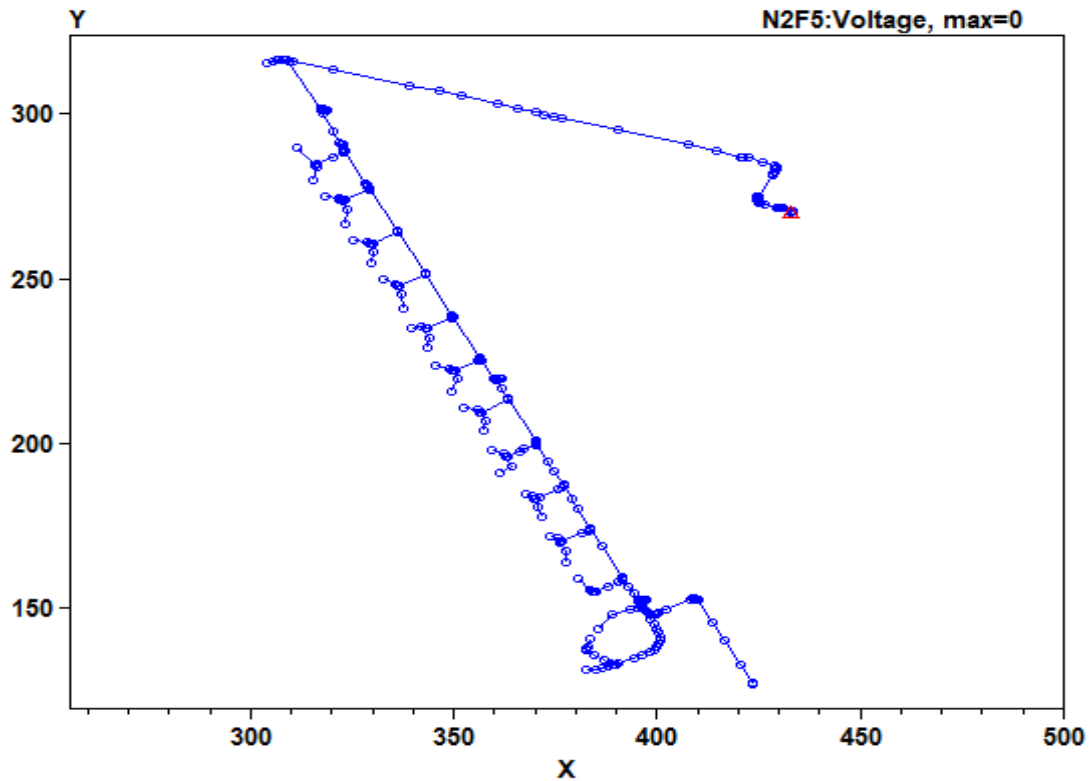
Το δίκτυο με τον κωδικό N2F5 διαθέτει 23 φορτία. Τα στοιχεία του δικτύου N2F5 παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1. R1 και X1 είναι η αντίσταση και η αντίδραση θετικής (και αρνητικής) ακολουθίας, αντίστοιχα, ενώ R0 και X0 είναι η αντίσταση και η αντίδραση μηδενικής ακολουθίας, αντίστοιχα.

Η δομή του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Με μπλε κουκίδες σημειώνονται οι κόμβοι του δικτύου, ενώ με το κόκκινο τρίγωνο ο Μ/Σ του κεντρικού Υ/Σ. Οι σκούρες περιοχές υποδεικνύουν απλά συνωστισμό κόμβων.

Το δίκτυο N2F5 είναι ονομαστικής τάσης 230 V. Έχει συνολικό μήκος 734.9 m. Διαθέτει 308 κόμβους, 23 φορτία, και 23 οικιακούς καταναλωτές. Το καλοκαίρι, το ελάχιστο συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 1.52 kW (κατά μέσο όρο) και εμφανίζεται την ώρα 00:05. Το μέγιστο συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 19.7 kW (κατά μέσο όρο) και εμφανίζεται την ώρα 21:50. Τον χειμώνα, το ελάχιστο συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 2.1 kW (κατά μέσο όρο) και εμφανίζεται την ώρα 05:00. Το μέγιστο συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 24.3 kW (κατά μέσο όρο) και εμφανίζεται την ώρα 19:15.

Πίνακας 6.1: Στοιχεία δικτύου N2F5

Είδη Γραμμών	R1 (Ω/km)	X1 (Ω/km)	R0 (Ω/km)	X0 (Ω/km)	C1 (Ω/km)	C0 (Ω/km)	Ονομαστική Τάση
2c_.007	3.97	0.099	3.97	0.099	0	0	240 V
2c_.0225	1.257	0.085	1.257	0.085	0	0	Συνολικό μήκος
2c_.04	0.708	0.079	0.708	0.079	0	0	734.87753 m
3c_300_SAC_XC	0.102	0.073	0.594	0.105	0	0	Συνολικοί Ζυγοί
4c_.12_UA	0.242	0.072	0.851	0.079	0	0	308
4c_.25	0.124	0.069	0.441	0.077	0	0	Συνολικά Φορτία
4c_.3_AS	0.106	0.068	0.379	0.076	0	0	23
4c_.3_SAC	0.15	0.068	0.521	0.083	0	0	Τριφασικό



Σχήμα 6.1: Δομή Δικτύου N2F5

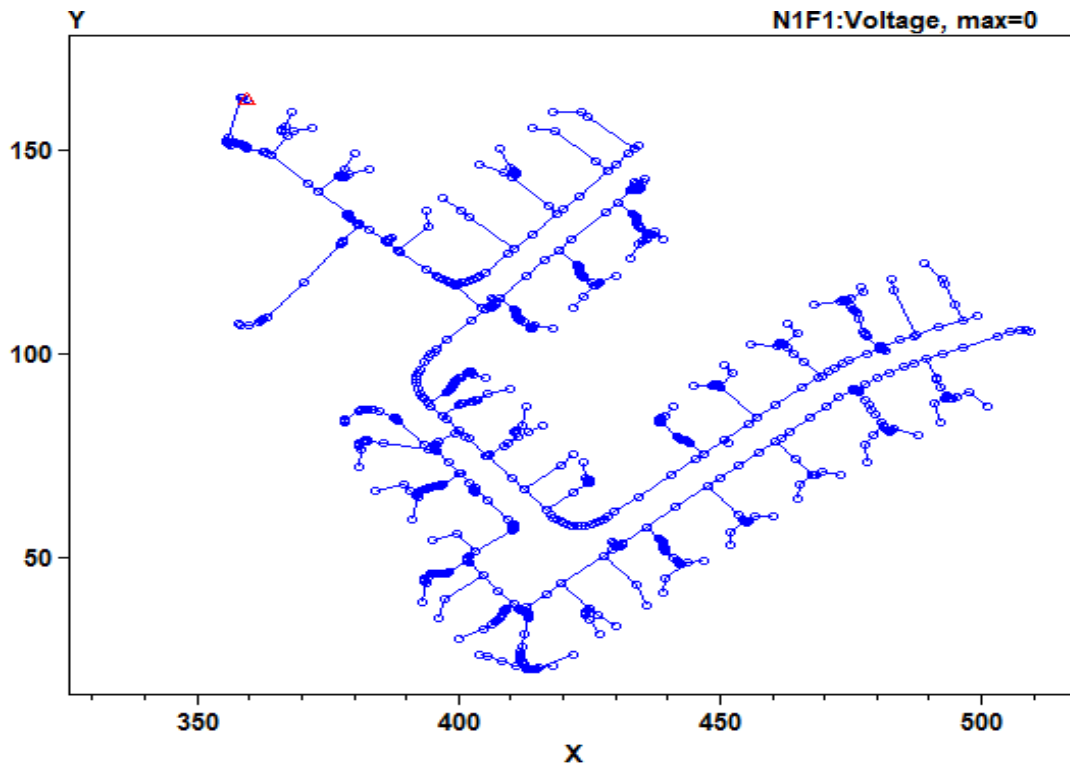
6.2.2 Δεδομένα Δικτύου N1F1 με 55 Φορτία

Το δίκτυο με τον κωδικό N1F1 διαθέτει 55 φορτία. Τα στοιχεία του δικτύου N1F1 παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2. Η δομή του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 6.2.

Το δίκτυο N1F1 είναι ονομαστικής τάσης 230 V. Έχει συνολικό μήκος 1437.8 m. Διαθέτει 906 κόμβους, 55 φορτία, και 55 οικιακούς καταναλωτές. Το καλοκαίρι, το ελάχιστο συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 3.63 kW (κατά μέσο όρο) και εμφανίζεται την ώρα 00:05. Το μέγιστο συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 47.1 kW (κατά μέσο όρο) και εμφανίζεται την ώρα 21:50. Τον χειμώνα, το ελάχιστο συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 5.0 kW (κατά μέσο όρο) και εμφανίζεται την ώρα 05:00. Το μέγιστο συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 58.1 kW (κατά μέσο όρο) και εμφανίζεται την ώρα 19:15.

Πίνακας 6.3: Στοιχεία δικτύου N1F1

Είδη Γραμμών	R1 (Ω/km)	X1 (Ω/km)	R0 (Ω/km)	X0 (Ω/km)	C1 (Ω/km)	C0 (Ω/km)	Ονομαστική Τάση
2c_007	3.97	0.099	3.97	0.099	0	0	240 V
2c_0225	1.257	0.085	1.257	0.085	0	0	Συνολικό μήκος
2c_16	1.15	0.088	1.2	0.088	0	0	1437.842423 m
35_SAC_XSC	0.868	0.092	0.76	0.092	0	0	Συνολικοί Ζυγοί
4c_06	0.469	0.075	1.581	0.091	0	0	906
4c_1	0.274	0.073	0.959	0.079	0	0	Συνολικά Φορτία
4c_35	0.089	0.0675	0.319	0.076	0	0	55
4c_185	0.166	0.068	0.58	0.078	0	0	Τριφασικό
4c_70	0.446	0.071	1.505	0.083	0	0	
4c_95_SAC_XC	0.322	0.074	0.804	0.093	0	0	



Σχήμα 6.2: Δομή Δικτύου N1F1

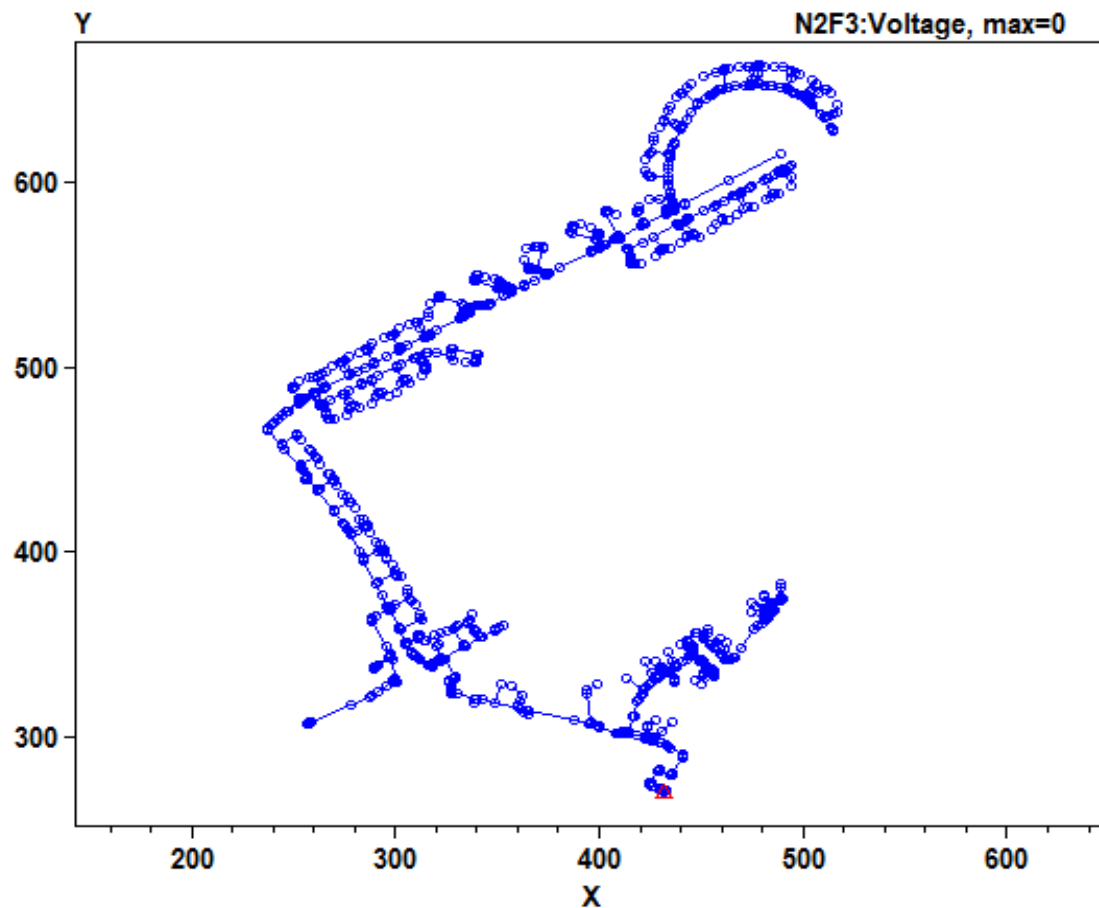
6.2.3 Δεδομένα Δικτύου N2F3 με 112 Φορτία

Το δίκτυο με τον κωδικό N2F3 διαθέτει 112 φορτία. Τα στοιχεία του δικτύου N2F3 παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3. Η δομή του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 6.3.

Το δίκτυο N2F3 είναι ονομαστικής τάσης 230 V. Έχει συνολικό μήκος 2763.6 m. Διαθέτει 1680 κόμβους, 112 φορτία, και 112 οικιακούς καταναλωτές. Το καλοκαίρι, το ελάχιστο συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 7.4 kW (κατά μέσο όρο) και εμφανίζεται την ώρα 00:05. Το μέγιστο συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 95.9 kW (κατά μέσο όρο) και εμφανίζεται την ώρα 21:50. Τον χειμώνα, το ελάχιστο συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 10.2 kW (κατά μέσο όρο) και εμφανίζεται την ώρα 05:00. Το μέγιστο συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 118.3 kW (κατά μέσο όρο) και εμφανίζεται την ώρα 19:15.

Πίνακας 6.3: Στοιχεία δικτύου N2F3

Είδη Γραμμών	R1 (Ω/km)	X1 (Ω/km)	R0 (Ω/km)	X0 (Ω/km)	C1 (Ω/km)	C0 (Ω/km)	Ονομαστική Τάση
007_PSC	3.97	0.099	3.97	0.099	0	0	240 V
25_SAC_PC	1.2	0.084	1.3	0.084	0	0	Συνολικό μήκος
25_SAC_XC	1.2	0.079	1.3	0.079	0	0	2763.552728 m
2c_.007	3.97	0.099	3.97	0.099	0	0	Συνολικοί Ζυγοί
2c_.0145	1.903	0.09	1.903	0.09	0	0	1680
2c_.0225	1.257	0.085	1.257	0.085	0	0	Συνολικά Φορτία
2c_.0225_AS	1.257	0.085	1.257	0.085	0	0	112
2c_.0225_UA	1.257	0.085	1.257	0.085	0	0	Τριφασικό
2c_.04	0.708	0.079	0.708	0.079	0	0	
35_SAC_PC	0.868	0.077	0.91	0.077	0	0	
3c_300_SAC_XC	0.102	0.073	0.594	0.105	0	0	
3c_300_SAC_XC	0.102	0.073	0.594	0.105	0	0	
3c_95_SAC_XC	0.322	0.074	1.282	0.125	0	0	
4_PSC	4.61	0.093	4.8	0.093	0	0	
4_XC	4.61	0.091	4.8	0.091	0	0	
4_XSC	4.61	0.091	4.8	0.091	0	0	
4_XSC	4.61	0.091	4.8	0.091	0	0	
4c_.04	0.708	0.079	2.32	0.093	0	0	
4c_.06	0.469	0.075	1.581	0.091	0	0	
4c_.06_UA	0.469	0.075	1.581	0.091	0	0	
4c_.12	0.242	0.072	0.851	0.079	0	0	
4c_.12_UA	0.242	0.072	0.851	0.079	0	0	
4c_.25	0.124	0.069	0.441	0.077	0	0	
4c_.25_UA	0.124	0.069	0.441	0.077	0	0	
4c_.2_AS	0.15	0.069	0.533	0.078	0	0	
4c_.2_UA	0.15	0.069	0.533	0.078	0	0	
4c_.3_AS	0.106	0.068	0.379	0.076	0	0	
4c_300_SAC	0.102	0.073	0.291	0.087	0	0	



Σχήμα 6.3: Δομή Δικτύου N2F3

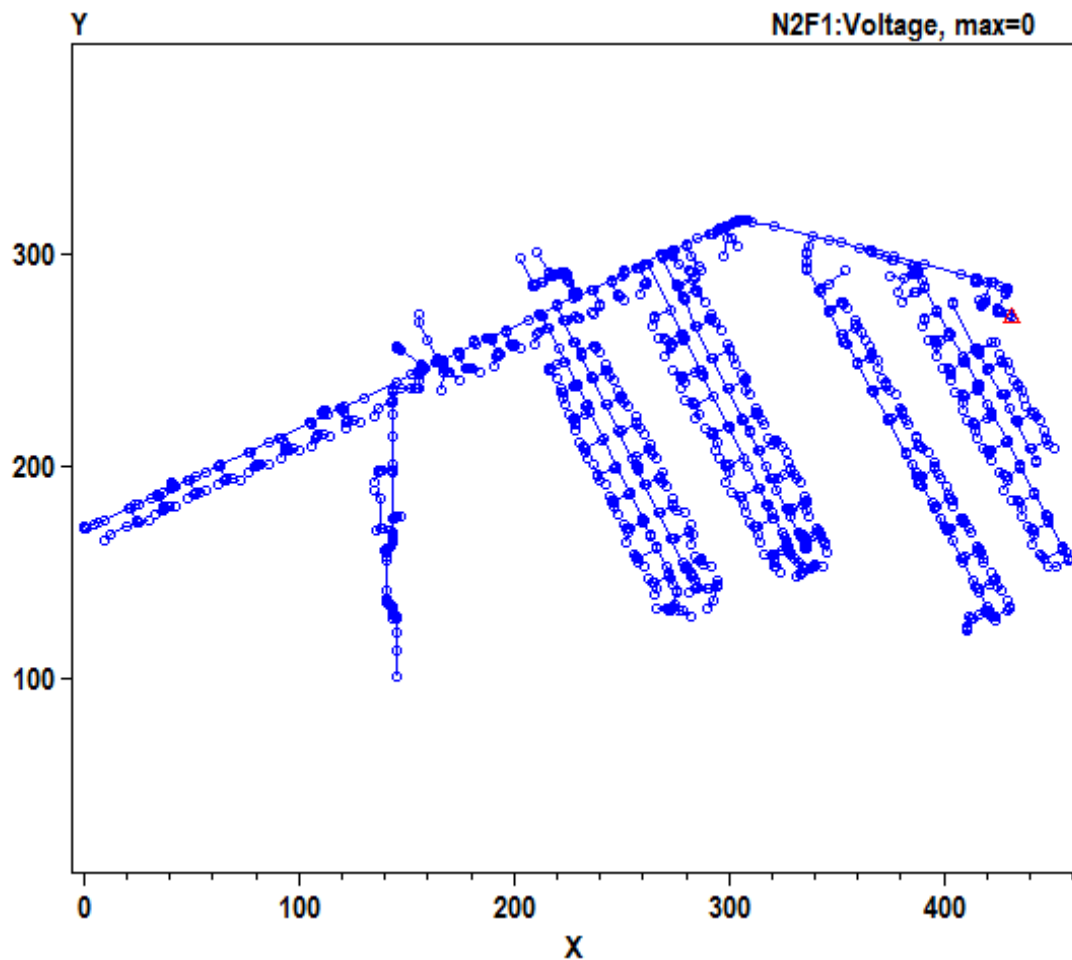
6.2.4 Δεδομένα Δικτύου N2F1 με 175 Φορτία

Το δίκτυο με τον κωδικό N2F1 διαθέτει 175 φορτία. Τα στοιχεία του δικτύου N2F1 παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4. Η δομή του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 6.4.

Το δίκτυο N2F1 είναι ονομαστικής τάσης 230 V. Έχει συνολικό μήκος 5205.6 m. Διαθέτει 2286 κόμβους, 175 φορτία, και 175 οικιακούς καταναλωτές. Το καλοκαίρι, το ελάχιστο συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 11.6 kW (κατά μέσο όρο) και εμφανίζεται την ώρα 00:05. Το μέγιστο συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 149.9 kW (κατά μέσο όρο) και εμφανίζεται την ώρα 21:50. Τον χειμώνα, το ελάχιστο συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 16.0 kW (κατά μέσο όρο) και εμφανίζεται την ώρα 05:00. Το μέγιστο συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 184.9 kW (κατά μέσο όρο) και εμφανίζεται την ώρα 19:15.

Πίνακας 6.4: Στοιχεία Δικτύου N2F1

Είδη Γραμμών	R1 (Ω/km)	X1 (Ω/km)	R0 (Ω/km)	X0 (Ω/km)	C1 (Ω/km)	C0 (Ω/km)	Ονομαστική Τάση
007_PSC	3.97	0.099	3.97	0.099	0	0	240 V
25_SAC_PSC	1.2	0.088	1.2	0.088	0	0	Συνολικό μήκος 5205.557939 m
25_SAC_XC	1.2	0.079	1.3	0.079	0	0	
2c_.007	3.97	0.099	3.97	0.099	0	0	Συνολικοί Ζυγοί 2286
2c_.0145	1.903	0.09	1.903	0.09	0	0	
2c_.0225	1.257	0.085	1.257	0.085	0	0	Συνολικά Φορτία 175
2c_.04	0.708	0.079	0.708	0.079	0	0	
35_SAC_PC	0.868	0.077	0.91	0.077	0	0	Τριφασικό
35_SAC_PSC	0.868	0.077	0.91	0.077	0	0	
35_SAC_XC	0.868	0.077	0.91	0.077	0	0	
3c_25_SAC_XC	1.2	0.077	5.1	0.116	0	0	
3c_300_SAC_XC	0.102	0.073	0.594	0.105	0	0	
4_PC	4.61	0.094	4.8	0.094	0	0	
4_PSC	4.61	0.093	4.8	0.093	0	0	
4_XC	4.61	0.091	4.8	0.091	0	0	
4_XSC	4.61	0.091	4.8	0.091	0	0	
4c_.0225	1.257	0.086	3.83	0.102	0	0	
4c_.06	0.469	0.075	1.581	0.091	0	0	
4c_.06_UA	0.469	0.075	1.581	0.091	0	0	
4c_.12	0.242	0.072	0.851	0.079	0	0	
4c_.12_UA	0.242	0.072	0.851	0.079	0	0	
4c_.1_UA	0.274	0.073	0.959	0.079	0	0	
4c_.25	0.124	0.069	0.441	0.077	0	0	
4c_.25_UA	0.124	0.069	0.441	0.077	0	0	
4c_.3_AS	0.106	0.068	0.379	0.076	0	0	
4c_120_SAC	0.255	0.068	0.884	0.079	0	0	



Σχήμα 6.4: Δομή Δικτύου N2F1

6.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΩΡΙΣ ΕΛΕΓΧΟ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης, χωρίς δυναμικό έλεγχο της κατανάλωσης.

6.3.1 Ανεμογεννήτριες

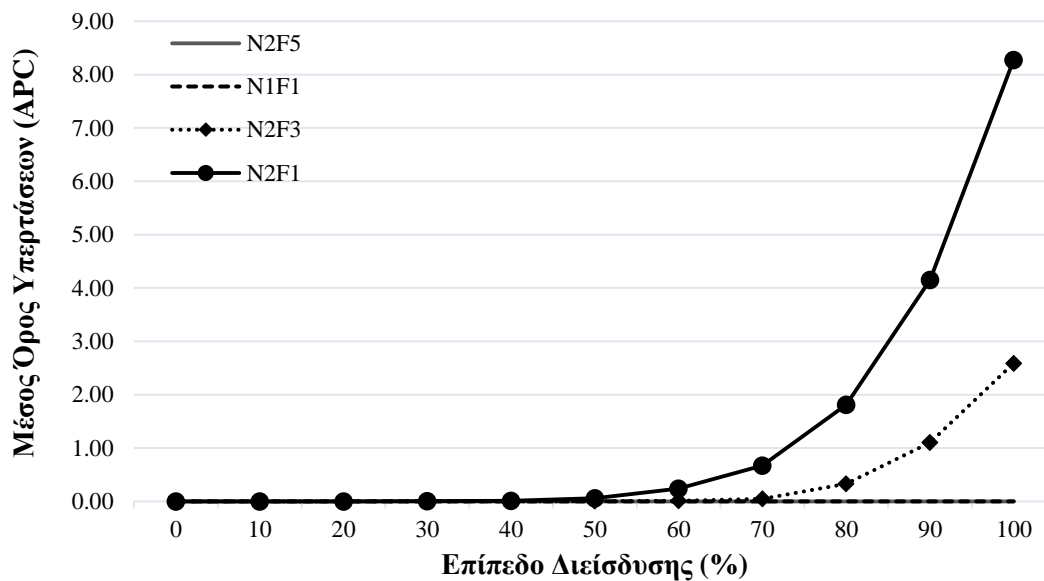
Για την περίπτωση που παρούσες είναι μόνο WG (ανεμογεννήτριες), προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Κατά μέσο όρο, δεν παρατηρείται καμία περίπτωση υπέρτασης για κανένα από τα τέσσερα υπό εξέταση δίκτυα και επομένως, καμία επίδραση στην εξυπηρέτηση των καταναλωτών. Συμπερασματικά, παρουσίας των WG, η λειτουργία όλων των δικτύων, για όλα τα επίπεδα διείσδυσης, κρίνεται ομαλή.

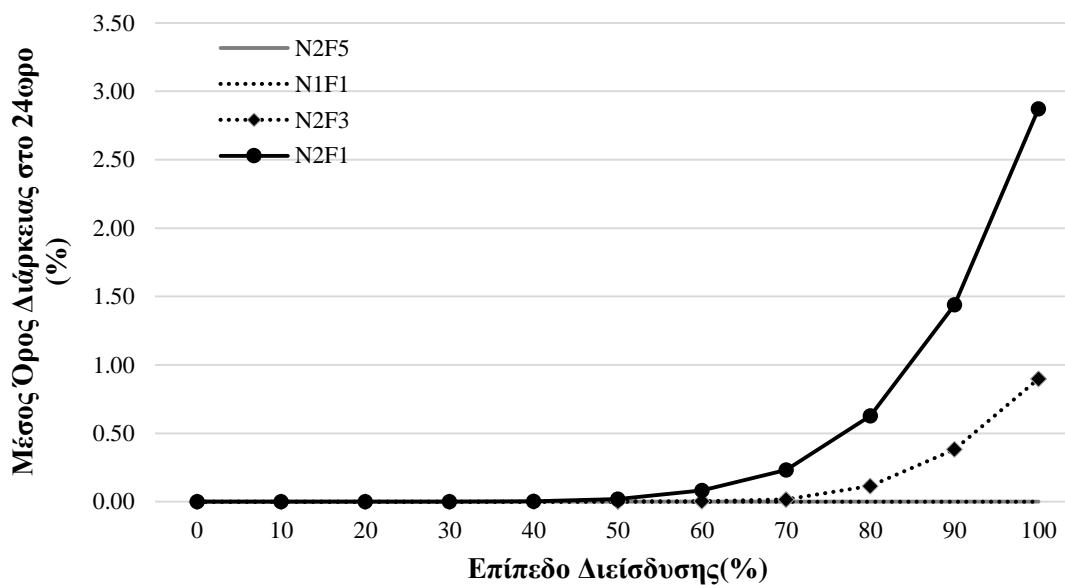
6.3.2 Φωτοβολταϊκά

Στα Σχήματα 6.5, 6.6 και 6.7 φαίνονται, αντίστοιχα, ο δείκτης APC (μέσος αριθμός προβληματικών περιόδων), ο δείκτης APT (μέση διάρκεια προβληματικών περιόδων) και ο δείκτης CVP (ποσοστό καταναλωτών με προβλήματα τάσης). Τα παραπάνω αφορούν την περίπτωση όπου υπάρχουν μόνο PV (φωτοβολταϊκά). Από αυτά, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

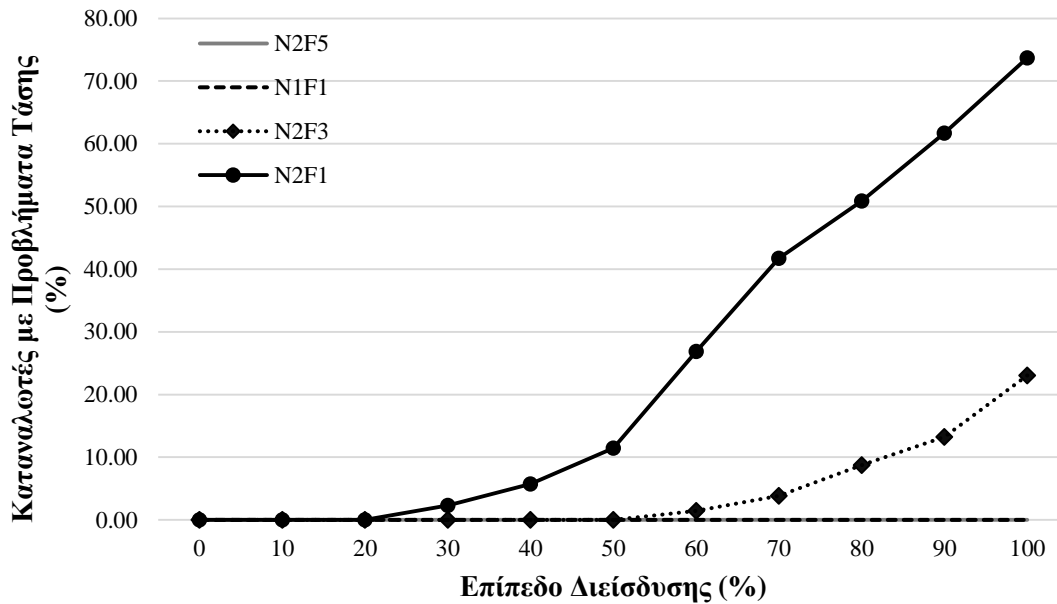
- Τα δύο μικρότερα δίκτυα (23 φορτία και 55 φορτία) δεν εμφανίζουν κανένα πρόβλημα λειτουργίας, σε αντίθεση με τα δύο μεγαλύτερα (112 φορτία και 175 φορτία).
- Κατά μέσο όρο, όσο μεγαλύτερο είναι το δίκτυο, τόσο περισσότερες περιπτώσεις υπερτάσεων λόγω PV ενδέχεται να εμφανίσει. Όμως, υπερτάσεις αρχίζουν να εμφανίζονται μετά από συγκεκριμένο συνδυασμό αριθμού φορτίων–επίπεδου διείσδυσης.
- Οι ίδιες παρατηρήσεις ισχύουν και για το μέσο όρο της διάρκειας των υπερτάσεων αυτών.
- Όσο αυξάνεται το επίπεδο διείσδυσης των PV, υπό συγκεκριμένο μέγεθος δικτύου, τόσο αυξάνεται το ποσοστό των καταναλωτών που επηρεάζονται. Το ίδιο ισχύει όσο αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου, υπό συγκεκριμένο επίπεδο διείσδυσης PV.



Σχήμα 6.5.: Δείκτης APC όταν υπάρχουν μόνο PV



Σχήμα 6.6.: Δείκτης APT όταν υπάρχουν μόνο PV

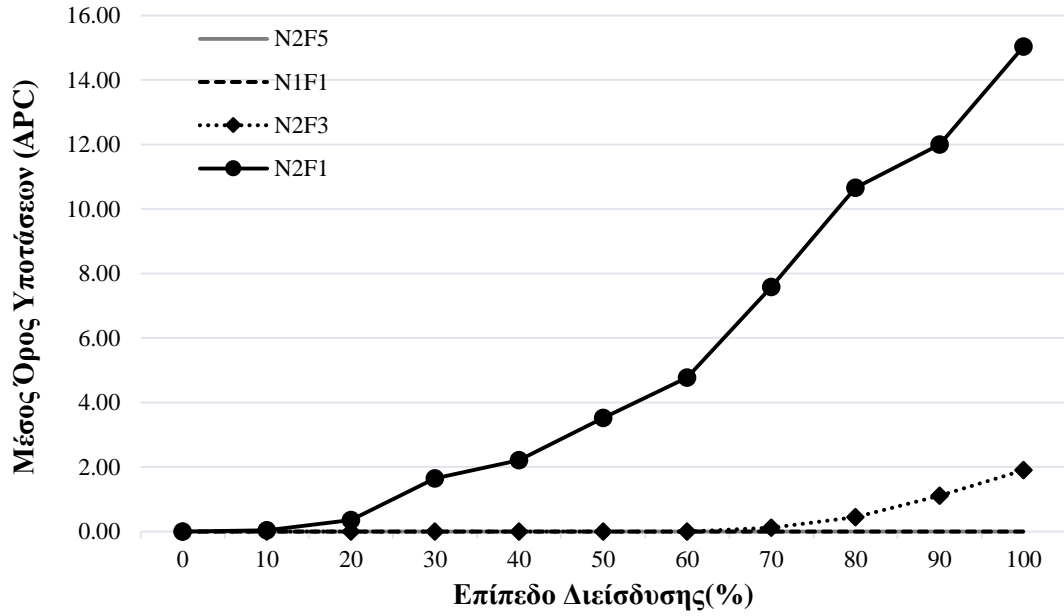


Σχήμα 6.7: Δείκτης CVP όταν υπάρχουν μόνο PV

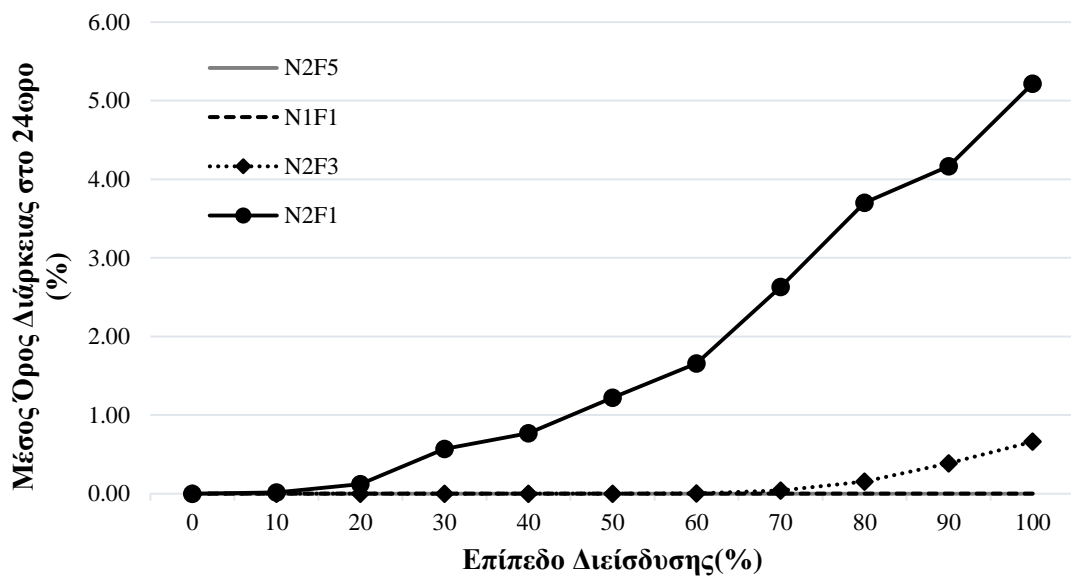
6.3.3 Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας

Στα Σχήματα 6.8, 6.9 και 6.10 φαίνονται, αντίστοιχα ο δείκτης APC (μέσος αριθμός προβληματικών περιόδων), ο δείκτης ART (μέση διάρκεια προβληματικών περιόδων) και ο δείκτης CVP (ποσοστό καταναλωτών με προβλήματα τάσης). Τα παραπάνω αφορούν την περίπτωση όπου υπάρχουν μόνο EHP (ηλεκτρικές αντλίες θερμότητας). Από αυτά, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

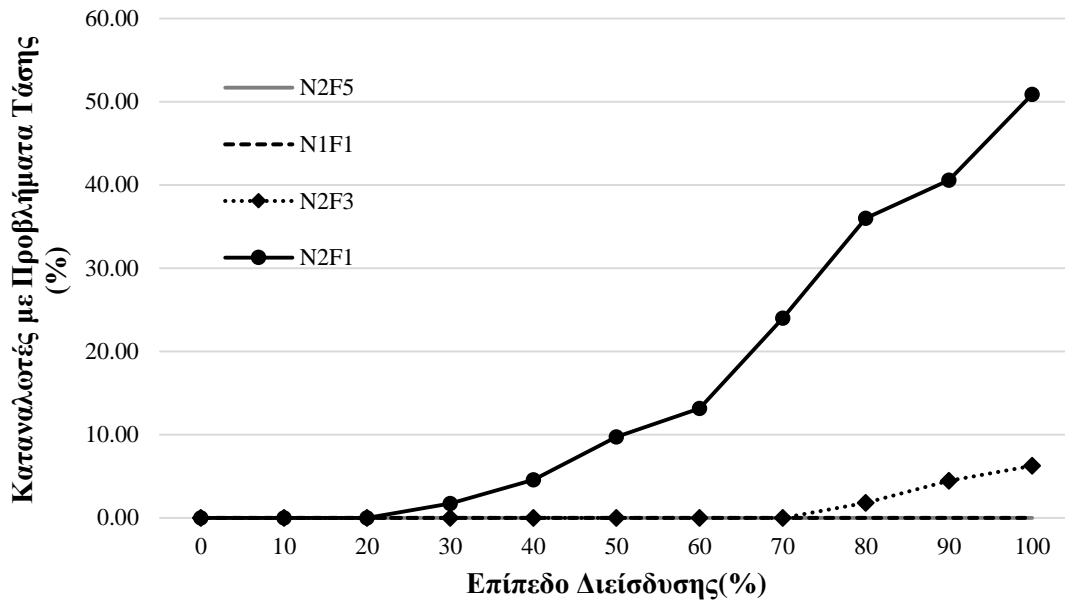
- Τα δύο μικρότερα δίκτυα (23 φορτία και 55 φορτία) δεν εμφανίζουν κανένα πρόβλημα λειτουργίας, σε αντίθεση με τα δύο μεγαλύτερα (112 φορτία και 175 φορτία).
- Κατά μέσο όρο, όσο μεγαλύτερο είναι το δίκτυο, τόσο περισσότερες περιπτώσεις υποτάσεων λόγω EHP ενδέχεται να εμφανίσει. Όμως, υποτάσεις αρχίζουν να εμφανίζονται μετά από συγκεκριμένο συνδυασμό αριθμού φορτίων–επιπέδου διείδυσης. Ο μέσος όρος υποτάσεων εμφανίζεται μεγαλύτερος του μέσου όρου υπερτάσεων, το οποίο μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι τα EHP "ενισχύουν" τη συνολική κατανάλωση, σε σχέση με τα PV που αντιτίθενται αυτής.
- Οι ίδιες παρατηρήσεις ισχύουν και για τον μέσο όρο της διάρκειας των υποτάσεων αυτών.
- Όσο αυξάνεται το επίπεδο διείδυσης των EHP, υπό συγκεκριμένο μέγεθος δικτύου, τόσο αυξάνεται το ποσοστό των καταναλωτών που επηρεάζονται. Το ίδιο ισχύει όσο αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου, υπό συγκεκριμένο επίπεδο διείδυσης EHP. Για ίδιους συνδυασμούς αριθμού φορτίων–επιπέδου διείδυσης, οι καταναλωτές που αντιμετωπίζουν θέματα εμφανίζονται λιγότεροι στην περίπτωση των EHP σε σχέση με την περίπτωση των PV. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο πρότυπο EN50160, που είναι γενικά ελαστικότερο στις υποτάσεις σε σχέση με τις υπερτάσεις.



Σχήμα 6.8: Δείκτης APC όταν υπάρχουν μόνο EHP



Σχήμα 6.9: Δείκτης APT όταν υπάρχουν μόνο EHP

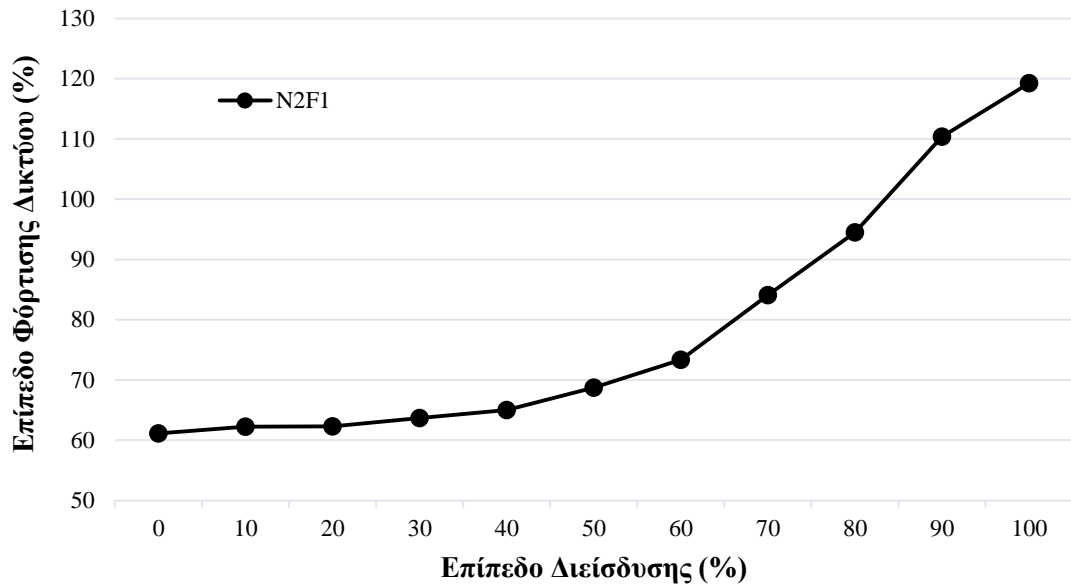


Σχήμα 6.10: Δείκτης CVP όταν υπάρχουν μόνο EHP

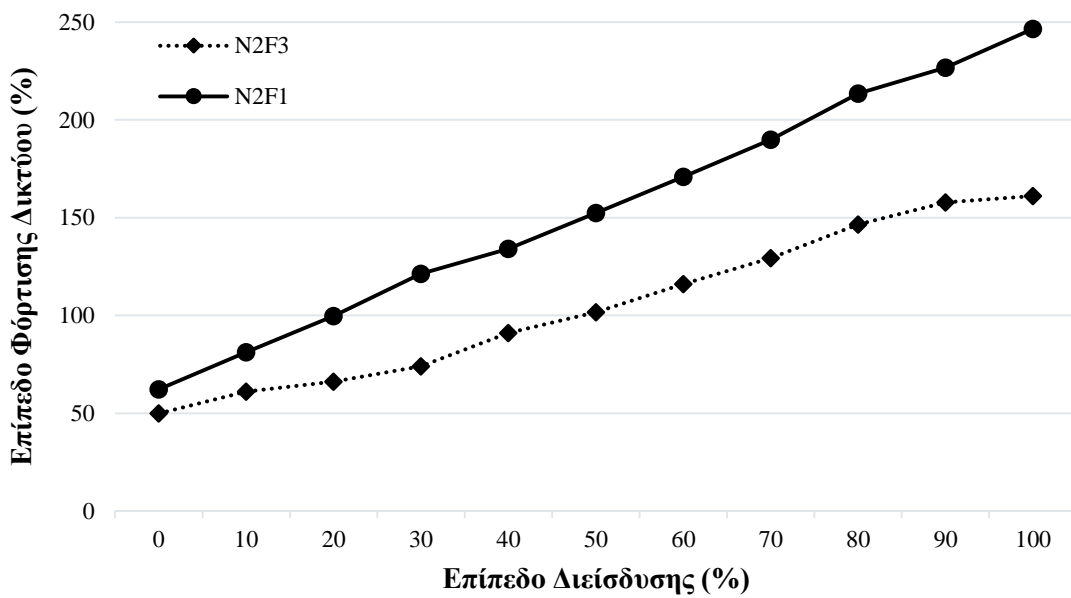
6.3.4 Δείκτες LLHF και LLT

Στα Σχήματα 6.11, 6.12 και 6.13 φαίνονται, αντίστοιχα ο δείκτης LLHF (επίπεδο φόρτισης δικτύου) με παρουσία μόνο PV (φωτοβολταϊκών), ο δείκτης LLHF με παρουσία μόνο EHP (ηλεκτρικών αντλιών θερμότητας) και ο δείκτης LLT (επίπεδο φόρτισης Υ/Σ) για όλα τα LCT. Από αυτά, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

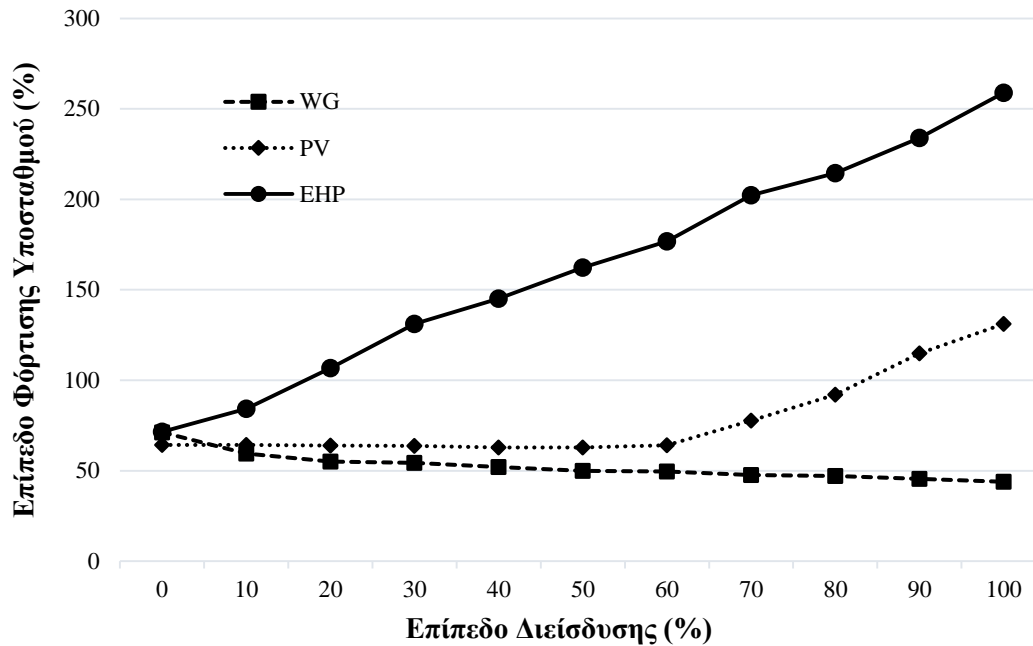
- Από την πλευρά του δικτύου, για την περίπτωση που υπάρχουν μόνο PV, αξιοσημείωτα θερμικά προβλήματα παρατηρούνται μόνο στο μεγαλύτερο δίκτυο (175 φορτία), το οποίο πάραυτα έχει θερμική αντοχή που επιτρέπει οριακά μεγάλες διεισδύσεις (90%).
- Από την πλευρά του δικτύου, για την περίπτωση που υπάρχουν μόνο EHP, παρατηρούνται έντονα θερμικά προβλήματα (λόγω του αυξημένου φορτίου) για τα δύο μεγαλύτερα δίκτυα (112 φορτία και 175 φορτία), με τη θερμική τους αντοχή να παραβιάζεται πολύ γρήγορα (διεισδύσεις του 50% και 20% αντίστοιχα)
- Από την πλευρά του Υ/Σ, παρατηρείται αρχικά μείωση της θερμικής καταπόνησης του Μ/Σ για τα LCT παραγωγής και στη συνέχεια αύξηση από ένα επίπεδο διείσδυσης και μετά, πράγμα αναμενόμενο, αφού η καταπόνηση του Μ/Σ εξαρτάται από την καθαρή κυκλοφορούσα ισχύ. Για τα EHP, όσο αυξάνεται το επίπεδο διείσδυσης, τόσο αυξάνεται και η καταπόνηση του Μ/Σ. Εν τούτοις, τα WG επιτρέπουν σε κάθε περίπτωση την ομαλή λειτουργία του Υ/Σ, τα PV για αρκετά υψηλές διεισδύσεις (μέχρι 80%), ενώ τα EHP φέρνουν τον Υ/Σ πολύ γρήγορα στα όριά του (διείσδυση 20%).



Σχήμα 6.11: Δείκτης LLHF όταν υπάρχουν μόνο PV



Σχήμα 6.12: Δείκτης LLHF όταν υπάρχουν μόνο EHP



Σχήμα 6.13: Δείκτης LLT

6.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της τελικής προσομοίωσης, μετά την εφαρμογή του δυναμικού ελέγχου κατανάλωσης.

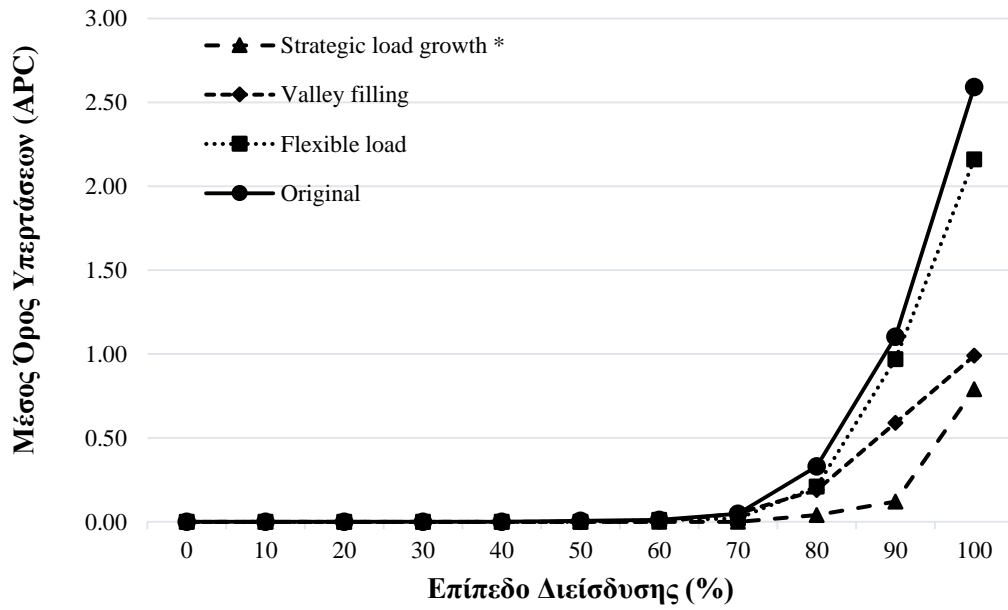
6.4.1 Ανεμογεννήτριες

Για την περίπτωση που παρούσες είναι μόνο WG (ανεμογεννήτριες), όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 6.3.1, δεν προέκυψαν προβλήματα τάσης ή θερμικά προβλήματα για κανένα επίπεδο διεΐσδυσης, σε κανένα εκ των δικτύων. Επομένως, κρίθηκε πως δεν απαιτούνταν περαιτέρω επέμβαση στις περιπτώσεις αυτές.

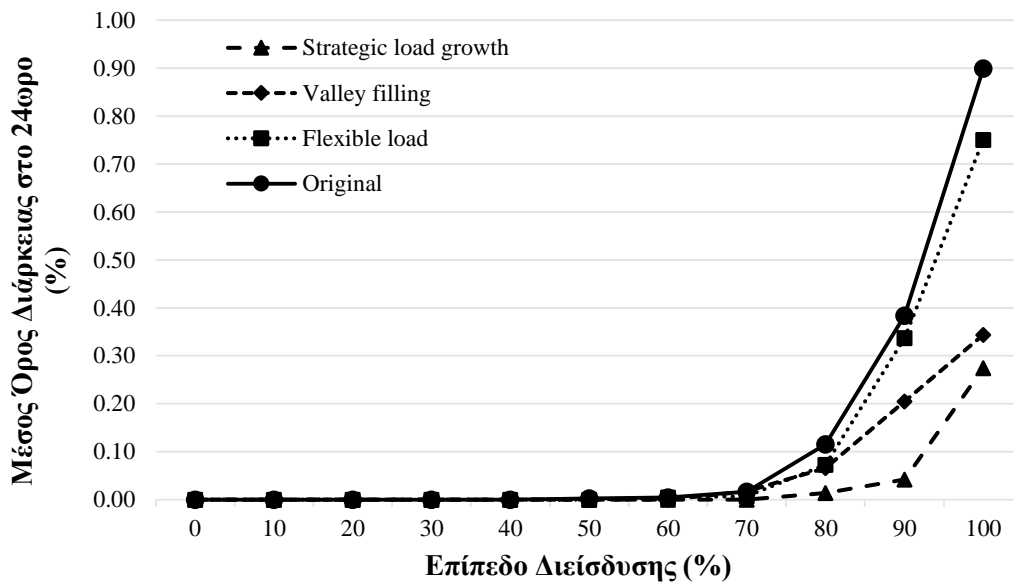
6.4.2 Φωτοβολταϊκά στο Δίκτυο N2F3

Στα Σχήματα 6.14, 6.15 και 6.16 φαίνονται, αντίστοιχα, ο δείκτης APC (μέσος αριθμός προβληματικών περιόδων), ο δείκτης APT (μέση διάρκεια προβληματικών περιόδων) και ο δείκτης CVP (ποσοστό καταναλωτών με προβλήματα τάσης). Τα παραπάνω αφορούν μόνο το δίκτυο N2F3 (112 φορτία), στην περίπτωση όπου υπάρχουν μόνο PV (φωτοβολταϊκά) και αφού έχουν εφαρμοστεί οι μέθοδοι ελέγχου κατανάλωσης. Από αυτά, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

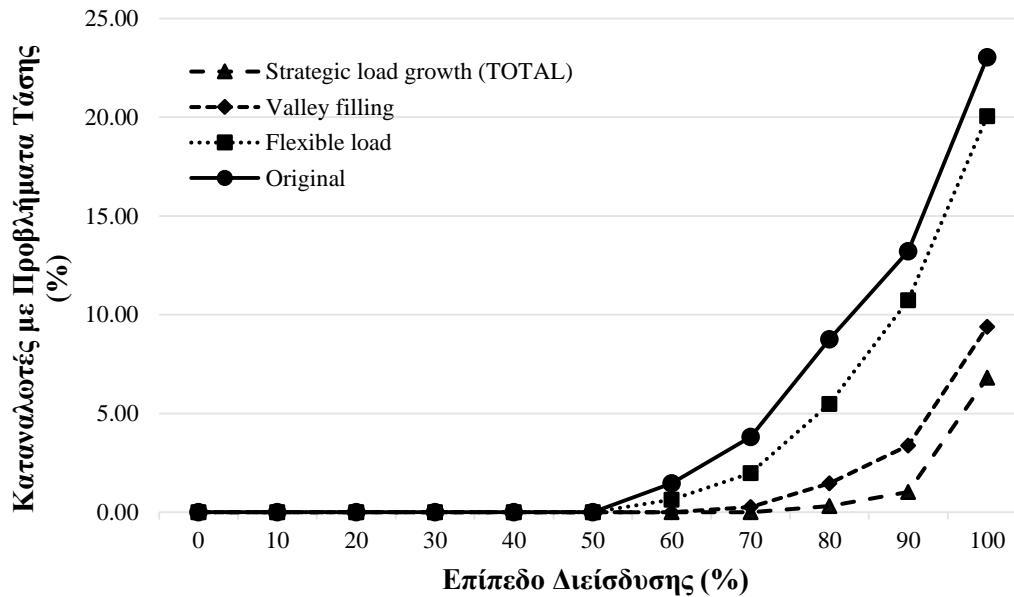
- Όλες οι προσεγγίσεις που επιχειρήθηκαν είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση (διαφορετική ανά περίπτωση) των τριών δεικτών APC, APT και CVP.
- Η καμπύλη "συμπεριφοράς" κάθε μεθόδου (και για τους τρεις δείκτες) είναι διαφορετική, δηλαδή οι επεμβάσεις δεν είναι αναλογικού χαρακτήρα.
- Όσο πιο στοχευμένη είναι η μέθοδος στη διαχείριση της περίσσειας ισχύος (η flexible load επικεντρώνεται μόνο στα φορτία, η valley filling στην ανακατανομή της επιπλέον ισχύος, η strategic load growth στην εξάλειψή της), τόσο καλύτερα αποτελέσματα σημειώνονται, όπως αναδεικνύεται και από τους 3 δείκτες .



Σχήμα 6.14: Δείκτης APC στο δίκτυο N2F3 όταν υπάρχουν μόνο PV



Σχήμα 6.15: Δείκτης APT στο δίκτυο N2F3 όταν υπάρχουν μόνο PV

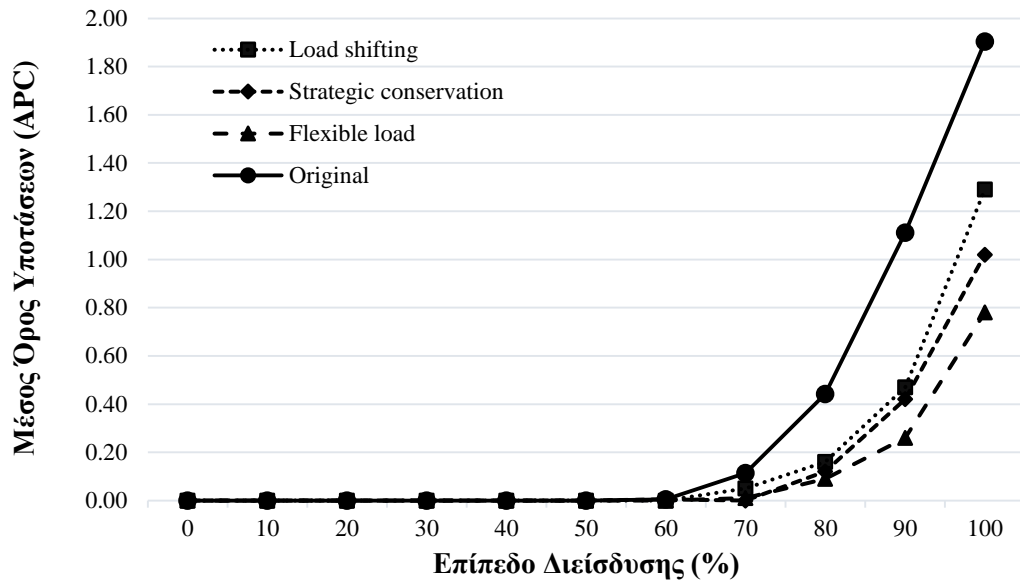


Σχήμα 6.16: Δείκτης CVP στο δίκτυο N2F3 όταν υπάρχουν μόνο PV

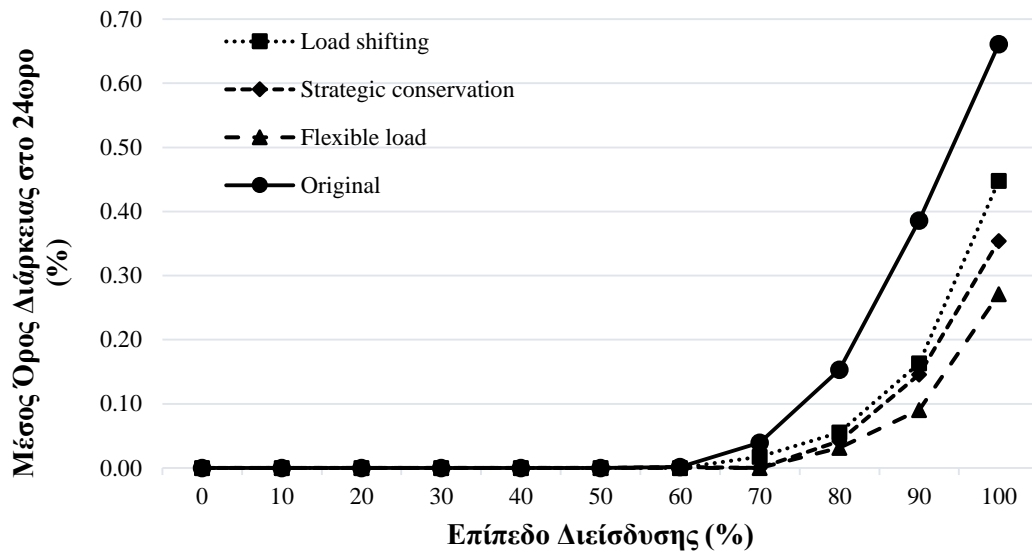
6.4.3 Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας στο Δίκτυο N2F3

Στα Σχήματα 6.17, 6.18 και 6.19 φαίνονται αντίστοιχα ο δείκτης APC (μέσος αριθμός προβληματικών περιόδων), ο δείκτης APT (μέση διάρκεια προβληματικών περιόδων) και ο δείκτης CVP (ποσοστό καταναλωτών με προβλήματα τάσης). Τα παραπάνω αφορούν μόνο το δίκτυο N2F3 (112 φορτία), στην περίπτωση όπου υπάρχουν μόνο EHP (ηλεκτρικές αντλίες θερμότητας) και αφού έχουν εφαρμοστεί οι μέθοδοι ελέγχου κατανάλωσης. Από αυτά, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

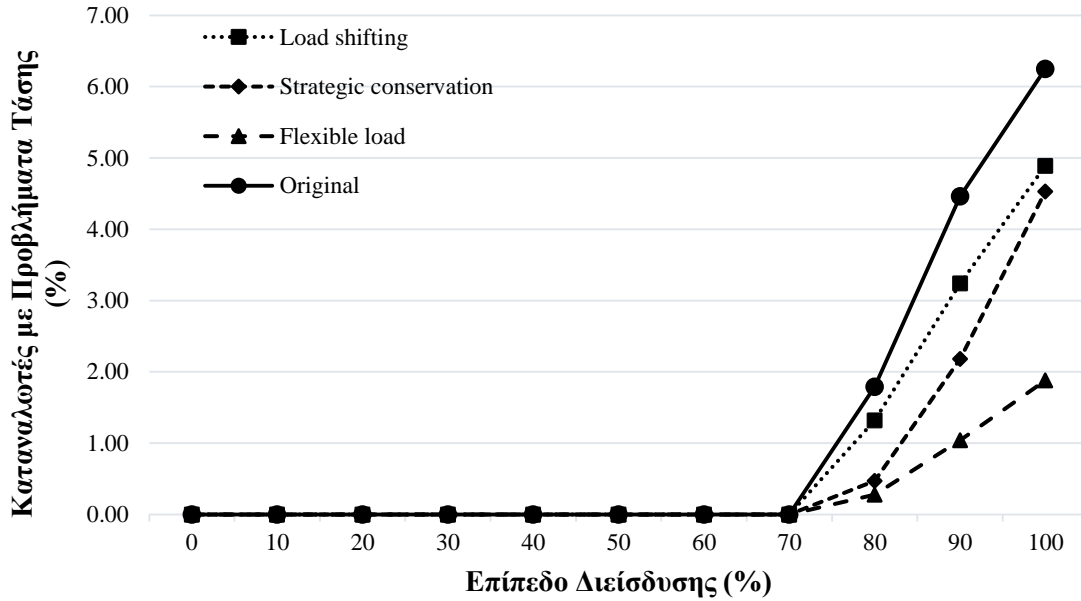
- Όλες οι προσεγγίσεις που επιχειρήθηκαν είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση (διαφορετική ανά περίπτωση) των τριών δεικτών APC, APT και CVP.
- Η καμπύλη "συμπεριφοράς" κάθε μεθόδου (και για τους τρεις δείκτες) είναι διαφορετική, δηλαδή οι επεμβάσεις δεν είναι αναλογικού χαρακτήρα.
- Όσο πιο έντονα "χτυπά" κάθε μέθοδος το σταθερά υψηλό συνολικό φορτίο (η load shifting προσπαθεί να ανακατανείμει την συνεχώς υψηλή κατανάλωση, η strategic conservation προσπαθεί να μειώσει κάθε ατομικό φορτίο ανεξάρτητα από την εικόνα του δικτύου και η flexible load στοχεύει απευθείας στη μείωση του συνολικού φορτίου), τόσο καλύτερα αποτελέσματα σημειώνονται, όπως αναδεικνύεται και από τους 3 δείκτες.



Σχήμα 6.17: Δείκτης APC στο δίκτυο N2F3 όταν υπάρχουν μόνο EHP



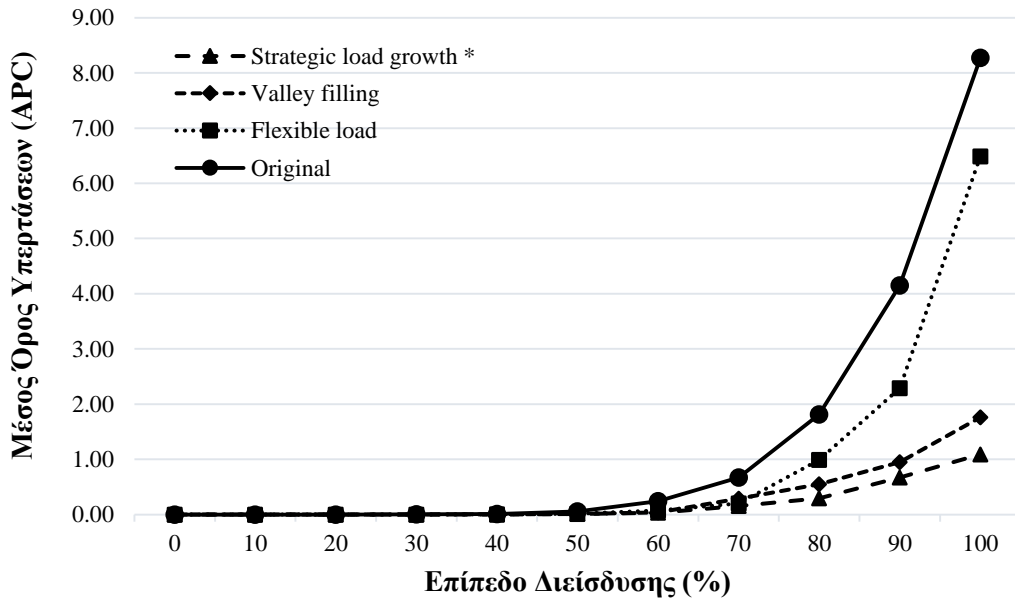
Σχήμα 6.18: Δείκτης APC στο δίκτυο N2F3 όταν υπάρχουν μόνο EHP



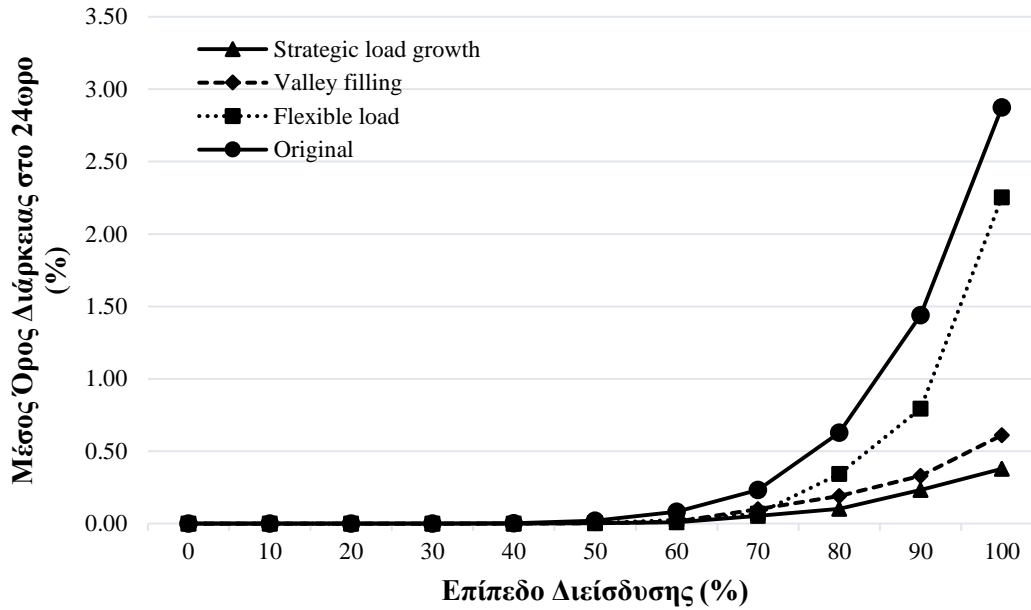
Σχήμα 6.19: Δείκτης CVP στο δίκτυο N2F3 όταν υπάρχουν μόνο EHP

6.4.4 Φωτοβολταϊκά στο Δίκτυο N2F1

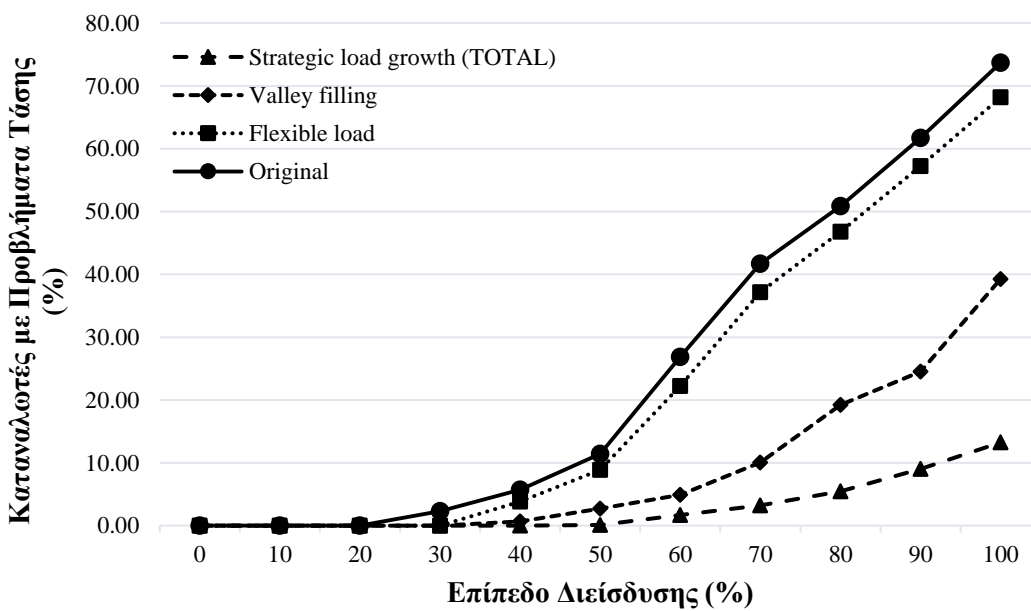
Στα Σχήματα 6.20, 6.21 και 6.22 φαίνονται αντίστοιχα ο δείκτης APC (μέσος αριθμός προβληματικών περιόδων), ο δείκτης APT (μέση διάρκεια προβληματικών περιόδων) και ο δείκτης CVP (ποσοστό καταναλωτών με προβλήματα τάσης). Τα παραπάνω αφορούν μόνο το δίκτυο N2F1 (175 φορτία), στην περίπτωση όπου υπάρχουν μόνο PV (φωτοβολταϊκά) και αφού έχουν εφαρμοστεί οι μέθοδοι ελέγχου κατανάλωσης. Από αυτά, προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα που προέκυψαν και για το δίκτυο N2F3. Όμως, λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους του δικτύου, αναδεικνύονται εντονότερα οι δυνατότητες κάθε μεθόδου επέμβασης.



Σχήμα 6.20: Δείκτης APC στο δίκτυο N2F1 όταν υπάρχουν μόνο PV



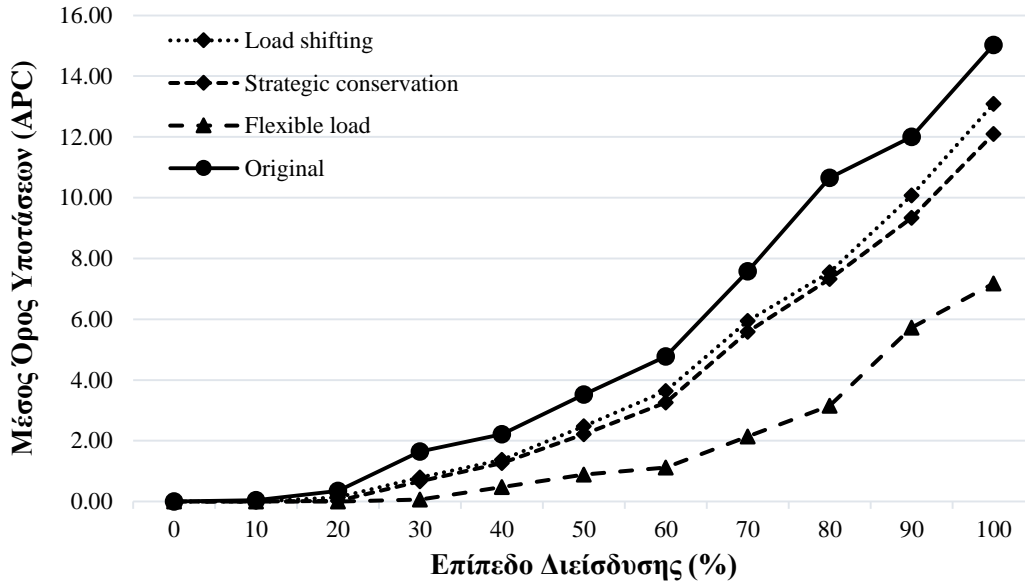
Σχήμα 6.21: Δείκτης APT στο δίκτυο N2F1 όταν υπάρχουν μόνο PV



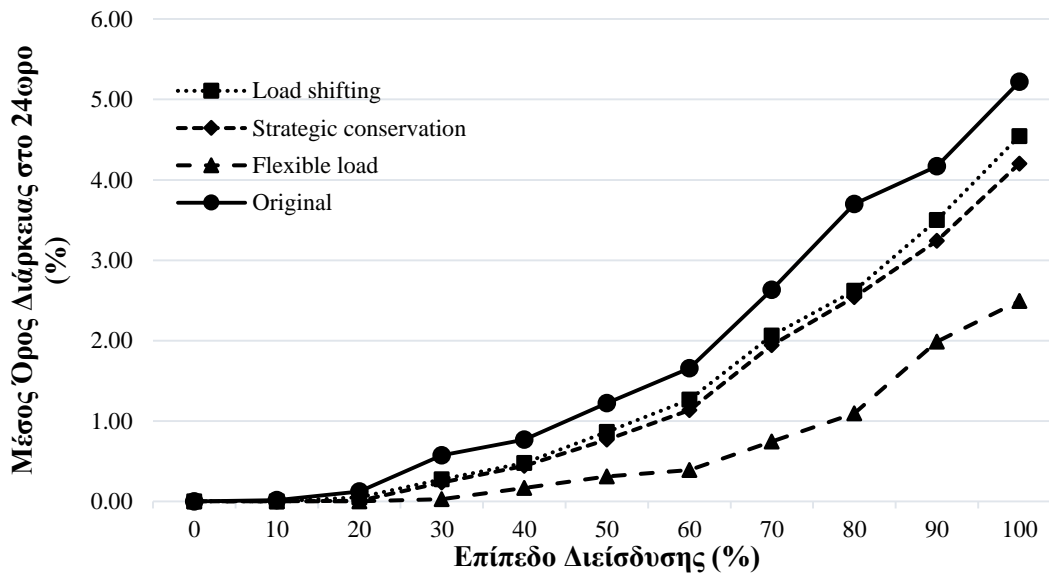
Σχήμα 6.22: Δείκτης CVP στο δίκτυο N2F1 όταν υπάρχουν μόνο PV

6.4.5 Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας στο Δίκτυο N2F1

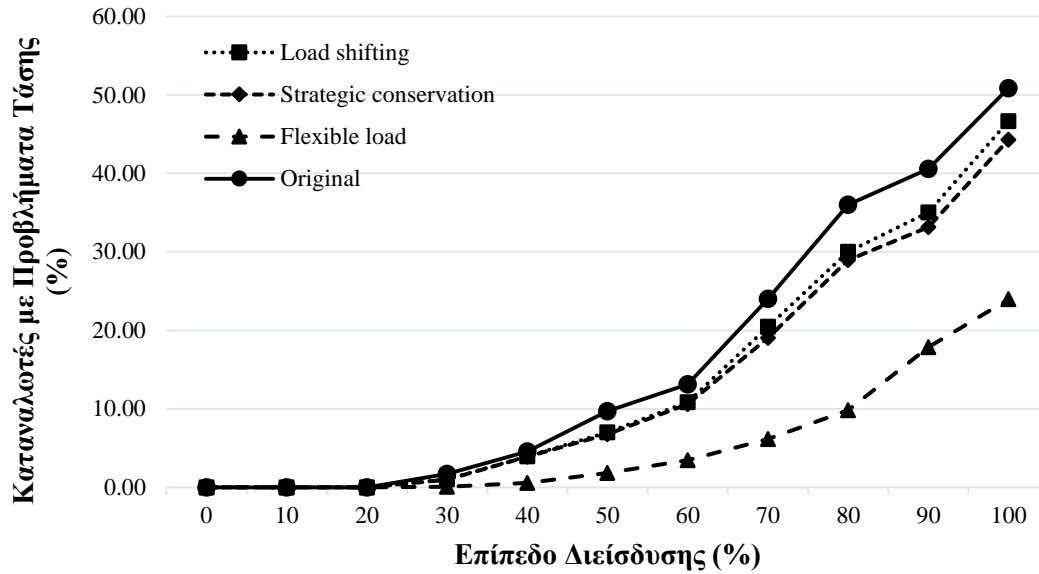
Στα Σχήματα 6.23, 6.24 και 6.25 φαίνονται, αντίστοιχα, ο δείκτης APC (μέσος αριθμός προβληματικών περιόδων), ο δείκτης APT (μέση διάρκεια προβληματικών περιόδων) και ο δείκτης CVP (ποσοστό καταναλωτών με προβλήματα τάσης). Τα παραπάνω αφορούν μόνο το δίκτυο N2F1 (175 φορτία), στην περίπτωση όπου υπάρχουν μόνο EHP (ηλεκτρικές αντλίες θερμότητας) και αφού έχουν εφαρμοστεί οι μέθοδοι ελέγχου κατανάλωσης. Από αυτά, προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα που προέκυψαν και για το δίκτυο N2F3. Όμως, λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους του δικτύου, αναδεικνύονται εντονότερα οι δυνατότητες κάθε μεθόδου επέμβασης.



Σχήμα 6.23: Δείκτης APC στο δίκτυο N2F1 όταν υπάρχουν μόνο ΕΗΡ



Σχήμα 6.24: Δείκτης ΑΡΤ στο δίκτυο N2F1 όταν υπάρχουν μόνο ΕΗΡ

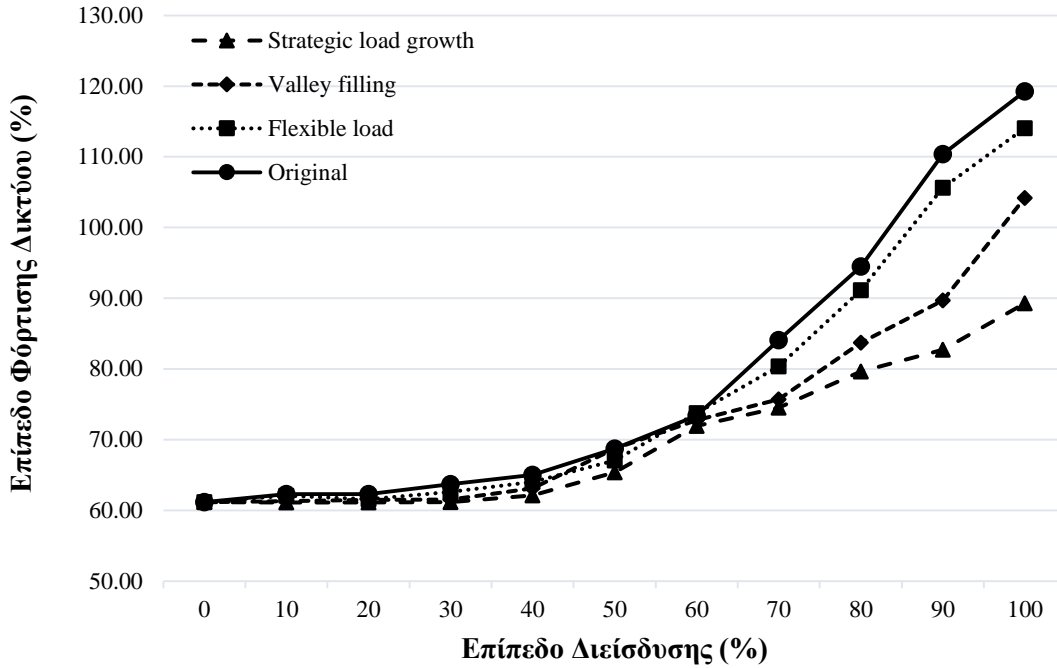


Σχήμα 6.25: Δείκτης CVP στο δίκτυο N2F1 όταν υπάρχουν μόνο EHP

6.4.6 Δείκτης LLHF

Στο Σχήμα 6.26 παρουσιάζεται ο δείκτης LLHF (επίπεδο φόρτισης δικτύου) με παρουσία μόνο PV (φωτοβολταϊκών), για το δίκτυο N2F1, που ήταν και το μοναδικό που παρουσίαζε προβλήματα θερμικής αντοχής με διείσδυση PV στην αρχική ανάλυση. Από αυτό, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

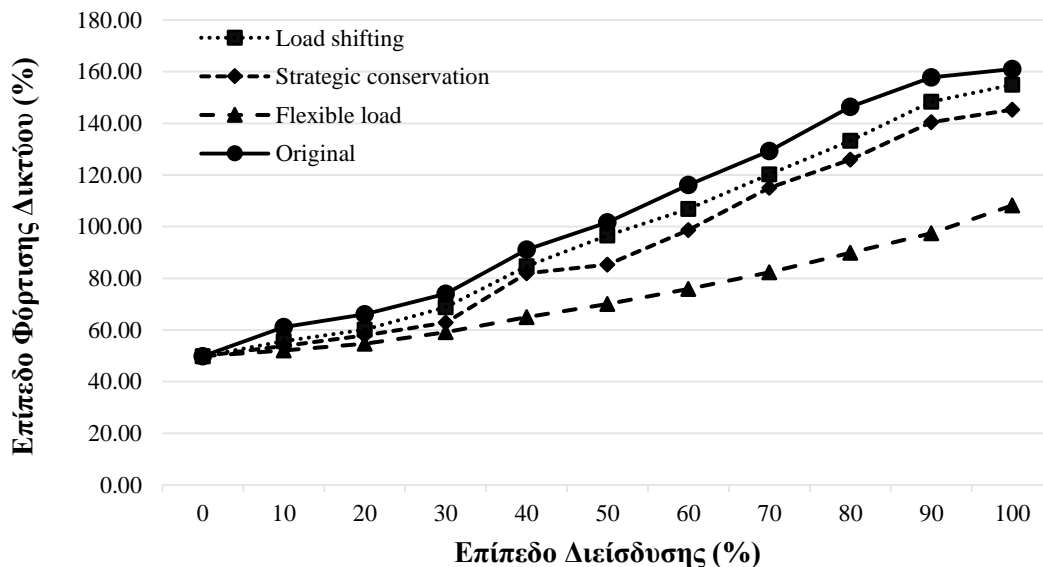
- Τα αποτελέσματα είναι επίσης συμβατά με αυτά που παρατηρήθηκαν για την τάση των δικτύων, όσον αφορά τη μείωση των προβλημάτων και την αποτελεσματικότητα κάθε μεθόδου.
- Το δίκτυο δύναται πλέον να "σηκώσει" τις μελετώμενες συνθήκες λειτουργίας πολύ αποτελεσματικότερα. Συγκεκριμένα, η μέθοδος valley filling αποτυγχάνει οριακά για πλήρη διείσδυση (100%), ενώ η strategic load growth επιτρέπει τη χρήση PV από όλους τους καταναλωτές, έχοντας επιπλέον σημαντικό περιθώριο αντοχής (90% καταπόνηση).



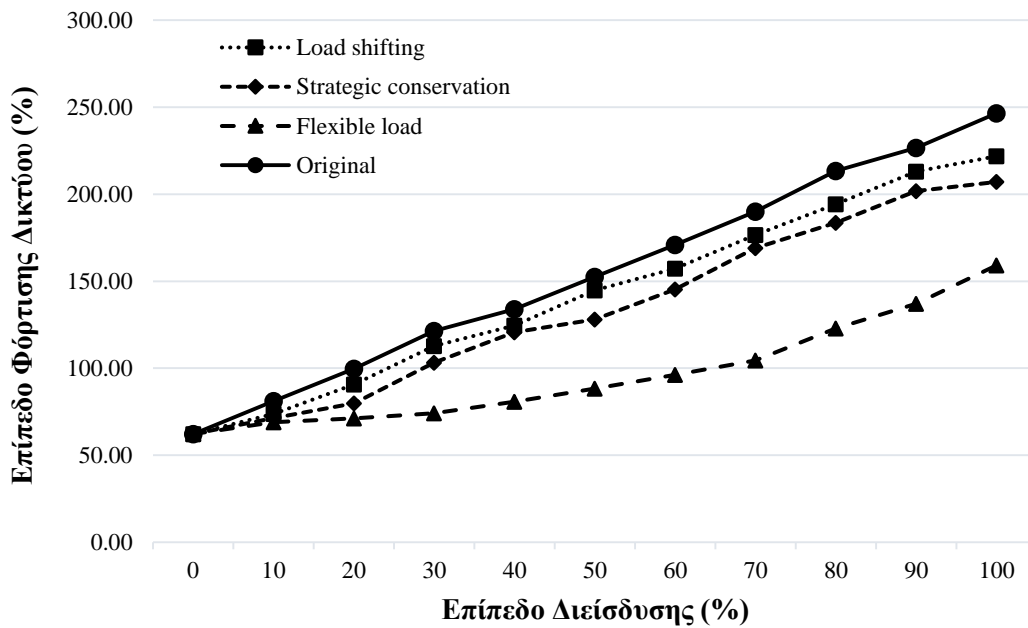
Σχήμα 6.26: Δείκτης LLHF στο δίκτυο N2F1 όταν υπάρχουν μόνο PV

Στα Σχήματα 6.27 και 6.28 φαίνονται, αντίστοιχα, ο δείκτης LLHF (επίπεδο φόρτισης δικτύου) με παρουσία μόνο EHP (ηλεκτρικών αντλιών θερμότητας) για τα δίκτυα N2F3 (112 φορτία) και N2F1 (175 φορτία). Από αυτά, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Τα αποτελέσματα είναι επίσης συμβατά με αυτά που παρατηρήθηκαν για την τάση των δικτύων, όσον αφορά τη μείωση των προβλημάτων και την αποτελεσματικότητα κάθε μεθόδου.
- Για το μικρότερο εκ των δικτύων, η παραβίαση των θερμικών ορίων των γραμμών δεν μειώνεται σημαντικά από την επέμβαση, με εξαίρεση τη μέθοδο flexible load, που λόγω της δραστηκής επέμβασής της επιτρέπει έστω και οριακά πλήρη διείσδυση EHP.
- Για το μεγαλύτερο εκ των δικτύων ισχύει σχεδόν εξ ολοκλήρου η παραπάνω παρατήρηση, με τη διαφοροποίηση ότι πλέον, παρόλο που η flexible load παραμένει ιδιαίτερα αποτελεσματική φτάνει στα όριά της με διείσδυση της τάξης του 90%.



Σχήμα 6.27: Δείκτης LLHF στο δίκτυο N2F3 όταν υπάρχουν μόνο EHP

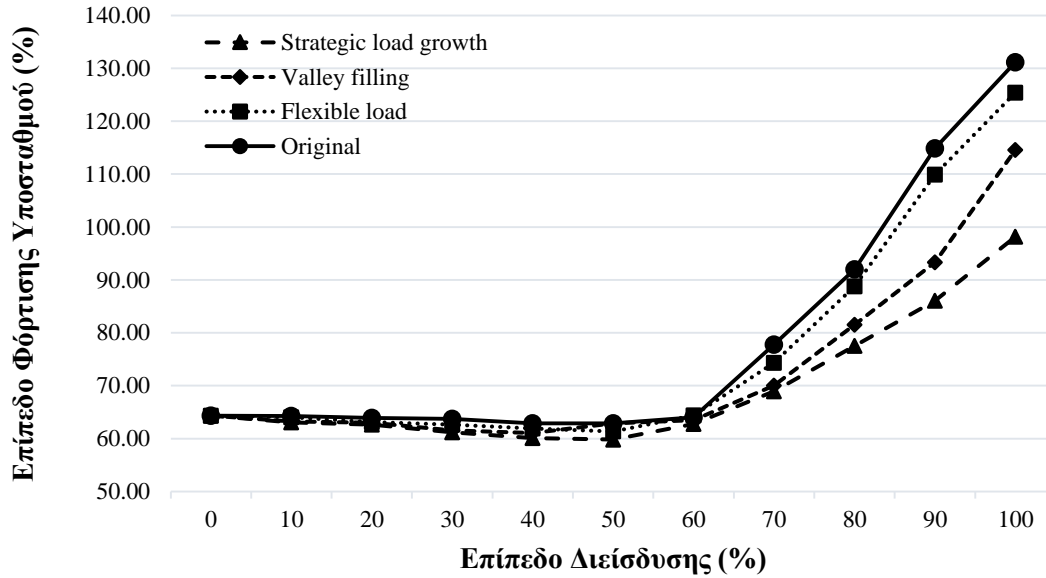


Σχήμα 6.28: Δείκτης LLHF στο δίκτυο N2F1 όταν υπάρχουν μόνο EHP

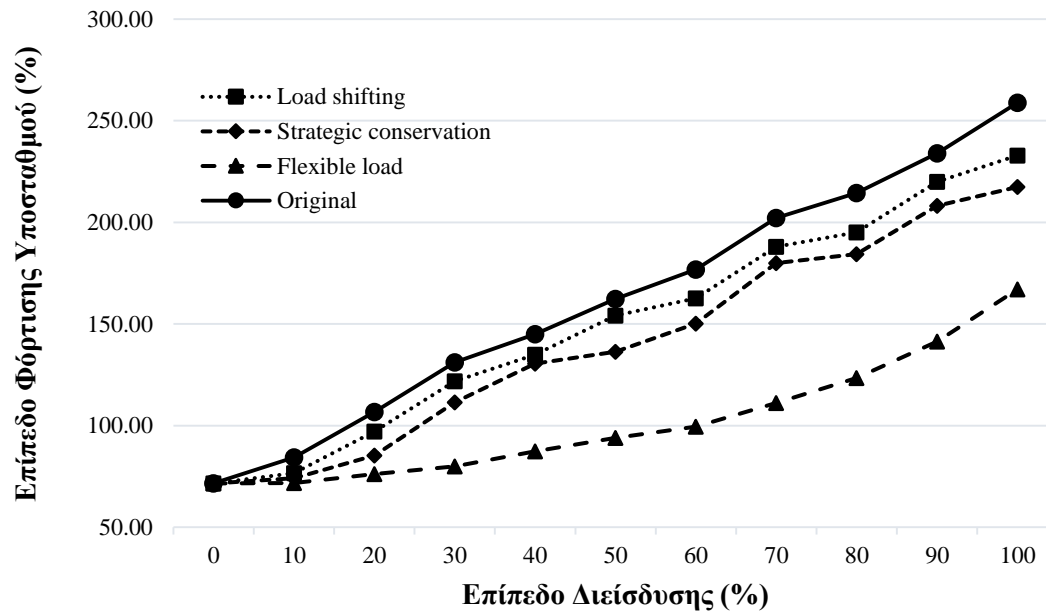
6.4.7 Δείκτης LLT

Στα Σχήματα 6.29 και 6.30 παρουσιάζονται, αντίστοιχα, ο δείκτης LLT (επίπεδο φόρτισης Υ/Σ) με παρουσία μόνο PV (φωτοβολταϊκών), και με παρουσία μόνο EHP (ηλεκτρικών αντλιών θερμότητας). Από αυτά, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Τα αποτελέσματα είναι επίσης συμβατά με αυτά που παρατηρήθηκαν για την τάση των δικτύων, όσον αφορά τη μείωση των προβλημάτων και την αποτελεσματικότητα κάθε μεθόδου.
- Αξιοσημείωτο ότι με εξαίρεση τη flexible load που επιτρέπει διείσδυσεις EHP μέχρι και 60%, καμία από τις υπόλοιπες μεθόδους δεν είναι αξιόπιστη, μην "προστατεύοντας" τον Μ/Σ επαρκώς, με την επιπλέον ανοχή στη διείσδυση που προσφέρουν να είναι ελάχιστη.
- Όσον αφορά τα PV, ενώ όλες οι μέθοδοι μειώνουν σε γενικές γραμμές την καταπόνηση του Μ/Σ, η strategic load growth επιτρέπει διείσδυση μέχρι και 100% χωρίς να δημιουργείται κάποιο αξιοπρόσεκτο πρόβλημα θερμικής καταπόνησης του Υ/Σ.



Σχήμα 6.29: Δείκτης LLT όταν υπάρχουν μόνο PV



Σχήμα 6.30: Δείκτης LLT όταν υπάρχουν μόνο EHP

6.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ N2F5 ΤΩΝ 23 ΦΟΡΤΙΩΝ ΧΩΡΙΣ ΕΛΕΓΧΟ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα, για το δίκτυο N2F5, των αρχικών προσομοιώσεων, χωρίς έλεγχο της κατανάλωσης.

6.5.1 Ανεμογεννήτριες

Λόγω της όλο και αυξανόμενης διείδυσης ανεμογεννητριών (που εγχέουν ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο) παρατηρείται συνεχώς αύξηση της τάσης στους ζυγούς φορτίου του δικτύου, αλλού μεγαλύτερη και αλλού μικρότερη. Παρά ταύτα, δεν παρατηρείται ουδεμία άνω του αποδεκτού υπέρταση, και η όλη λειτουργία του δικτύου και η εξυπηρέτηση των καταναλωτών βρίσκεται

εντός αποδεκτών ορίων. Συμπερασματικά, αφού το ΣΗΕ λειτουργεί φυσιολογικά, ανεξαρτήτως του επιπέδου διείσδυσης των ανεμογεννητριών, δεν απαιτείται περαιτέρω επέμβαση σε μετέπειτα προσομοιώσεις.

6.5.2 Φωτοβολταϊκά

Λόγω της όλο και αυξανόμενης διείσδυσης φωτοβολταϊκών (που εγχέουν ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο) παρατηρείται συνεχώς αύξηση της τάσης στους ζυγούς φορτίου του δικτύου, αλλού μεγαλύτερη και αλλού μικρότερη. Η συνολική επίπτωση είναι πολύ πιο αισθητή σε σχέση με αυτή των ανεμογεννητριών, καθώς η αύξηση της τάσης είναι σημαντικά υψηλότερη, λογικό δεδομένου ότι εγχέεται συνολικά περισσότερη ισχύς στο δίκτυο. Παρά ταύτα, δεν παρατηρείται ουδεμία άνω του αποδεκτού υπέρταση, και η όλη λειτουργία του δικτύου και η εξυπηρέτηση των καταναλωτών βρίσκεται εντός αποδεικτών ορίων. Συμπερασματικά, αφού το ΣΗΕ λειτουργεί φυσιολογικά, ανεξαρτήτως του επιπέδου διείσδυσης των φωτοβολταϊκών, δεν απαιτείται περαιτέρω επέμβαση σε μετέπειτα προσομοιώσεις.

6.5.3 Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας

Λόγω της όλο και αυξανόμενης διείσδυσης ηλεκτρικών αντλιών θερμότητας (που καταναλώνουν ηλεκτρική ισχύ από το δίκτυο) παρατηρείται συνεχώς μείωση της τάσης στους ζυγούς φορτίου του δικτύου, αλλού μεγαλύτερη και αλλού μικρότερη. Παρά ταύτα, δεν παρατηρείται ουδεμία υπό του αποδεκτού υπόταση, και η όλη λειτουργία του δικτύου και η εξυπηρέτηση των καταναλωτών βρίσκεται εντός αποδεικτών ορίων. Συμπερασματικά, αφού το ΣΗΕ λειτουργεί φυσιολογικά, ανεξαρτήτως του επιπέδου διείσδυσης των ηλεκτρικών αντλιών θερμότητας, δεν απαιτείται περαιτέρω επέμβαση σε μετέπειτα προσομοιώσεις.

6.5.4 Συμπεράσματα

Η μελέτη του δικτύου των 23 φορτίων έδειξε πως δεν εμφανίζονται έκτακτα ενδεχόμενα ή οποιουδήποτε είδους προβληματική κατάσταση, ανεξαρτήτως είδους LCT ή επιπέδου διείσδυσης. Παρατηρείται φυσικά επίδραση στη λειτουργία του δικτύου από τα LCT (ανάλογη ανά είδος LCT), αυτή όμως είναι ασήμαντη, ή βρίσκεται εν τέλει εντός των προκαθορισμένων ορίων που θέσαμε στην αρχή. Ένα σημαντικό συμπέρασμα είναι πως τα αποτελέσματα αυτά είναι πιθανότατα συμβατά με το μέγεθος του δικτύου. Λόγω του ότι πρόκειται για ένα μικρό αριθμό φορτίων, η οποιαδήποτε κατάσταση είναι σε κάθε περίπτωση διαχειρίσιμη. Στις περιπτώσεις των LCT παραγωγής, η παρουσία επιπλέον εγχεόμενης ισχύς στο δίκτυο δεν είναι ανησυχητική, καθώς είτε αυτή “καταναλώνεται” στις αντιστάσεις/αντιδράσεις των γραμμών κατά την μεταφορά της, είτε η επίδρασή της είναι αμελητέα ή αποδεκτή. Στις περιπτώσεις των LCT κατανάλωσης, η επιπλέον ισχύς που απαιτείται δεν προκαλεί κάποιο αξιοπρόσεκτο αποτέλεσμα. Συμπερασματικά, ένα μικρό δίκτυο, το οποίο λόγω μεγέθους δεν επιτρέπει τη συγκέντρωση μεγάλων ποσών ισχύος, δεν παρουσιάζει αισθητή “αντίδραση” στη διείσδυση LCT. Δεν κρίθηκε απαραίτητη περαιτέρω επέμβαση στο δίκτυο.

6.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ N1F1 ΤΩΝ 55 ΦΟΡΤΙΩΝ ΧΩΡΙΣ ΕΛΕΓΧΟ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα, για το δίκτυο N1F1, των αρχικών προσομοιώσεων, χωρίς έλεγχο της κατανάλωσης.

6.6.1 Ανεμογεννήτριες

Λόγω της όλο και αυξανόμενης διείσδυσης ανεμογεννητριών (που εγχέουν ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο) παρατηρείται συνεχώς αύξηση της τάσης στους ζυγούς φορτίου του δικτύου, αλλού μεγαλύτερη και αλλού μικρότερη. Παρά ταύτα, δεν παρατηρείται ουδεμία άνω του αποδεκτού υπέρταση, και η όλη λειτουργία του δικτύου και η εξυπηρέτηση των καταναλωτών βρίσκεται εντός αποδεικτών ορίων. Συμπερασματικά, αφού το ΣΗΕ λειτουργεί φυσιολογικά, ανεξαρτήτως του επιπέδου διείσδυσης των ανεμογεννητριών, δεν απαιτείται περαιτέρω επέμβαση σε μετέπειτα προσομοιώσεις.

6.6.2 Φωτοβολταϊκά

Λόγω της όλο και αυξανόμενης διείσδυσης φωτοβολταϊκών (που εγχέουν ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο) παρατηρείται συνεχώς αύξηση της τάσης στους ζυγούς φορτίου του δικτύου, αλλού μεγαλύτερη και αλλού μικρότερη. Η συνολική επίπτωση είναι πολύ πιο αισθητή σε σχέση με αυτή των ανεμογεννητριών, καθώς η αύξηση της τάσης είναι σημαντικά υψηλότερη, λογικό δεδομένου ότι εγχέεται συνολικά περισσότερη ισχύς στο δίκτυο. Παρά ταύτα, δεν παρατηρείται ουδεμία άνω του αποδεκτού υπέρταση, και η όλη λειτουργία του δικτύου και η εξυπηρέτηση των καταναλωτών βρίσκεται εντός αποδεικτών ορίων. Συμπερασματικά, αφού το ΣΗΕ λειτουργεί φυσιολογικά, ανεξαρτήτως του επιπέδου διείσδυσης των φωτοβολταϊκών, δεν απαιτείται περαιτέρω επέμβαση σε μετέπειτα προσομοιώσεις.

6.6.3 Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας

Λόγω της όλο και αυξανόμενης διείσδυσης ηλεκτρικών αντλιών θερμότητας (που καταναλώνουν ηλεκτρική ισχύ από το δίκτυο) παρατηρείται συνεχώς μείωση της τάσης στους ζυγούς φορτίου του δικτύου, αλλού μεγαλύτερη και αλλού μικρότερη. Παρά ταύτα, δεν παρατηρείται ουδεμία υπό του αποδεκτού υπόταση, και η όλη λειτουργία του δικτύου και η εξυπηρέτηση των καταναλωτών βρίσκεται εντός αποδεικτών ορίων. Συμπερασματικά, αφού το ΣΗΕ λειτουργεί φυσιολογικά, ανεξαρτήτως του επιπέδου διείσδυσης των ηλεκτρικών αντλιών θερμότητας, δεν απαιτείται περαιτέρω επέμβαση σε μετέπειτα προσομοιώσεις.

6.6.4 Συμπεράσματα

Η μελέτη του δικτύου των 55 φορτίων έδειξε πως δεν εμφανίζονται έκτακτα ενδεχόμενα ή οποιοδήποτε είδους προβληματική κατάσταση, ανεξαρτήτως είδους LCT ή επιπέδου διείσδυσης. Παρατηρείται φυσικά επίδραση στη λειτουργία του δικτύου από τα LCT (ανάλογη ανά είδος LCT), σοβαρότερη από αυτή που καταγράφηκε στο δίκτυο των 23 φορτίων, η οποία όμως και πάλι βρίσκεται εντός των προκαθορισμένων ορίων που τέθηκαν στην αρχή. Το συμπέρασμα που εξήχθη στην προηγούμενη ενότητα φαίνεται προς το παρόν να επαληθεύεται, καθώς η αύξηση του μεγέθους του δικτύου δυσχέρανε την όλη λειτουργία του. Όντας βέβαια ακόμη ένα σχετικά μικρό δίκτυο, οποιαδήποτε κατάσταση παρατηρείται είναι και πάλι σε κάθε περίπτωση διαχειρίσιμη. Στις περιπτώσεις των LCT παραγωγής, η παρουσία επιπλέον εγγεόμενης ισχύς στο δίκτυο δεν είναι και πάλι ανησυχητική, καθώς είτε αυτή “καταναλώνεται” στις αντιστάσεις/αντιδράσεις των γραμμών κατά την μεταφορά της, είτε η επίδρασή της είναι αμελητέα ή αποδεκτή. Στις περιπτώσεις των LCT κατανάλωσης, η επιπλέον ισχύς που απαιτείται δεν προκαλεί και πάλι κάποιο αξιοπρόσεκτο αποτέλεσμα. Συμπερασματικά, το μέγεθος του δικτύου αυξήθηκε, και επομένως η συνολική συγκέντρωση των ποσών ισχύος, άρα η αύξηση της έντασης της επίδρασης των LCT που παρατηρήθηκε είναι αναμενόμενη. Από την άλλη, στην παρούσα τάξη μεγέθους δεν παρουσιάζεται σημαντική “αντίδραση” στη διείσδυση LCT. Δεν κρίθηκε απαραίτητη περαιτέρω επέμβαση στο δίκτυο.

6.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ N2F3 ΤΩΝ 112 ΦΟΡΤΙΩΝ ΧΩΡΙΣ ΕΛΕΓΧΟ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα, για το δίκτυο N2F3, των αρχικών προσομοιώσεων, χωρίς έλεγχο της κατανάλωσης.

6.7.1 Ανεμογεννήτριες

Λόγω της όλο και αυξανόμενης διείσδυσης ανεμογεννητριών (που εγγέουν ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο) παρατηρείται συνεχώς αύξηση της τάσης στους ζυγούς φορτίου του δικτύου, αλλού μεγαλύτερη και αλλού μικρότερη. Παρά ταύτα, δεν παρατηρείται ουδεμία άνω του αποδεκτού υπέρταση, και η όλη λειτουργία του δικτύου και η εξυπηρέτηση των καταναλωτών βρίσκεται εντός αποδεικτών ορίων. Συμπερασματικά, αφού το ΣΗΕ λειτουργεί φυσιολογικά, ανεξαρτήτως του επιπέδου διείσδυσης των ανεμογεννητριών, δεν απαιτείται περαιτέρω επέμβαση σε μετέπειτα προσομοιώσεις.

6.7.2 Φωτοβολταϊκά

Παρατηρείται πως για το δίκτυο των 112 φορτίων υπερέτασεις στους ζυγούς φορτίων συνοδεύονται από παραβιάσεις των ορίων που τέθηκαν. Η συνολική εικόνα του δικτύου μπορεί με μια πρώτη ματιά να μη φαίνεται ανησυχητική, καθώς τα προβλήματα ξεκινούν από την σχετικά υψηλή διείσδυση του 60%, ενώ στη χειρίστη περίπτωση παρατηρούνται 2 παραβιάσεις ορίων τάσης ανά καταναλωτή, που αντιστοιχεί στο 1% του χρόνου λειτουργίας (Σχήματα 6.5 και 6.6). Όμως, οι δείκτες APC, APT συναθροίζουν τους ελάχιστα προβληματικούς με τους εξαιρετικά προβληματικούς καταναλωτές, αποκρύπτοντας έτσι κομμάτι πληροφοριών. Απεναντίας, ο δείκτης CVP μαρτυρά το μέγεθος των προβλημάτων που καταγράφονται, με εκθετική αύξηση των προβληματικών καταναλωτών μέχρι και άνω του 20% των συνολικών καταναλωτών, ποσοστό ανεπίτρεπτο για ένα δίκτυο διανομής (Σχήμα 6.7). Από την άλλη, η θερμική καταπόνηση του δικτύου δεν είναι ανησυχητικού βαθμού, με τον δείκτη LLHF να λαμβάνει φυσιολογικές και σχετικά χαμηλές τιμές. Τα ποσά της κυκλοφορούσας ισχύος στο δίκτυο παραμένουν ακόμη σε διαχειρίσιμα επίπεδα. Τελικά, ενώ το συγκεκριμένο δίκτυο έχει σχετικά υψηλή ηλεκτρική ανεκτικότητα και πλήρη θερμική ανεκτικότητα στην εισαγωγή PV, δεν είναι εφικτή, υπό τις παρούσες συνθήκες, η πλήρης χρήση των PV.

6.7.3 Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας

Παρατηρείται πως για το δίκτυο των 112 φορτίων οι υποτάσεις στους ζυγούς φορτίων συνοδεύονται από παραβιάσεις των ορίων που τέθηκαν. Η συνολική εικόνα του δικτύου μπορεί είναι αισθητά καλύτερη σε σχέση με την προηγούμενη, καθώς τα προβλήματα ξεκινούν από την πολύ υψηλή διείσδυση του 80%, ενώ στη χειρίστη περίπτωση παρατηρούνται λιγότερο από 2 παραβιάσεις ορίων ανά καταναλωτή, που αντιστοιχεί σε λιγότερο από 1% του χρόνου λειτουργίας (Σχήματα 6.8 και 6.9). Παρά ταύτα, ο δείκτης CVP και πάλι αποκαλύπτει την ύπαρξη προβλημάτων, σημαντικά μικρότερων αυτή τη φορά, με περίπου γραμμική αύξηση των προβληματικών καταναλωτών μέχρι και περίπου το 8% ποσοστό σχετικά μικρό, αλλά και πάλι μη επιτρεπτό για ένα δίκτυο διανομής (Σχήμα 6.10). Επιπλέον, καταγράφεται σημαντική θερμική καταπόνηση του δικτύου, με το δείκτη LLHF να ξεπερνά το 100% στο 60% της διείσδυσης (δεν έχουν ξεκινήσει προβλήματα εξυπηρέτησης) και να φτάνει μέχρι και άνω του 150%, τιμή προφανώς απαγορευτική (Σχήμα 6.12). Προφανώς, τα ποσά της κυκλοφορούσας ισχύος στο δίκτυο είναι ανησυχητικά από άποψη αντοχής του δικτύου. Εν τέλει, ενώ το παρόν δίκτυο έχει υψηλή ηλεκτρική ανεκτικότητα στην εισαγωγή EHP, είναι αρκετά πιο περιορισμένο από άποψη θερμικής αντοχής, δεν είναι επομένως εφικτή, υπό τις παρούσες συνθήκες, η πλήρης χρήση τους, τόσο για λόγους αξιοπιστίας, όσο και για λόγους ασφαλείας.

6.7.4 Συμπεράσματα

Η μελέτη του δικτύου των 112 φορτίων έδειξε πως αρχίζουν πλέον να εμφανίζονται προβλήματα στη λειτουργία του, τα οποία είναι ως επί το πλείστον προβλήματα τάσης. Επαληθεύεται εκ νέου το συμπέρασμα που εξήχθη στην προηγούμενη ενότητα, καθώς η αύξηση του μεγέθους του δικτύου δυσχέρανε την όλη λειτουργία του. Στις περιπτώσεις των μεγάλων LCT παραγωγής (PV), η παρουσία επιπλέον εγγεόμενης ισχύς στο δίκτυο είναι πλέον ανησυχητική, με την συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση να αρχίζει να δημιουργεί προβληματικές καταστάσεις και να επηρεάζει σημαντικό ποσοστό καταναλωτών.. Στις περιπτώσεις των LCT κατανάλωσης, η επιπλέον ισχύς που απαιτείται προκαλεί πλέον αξιοπρόσεκτα αποτελέσματα. Τόσο οι περιπτώσεις παραβίασης των ορίων τάσης, όσο και η αντίστοιχη διάρκειά τους αυξήθηκαν και μάλιστα πολύ περισσότερο σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των PV. Το γεγονός ότι επηρεάζονται κατά μέσο όρο λιγότεροι καταναλωτές από τα EHP είναι η μεγαλύτερη ανεκτικότητα του χρησιμοποιούμενου προτύπου στις υπερτάσεις, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως. Τέλος, όσον αφορά αποκλειστικά τα EHP (προς το παρόν), το κάνουν την εμφάνισή τους μη αποδεκτές καταστάσεις λειτουργίας του δικτύου, με σοβαρές παραβιάσεις των θερμικών του ορίων από ένα σημείο και έπειτα. Συμπερασματικά, το μέγεθος του δικτύου αυξήθηκε σημαντικά, και επομένως η συνολική συγκέντρωση των ποσών ισχύος, άρα η αντίστοιχη σημαντική αύξηση της έντασης της επίδρασης των LCT που παρατηρήθηκε είναι αναμενόμενη. Πλέον, στην παρούσα τάξη μεγέθους παρουσιάζονται σημαντικά προβλήματα τάσης αλλά και θερμικά. Από την άλλη, αυτά εμφανίζονται μετά από σημαντικό επίπεδο διείσδυσης. Κρίνεται επομένως απαραίτητη η περαιτέρω επέμβαση στο δίκτυο.

6.8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ N2F3 ΤΩΝ 112 ΦΟΡΤΙΩΝ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

6.8.1 Φωτοβολταϊκά

6.8.1.1 Strategic Load Growth

Τα αποτελέσματα που σημειώνονται είναι εντυπωσιακά. Όχι μόνο υπάρχει μεγάλη μείωση των δεικτών APC, APT (Σχήματα 6.14 και 6.15), αλλά και η ποιότητα εξυπηρέτησης βελτιώνεται σημαντικά ανά επίπεδο διείσδυσης LCT. Ακόμη, τα πραγματικά προβλήματα τάσης για τους καταναλωτές ξεκινούν από τη διείσδυση του 90% (σε σχέση με το αρχικό 60%), ενώ για μέγιστη εισχώρηση PV παρατηρείται σχεδόν 70% ποσοστιαία μείωση των προβληματικών καταναλωτών (Σχήμα 6.16). Με ένα εξιδανικευμένο φορτίο τα προβλήματα θα μπορούσαν ενδεχομένως να έχουν εξαιρεθεί πλήρως, ακόμη και για διείσδυση 100%. Να σημειωθεί πως ακόμη και κατά τις περιόδους που δεν λειτουργούσαν τα PV, το επιπλέον φορτίο δεν δημιούργησε κάποιο αξιοσημείωτο πρόβλημα υπότασης, παρόλο που η πτώση τάσης ήταν εντονότερη σε σχέση με την αρχική προσομοίωση, όπου υπήρχαν μόνο τα οικιακά φορτία. Όσον αφορά τα θερμικά αποτελέσματα για τον Υ/Σ, τα αποτελέσματα δεν είναι αξιοσημείωτα σε χαμηλές διεισδύσεις, όσο όμως αυξάνεται το ποσοστό εισχώρησης άνω του 60%, τόσο εντονότερη είναι η μείωση των θερμικών επιδράσεων, με τη μέγιστη διείσδυση του 100% να παρουσιάζει μείωση περίπου 25% σε σχέση με την αρχική προσομοίωση (Σχήμα 6.29).

6.8.1.2 Valley Filling

Παρατηρείται βελτίωση σε σχέση με την αρχική μείωση, μικρότερη όμως σε σχέση με αυτή της strategic load growth. Συγκεκριμένα, οι δείκτες APC και APT παρουσιάζουν μείωση άνω του 50% (Σχήματα 6.14 και 6.15), ενώ ουσιαστικά προβλήματα τάσης ξεκινούν από διεισδύσεις του 80% (Σχήμα 6.16). Συγκριτικά, η αποτελεσματικότητα της valley filling είναι μειωμένη κατά περίπου 30% σε σχέση με τη strategic load growth. Αυτό αποδίδεται στη φύση του τρόπου εφαρμογής της valley filling, με τα SD να πραγματοποιούν μια καλύτερη κατανομή της ενέργειας. Όμως, καθώς η ανακατανομή υστερεί σε σχέση με την κατανάλωση, η

αποτελεσματικότητά της είναι μειωμένη. Όσον αφορά τα θερμικά αποτελέσματα του Υ/Σ, παρατηρείται βελτίωση σε όλα τα επίπεδα διείσδυσης, λόγω όμως του ότι η ενέργεια ανακατανέμεται, η θερμική βελτίωση (περίπου 15% σε μέγιστη διείσδυση) είναι αισθητά μικρότερη σε σχέση με την ηλεκτρική (περίπου 40% σε μέγιστη διείσδυση) (Σχήμα 6.29).

6.8.1.3 Flexible Load

Η μέθοδος flexible load έχει τη μικρότερη ουσιαστική επίδραση επί της αρχικής κατάστασης, με όλους τους δείκτες των δύο περιπτώσεων σχεδόν να ταυτίζονται (διαφορά περίπου 1-2%) (Σχήματα 6.14, 6.15 και 6.16). Τα αποτελέσματα αυτά είναι αναμενόμενα, καθώς τα PV παράγουν πολύ περισσότερη ισχύ σε σχέση με αυτή που μπορούν να καταναλώσουν τα οικιακά φορτία, ακόμη και μετά την εφαρμογή της μεθόδου. Έτσι, λόγω της αδυναμίας της flexible load να επέμβει στη συμπεριφορά των PV ή να τα αντισταθμίσει ικανοποιητικά, προσφέρει πολύ μικρή βελτίωση, με την αποτελεσματικότητά της είναι ελάχιστη. Όσον αφορά τα θερμικά αποτελέσματα του Υ/Σ, οι δείκτες LLT πριν και μετά την εφαρμογή του flexible load είναι σχεδόν ταυτόσημοι για τους προαναφερθέντες λόγους (Σχήμα 6.29).

6.8.2 Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας

6.8.2.1 Load Shifting

Η μέθοδος load shifting επιτυγχάνει βελτίωση των αρχικών αποτελεσμάτων κατά περίπου 30%, τόσο στους δείκτες APC, APT, όσο και στη γενικότερη ποιότητα εξυπηρέτησης (δείκτης CVP) (Σχήματα 6.17, 6.18 και 6.19). Η μείωση αυτή δεν είναι ωστόσο πολύ μεγάλη, λόγω των αδυναμιών που συνοδεύουν την ανακατανομή της ενέργειας. Συγκεκριμένα, λόγω του καταναλωτικού προφίλ των EHP, η κατανάλωση είναι σχεδόν πάντα υψηλή, με αποτέλεσμα η αναδιάρταξή της να μη είναι εγγενώς ιδιαίτερα αποτελεσματική. Όσον αφορά τα θερμικά αποτελέσματα, τόσο για τον Υ/Σ, όσο και για το δίκτυο, παρατηρούνται παρόμοια αποτελέσματα, με την θερμική καταπόνηση να είναι μειωμένη, αλλά αισθητά λιγότερο σε σχέση με το ηλεκτρικό της ανάλογο (περίπου 7% για το δίκτυο και περίπου 11% για τον Υ/Σ) (Σχήματα 6.27 και 6.30).

6.8.2.2 Strategic Conservation

Η μέθοδος strategic conservation παραγάγει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τη load shifting, τόσο από άποψη ποιότητας εξυπηρέτησης, όσο και από άποψη θερμική, με την ποσοστιαία βελτίωση να βρίσκεται κάτω από το 10% (Σχήματα 6.17, 6.18, 6.19, 6.27 και 6.30). Κάτι τέτοιο είναι μέχρι ένα βαθμό αναμενόμενο: ο βέλτιστος δυνατός προγραμματισμός κατανάλωσης αποφέρει συνολικά μείωση της ενέργειας περίπου 5-15%. Το γεγονός ότι πλέον σημειώνεται μείωση και όχι ανακατανομή, μεταφράζεται σε μειωμένη θερμική καταπόνηση του δικτύου, καθώς και σε μικρότερες απαιτήσεις φορτίου, άρα προβλημάτων τάσης. Ο συνδυασμός όλων των συμπεριφορών των καταναλωτών επιτυγχάνει τη συνολική βελτίωση της εικόνας του ΣΗΕ. Όμως, οι δύο βασικές αδυναμίες της μεθόδου (ατομική κάθε φορά εφαρμογή, προγραμματισμός ανεξάρτητος από την πρωταρχική κατάσταση του ΣΗΕ) δε επιτρέπουν τη δημιουργία σημαντικών αποτελεσμάτων.

6.8.2.3 Flexible Load

Η μέθοδος flexible load χρησιμοποιείται αντίθετα σε σχέση με την περίπτωση των PV, δηλαδή για τη μείωση της ζήτησης. Επιπλέον, υπάρχει επίδραση στη συμπεριφορά των EHP, καθώς αποτελούν απλώς φορτίο, σε αντίθεση με τα PV. Τα αποτελέσματα είναι πραγματικά αξιοσημείωτα. Οι δείκτες APC, APT, CVP είναι αισθητά βελτιωμένοι, έχοντας παρουσιάσει

μείωση άνω του 60% σε σχέση με τους αρχικούς (Σχήματα 6.17, 6.18 και 6.19). Επιπλέον, σημαντικά αποτελέσματα σημειώνονται και στους δείκτες LLHF, LLT, με τον Υ/Σ να αντέχει πλέον διεισδύσεις μέχρι και 60% (σε σχέση με το αρχικό περίπου 15%), ενώ η θερμική καταπόνηση του δικτύου κυμαίνεται σε αποδεκτά επίπεδα μέχρι και για διείσδυση της τάξης του 90%, εμφανώς βελτιωμένη σε σχέση με το αρχικό 30% (Σχήματα 6.27 και 6.30). Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι αναμενόμενα, καθώς η δραστική αυξητική μεταβολή των τιμών έχει σαν αποτέλεσμα την αποθάρρυνση των καταναλωτών από την προηγούμενη, επικίνδυνα υψηλή ζήτηση. Η εφαρμογή βέβαια της εν λόγω μεθόδου για την επίτευξη των εν λόγω αποτελεσμάτων αναμένεται ιδιαίτερα ακριβή και είναι αμφίβολο το κατά πόσο συμφέρει οικονομικά με τα σημερινά δεδομένα. Η διερεύνηση του προβληματισμού αυτού, όμως, δεν αποτελεί κομμάτι της παρούσας μελέτης.

6.8.3 Συγκρίσεις και Συμπεράσματα

Καταρχήν να σημειωθεί πως παρά το γεγονός ότι πέντε μέθοδοι επέμβασης στο ΣΗΕ ήταν όλες διαφορετικές μεταξύ τους, με διαφορετική αποτελεσματικότητα, όλες κατάφεραν να βελτιώσουν την αρχική του εικόνα. Ειδικότερα, από την πλευρά των PV, φάνηκε πως η χειραγώγηση του υπάρχοντος φορτίου δεν αποτελεί καλή επιλογή για την αντιμετώπιση των προβλημάτων. Η προσθήκη νέων στοιχείων, είτε αυτά ανακατένειμαν την ενέργεια (SD), είτε την κατανάλωσαν (EV), ακόμη κι αν αυτό δεν έγινε με βέλτιστο τρόπο, παρήγαγε πολύ καλύτερα αποτελέσματα, με την κατανάλωση να υπερέχει αισθητά σε σχέση με την αναδιάταξη. Από την πλευρά των EHP, τόσο η ανακατανομή, όσο και η καλύτερη διαχείριση της ενέργειας βελτίωσαν την εικόνα του ΣΗΕ, χωρίς να εμφανίζουν όμως μεγάλη διαφορά, λόγω της σταθερά υψηλής ζήτησης. Η χειραγώγηση του συνολικού φορτίου μέσω της μεταβολής των τιμών ενέργειας παρήγαγε εξαιρετικά αποτελέσματα από όλες τις σκοπιές. Όμως, η χρήση μιας τέτοιας μεθόδου αναμένεται εξαιρετικά ακριβή και αμφίβολου συμφέροντος.

Συνοπτικά, όταν στο δίκτυο υπάρχει περίσσεια ενέργεια, ειδικά όταν αυτή είναι πολύ υψηλή (και άρα η ανακατανομή δεν μπορεί να επιτύχει πολλά), πρέπει να διοχετεύεται κάπου ικανοποιητικά, είτε αυτό είναι η γη (χείριστη λύση), είτε είναι κάποιο προγραμματιζόμενο φορτίο. Όταν η κατανάλωση είναι αυξημένη, πρέπει είτε να βρεθεί κάποιος ικανοποιητικός (οικονομικά) τρόπος αυτή να μειωθεί, είτε να μπορεί να εξυπηρετείται και από επιπλέον πηγές (διανεμημένη παραγωγή ή LCT παραγωγή).

6.9 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ N2F1 ΤΩΝ 175 ΦΟΡΤΙΩΝ ΧΩΡΙΣ ΕΛΕΓΧΟ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα, για το δίκτυο N2F1, των αρχικών προσομοιώσεων, χωρίς έλεγχο της κατανάλωσης.

6.9.1 Ανεμογεννήτριες

Λόγω της όλο και αυξανόμενης διείσδυσης ανεμογεννητριών (που εγχέουν ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο) παρατηρείται συνεχώς αύξηση της τάσης στους ζυγούς φορτίου του δικτύου, αλλού μεγαλύτερη και αλλού μικρότερη. Παρά ταύτα, δεν παρατηρείται ουδεμία άνω του αποδεκτού υπέρταση, και η όλη λειτουργία του δικτύου και η εξυπηρέτηση των καταναλωτών βρίσκεται εντός αποδεικτών ορίων. Συμπερασματικά, αφού το ΣΗΕ λειτουργεί φυσιολογικά, ανεξαρτήτως του επιπέδου διείσδυσης των ανεμογεννητριών, δεν απαιτείται περαιτέρω επέμβαση σε μετέπειτα προσομοιώσεις.

6.9.2 Φωτοβολταϊκά

Παρατηρείται πως για το δίκτυο των 175 φορτίων δεν σημειώνονται μόνο υπερτάσεις στους ζυγούς φορτίων αλλά και σημαντικές παραβιάσεις των ορίων που τέθηκαν. Οι δείκτες APC, APT λειτουργούν σχετικά παραπλανητικά, καθώς παρόλο που εμφανίζουν στη χειρίστη περίπτωση περίπου 8 παραβιάσεις ορίων ανά καταναλωτή, που αντιστοιχεί σε περίπου 3% του χρόνου λειτουργίας, φαίνεται πως αρχίζουν να μετράνε από το 60% της διείσδυσης (Σχήματα 6.5 και 6.6). Ο δείκτης CVP αποκαλύπτει την πραγματική συνολική εικόνα του δικτύου, η οποία είναι ιδιαίτερα ανησυχητική, καθώς όχι μόνο καταγράφονται προβλήματα που ξεκινούν από μόλις το 20% της διείσδυσης, αλλά επιπλέον η μείωση της αξιοπιστίας εξυπηρέτησης γίνεται με ρυθμό γρηγορότερο του εκθετικού, με το δείκτη να προσεγγίζει μέχρι και το 75%, με την πλειονότητα των καταναλωτών του δικτύου να αντιμετωπίζουν προβλήματα (Σχήμα 6.7). Επιπλέον, είναι υπαρκτή η θερμική καταπόνηση του δικτύου, χωρίς όμως αυτή να είναι δυσθεόρατων μεγεθών. Ο δείκτης LLHF “πιάνει” το 100% στο 80% της διείσδυσης, φτάνοντας τελικά κοντά στο 120%, το οποίο παρόλο που δεν είναι αποδεκτό, είναι σχετικά διαχειρίσιμο (Σχήμα 6.11). Λόγω του ότι τα φορτία “αντιστέκονται” κατά μία έννοια στα PV, μειώνεται αισθητά η ισχύ που εγχέεται στο δίκτυο, με αποτέλεσμα οι γραμμές να μην καταπονούνται σε βαθμό καταστροφικό. Εν τέλει, το παρόν δίκτυο έχει ελάχιστη καταναλωτική ανεκτικότητα και υψηλή θερμική ανεκτικότητα στην εισαγωγή PV, δεν είναι λοιπόν σε καμία περίπτωση δυνατή, από άποψη αξιοπιστίας και υπό τις παρούσες συνθήκες, η μεγάλου εύρους χρήση τους.

6.9.3 Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας

Παρατηρείται πως για το δίκτυο των 175 φορτίων δεν σημειώνονται μόνο υποτάσεις στους ζυγούς φορτίων αλλά και σημαντικές παραβιάσεις των ορίων που τέθηκαν. Τόσο οι δείκτες APC, APT (χειρίστη περίπτωση 15 παραβιάσεις ορίων ανά καταναλωτή, που αντιστοιχούν σε άνω του 5% του χρόνου λειτουργίας) (Σχήματα 6.8 και 6.9), όσο και ο δείκτης CVP (έναρξη προβλημάτων στο 30% της διείσδυσης, ανώτατη τιμή του δείκτη άνω του 50%) αποκαλύπτουν την συνολική εικόνα του δικτύου, η οποία είναι και πάλι ιδιαίτερος ανησυχητική (Σχήμα 6.10). Η αύξηση των δεικτών ακολουθεί ρυθμό μεταξύ του γραμμικού και του εκθετικού και από πολύ νωρίς υποδεικνύουν την αδυναμία του δικτύου για ανοχή σημαντικής εισαγωγής EHP. Επιπλέον, υπάρχει βαρύτερη θερμική καταπόνηση του δικτύου, με το δείκτη LLHF να “πιάνει” το 100% μόλις στο 20% της διείσδυσης και να ξεπερνά μάλιστα μέχρι και το 250% (Σχήμα 6.12). Η κατανάλωση των φορτίων λειτουργεί προσθετικά σε σχέση με την κατανάλωση των EHP, δημιουργώντας έτσι τεράστια ποσά κυκλοφορούσας ισχύος στο δίκτυο. Τα παραπάνω αποτελούν σαφέστατη ένδειξη του γεγονότος πως το δίκτυο δεν δύναται να λειτουργήσει ακόμη και με μικρή συμμετοχή EHP, καθώς τα θέματα ασφαλείας που εμφανίζονται είναι τεράστια. Εν τέλει, το παρόν δίκτυο έχει ελάχιστη καταναλωτική και θερμική ανεκτικότητα στην εισαγωγή EHP, δεν είναι λοιπόν σε καμία περίπτωση δυνατή, τόσο από άποψη αξιοπιστίας, όσο και από άποψη προστασίας, υπό τις παρούσες συνθήκες, η μεγάλου εύρους χρήση τους.

6.9.4 Συμπεράσματα

Η μελέτη του δικτύου των 175 φορτίων έδειξε πως τα προβλήματα τα οποία δημιουργούνται (προβλήματα τάσης και θερμικά προβλήματα) είναι πλέον πολύ σοβαρότερα και ξεκινούν πολύ νωρίς, δηλαδή από πολύ χαμηλά επίπεδα διείσδυσης LCT. Είναι πλέον σαφές αυτό που υποτέθηκε σε προηγούμενες ενότητες, ότι δηλαδή αύξηση του μεγέθους του δικτύου δυσχεραίνει σημαντικά την ομαλή λειτουργία του, με τα προβλήματα να αυξάνονται με σχεδόν εκθετικό ρυθμό. Στις περιπτώσεις των μεγάλων LCT παραγωγής (PV), η παρουσία επιπλέον εγχόμενης ισχύς στο δίκτυο είναι ανησυχητική σε πολύ μεγάλο βαθμό, με τη δημιουργία προβληματικών καταστάσεων ήδη από πολύ χαμηλές διεισδύσεις και τον επηρεασμό πάρα πολύ μεγάλου αριθμού καταναλωτών για υψηλές διεισδύσεις. Στις

περιπτώσεις των LCT κατανάλωσης, η επιπλέον ισχύς που απαιτείται φτάνει σε ανεπιθύμητα υψηλά επίπεδα. Τόσο οι περιπτώσεις παραβίασης των ορίων τάσης, όσο και η αντίστοιχη διάρκειά τους αυξήθηκαν σε επίπεδα που δεν μπορούν να αγνοηθούν (ειδικά σε σχέση με αυτά των PV) όσο πριν οι δείκτες APC και APT. Πάλι, το γεγονός ότι επηρεάζονται κατά μέσο όρο λιγότεροι καταναλωτές από τα EHP είναι η μεγαλύτερη ανεκτικότητα του χρησιμοποιούμενου προτύπου στις υπερτάσεις, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως. Τέλος, τόσο για τα EHP όσο και για τα PV, η θερμική καταπόνηση του δικτύου είναι αρκετά σοβαρότερη, αναδεικνύοντας επιπλέον τη μη ικανότητα του δικτύου να λειτουργήσει με υψηλή διείσδυση LCT από πρακτική πλευρά. Τέλος, να σημειωθεί ότι ακόμη και για χαμηλά επίπεδα διείσδυσης, ο Υ/Σ δεν μπορεί να "σηκώσει" αποτελεσματικά την αυξημένη ζήτηση λόγω EHP, ενώ για τα PV είναι κάπως πιο ανεκτικός (λόγω της φύσης του συγκεκριμένου LCT), αλλά και πάλι μη ικανός να επιτρέψει υψηλές διεισδύσεις. Συμπερασματικά, το μέγεθος του δικτύου αυξήθηκε σημαντικά, και επομένως η συνολική συγκέντρωση των ποσών ισχύος, άρα η αντίστοιχη σημαντική αύξηση της έντασης της επίδρασης των LCT που παρατηρήθηκε είναι αναμενόμενη. Πλέον, στην παρούσα τάξη μεγέθους παρουσιάζονται πάρα πολύ σοβαρά προβλήματα τάσης αλλά και θερμικά. Επιπλέον, αυτά εμφανίζονται ακόμη και σε πολύ χαμηλά επίπεδα διείσδυσης. Κρίνεται επομένως απαραίτητη η περαιτέρω επέμβαση στο δίκτυο.

6.10 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ N2F1 ΤΩΝ 175 ΦΟΡΤΙΩΝ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

6.10.1 Φωτοβολταϊκά

6.10.1.1 Strategic Load Growth

Τα αποτελέσματα που σημειώνονται είναι ακόμη εντυπωσιακότερα σε σχέση με το δίκτυο των 112 φορτίων. Όχι μόνο υπάρχει μεγάλη μείωση των δεικτών APC, APT (Σχήματα 6.20 και 6.21), αλλά και η ποιότητα εξυπηρέτησης βελτιώνεται σημαντικά ανά επίπεδο διείσδυσης LCT. Ακόμη, τα πραγματικά προβλήματα τάσης για τους καταναλωτές ξεκινούν από τη διείσδυση του 60% (σε σχέση με το αρχικό 30%), ενώ για μέγιστη εισχώρηση PV παρατηρείται σχεδόν 65% ποσοστιαία μείωση των προβληματικών καταναλωτών (Σχήμα 6.22). Με ένα εξιδανικευμένο φορτίο τα προβλήματα θα μπορούσαν ενδεχομένως να έχουν εξαλειφθεί πλήρως, ακόμη και για διείσδυση 100%. Από την άλλη, θα πρέπει να σημειωθεί πως κατά τις περιόδους που δεν λειτουργούσαν τα PV, το επιπλέον φορτίο δημιούργησε στην περίπτωση αυτή ορισμένα προβλήματα υπότασης. Το ποσοστό των καταναλωτών που πλήγωνα από προβλήματα εξυπηρέτησης αποτελεί συνδυασμό περιπτώσεων υπερτάσεων κατά τις μεσημεριανές ώρες και υποτάσεων κατά τις βραδινές ώρες. Όσον αφορά τα θερμικά αποτελέσματα για το δίκτυο, υπάρχει σημαντική μείωση της θερμικής καταπόνησης, με την νέα κατάσταση που επιτεύχθηκε να επιτρέπει μέχρι και 100% διείσδυση PV, αφήνοντας ένα επιπλέον περιθώριο θερμικής αντοχής 10% (Σχήμα 6.26). Για τον Υ/Σ, τα αποτελέσματα δεν είναι αξιοσημείωτα σε χαμηλές διεισδύσεις, όσο όμως αυξάνεται το ποσοστό εισχώρησης άνω του 60%, τόσο εντονότερη είναι η μείωση των θερμικών επιδράσεων, με τη μέγιστη διείσδυση του 100% να παρουσιάζει μείωση περίπου 25% σε σχέση με την αρχική προσομοίωση (Σχήμα 6.29).

6.10.1.2 Valley Filling

Παρατηρείται βελτίωση σε σχέση με την αρχική μείωση, μικρότερη όμως σε σχέση με αυτή της strategic load growth. Συγκεκριμένα, οι δείκτες APC και APT παρουσιάζουν μείωση άνω του 75% (Σχήμα 6.20 και 6.21), ενώ ουσιαστικά προβλήματα τάσης ξεκινούν από διεισδύσεις του 50% (Σχήμα 6.22). Συγκριτικά, η αποτελεσματικότητα της valley filling είναι μειωμένη κατά περίπου 35% σε σχέση με τη strategic load growth. Αυτό αποδίδεται στη φύση του τρόπου εφαρμογής της valley filling, με τα SD να πραγματοποιούν μια καλύτερη κατανομή της ενέργειας. Όμως, καθώς η ανακατανομή υστερεί σε σχέση με την κατανάλωση, η

αποτελεσματικότητά της είναι μειωμένη. Όσον αφορά τα θερμικά αποτελέσματα, τόσο για τον Υ/Σ όσο και για το δίκτυο, παρατηρείται βελτίωση σε όλα τα επίπεδα διείσδυσης, λόγω όμως του ότι η ενέργεια ανακατανέμεται, η θερμική βελτίωση (περίπου 15% σε μέγιστη διείσδυση) είναι αισθητά μικρότερη σε σχέση με την ηλεκτρική (περίπου 40% σε μέγιστη διείσδυση) (Σχήματα 6.26 και 6.29).

6.10.1.3 Flexible Load

Η μέθοδος flexible load έχει τη μικρότερη ουσιαστική επίδραση επί της αρχικής κατάστασης, με όλους τους δείκτες των δύο περιπτώσεων σχεδόν να ταυτίζονται (διαφορά περίπου 1-2%) (Σχήματα 6.20, 6.21 και 6.22). Τα αποτελέσματα αυτά είναι αναμενόμενα, καθώς τα PV παράγουν πολύ περισσότερη ισχύ σε σχέση με αυτή που μπορούν να καταναλώσουν τα οικιακά φορτία, ακόμη και μετά την εφαρμογή της μεθόδου. Έτσι, λόγω της αδυναμίας της flexible load να επέμβει στη συμπεριφορά των PV ή να τα αντισταθμίσει ικανοποιητικά, προσφέρει πολύ μικρή βελτίωση, με την αποτελεσματικότητά της είναι ελάχιστη. Όσον αφορά τα θερμικά αποτελέσματα, τόσο για το δίκτυο όσο και για τον Υ/Σ, οι δείκτες LLHF και LLT πριν και μετά την εφαρμογή του flexible load είναι σχεδόν ταυτόσημοι για τους προαναφερθέντες λόγους (Σχήματα 6.26 και 6.29).

6.10.2 Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας

6.10.2.1 Load Shifting

Η μέθοδος load shifting επιτυγχάνει βελτίωση των αρχικών αποτελεσμάτων κατά περίπου 15%, τόσο στους δείκτες APC, APT, όσο και στη γενικότερη ποιότητα εξυπηρέτησης (δείκτης CVP) (Σχήματα 6.23, 6.24 και 6.25). Η μείωση αυτή δεν είναι ωστόσο πολύ μεγάλη, λόγω των αδυναμιών που συνοδεύουν την ανακατανομή της ενέργειας. Συγκεκριμένα, λόγω του καταναλωτικού προφίλ των EHP, η κατανάλωση είναι σχεδόν πάντα υψηλή, με αποτέλεσμα η αναδιάρταξή της να μη είναι εγγενώς ιδιαίτερα αποτελεσματική. Όσον αφορά τα θερμικά αποτελέσματα, τόσο για τον Υ/Σ, όσο και για το δίκτυο, παρατηρούνται παρόμοια αποτελέσματα, με την θερμική καταπόνηση να είναι μειωμένη, αλλά αισθητά λιγότερο σε σχέση με τα ηλεκτρικά αποτελέσματα (περίπου 12% για το δίκτυο και περίπου 6% για τον Υ/Σ) (Σχήματα 6.28 και 6.30).

6.10.2.2 Strategic Conservation

Η μέθοδος strategic conservation παραγάγει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τη load shifting, τόσο από άποψη ποιότητας εξυπηρέτησης, όσο και από άποψη θερμική, με την ποσοστιαία βελτίωση να βρίσκεται κάτω από το 10% (Σχήματα 6.23, 6.24, 6.25, 6.28 και 6.30). Κάτι τέτοιο είναι μέχρι ένα βαθμό αναμενόμενο: ο βέλτιστος δυνατός προγραμματισμός κατανάλωσης αποφέρει συνολικά μείωση της ενέργειας περίπου 5-15%. Το γεγονός ότι πλέον σημειώνεται μείωση και όχι ανακατανομή, μεταφράζεται σε μειωμένη θερμική καταπόνηση του δικτύου, καθώς και σε μικρότερες απαιτήσεις φορτίου, άρα προβλημάτων τάσης. Ο συνδυασμός όλων των συμπεριφορών των καταναλωτών επιτυγχάνει τη συνολική βελτίωση της εικόνας του ΣΗΕ. Όμως, οι δύο βασικές αδυναμίες της μεθόδου (ατομική κάθε φορά εφαρμογή, προγραμματισμός ανεξάρτητος από την πρωταρχική κατάσταση του ΣΗΕ) δε επιτρέπουν τη δημιουργία σημαντικών αποτελεσμάτων.

6.10.2.3 Flexible Load

Η μέθοδος flexible load χρησιμοποιείται αντίθετα σε σχέση με την περίπτωση των PV, δηλαδή για τη μείωση της ζήτησης. Επιπλέον, υπάρχει επίδραση στη συμπεριφορά των EHP, καθώς αποτελούν απλώς φορτίο, σε αντίθεση με τα PV. Τα αποτελέσματα είναι πραγματικά

αξιοσημείωτα. Οι δείκτες APC, APT, CVP είναι αισθητά βελτιωμένοι, έχοντας παρουσιάσει μείωση άνω του 55% σε σχέση με τους αρχικούς (Σχήματα 6.23, 6.24 και 6.25). Επιπλέον, σημαντικά αποτελέσματα σημειώνονται και στους δείκτες LLHF, LLT, με τον Υ/Σ να αντέχει πλέον διεισδύσεις μέχρι και 60% (σε σχέση με το αρχικό περίπου 15%) (Σχήμα 6.30), ενώ η θερμική καταπόνηση του δικτύου κυμαίνεται σε αποδεκτά επίπεδα μέχρι και για διείσδυση της τάξης του 60%, εμφανώς βελτιωμένη σε σχέση με το αρχικό 20% (Σχήμα 6.28). Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι αναμενόμενα, καθώς η δραστική αυξητική μεταβολή των τιμών έχει σαν αποτέλεσμα την αποθάρρυνση των καταναλωτών από την προηγούμενη, επικίνδυνα υψηλή ζήτηση. Η εφαρμογή βέβαια της εν λόγω μεθόδου για την επίτευξη των εν λόγω αποτελεσμάτων αναμένεται ιδιαίτερα ακριβή και είναι αμφίβολο το κατά πόσο συμφέρει οικονομικά με τα σημερινά δεδομένα. Η διερεύνηση του προβληματισμού αυτού, όμως, δεν αποτελεί κομμάτι της παρούσας μελέτης.

6.10.3 Συγκρίσεις και Συμπεράσματα

Καταρχήν να σημειωθεί πως παρά το γεγονός ότι πέντε μέθοδοι επέμβασης στο ΣΗΕ ήταν όλες διαφορετικές μεταξύ τους, με διαφορετική αποτελεσματικότητα, όλες κατάφεραν να βελτιώσουν την αρχική του εικόνα. Ειδικότερα, από την πλευρά των PV, φάνηκε πως η χειραγώγηση του υπάρχοντος φορτίου δεν αποτελεί καλή επιλογή για την αντιμετώπιση των προβλημάτων. Η προσθήκη νέων στοιχείων, είτε αυτά ανακατένειμαν την ενέργεια (SD), είτε την κατανάλωναν (EV), ακόμη κι αν αυτό δεν έγινε με βέλτιστο τρόπο, παρήγαγε πολύ καλύτερα αποτελέσματα, με την κατανάλωση να υπερέχει αισθητά σε σχέση με την αναδιάταξη. Από την πλευρά των EHP, τόσο η ανακατανομή, όσο και η καλύτερη διαχείριση της ενέργειας βελτίωσαν την εικόνα του ΣΗΕ, χωρίς να εμφανίζουν όμως μεγάλη διαφορά, λόγω της σταθερά υψηλής ζήτησης. Η χειραγώγηση του συνολικού φορτίου μέσω της μεταβολής των τιμών ενέργειας παρήγαγε εξαιρετικά αποτελέσματα από όλες τις σκοπιές. Όμως, η χρήση μιας τέτοιας μεθόδου αναμένεται εξαιρετικά ακριβή και αμφίβολου συμφέροντος.

Συνοπτικά, όταν στο δίκτυο υπάρχει περίσσεια ενέργεια, ειδικά όταν αυτή είναι πολύ υψηλή (και άρα η ανακατανομή δεν μπορεί να επιτύχει πολλά), πρέπει να διοχετεύεται κάπου ικανοποιητικά, είτε αυτό είναι η γη (χειρίστη λύση), είτε είναι κάποιο προγραμματιζόμενο φορτίο. Όταν η κατανάλωση είναι αυξημένη, πρέπει είτε να βρεθεί κάποιος ικανοποιητικός (οικονομικά) τρόπος αυτή να μειωθεί, είτε να μπορεί να εξυπηρετείται και από επιπλέον πηγές (διανεμημένη παραγωγή ή LCT παραγωγής).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία είχε στην πραγματικότητα δύο στόχους. Ο πρώτος, που αποτελεί και τα θεμέλια της μελέτης αυτής, ήταν η μελέτη της δυνατότητας των σημερινών δικτύων διανομής ΧΤ να ενσωματώσουν στη λειτουργία τους το συνεχώς αυξανόμενο επίπεδο διείσδυσης LCT από τους καταναλωτές. Στην συγκεκριμένη εργασία, ως επίπεδο διείσδυσης ορίζεται το ποσοστό των κατοικιών που διαθέτουν μία τεχνολογία παραγωγής ή κατανάλωσης ενέργειας με χαμηλές εκπομπές άνθρακα. Κατά δεύτερον, στην εργασία αυτή εξερευνήθηκαν διάφοροι τρόποι βελτίωσης της δυνατότητας ανάληψης LCT από τα δίκτυα, των οποίων κύριος άξονας εφαρμογής ήταν η συνεργασία παραγωγών και καταναλωτών. Με λίγα λόγια, επιχειρήθηκε η αύξηση των λειτουργικών δυνατοτήτων των δικτύων που μελετήθηκαν, χωρίς καμία ουσιαστική επίδραση στην τοπολογία του ή στη βασική υποδομή του (επέκταση ή εγκατάσταση συσκευών από τον διαχειριστή). Έτσι, αναδείχθηκαν οι δυνατότητες και αδυναμίες κάθε μεθόδου που μελετήθηκε, δημιουργώντας έτσι ένα πολύ καλό εφαλτήριο για μελλοντική μελέτη στον τομέα της διαχείρισης της κατανάλωσης.

Αξίζει να σημειωθεί πως παρόλο που τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν όσο το δυνατόν πιο πραγματικά, όλα τα αποτελέσματα είναι σχετικά. Διαφορετικά δεδομένα φορτίων, LCT και δικτύων (όπως κάποιας διαφορετικής περιοχής του Ηνωμένου Βασιλείου ή κάποιας διαφορετικής χώρας) θα παρήγαγαν διαφορετικά αποτελέσματα. Αυτό δεν επηρεάζει την αξία της μελέτης αυτής, μονάχα επισημαίνει την ανάγκη για περαιτέρω αναζήτηση.

7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΧΩΡΙΣ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των αρχικών προσομοιώσεων (χωρίς έλεγχο της κατανάλωσης) προέκυψαν τα παρακάτω κύρια συμπεράσματα:

- Όσο μεγαλύτερο είναι το δίκτυο, τόσο περισσότερα προβλήματα τάσης ενδέχεται να δημιουργηθούν ανά επίπεδο διείσδυσης, ανεξάρτητα από το είδος του προβλήματος (υπόταση ή υπέρταση).
- Όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο διείσδυσης, τόσο αυξάνονται τα προβλήματα τάσης, τόσο σε αριθμό, όσο και σε ένταση.
- Τα θερμικά προβλήματα του κάθε δικτύου (που εξαρτώνται από την ένταση του ρεύματος) ακολουθούν την ίδια λογική με τα προβλήματα τάσης. Τα θερμικά προβλήματα όμως του Υ/Σ είναι ανάλογα της καθαρής κυκλοφορούσας ισχύος και ανεξάρτητα του δικτύου.
- Ως αναμενόταν, όσο πιο κοντά διατηρείται το συνολικό φορτίο (οικιακή κατανάλωση συν κατανάλωση των LCT) στην ελάχιστη τιμή του (ελάχιστο φορτίο), τόσο λιγότερα προβλήματα προκύπτουν, ηλεκτρικά και θερμικά.

Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός πως παρόλο που παρατηρείται, κατά μέσο όρο, υψηλότερος αριθμός υποτάσεων από υπερτάσεις ανά δίκτυο, η ποιότητα εξυπηρέτησης είναι γενικά υψηλότερη στις περιπτώσεις υποτάσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι τα όρια υπότασης είναι λιγότερο αυστηρά σε σχέση με τα όρια υπέρτασης (λογικό, καθώς οι υπερτάσεις είναι πολύ πιο απειλητικές για την ασφάλεια του ΣΗΕ), το οποίο σημαίνει ότι ακόμη και αν σημειωθεί τυπικά υπόταση, δεν είναι βέβαιο πως πραγματοποιήθηκε πραγματική παραβίαση ορίων. Η μεγαλύτερη αυτή ανεκτικότητα ως προς τις υποτάσεις είναι ο βασικότερος λόγος για τη γενικά υψηλότερη ποιότητα εξυπηρέτησης που παρατηρείται.

7.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν εφαρμόζοντας τη μέθοδο DRDM, δηλαδή ελέγχοντας την κατανάλωση.

7.3.1 Φωτοβολταϊκά

Στην περίπτωση που κάποιες κατοικίες διαθέτουν φωτοβολταϊκά, προέκυψαν τα ακόλουθα κύρια συμπεράσματα για τις διαφορετικές μεθόδους ελέγχου της κατανάλωσης:

- **Strategic Load Growth:** Αποτελεί αναμφισβήτητη τη βέλτιστη εκ των μεθόδων, με την επιπλέον ενέργεια να καταναλώνεται, δηλαδή να εξαφανίζεται από το ΣΗΕ. Μια ιδιαιτερότητα που τη συνοδεύει είναι πως απαιτείται προσοχή στη δόμηση της μεθόδου, προς αποφυγή πιθανών υποτάσεων από την αύξηση του φορτίου.
- **Valley Filling:** Είναι επίσης αποτελεσματική μέθοδος, της οποίας όμως η αποτελεσματικότητα περιορίζεται από το μέγεθος των SD. Μεγαλύτεροι SD θα είχαν ενδεχομένως λύσει εντελώς το πρόβλημα, επειδή όμως η ενέργεια ανακατανέμεται, αυτό θα δημιουργούσε μεγάλες υποτάσεις.
- **Flexible Load:** Η μέθοδος αυτή είναι πολύ περιορισμένων δυνατοτήτων, από τη στιγμή που η έγχυση των PV είναι πολλαπλάσια αυτής των φορτίων. Η συμπεριφορά των PV δεν μπορεί να μεταβληθεί, με το αρχικό πρόβλημα ως επί το πλείστον να παραμένει.
- **Συνοπτικά:** Η ανακατανομή της ενέργειας λύνει το πρόβλημα μέχρι ένα σημείο. Το ιδανικό είναι η επιπλέον ενέργεια να καταναλώνεται. Με βέλτιστο σχεδιασμό και υπό συγκεκριμένο φορτίο, η strategic load growth μπορεί να επιτρέψει μέχρι και 100% διείσδυση PV χωρίς ουσιαστικά θέματα.

7.3.2 Ηλεκτρικές Αντλίες Θερμότητας

Στην περίπτωση που κάποιες κατοικίες διαθέτουν ηλεκτρικές αντλίες θερμότητας, προέκυψαν τα ακόλουθα κύρια συμπεράσματα για τις διαφορετικές μεθόδους ελέγχου της κατανάλωσης:

- **Strategic Conservation:** Η μέθοδος είναι αποτελεσματική ως ένα σημείο, πάσχει όμως στο γεγονός ότι στοχεύει στη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση ανά φορτίο, χωρίς δυνατότητα συνολικής εποπτείας. Η συνολική πάντως χρήση της παρέχει μια σχετική βοήθεια στο ΣΗΕ.
- **Load Shifting:** Η μέθοδος αυτή είναι πολύ περιορισμένων δυνατοτήτων λόγω της σταθερά υψηλής ζήτησης. Για μικρούς SD δεν έχει ουσιαστική επίδραση, για μεγαλύτερους επανεμφανίζονται τα γνωστά προβλήματα με την ανακατανομή ενέργειας, η οποία εν γένει περιορίζει τα προβλήματα, αλλά από ένα κατώφλι και μετά αχρηστεύεται.

- Flexible Load: Η βέλτιστη εκ των μεθόδων, που διαμορφώνει αποτελεσματικά την κατανάλωση (συμπεριλαμβανομένων των EHP). Στα αρνητικά της ότι προκειμένου να επιτύχει ουσιαστικά αποτελέσματα είναι εξαιρετικά ακριβή για τον καταναλωτή σε περίπτωση που αναγκαστεί να παραβεί τις ανάγκες του ΣΗΕ και εξαιρετικά ζημιογόνος για τον προμηθευτή σε πολύ υψηλές ζητήσεις.
- Συνοπτικά: Η ανακατανομή της ενέργειας είναι μια κακή λύση για υψηλά επίπεδα ενέργειας, η βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης σχετικά περιορισμένης επίδρασης και η διαμόρφωση φορτίου πάρα πολύ ακριβή όσο το φορτίο αυξάνεται. Το φορτίο πρέπει να μειωθεί, που μπορεί να επιτευχθεί ιδανικά με συνεργασία καταναλωτών και διαχειριστών. Μια άλλη λύση θα ήταν η χρησιμοποίηση διανεμημένων πηγών ενέργειας, εγκατεστημένες από τον διαχειριστή του ΣΗΕ, όπου αυτό επιτρέπεται από τους κανόνες της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

7.4 ΠΙΘΑΝΕΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Η εργασία αυτή αποτελεί έναν ακόμη μικρό λίθο στο ήδη υπάρχον ερευνητικό έργο που αφορά τη διερεύνηση των τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν 4 χαρακτηριστικά μεγέθη δικτύων και 3 ιδιαίτερα διαδεδομένα LCT. Μια τέτοιου είδους μελέτη μπορεί κάλλιστα να επεκταθεί σε πολύ περισσότερα δίκτυα διαφόρων μεγεθών, αλλά και σε πολύ περισσότερα LCT μερικά εκ των οποίων δεν γνωρίζουν ευρεία χρήση προς το παρόν.

Μια κίνηση που θα βελτίωνε αναμφίβολα την ακρίβεια των αποτελεσμάτων θα ήταν η βελτίωση της ρεαλιστικότητας των συνθηκών, ακολουθώντας ένα, μερικά ή όλα εκ των παρακάτω βημάτων: αύξηση των επαναλήψεων της προσομοίωσης Monte Carlo, προσομοίωση σε χρονικό ορίζοντα μεγαλύτερο της μίας ημέρας, χρονικό διάστημα μεταξύ δεδομένων μικρότερο των 5 λεπτών, πλήρως πραγματικά δεδομένα για όλα τα φορτία και τα LCT.

Μια πολύ ενδιαφέρουσα επέκταση της παρούσης μελέτης θα ήταν η επανάληψή της, λαμβάνοντας όμως υπόψιν πιθανές μεταβατικές καταστάσεις, είτε βραδείες (συντήρηση εξοπλισμού, επέκταση του δικτύου με τον χρόνο), είτε ταχείες (ανοικτοκυκλώματα, βραχυκυκλώματα, αφύσικες συμπεριφορές από τους καταναλωτές).

Ακόμη, δεδομένου ότι κάθε καταναλωτής θα ήθελε, ιδανικά, να καλύπτει ο ίδιος την όποια κατανάλωση κάνει, αλλά και δεδομένης της διαφορετικής συμπεριφοράς LCT, θα είχε πραγματικό ενδιαφέρον να μελετηθεί ποιος είναι ο ιδανικός συνδυασμός LCT και πως αυτός επιδρά στο δίκτυο των καταναλωτών, με ή χωρίς έλεγχο της κατανάλωσης.

Καθώς οι διάφορες μέθοδοι DRDM που εξερευνήθηκαν αποτελούν μια αρχική προσέγγιση για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η πιθανή τους βελτιστοποίηση, προκειμένου να αναδειχθούν στο έπακρο οι πραγματικές τους δυνατότητες, αλλά και η οικονομική τους αξιολόγηση, ώστε να καταστεί ξεκάθαρο το κατά πόσο συμφέρει η εφαρμογή της μεθόδου DRDM.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006.
- [2] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος I*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1994.
- [3] The Shift Project Data Portal: Breakdown of Electricity Generation by Energy Source. [Online]. Available: <http://www.tsp-data-portal.org>
- [4] D. Ockwell and A. Mallet, *Low-Carbon Technology Transfer: From Rhetoric to Reality*, New York: Routledge, 2012.
- [5] I. B. Fridleifsson, R. Bertani, E. Huenges, J. W. Lund, A. Ragnarsson, and L. Rybach, “The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change,” *IPCC Geothermal*, February 11, 2008.
- [6] A. N. Espinosa and L. F. Ochoa, “Probabilistic Impact Assessment of Low Carbon Technologies in LV Distribution Systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 31, pp. 2192–2203, May 2016.
- [7] J. Grainger and W. Stevenson, *Power System Analysis*, New York: McGraw–Hill, 1994.
- [8] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος I, Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985.
- [9] Π. Σ. Γεωργιλάκης, *Ηλεκτρική Οικονομία*, σημειώσεις διαλέξεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, παρεδόθησαν στις 15 Μαρτίου 2015.
- [10] A. Trias, “System and method for monitoring and managing electrical power transmission and distribution networks”, US Patent 7979239, July 12, 2011.
- [11] A. Trias, "The Holomorphic Embedding Load Flow Method", *IEEE Power and Energy Society General Meeting 2011*, 22–26 July 2012.
- [12] Wind & Sun Co: Info on the UK Windspeed Database. [Online]. Available: <http://www.windandsun.co.uk>
- [13] Π. Σ. Γεωργιλάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, 2015.
- [14] Ε. Διαλυνάς, *Ανάλυση Αξιοπιστίας Λειτουργίας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Αθήνας: Εκδ. Τσότρας, 2013.
- [15] Α. Σ. Πέτρου, “Πιθανοτική ανάλυση ροής φορτίου σε δίκτυο διανομής”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα ΗΜΜΥ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2015.
- [16] D. P. Kroese, T. Brereton, T. Taimre, and Z. I. Botev, “Why the Monte Carlo Method is so Important Today,” *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, Vol. 6, No. 6, pp. 386–392, June 2014.

- [17] Β. Ευαγγελόπουλος, “Βέλτιστος σχεδιασμός διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής λαμβάνοντας υπόψη αβεβαιότητες,” Διπλωματική εργασία, Τμήμα ΗΜΜΥ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάιος 2015.
- [18] N. Nikmehr and S. N. Ravadanegh, “Solving probabilistic load flow in smart distribution grids using heuristic methods,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 7, 043138 (2015).
- [19] R. S. Salgado and A. F. Zeitune, “Power Flow Solutions through Tensor Methods,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 3, No. 5, pp. 413–424, May 2009.
- [20] H. Yu, C. Y. Chung, K. P. Wong, H. W. Lee, and J. H. Zhang, “Probabilistic Load Flow Evaluation With Hybrid Latin Hypercube Sampling and Cholesky Decomposition,” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 24, No. 2, pp. 661–667, May 2009.
- [21] G. Erbach. (2016, November). “Understanding electricity markets in the EU”, European Parliament Briefing. [Online]. Available: <http://www.europarl.europa.eu>
- [22] ΑΔΜΗΕ: Φόρτιση Μονάδων Παραγωγής και Φορτία Συστήματος. [Online]. Available: <http://www.admie.gr>
- [23] C. W. Gellings, “The Concept of Demand-Side Management for Electric Utilities,” *Proceedings of the IEEE*, Vol.73, No.10, pp. 1468–1470, Oct. 1985.
- [24] J. O. Petinrin and M. Shaaban, “Voltage Control in a Smart Distribution Network Using Demand Response,” *IEEE International Conference on Power & Energy*, 2014.
- [25] P. Richardson, M. Moran, J. Taylor, A. Maitra, and A. Keane, “Impact of Electric Vehicle Charging on Residential Distribution Networks: An Irish Demonstration Initiative,” *22nd International Conference on Electricity Distribution*, Stockholm, 10-13 June 2013 (Paper 0674).
- [26] W. Y. Chiu, H. Sun, and H. V. Poor, “Energy Imbalance Management Using a Robust Pricing Scheme,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, No. 2, pp. 896–904, June 2013.
- [27] Federal Energy Regulatory Commission. (2014, December). Assessment of Demand Response & Advanced Metering: Staff Report. U.S.A. Department of Energy. [Online]. Available: <http://www.ferc.gov>
- [28] C. P. Mediwathte, E. R. Stephens, D. B. Smith, and A. Mahanti, “Competitive Energy Trading Framework for Demand-side Management in Neighborhood Area Networks,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, to be published.
- [29] W. Kovach. (2014, February 21). “Benefits and Costs of Residential Demand Response”. [Online]. Available: <http://www.yourenergyblog.com>
- [30] Π. Κάπρος, *Σημειώσεις Ενεργειακής Οικονομίας*, Αθήνα: Εκδ. ΕΜΠ, 2006.
- [31] Electricity Northwest Co., Low Voltage Network Solutions. [Online]. Available: <http://www.enwl.co.uk>
- [32] Κ. Θ. Δέρβος, *Φωτοβολταϊκά Συστήματα: Από τη Θεωρία στην Πράξη*, Αθήνα: Εκδ. ΕΜΠ, 2013.
- [33] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές*, Αθήνα: Εκδ. ΕΜΠ, 1997.
- [34] I. Staffell, D. Brett, N. Brandon, and A. Hawkes, “A review of domestic heat pumps,” *Energy and Environmental Science*, Vol. 5, No. 11, pp. 9291–9306, 2012.
- [35] Tesla “Powerwall 2 AC” battery system datasheet, Nov. 2016.

-
- [36] Z. Wang, C. Gu, F. Li, P. Bale, and H. Sun, "Active Demand Response Using Shared Energy Storage for Household Energy Management," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, No. 4, pp. 1888–1897, Dec. 2013.
- [37] R. C. Dugan. (June, 2013). Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS). [Online]. Available: <http://www.sourceforge.net>
- [38] A. J. Conejo, J. M. Morales, and L. Baringo, "Real-Time Demand Response Model," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, No. 3, pp. 236–242, Dec. 2010.
- [39] W. Fu, J. D. McCalley, and V. Vittal, "Risk Assessment for Transformer Loading," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, No. 3, pp. 346–353, Aug. 2001.
- [40] R. Kluge. (2012, April 30). Overhead Transmission Line Ampacity Rating. American Transmission Company, Pewaukee, WI. [Online]. Available: <http://www.atc10yearplan.com>

A.1 ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ-ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

AC	Alternating Current
CFC	Chlorofluorocarbon
CHP	Combined Heat & Power
CO ₂	Carbon Dioxide
DC	Direct Current
DR/DM	Demand Response/Demand Management
EHP	Electric Heat Pump
ESD	Electricity Storage Devices
EV	Electric Vehicle
GTE	Geothermal Energy
LCT	Low Carbon Technology
NE	Nuclear Energy
P	Real Power
pf	Power Factor
PF	Power Flow
PPF	Probabilistic Power Flow
PV	Photovoltaic
Q	Reactive Power
S	Apparent Power
SCE	Sea Current Energy
SD	Storage Device
WG	Wind generator

α.μ.	Ανά Μονάδα
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΓΜ	Γραμμή Μεταφοράς
ΔΔΗΕ	Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
ΜΤ	Μέση Τάση
ΣΑΤΥΦ	Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
Υ/Σ	Υποσταθμός
ΥΗΣ	Υδροηλεκτρικός Σταθμός
ΥΤ	Υψηλή Τάση
ΥΥΤ	Υπερυψηλή Τάση
ΧΤ	Χαμηλή Τάση

A.2 ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ–ΑΓΓΛΙΚΩΝ ΟΡΩΝ

Alternating Current	Εναλλασσόμενο Ρεύμα
Chlorofluorocarbon	Χλωροφθοράνθρακες
Combined Heat & Power	Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού & Θερμότητας
Carbon Dioxide	Διοξείδιο του Άνθρακα
Direct Current	Συνεχές Ρεύμα
Demand Response/Demand Management	Δυναμικός Έλεγχος Κατανάλωσης
Electric Heat Pump	Ηλεκτρική Αντλία Θερμότητας
Electricity Storage Devices	Αποθηκευτές Ηλεκτρικής Ενέργειας
Electric Vehicle	Ηλεκτρικό Όχημα
Geothermal Energy	Γεωθερμική Ενέργεια
Low Carbon Technology	Τεχνολογία Χαμηλών Εκπομπών Άνθρακα

Nuclear Energy	Πυρηνική Ενέργεια
Real Power	Ενεργός Ισχύς
Power Factor	Συντελεστής Ισχύος
Power Flow	Ροή Ισχύος
Probabilistic Power Flow	Πιθανοτική Ροή Ισχύος
Photovoltaic	Φωτοβολταϊκό
Reactive Power	Αεργος Ισχύς
Apparent Power	Φαινόμενη Ισχύς
Sea Current Energy	Ενέργεια Θαλάσσιων Κυμάτων
Storage Device	Συσσωρευτής
Wind generator	Ανεμογεννήτρια

