



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Μελέτη και Σχεδιασμός Τοπικών Αγορών Ενέργειας για
Παροχή Ευελιξίας από Διεσπαρμένες Πηγές

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στυλιανός Χ. Λειβαδιώτης

Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος, Καθηγητής
ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Μελέτη και Σχεδιασμός Τοπικών Αγορών Ενέργειας για Παροχή Ευελιξίας από Διεσπαρμένες Πηγές

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στυλιανός Χ. Λειβαδιώτης

Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος, Καθηγητής
ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7^η Ιουλίου 2021

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

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

.....
Γεωργιλάκης
Πάυλος
Αναπλ. Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2021

.....
Στυλιανός Χ. Λειβαδιώτης
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Στυλιανός Χ. Λειβαδιώτης, 2021
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για τη μετάβαση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που θα είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον είναι αναγκαία η εφαρμογή των τοπικών δικτύων που λειτουργούν υπό μια ανεξάρτητη αγορά στο επίπεδο της διανομής. Οι διεσπαρμένες μονάδες ενέργειας αποτελούν τον θεμέλιο λίθο των τοπικών δικτύων όμως η υλοποίηση τέτοιων δικτύων και αγορών χαρακτηρίζεται από αρκετά εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν. Ως αποτέλεσμα, είναι κρίσιμης σημασίας η μελέτη αυτών των αγορών λαμβάνοντας υπόψη πάντα τους περιορισμούς του δικτύου.

Η συνεχής αγορά αναμένεται ότι θα αποτελέσει τη βάση σχεδιασμού των τοπικών αγορών ενέργειας για παροχή ευελιξίας. Ο λόγος είναι διότι η συνεχής αγορά επιτρέπει την άμεση ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των χρηστών του δικτύου.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός μιας συνεχούς αγοράς ενέργειας, που ενώ θα παρέχει ευελιξία με τη βοήθεια των ΑΠΕ παράλληλα θα διασφαλίζει ότι το δίκτυο λειτουργεί σε μια ασφαλή κατάσταση.

Πιο συγκεκριμένα, καθορίζονται οι κανονισμοί με τους οποίους μπορεί να λειτουργεί μια τοπική αγορά. Το δίκτυο ελέγχεται με τη χρήση των συντελεστών PTDF ενώ για τον υπολογισμό των προσφορών που υπάρχουν στην αγορά ενέργειας χρησιμοποιείται η κανονική κατανομή. Η εξέταση της αγοράς γίνεται σε ένα ακτινικό δίκτυο όπου υπάρχουν οικιακά και βιομηχανικά φορτία ενώ οι πηγές που μπορούν να παρέχουν ευελιξία είναι οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Τοπική αγορά ενέργειας, συνεχής αγορά ενέργειας, δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, διεσπαρμένη παραγωγή, ενεργά δίκτυα διανομής, ευελιξία, συντελεστές PTDF, ακτινικό δίκτυο

ABSTRACT

For the transition to electricity generation that will be more environmentally friendly, it is necessary to implement local networks operating under an independent market at the level of distribution. Distributed energy units are the foundation stone of local networks, but the implementation of such networks and markets is characterized by several obstacles that need to be overcome. As a result, it is critical to study these markets always taking into account the constraints of the network.

The continuous market is expected to form the basis for planning local energy markets to provide flexibility. The reason is because the continuous market allows direct energy exchange between network users.

The subject of this thesis is the design of a continuous energy market, which while providing flexibility with the use of RES, at the same time will ensure that the network operates in a safe state.

More precisely, the regulations by which a local market can operate are established. The network is controlled using the PTDF coefficients and the normal distribution is used to calculate the bids on the energy market. The market is examined in a radial network where there are household and industrial loads while the sources that can provide flexibility are wind turbines and photovoltaics.

KEYWORDS

Local energy markets, continuous energy market, electrical energy distribution networks, distributed generation, active distribution networks, flexibility, PTDF coefficients, radial network

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθώς και για την ευκαιρία που μου πρόσφερε να ασχοληθώ με το εν λόγω θέμα.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Νικόλαο Σαββόπουλο, ο οποίος καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας με βοήθησε με την καθοδήγηση του και δίνοντας μου συμβουλές.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου που με στήριξαν σε όλη τη σταδιοδρομία των σπουδών μου.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	9
Πίνακας περιεχομένων.....	11
1 Εισαγωγή.....	13
1.1 Γενικά	13
1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	14
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	14
2 Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας και Διείσδυση Διεσπαρμένης Παραγωγής	16
2.1 Εισαγωγή.....	16
2.2 Δίκτυα διανομής ενέργειας	17
2.2.1 Εισαγωγή και αναφορά στα ΣΗΕ	17
2.2.2 Γενικές Πληροφορίες.....	18
2.2.3 Εξοπλισμός.....	19
2.3 Διεσπαρμένη Παραγωγή Ενέργειας.....	20
2.3.1 Πλεονεκτήματα	20
2.3.2 Εμπόδια στην διείσδυση μονάδων ΔΠΕ	21
2.4 Είδη Λειτουργίας της ΔΠΕ στο Δίκτυο	22
2.5 Τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	23
2.5.1 Εισαγωγή.....	23
2.5.2 Φωτοβολταϊκά (PV).....	23
2.5.3 Αιολικά Πάρκα.....	25
2.6 Τοπικά Δίκτυα και Αγορές Ενέργειας	25
2.6.1 Εισαγωγή.....	25
2.6.2 Σχεδιασμός τοπικών αγορών ενέργειας	27
2.6.3 Δυνατότητες και Πλεονεκτήματα.....	28
2.6.4 Προβλήματα και Εμπόδια	29
2.6.5 Παρούσες μελέτες των τοπικών αγορών.....	30
2.7 Τοπικές Αγορές με Χρήση της Peer to Peer Τεχνολογίας	33
2.7.1 Στοιχεία του Δικτύου	33
2.7.2 Δομή της Αγοράς.....	35
2.7.3 Δυσκολίες και Προβλήματα.....	35
2.7.4 Τεχνικές Προσεγγίσεις.....	36
3 Βέλτιστη Ροή Ισχύος	39
3.1 Εισαγωγή.....	39
3.2 DC Optimal Power Flow (DC-OPF).....	39
3.2.1 Σχηματισμός του Προβλήματος DC-OPF.....	39
3.2.2 Power Transfer Distribution Factors (PTDF).....	40
3.3 AC Optimal Power Flow (AC-OPF).....	41
3.4 Αποκεντρωμένες Αγορές	42
4 Σχεδιασμός Τοπικών Αγορών Ενέργειας.....	45
4.1 Εισαγωγή.....	45
4.2 Αναφορά στη Βιβλιογραφία.....	45
4.3 Διαμόρφωση Προβλήματος	46

4.4 Διαδικασία Υπολογισμού των Προσφορών Ευελιξίας	47
4.4.1 Προσφορές Ευελιξίας με χρήση μεθόδων πρόβλεψεων	47
4.4.2 Προσφορές Ευελιξίας με Χρήση Μεθόδων Προβλέψεων και Διαχείρισης Φορτίου	48
4.4.3 Τιμολόγηση των Προσφορών Ευελιξίας.....	49
4.5 Διαδικασία Επίλυσης και Παράδειγμα	49
5 Εφαρμογές.....	55
5.1 Περιγραφή του υπό Εξέταση Δικτύου	55
5.2 Παρουσίαση των Προσφορών Ευελιξίας.....	59
5.3 Αποτελέσματα για τη Μέθοδο Πρόβλεψης.....	59
5.4 Αποτελέσματα για τη μέθοδο του forecast και των comfort bids.....	61
5.5 Σύγκριση των δύο μεθόδων.....	63
6 Συμπεράσματα.....	66
6.1 Σύνοψη.....	66
6.2 Συμπεράσματα.....	66
6.3 Μελλοντική επέκταση του θέματος.....	67
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟΥ	69
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΛΙΣΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΦΟΡΩΝ ΕΥΕΛΙΞΙΑΣ	71
Βιβλιογραφία.....	77

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η συνεχής αύξηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας απαιτούν όλο και μεγαλύτερη ευελιξία από το δίκτυο. Αυτά τα είδη πηγών ενέργειας-φορτίων χαρακτηρίζονται ως μεταβλητές και απρόβλεπτες ιδιαίτερα στο επίπεδο χαμηλής τάσης (ΧΤ) όπου βρίσκεται ο καταναλωτής. Έως πρόσφατα δεν υπήρχαν τέτοια προβλήματα καθώς οι καταναλωτές είχαν παθητικό ρόλο. Παράλληλα ήταν σχετικά απλή η πρόβλεψη του φορτίου αφού δεν χαρακτηριζόταν με πολύ αβεβαιότητα. Το ζήτημα των αγορών τοπικής ευελιξίας σε επίπεδο διανομής είναι ένα πρόσφατο ζήτημα και μπορεί να χαρακτηριστεί ως πολύ υποσχόμενο σε θέματα έρευνας. Αυτό διότι τέτοιου είδους αγορές αναμένονται να αυξήσουν την αξιοπιστία και ευελιξία όσον αφορά την παροχή ισχύος αλλά ταυτόχρονα θα βοηθήσουν στη μείωση προβλημάτων στο δίκτυο διανομής, όπως είναι το πρόβλημα υπερφόρτισης των γραμμών και οι μεταβολές τάσης.

Προκειμένου να επιτευχθεί η ευελιξία που μπορούν να προσφέρουν τέτοιες αγορές, είναι αναγκαίο και απαραίτητο να συμπεριλαμβάνεται το όλο και συνεχώς πιο φορτισμένο δίκτυο διανομής αλλά ταυτόχρονα και οποιοδήποτε περιορισμοί του δικτύου. Αυτό γιατί η ανταλλαγή ενέργειας και οι περιορισμοί του δικτύου είναι αλληλένδετα ζητήματα. Συμπερασματικά, στόχος τέτοιων αγορών είναι να υπολογίζεται λύση που λαμβάνει υπόψη και τα δύο ζητήματα ταυτόχρονα. Όσον αφορά το δίκτυο υπάρχουν αρκετά μοντέλα που επιτρέπουν την επίλυση του, όπως είναι αυτό της DC Optimal Power Flow (DC-OPF) και AC Optimal Power Flow (AC-OPF).

Μια τοπική αγορά μπορεί να προσφέρει ευελιξία από τις διεσπαρμένες πηγές ισορροπώντας τις τυχόν αποκλίσεις που μπορεί να υπάρχουν στο δίκτυο. Αυτές οι αποκλίσεις προέρχονται από την αδυναμία της ακριβούς πρόβλεψης παραγωγής και κατανάλωσης, που όπως είναι αντιληπτό γίνεται πιο δύσκολη καθώς το δίκτυο γίνεται πιο πολύπλοκο. Τέτοια τοπικά δίκτυα θα είναι σε θέση, να παίρνουν ενέργεια από ένα χρήστη που έχει περίσσειμα και να τη δίνει σε κάποιο άλλο που έχει έλλειψη. Προφανώς για να γίνεται αυτό πρέπει να ικανοποιούνται οι περιορισμοί του δικτύου αλλά ταυτόχρονα να έχουν κέρδος και οι χρήστες του δικτύου.

Όπως έχουμε αναφέρει, το ζήτημα παροχής ευελιξίας από διεσπαρμένες πηγές σε τοπικά δίκτυα είναι ένα θέμα που βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο. Για αυτό το λόγο η συνηθής προσέγγιση έρευνας αγνοεί την τοπολογία του δικτύου ή αφήφά την υπερφόρτιση των γραμμών και τις μεταβολές της τάσης. Αυτό διότι πολλές προσεγγίσεις αφήνουν τέτοια προβλήματα υπό τον έλεγχο του διαχειριστή διανομής του δικτύου (Distribution System Operator-DSO). Για να έχουν πρακτική εφαρμογή τέτοιου είδους αγορές θα πρέπει να γίνεται ο έλεγχος της αγοράς και την ίδια ώρα ο έλεγχος του δικτύου από την ίδια οντότητα σε συνεχές χρόνο. Το παρόν νομικό πλαίσιο δεν επιτρέπει στον DSO να δρα ως ο διαχειριστής της αγοράς [1]. Αυτό είναι ένα θέμα που θα εξεταστεί στο μέλλον ούτως ώστε να βρεθεί μια χρυσή τομή στο θέμα συνύπαρξης διαχειριστή αγοράς και διαχειριστή δικτύου ενώ ταυτόχρονα ερευνάται και εξελίσσεται το θέμα των τοπικών αγορών.

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία και έλεγχος μιας τοπικής αγοράς που θα προσφέρει ευελιξία με διεσπαρμένες παραγωγές. Αυτό θα γίνει με την χρήση ενός συνεχούς μηχανισμού εκκαθάρισης της αγοράς που ταυτόχρονα λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς του δικτύου. Για τον έλεγχο του δικτύου θα γίνει χρήση του DC OPF και πιο συγκεκριμένα των μεταβλητών Power Transfer Distribution Factor (PTDF). Αυτή η αγορά έχει ως σκοπό την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των χρηστών του δικτύου, όπου κρίνεται σκόπιμο ή αναγκαίο, διορθώνοντας όσες περισσότερες ατέλειες μπορεί να προέκυψαν από τη πρόβλεψη ΑΠΕ και φορτίων. Αυτή η αγορά θα εξεταστεί κατά πόσο μπορεί να εφαρμοστεί σε αποκεντρωμένα δίκτυα.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια γενική περιγραφή και αναφορά στα δίκτυα διανομής αλλά και στα τοπικά δίκτυα και αγορές. Αρχικά γίνεται μια παρουσίαση των κλασικών δικτύων διανομής και της λειτουργίας τους. Ακολούθως, γίνεται αναφορά στα τοπικά δίκτυα και αγορές που είναι και το θέμα της διπλωματικής. Έπειτα, βλέπουμε πως αυτού του είδους δίκτυα κερδίζουν όλο και περισσότερο έδαφος καθώς και τα πλεονεκτήματα καθώς και τα μειονεκτήματα τους. Τέλος, αναφερόμαστε στην peer-to-peer ανταλλαγή ενέργειας που θεωρείτε από πολλούς το μέλλον της ενεργειακής αγοράς.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μια αναφορά στις κύριες μεθόδους υπολογισμού της βέλτιστης ροής ισχύος με τις οποίες γίνεται η μελέτη και εξέταση των δικτύων. Αρχικά, παρουσιάζεται η DC μέθοδος όπου θα δοθεί έμφαση στον πίνακα PTDF που αποτελεί κύριο κομμάτι του αλγορίθμου επίλυσης του προβλήματος. Ακολούθως, αναφέρεται η πιο περίπλοκη μέθοδος, αυτή της βέλτιστης AC ροής ισχύος. Τέλος, αναφερόμαστε στις αποκεντρωμένες αγορές και τις προσεγγίσεις με τις οποίες γίνεται προσπάθεια για σωστή λειτουργία της αγοράς.

Ακολούθως στο Κεφάλαιο 4, μελετούμε τον σχεδιασμό των τοπικών αγορών ενέργειας. Αρχικά, κάνουμε μια μικρή ανασκόπηση στις υπάρχοντες μελέτες που εξέτασαν το εν λόγω θέμα. Έπειτα, γίνεται ο ακριβής καθορισμός του προβλήματος όπου θα ορίσουμε τι ακριβώς θέλουμε να επιτύχουμε, τα δεδομένα μας και τα αποτελέσματα που περιμένουμε να εξάγουμε. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος, με τη βοήθεια λογικού διαγράμματος, και προκειμένου το πρόβλημα να γίνει πλήρως κατανοητό θα εξεταστεί βήμα-βήμα η διαδικασία σε ένα απλό δίκτυο.

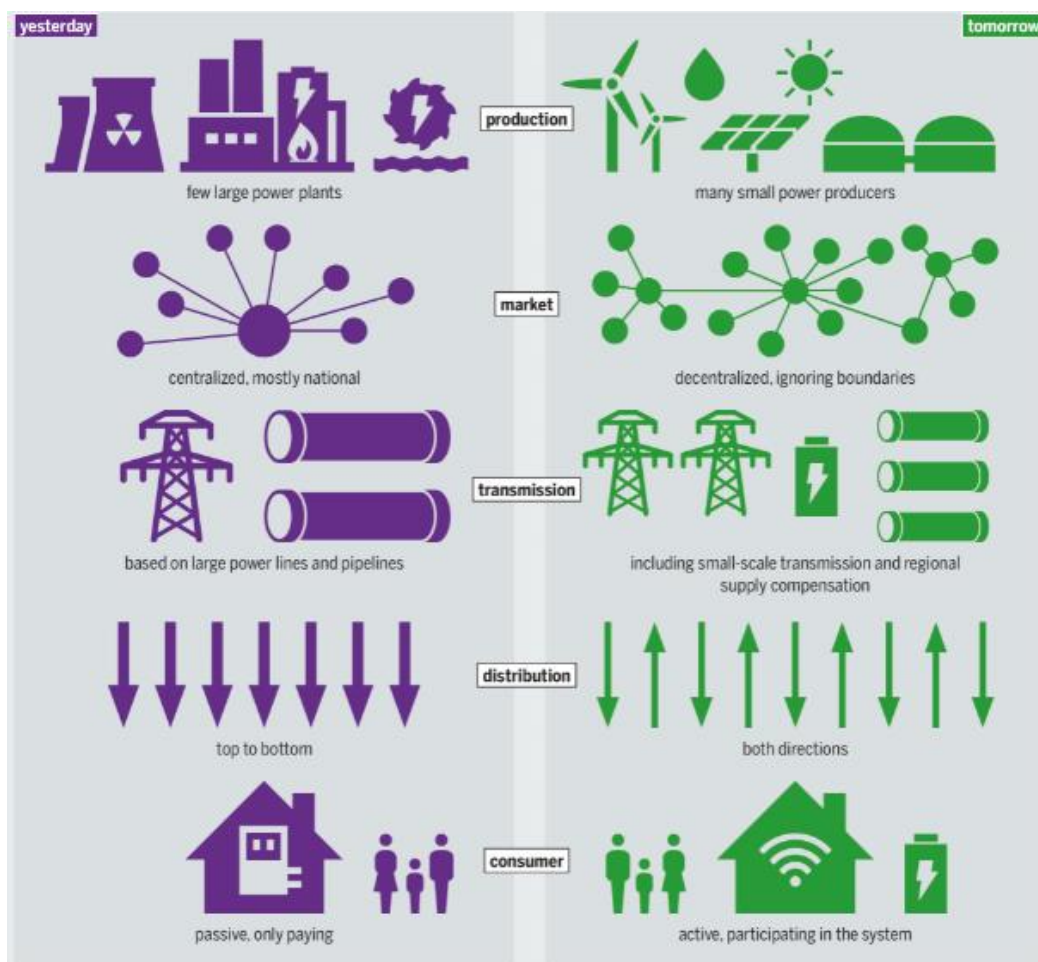
Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζεται η εφαρμογή. Αρχικά, γίνεται καθορισμός του υπό εξέταση δικτύου και γίνεται αναφορά στη λίστα των προσφορών. Έπειτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων και γίνεται σχολιασμός και σύγκριση αυτών.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, γίνεται μια σύνοψη στο τι προσπαθήσαμε να επιτύχουμε με την παρούσα διπλωματική και τι τελικά καταφέραμε. Ακολουθούν τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε και τέλος γίνεται αναφορά στους τρόπους που μπορεί να επεκταθεί το παρών θέμα.

2 Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας και Διείδυση Διεσπαρμένης Παραγωγής

2.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) υπάρχουν εδώ και πάνω από ένα αιώνα από τότε που εφευρέθηκε ο ηλεκτρισμός και ο άνθρωπος έπρεπε να βρει κάποιο τρόπο να μεταφέρει και να διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται. Τα ΣΗΕ ως πριν λίγα χρόνια θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως απλά. Αυτό διότι έχουν μείνει αρκετά αμετάλλακτα με την πάροδο του χρόνου και επιπλέον, η λειτουργία που τα χαρακτηρίζει είναι η μεταφορά και διανομή ενέργειας από τον παραγωγό στον καταναλωτή. Όμως η διείδυση των ΑΠΕ έχει ήδη επιφέρει αλλαγές στα συστήματα και έπονται άλλες μελλοντικά. Αυτό διότι τα ΑΠΕ μπορούν να καταστήσουν τον κάθε καταναλωτή και ως παραγωγό. Έτσι πλέον ο καταναλωτής έχει την δυνατότητα να συμμετέχει ενεργά στην αγορά ενέργειας προσφέροντας στο δίκτυο.



Σχήμα 2.1: Η μετάβαση στην αεριανή τεχνολογία ενέργειας [9]

Η ανάγκη του πλανήτη από την απαλλαγή των συμβατικών μορφών ενέργειας καθιστά μονόδρομο την διείδυση των ΑΠΕ στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές, όπως είναι γνωστό, δεν έχουν αντίκτυπο στο περιβάλλον και επίσης, είναι απεριόριστες. Αυτοί είναι και οι λόγοι για τους οποίους τα ΑΠΕ

θεωρούνται η μελλοντική πηγή ενέργειας. Όμως, φέρνουν μαζί τους και προκλήσεις. Η στοχαστικότητα που χαρακτηρίζει τα ΑΠΕ απαιτεί σημαντικές αλλαγές στη λειτουργία και ρύθμιση του συστήματος. Τα δίκτυα θα πρέπει να έχουν καλύτερο έλεγχο αφού η ενέργεια μπορεί να έχει δύο κατευθύνσεις και να προέρχεται από πολλούς παραγωγούς. Επίσης, θα πρέπει να αντιμετωπιστούν θέματα όπως είναι αυτό της ρύθμισης της συχνότητας και της παροχής ευελιξίας. Σε αυτούς τους τομείς κρίσιμο ρόλο αναμένεται να έχουν σύγχρονες τεχνολογίες όπως είναι τα ηλεκτρονικά ισχύος και οι μπαταρίες μεγάλης χωρητικότητας.

Η διείσδυση των ΑΠΕ έχει ήδη φέρει αλλαγές στα παραδοσιακά ΣΗΕ. Πλέον, είναι δυνατή η δημιουργία νέων οντοτήτων όπως είναι αυτή των τοπικών αγορών καθώς και των δικτύων peer-to-peer. Τέτοιες τεχνολογίες επιτρέπουν την λειτουργία αποκεντρωμένων δικτύων με δυνατότητα ανταλλαγής ενέργειας χωρίς την ανάγκη κάποιου μεσάζοντα [3]. Όμως αυτές οι οντότητες έρχονται και αυτές με τις δικές τους προκλήσεις.

Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θα γίνει αναφορά στα χαρακτηριστικά των δικτύων διανομής καθώς και των στοιχείων τους. Επίσης, θα παρουσιαστούν οι τοπικές αγορές ενέργειας μαζί με τις προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν. Τέλος, θα γίνει αναφορά στη πιο σύγχρονη τεχνολογία, αυτή του peer-to-peer.

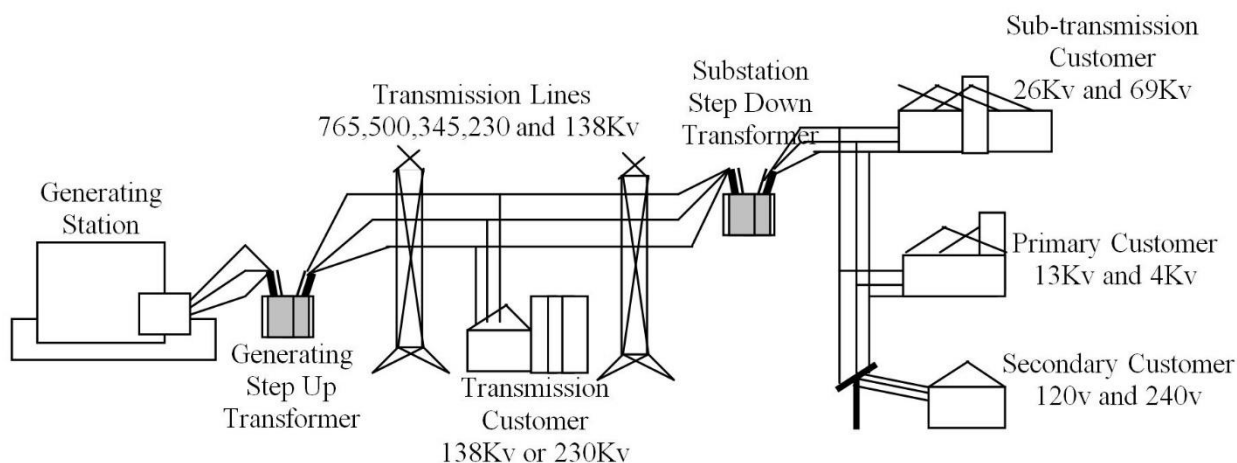
2.2 Δίκτυα διανομής ενέργειας

2.2.1 Εισαγωγή και αναφορά στα ΣΗΕ

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται ως το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που η χρήση τους αποσκοπεί στη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές όπου υπάρχει ζήτηση, δηλαδή στους καταναλωτές [2]. Τα ΣΗΕ μπορούν να έχουν διάφορα μεγέθη και αρκετά δομικά στοιχεία. Παρόλα αυτά, κάθε ΣΗΕ έχει μερικά βασικά χαρακτηριστικά:

- Κατά κύριο λόγο αποτελούνται από τριφασικά συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) που περίπου βρίσκονται σε σταθερή τάση. Όσον αφορά την παραγωγή και την μεταφορά, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι τριφασικός. Για την διανομή, τα οικιακά φορτία είναι μονοφασικά, τα βιομηχανικά είναι τριφασικά, ενώ τα εμπορικά φορτία κατανέμονται εξίσου μεταξύ των φάσεων προκειμένου να γίνεται ένα συμμετρικό τριφασικό κύκλωμα.
- Χρησιμοποιούνται σύγχρονες μηχανές προκειμένου να παραχθεί ηλεκτρισμός. Αυτές οι μηχανές χρησιμοποιούν κυρίως συμβατικές μορφές ενέργειας (φυσικό αέριο, ορυκτά καύσιμα) για να παραχθεί μηχανική ενέργεια μέσω κινητήριων μηχανών. Τέλος, με τη βοήθεια σύγχρονων γεννητριών, αυτή η ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική.
- Η μεταφορά ενέργειας γίνεται σε μεγάλες αποστάσεις, γιατί συνηθίζεται οι σταθμοί παραγωγής να βρίσκονται μακριά από κατοικημένες περιοχές. Για να τροφοδοτηθούν οι καταναλωτές προβλέπεται η ύπαρξη ενός συστήματος μεταφοράς το οποίο λειτουργεί σε αρκετά επίπεδα τάσης [4].

Όπως αναφέραμε, η ηλεκτρική ισχύς παράγεται σε σταθμούς παραγωγής. Στη συνέχεια, είναι το στάδιο της μεταφοράς όπου η ισχύς μεταφέρεται στους υποσταθμούς μέσω γραμμών υψηλής τάσης (ΥΤ) και υπερύψηλης τάσης (ΥΥΤ). Εκεί ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης τα οποία κάνουν την διανομή τάσης στους καταναλωτές μέσω υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης (ΧΤ). Θα



Σχήμα 2.2: Γενική απεικόνιση ενός ΣΗΕ [5]

γίνει αναφορά των επί μέρους στοιχείων των δικτύων διανομής σε επόμενο υποκεφάλαιο. Αξίζει να σημειωθεί ότι το δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς εξαρτώνται οικονομικά μεταξύ τους, για αυτό συνήθως ο σχεδιασμός τους είναι ενιαίος με απώτερο σκοπό την επίτευξη της ενεργειακής ζήτησης, με την μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία και το ελάχιστο κόστος. Το σύστημα διανομής είναι συνήθως ανεξάρτητο και ο σχεδιασμός του γίνεται λαμβάνοντας κυρίως υπόψη τα χαρακτηριστικά της περιοχής [2]. Πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε κράτος έχει τα δικά του επίπεδα τάσης για τα δικά του ΣΗΕ. Το ίδιο ισχύει και όσο αφορά την συχνότητα όπου στην Ευρώπη ισχύουν τα 50 Hz, ενώ στην Αμερική τα 60 Hz.

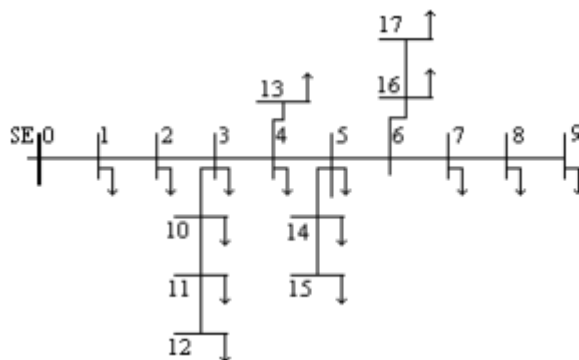
2.2.2 Γενικές Πληροφορίες

Τα δίκτυα διανομής αποτελούν το τελευταίο στάδιο πριν η ισχύς φτάσει τελικά στον καταναλωτή. Διαχωρίζονται σε δίκτυα διανομής μέσης τάσης (20 kV), ΔΔ ΜΤ, και δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης (380 V), ΔΔ ΧΤ. Τα ΔΔ ΜΤ μεταφέρουν ισχύ στους υποσταθμούς βιομηχανικών εγκαταστάσεων καθώς και σε υποσταθμούς όπου υποβιβάζεται η μέση τάση σε χαμηλή τάση για να διανεμηθεί στους οικιακούς καταναλωτές. Τα ΔΔ ΧΤ είναι υπεύθυνα για την διανομή ισχύς στους καταναλωτές που έχουν μικρές ενεργειακές ανάγκες, όπως είναι τα σπίτια και μικρές επιχειρήσεις.

Τα δίκτυα διανομής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη θέση που βρίσκονται οι αγωγοί. Αυτές οι δύο κατηγορίες είναι τα εναέρια και υπόγεια δίκτυα διανομής. Στα εναέρια δίκτυα οι γραμμές έχουν γυμνούς αγωγούς ή συνεστραμμένα καλώδια, τα οποία στηρίζονται με τη βοήθεια στύλων. Τα δίκτυα αυτού του είδους χαρακτηρίζονται από το μικρότερο κόστος τους σε σχέση με τα υπόγεια δίκτυα. Συνήθως, τοποθετούνται σε τοποθεσίες όπου τα φορτία είναι αραιά μεταξύ τους. Όσον αφορά τα υπόγεια δίκτυα, προφανώς η εγκατάστασή τους γίνεται κάτω από το έδαφος. Τα υπόγεια δίκτυα υπάρχουν σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη παρουσία φορτίων, όπως σε πολυσύχναστες πόλεις, και η τοποθέτησή τους γίνεται για λόγους εμφάνισης αλλά και εξοικονόμησης χώρου [6].

Τα δίκτυα διανομής μπορούν να χαρακτηριστούν σε ακόμα δύο μεγάλες κατηγορίες, όσον αφορά τον σχεδιασμό τους, ακτινικά και βροχοειδή ενώ πολύ πιο σπάνια μπορούν να βρεθούν και δίκτυα με ατρακτοειδή ή αραχοειδή τοπολογία (Σχήμα 2.3). Τα ακτινικά δίκτυα τα χαρακτηρίζει η κύρια γραμμή από την οποία

περνάει η ισχύς προκειμένου να φτάσει στους καταναλωτές. Επίσης, πέραν της κύριας γραμμής υπάρχουν και οι διακλαδώσεις όπου υπάρχουν υποσταθμοί μετατροπής της ΜΤ σε ΧΤ, από όπου τροφοδοτούνται οι καταναλωτές. Η κύρια γραμμή, ο “κορμός” του δικτύου, λαμβάνει την ισχύ του από τον ζυγό ΜΤ του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ. Το όλο δίκτυο ελέγχεται από ένα διακόπτη ισχύος που έχει κατάλληλες προστασίες. Ο κορμός μπορεί να χωριστεί σε τμήματα σε περίπτωση που απαιτείται απομόνωση τομέων του δικτύου. Αυτό γίνεται με τη χρήση αποζευκτών, διακοπών φορτίου και ΔΑΕ. Οι διακλαδώσεις του κορμού μπορούν να χειρισθούν μέσω διακοπών απομόνωσης ή ασφαλειοαποζευκτών. Τέλος, μια κύρια γραμμή μπορεί να συνδεθεί με μία άλλη, καθώς στο ένα άκρο υπάρχει αποζεύκτης ο οποίος κατά την κανονική λειτουργία είναι ανοικτός. Η εφαρμογή τους είναι συνήθως σε εναέρια δίκτυα διανομής, σε περιοχές όπου δεν χρειάζεται υψηλή αξιοπιστία.



Σχήμα 2.3: Η τοπολογία ενός απλού τυπικού ακτινικού δικτύου [7]

Όσον αφορά τα βροχοειδές δίκτυα η δομή τους μοιάζει αρκετά με τη δομή ενός ακτινικού δικτύου. Σε αυτού του είδους δικτύου, οι γραμμές έχουν την ίδια αρχή και τέλος, τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ σχηματίζοντας έτσι ένα βρόχο. Τέτοια δίκτυα βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε υπόγεια δίκτυα διανομής.

2.2.3 Εξοπλισμός

Τα δίκτυα διανομής αποτελούνται από ένα σύνολο επί μέρους στοιχείων, όπου με την αλληλεπίδραση τους επιτυγχάνεται η ορθή λειτουργία του συστήματος. Σε αυτή την ενότητα θα αναφέρουμε συνοπτικά αυτά τα κύρια στοιχεία.

Πολύ κύριο στοιχείο ενός δικτύου διανομής είναι οι υποσταθμοί οι οποίοι μπορεί να είναι ΥΤ/ΜΤ ή ΜΤ/ΧΤ. Οι υποσταθμοί έχουν σαν σκοπό την ανύψωση ή υποβιβασμό της τάσης στα κατάλληλα επίπεδα. Οι Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ μπορούν να είναι και κομμάτι του συστήματος αφού μπορούν να λειτουργήσουν σαν σημεία ζεύξης για τις γραμμές ΥΤ. Η συνηθισμένη ισχύς τέτοιων Μ/Σ είναι μερικών δεκάδων ΜVA. Όσον αφορά τους Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ αφού σαφώς χειρίζονται πολύ μικρότερη ισχύ, μπορούν να είναι μεταξύ 25 και 1000 kVA [10].

Είναι γνωστό πως η τάση μπορεί να έχει μεταβολές για διάφορους λόγους, όπως είναι η συνεχής αλλαγή του φορτίου. Προκειμένου η τάση να ρυθμίζεται χρησιμοποιούνται διάφορα μέσα. Το πιο σημαντικό στοιχείο θεωρείται ο Μ/Σ που υπάρχει στους Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ που περιλαμβάνει σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ). Τα ΣΑΤΥΦ επιτρέπουν τη βηματική μεταβολή της τάσης χωρίς να διακόπτεται η ροή ισχύος.

Αυτό επιτυγχάνεται διότι το ΣΑΤΥΦ αλλάζει τον λόγο μετασχηματισμού διά μέσου μίας κινούμενης κεφαλής (μεταγωγέας λήψεων). Τα ΣΑΤΥΦ έχουν ένα εύρος λήψεων στο οποίο μπορούν να κρατούν τη τάση σταθερή. Για παράδειγμα αν ένας Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ, με τη παρουσία ΣΑΤΥΦ, έχει λόγο μετασχηματισμού 150/20 kV και περιοχή λήψεων -10% έως +10%, τότε ο Μ/Σ μπορεί να διατηρήσει σταθερή την τάση εξόδου του στα 20kV αν η τάσης εισόδου είναι μεγαλύτερη από 135 kV και μικρότερη από 175 kV [10]. Το γεγονός ότι η αλλαγή γίνεται αυτόματα και ότι χρειάζεται μερικά δευτερόλεπτα τους καθιστά τη πιο συχνή επιλογή σαν μέσο ρύθμισης τάσης. Ακόμα, ένας τρόπος ρύθμισης της τάσης είναι η αλλαγή των λήψεων Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ. Λόγω ότι αυτές οι μεταβολές πρέπει να γίνονται χειροκίνητα δεν αποτελεί δημοφιλή επιλογή και για αυτό το λόγο οι αλλαγές των λήψεων γίνεται σπάνια. Τέλος, υπάρχουν και οι εγκάρσιοι πυκνωτές, οι οποίοι μπορούν να τοποθετηθούν στους ζυγούς ΜΤ των Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ ή στις γραμμές ΜΤ. Οι πυκνωτές μπορεί να είναι μόνιμα συνδεδεμένοι, συμβάλλοντας στην ανύψωση της τάσης, ή να μπορούν να συνδέονται όποτε είναι αναγκαίο μέσω αποζεύκτη[8].

Στα δίκτυα διανομής, υπάρχουν στοιχεία και κλάδοι που είναι απαραίτητη η σύνδεση/αποσύνδεση τους. Αυτό γίνεται εφικτό με τα μέσα ζεύξης, τα οποία στα δίκτυα διανομής αποτελούνται από τους αποζεύκτες, τους διακόπτες φορτίου και τους διακόπτες ισχύος. Οι αποζεύκτες μπορούν να ανοιγοκλείσουν ένα κύκλωμα, αλλά μόνο όταν αυτό δεν διαρρέεται από ρεύμα. Έτσι η λειτουργία τους εξαρτάται από άλλα μέσα που θα διακόψουν την παροχή ρεύματος. Οι διακόπτες φορτίου έχουν την δυνατότητα να διακόπτουν ή να επαναφέρουν το ρεύμα καθώς το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα. Παρόλο που μπορούν να αποκαθιστούν ρεύματα βραχυκύκλωσης, δεν μπορούν να το διακόψουν. Τέλος, ο διακόπτης ισχύος μπορεί να λειτουργήσει υπό οποιαδήποτε συνθήκη ακόμα και να διακόψει το ρεύμα βραχυκύκλωσης.

Τέλος, τα μέσα προστασίας είναι υπεύθυνα για την απομόνωση των κομματιών που υπέστησαν βλάβη, εξασφαλίζοντας έτσι την ακεραιότητα του υπόλοιπου κυκλώματος. Τα μέσα προστασίας αποτελούνται από τους διακόπτες ισχύος ελεγχόμενους από ηλεκτρονόμους προστασίας, τις ασφάλειες, τους διακόπτες αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ) και τους διακόπτες απομόνωσης.

2.3 Διεσπαρμένη Παραγωγή Ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές, αποτελούν την μόνη λύση για ένα αύριο που θα είναι πιο φιλικό προς το περιβάλλον. Όμως, η συνεχής διεξόδυση των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας έρχεται με προβλήματα και προκλήσεις αφού το παρόν σύστημα διανομής θα πρέπει να υποστεί αρκετές αλλαγές προκειμένου να γίνει εφικτή αυτή η μετάβαση.

2.3.1 Πλεονεκτήματα

Τα ΑΠΕ εκτός από μια φιλική μορφή ενέργειας έρχονται και με άλλα πλεονεκτήματα. Στα παραδοσιακά δίκτυα γινόταν η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα εργοστάσιο και έπρεπε να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις για να γίνει η διανομή στους καταναλωτές. Πλέον, τα ΑΠΕ επιτρέπουν στον καθένα να γίνει παραγωγός, φέρνοντας έτσι τους παραγωγούς πολύ κοντά στο φορτίο. Συνεπώς, η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να κοστίζει πολύ λιγότερο. Τα παραδοσιακά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας

αποτελούσαν τεράστια έργα τα οποία κόστιζαν αρκετά χρήματα και χρόνο για την ολοκλήρωσή τους. Οι προσθήκη της διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας (ΔΠΕ) στο δίκτυο, κάνει εφικτή την παρουσία πολύ πιο μικρότερων μονάδων παραγωγής μειώνοντας δραματικά το κόστος ανέγερσης μίας μονάδας καθώς και το χρόνο που χρειάζεται να ολοκληρωθεί το έργο. Τέλος, με την προσθήκη της ΔΠΕ η αγορά ενέργειας μπορεί να γίνει πολύ πιο ανταγωνιστική αφού θα υπάρχει ένας τεράστιος αριθμός παραγωγών που θα μπορούν να ικανοποιήσουν τους καταναλωτές [11].

2.3.2 Εμπόδια στην διείσδυση μονάδων ΔΠΕ

Όπως οποιαδήποτε τεχνολογία έτσι και οι ΔΠΕ έχουν πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα. Όμως αφού βαδίζουμε στο δρόμο της “καθαρής” ενέργειας, η αξιοποίηση των ΔΠΕ αποτελεί ένα ακρογωνιαίο λίθο. Συμπερασματικά, αυτά τα προβλήματα πρέπει να μελετηθούν και να ξεπεραστούν.

2.3.2.1 Αξιοπιστία

Ίσως και το πιο σημαντικό πρόβλημα από την διείσδυση των μονάδων ΔΠΕ, να αποτελεί το θέμα της αξιοπιστίας. Τα ΑΠΕ έχουν σχετικά μικρή ενεργειακή “πυκνότητα” σε σχέση με τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας, έτσι οι πλείστες μονάδες είναι μικρές και γεωγραφικά διεσπαρμένες. Δεν μπορεί να γίνει προγραμματισμός τους ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες αλλά μόνο πρόβλεψη τους. Η διαθέσιμη ενέργεια μπορεί να διαφέρει ανά εποχή και ανά τοποθεσία, αλλά επίσης δεν είναι όλες οι τοποθεσίες κατάλληλες για εγκατάσταση ΑΠΕ. Αυτό το γεγονός έχει τεράστιο αντίκτυπο στην αξιοπιστία του συστήματος. Η αβεβαιότητα των μονάδων ΔΠΕ χρεώνεται σε δύο παράγοντες: πρώτον, στη μη συνεχή και σταθερή παραγωγή ενέργειας και δεύτερον, στη πιθανή αβεβαιότητα μιας μονάδας όταν αυτή απαιτείται να παράγει ενέργεια. Ο συνδυασμός αυτών των δύο μπορεί να οδηγήσει σε έλλειμμα στη παραγωγή, γεγονός το οποίο θέτει σε κίνδυνο την αξιοπιστία, την ακεραιότητα του δικτύου και την ποιότητα της ενέργειας [11]. Λύση σε αυτά τα προβλήματα μπορούν να δώσουν νέες τεχνολογίες όπως είναι αυτή της αποθήκευσης ενέργειας. Πέραν της αβεβαιότητας των μονάδων ΑΠΕ υπάρχει πλέον και μια μεγάλη μεταβλητότητα στο φορτίο με την προσθήκη τεχνολογιών όπως το ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Η αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες μπορεί να αποτελεί λύση σε αυτά τα προβλήματα, αφού θα αποθηκεύεται ενέργεια όταν υπάρχει υψηλή παραγωγή και χαμηλή ζήτηση και θα προσφέρεται όταν ισχύει το αντίθετο. Επιπλέον, μονάδες ακόμα και δίκτυα που είναι απόμακρα μπορούν ανάλογα να ζητήσουν ή να προσφέρουν ενέργεια από μια άλλη μονάδα ή δίκτυο.

2.3.2.2 Αλγόριθμοι ροής ισχύος

Η ενέργεια που παράγεται πρέπει να μεταφέρεται στους καταναλωτές με ένα αποτελεσματικό τρόπο ούτως ώστε το δίκτυο να παραμένει σταθερό, οικονομικό και αξιόπιστο. Καθώς αυξάνεται η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια όλο και περισσότερες μονάδες ΔΠΕ εισάγονται στο δίκτυο. Ως αποτέλεσμα, το δίκτυο γίνεται συνεχώς μεγαλύτερο και πιο περίπλοκο. Έτσι, η ανάλυση της ροής ισχύος όσον αφορά το δίκτυο της

διανομής γίνεται ολοένα και πιο περίπλοκη. Οι μέθοδοι που είχαν χρήση στα παραδοσιακά δίκτυα διανομής δεν είναι πλέον τόσο αποτελεσματικοί. Ως αποτέλεσμα, διαρκώς εξετάζονται διάφοροι αλγόριθμοι που θα βοηθήσουν στην αντιμετώπιση αυτού του θέματος [12].

2.3.2.3 Τιμολόγηση

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως τα δίκτυα διανομής έχουν γίνει πολύ πιο περίπλοκα σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια, όπου τα δίκτυα διανομής αποτελούνταν μόνο από μετασχηματιστές και φορτία. Με την ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων και των μικροδικτύων, γίνεται μεγάλη διεύρυνση των μονάδων ΔΠΕ. Έτσι, εκτός από πολύπλοκο δίκτυο υπάρχει πλέον και πιο δύσκολη διαδικασία τιμολόγησης. Αυτό διότι υπάρχουν πολλοί παραπάνω αγοραστές/πωλητές ενέργειας, πράγμα που απαιτεί μεγαλύτερη παρακολούθηση και έλεγχο του δικτύου, για να καθοριστεί η κατάλληλη τιμολόγηση [12].

2.3.2.4 Διαχείριση ζήτησης

Η διαχείριση ζήτησης, στα αγγλικά Demand Side Management (DSM), ορίζεται ως η δράση που λαμβάνει υπόψη το τρόπο με τον οποίο οι καταναλωτές χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια προκειμένου να επιτευχθεί ενεργειακή εξοικονόμηση και υψηλότερη αποδοτικότητα. Με τη σημερινή τεχνολογία είναι εφικτή η διαχείριση των συσκευών εξ αποστάσεως. Συνεπώς, μπορεί να υπάρχει έντονη μεταβλητότητα στο φορτίο. Αλλά αυτό μπορεί να είναι θέμα όσο αφορά και τη παραγωγή. Για παράδειγμα τα δεδομένα ενός φωτοβολταϊκού θα πρέπει να είναι διαθέσιμα σε πραγματικό χρόνο, προκειμένου να γίνεται σωστή εκτίμηση για την αναμενόμενη παραγωγή. Κάθε χώρα, ακόμα και κάθε τοπικό δίκτυο μπορεί να έχει διάφορες πρακτικές εξοικονόμησης ενέργειας οι οποίες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Οι μονάδες ΔΠΕ επιτρέπουν την μείωση της αιχμής φορτίου δίνοντας κίνητρα στους καταναλωτές, όπως για παράδειγμα να φορτίσεις το ηλεκτρικό σου όχημα το βράδυ παρά το μεσημέρι, όπου η ζήτηση είναι μικρότερη. Για αυτό το λόγο γίνονται μελέτες για τις αντιδράσεις των καταναλωτών σε διάφορα σχέδια βασισμένα στη ζήτηση.

2.3.2.5 Διαστασιολόγηση και τοποθεσία

Ανάλογα με τις κλιματικές αλλαγές το κέρδος από την εγκατάσταση μονάδων ΑΠΕ διαφέρει. Συνηθίζεται τα ΑΠΕ να τοποθετούνται κοντά στο φορτίο. Ανάλογα της διαθεσιμότητας των ανανεώσιμων πηγών όπως νερό, ήλιος και αέρας, καθορίζεται και η τοποθεσία εγκατάστασης. Συνεπώς, ανάλογα με τις απαιτήσεις του φορτίου αλλά και τη μελέτη των ΑΠΕ έχει γίνει υποχρεωτική η μελέτη για τη μελέτη του μεγέθους και της τοποθεσίας εγκατάστασης [12].

2.4 Είδη Λειτουργίας της ΔΠΕ στο Δίκτυο

Υπάρχουν τρία είδη σύνδεσης με τα οποία μπορεί να ενσωματωθεί η ΔΠΕ στο δίκτυο. Κάθε ένα έχει τον δικό του σκοπό αλλά και διαφορετικό αντίκτυπο στην αξιοπιστία του δικτύου:

1. Η πιο απλή λειτουργία της ΔΠΕ είναι σαν εφεδρεία, όπου θα χρησιμοποιηθεί σε περίπτωση που

υπάρχουν διακοπές στη παροχή ενέργειας. Σε ένα σύστημα που υπάρχει ΔΠΕ, είναι δυνατό να γίνει αλλαγή από που θα τροφοδοτηθούν ενέργεια τα φορτία. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια διακοπών όταν υπάρχει κάποια διαταραχή, προκειμένου να διατηρηθεί η παροχή στους καταναλωτές. Αν οι μονάδες ΔΠΕ είναι ορθά συντονισμένες μπορούν να έχουν θετικό αντίκτυπο στην αξιοπιστία του δικτύου.

2. Άλλη λειτουργία των μονάδων ΔΠΕ είναι η περίπτωση όπου καλύπτουν τα τοπικά φορτία και μπορεί να γίνει έγχυση της περίσσειας ισχύς στο δίκτυο διανομής. Η ενέργεια που εγχέεται θα μετρηθεί και ο καταναλωτής πληρώνει τη διαφορά μεταξύ της ενέργειας που καταναλώθηκε από την διανομή και της ποσότητας που εισάχθηκε στο δίκτυο. Σε αυτή τη λειτουργία δεν υπάρχει κάποια αλλαγή στην αξιοπιστία του δικτύου.
3. Η τρίτη λειτουργία αφορά την περίπτωση που οι ΔΠΕ λειτουργά παράλληλα με το δίκτυο. Σε αυτή τη περίπτωση εισάγονται νέα μοντέλα για την αξιοπιστία. Ένας τρόπος είναι η μοντελοποίηση της ΔΠΕ ως αρνητική έγχυση ισχύος, ανεξάρτητη από την τάση του δικτύου στο τελευταίο κόμβο. Η μοντελοποίηση της ΔΠΕ ως αρνητικά φορτία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αξιοπιστίας καθώς μειώνεται το συνολικό φορτίο. Όμως, πρέπει να αναφερθεί ότι πρέπει να χρησιμοποιούνται πιο εξελιγμένα μοντέλα για τις μονάδες ΔΠΕ όταν υπάρχει έντονη μεταβλητότητα στην παραγωγή των ΑΠΕ, προκειμένου να γίνεται καλύτερη ανάλυση του αντίκτυπου που θα έχουν στην αξιοπιστία του συστήματος [11].

2.5 Τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

2.5.1 Εισαγωγή

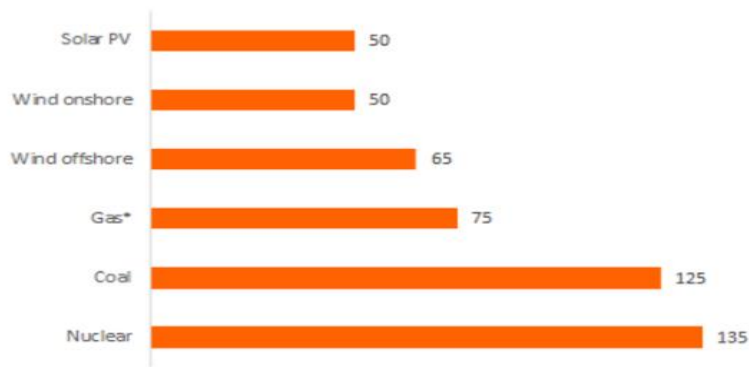
Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενα σημεία, η ενσωμάτωση των ΑΠΕ είναι απαραίτητο για το καλό του πλανήτη μας. Ως αποτέλεσμα, τα τελευταία χρόνια γίνεται εντατική έρευνα στις τεχνολογίες ΑΠΕ προκειμένου η παραγωγή ενέργειας να είναι όσο πιο αποδοτική γίνεται. Αυτή η μετάβαση στα ΑΠΕ έχει ήδη αρχίσει γεγονός που φαίνεται και στις τιμές αφού πολλές μορφές ΑΠΕ είναι πλέον πιο φτηνές από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4. Εξάλλου πλέον τα πρόστιμα για ρίπους έχουν γίνει πιο ακριβά. Οι διαδικασίες για ενσωμάτωση των ΑΠΕ στα δίκτυα έχουν ήδη ξεκινήσει και συνεχίζονται με γοργούς ρυθμούς [13]. Υπάρχουν, πάρα πολλές μορφές ΑΠΕ όπως είναι: ηλιακή, αιολική, υδροηλεκτρική, πυρηνική, γεωθερμική κ.α. Όμως όσον αφορά τις μονάδες ΔΠΕ και τα δίκτυα διανομής δύο μορφές είναι αυτές που κυριαρχούν, η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών (PV) και των αιολικών πάρκων. Αυτό διότι η εγκατάσταση τους μπορεί να γίνει αρκετά κοντά στο φορτίο, ειδικά για τα PV όπου η εγκατάσταση μπορεί να γίνει σε κάθε οικία. Ακόμα ένας λόγος είναι η μεγάλη επάρκεια των πηγών ενέργειας (ήλιος και αέρας).

2.5.2 Φωτοβολταϊκά (PV)

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών αποτελεί την πιο διαδεδομένη μορφή ΔΠΕ. Αυτό διότι μπορεί εύκολα

Wind and solar are cheapest ways of power generation

Average Life Cycle cost Of Electricity (LCOE) for major power technologies in Europe in 2019 in euro/MWh



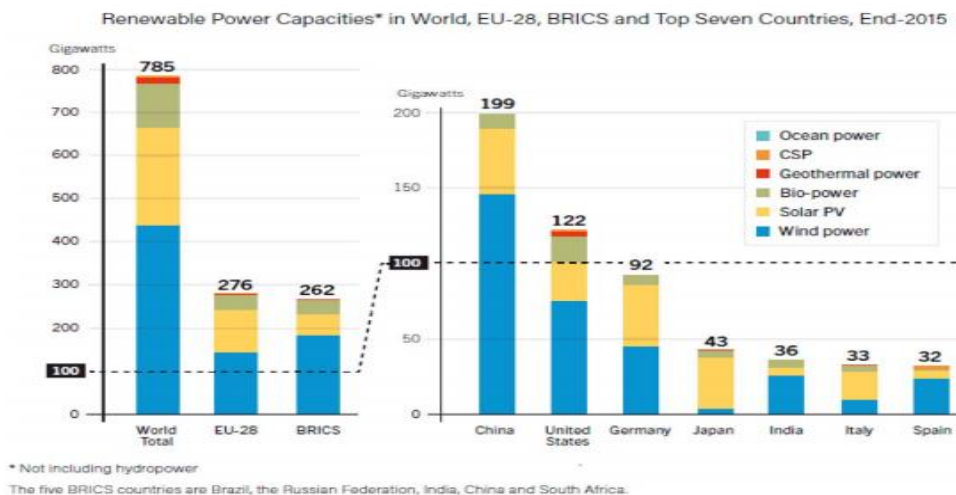
*Combined Cycle Gas Turbines or CCGT power plants. The LCOE for gas peaker plants is much higher.

Source; IEA World Energy Outlook 2020, ING Research.

Σχήμα 2.4: Η εμφανής διαφορά στη τιμολόγηση των ΑΠΕ σε σχέση με τον άνθρακα [15]

και φτηνά να εγκατασταθεί σε κάθε οικία δίνοντας στον καταναλωτή την δυνατότητα να γίνει και παραγωγός. Τα φωτοβολταϊκά είναι τεχνολογία που έχει μπει για τα καλά στη ζωή μας, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5. Θεωρητικά, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να καλύψει τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες. Παρόλα αυτά, η συνεισφορά της ηλιακής ενέργειας στη παγκόσμια ζήτηση είναι σχετικά μικρή. Όμως, υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης καθώς δίνονται κίνητρα από πολλές χώρες για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σπίτια ακόμα και για φωτοβολταϊκά πάρκα [16]. Επίσης, καθώς γίνεται περισσότερη έρευνα ίσως βελτιωθεί και ο παρών βαθμός απόδοσης που είναι γύρω στο 20%.

Μια εγκατάσταση από φωτοβολταϊκά αποτελείται από τα πλαίσια και επίσης, μπορεί να έχει μετατροπέα DC-AC, ρυθμιστές τάσης και ρεύματος, διατάξεις ελέγχου ακόμα και συσσωρευτές για την αποθήκευση της ενέργειας. Στα πλαίσια εμπεριέχονται ηλιακές κυψέλες οι οποίες έχουν την δυνατότητα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Τέτοιες κυψέλες είναι φτιαγμένες από ημιαγωγούς, συνήθως πυριτίου, και μπορεί να είναι μονοκρυσταλλική ή πολυκρυσταλλική. Οι κρύσταλλοι αυτοί κοστίζουν για αυτό το λόγο τα πλαίσια αποτελούν συνήθως το πιο ακριβό κομμάτι σε μία φωτοβολταϊκή εγκατάσταση [2]. Τα πλαίσια μπορούν να παράγουν ισχύ της τάξεως 50-150 W. Σειρές τέτοιων πλαισίων μπορούν να αποτελούν μια μικρή εγκατάσταση ακόμα και ένα σταθμό, σε ένα αιολικό πάρκο.



Σχήμα 2.5: Δεδομένα για τις διάφορες μορφές ΑΠΕ [16]

2.5.3 Αιολικά Πάρκα

Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από ένα σύνολο ανεμογεννητριών οι οποίες συνδέονται στον ίδιο ζυγό, και από εκεί συνδέονται στο δίκτυο. Η ισχύς που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια (Α/Γ) εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ταχύτητα του ανέμου, όπως φαίνεται στο παρακάτω χαρακτηριστικό τύπο υπολογισμού της ισχύς σε Α/Γ:

$$\text{Ισχύς Α/Γ} = \frac{1}{2} \rho A C_p w^3$$

Όπου: ρ : πυκνότητα αέρα, A : το εμβαδό του που καλύπτει το πτερύγιο, C_p : συντελεστής ισχύος
 w : ταχύτητα του ανέμου

Ως αποτέλεσμα της εξάρτησης της ισχύς από την ταχύτητα ανέμου παίζει κρίσιμο ρόλο η τοποθεσία που θα τοποθετηθεί η Α/Γ. Η Α/Γ χωρίζονται σε κατακόρυφου άξονα και οριζόντιου άξονα που αποτελούν την συντριπτική πλειοψηφία. Οι Α/Γ έχουν τον ανεμοκινητήρα (συμπεριλαμβανομένου πτερυγίου, μηχανισμό αλλαγής βήματος και τη πλήμνη), το μηχανισμό μετάδοσης της κίνησης (κιβώτιο ταχυτήτων, άξονες, ελαστικούς συνδέσμους και έδρανα), την γεννήτρια, το πύργο στήριξης, το σύστημα προσανατολισμού και το σύστημα ασφαλείας [2]. Η γενική αρχή λειτουργίας είναι ότι ο αέρας περιστρέφει τα πτερύγια μετατρέποντας έτσι την αιολική ενέργεια σε κινητική. Ακολουθώς, υπάρχει ένα κιβώτιο ταχυτήτων που αυξάνει τις στροφές κατάλληλα για τη σωστή λειτουργία της γεννήτριας. Οι Α/Γ διαθέτουν μηχανισμό περιστροφής προκειμένου ο αέρας να έρχεται πάντα κάθετος στα πτερύγια, αλλά και μηχανισμό περιστροφής των πτερυγίων για αλλαγή της αεροδυναμικής. Οι Α/Γ κατά κύριο λόγο έχουν εφαρμογές σε μεγάλα αιολικά πάρκα όπου μπορούν να παράγονται χιλιάδες MW, αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για οικιακούς σκοπούς με σαφώς μικρότερες διαστάσεις. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 2.5 η αιολική ενέργεια αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος παραγωγής των ΑΠΕ (χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η υδροηλεκτρική ενέργεια). Η τεχνολογία των Α/Γ αναπτύσσεται συνεχώς, τα τελευταία χρόνια κατασκευάζονται Α/Γ όλο και μεγαλύτερων διαστάσεων αλλά και επιπλέον εγκαθίστανται όλο και περισσότερες Α/Γ off-shore όπου υπάρχουν πιο ευνοϊκές συνθήκες καθώς και για εξοικονόμηση χώρου.

2.6 Τοπικά Δίκτυα και Αγορές Ενέργειας

2.6.1 Εισαγωγή

Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα σύστημα που αποτελείται από την παραγωγή, την μεταφορά-διανομή και την πώληση ηλεκτρικού ρεύματος στους καταναλωτές. Αρχικά, όλη η διαδικασία (παραγωγή, μεταφορά και διανομή) γινόταν από μία εταιρεία. Οι εταιρείες αυτές δημιούργησαν μονοπώλια στην πώληση και παραγωγή ενέργειας. Στην δεκαετία του 1990 άρχισε ένας ανασχηματισμός στο τομέα του ηλεκτρισμού, καθώς πολλές χώρες έφυγαν από το σχέδιο της μίας οντότητας και εισήγαν μια πιο ανταγωνιστική αγορά. Η παραγωγή, μεταφορά και διανομή αποτελούν ξεχωριστούς τομείς. Οι συμμετέχοντες στην αγορά αγοράζουν και πουλάνε ενέργεια με σκοπό το κέρδος. Πλέον υπάρχουν προκλήσεις στην ικανοποίηση της ζήτησης σε προσιτές τιμές λαμβάνοντας υπόψη την κλιματική αλλαγή. Παρόλο που απαιτείται ένας ανασχηματισμός της αγοράς, δεν πρέπει να εστιάζουμε μόνο σε οικονομικά και τεχνικά προβλήματα αλλά και σε κοινωνικά,

περιβαλλοντικά και πολιτικά. Λύση στα προβλήματα της παραδοσιακής αγοράς ίσως να μπορεί να δώσει η εισαγωγή των τοπικών αγορών ενέργειας, Local Energy Markets (LEM) [17].

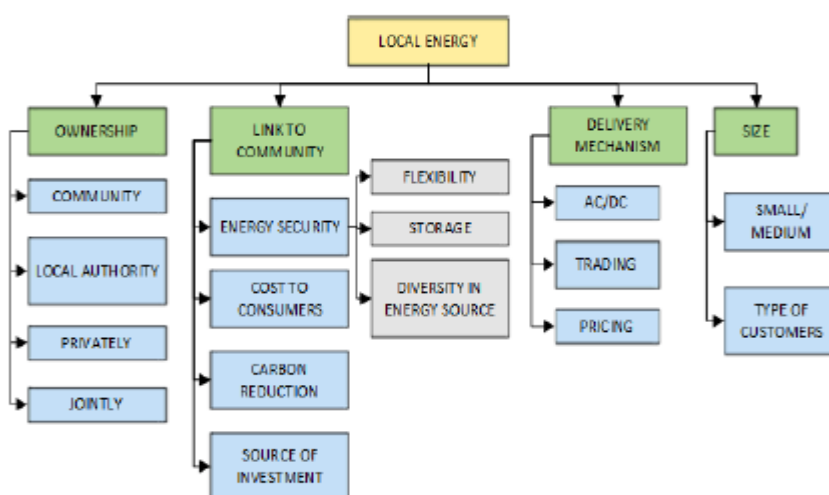
Στόχος των LEM είναι η μεγιστοποίηση της αξιοποίησης των ΔΠΕ σε μια τοπική περιοχή, δημιουργώντας μια τοπική αγορά. Τα LEM συνήθως αφορούν κοινότητες, με στόχο να τις βοηθήσουν. Αυτό γίνεται με τη μείωση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας και τη μείωση της παραγωγής από συμβατικές μονάδες, ενθαρρύνοντας την παραγωγή ΑΠΕ. Η ιδέα των LEM υπάρχει εδώ και αρκετά χρόνια όμως τα τελευταία χρόνια έχει εντατικοποιηθεί η μελέτη της. Ένα μεγάλο μειονέκτημα των LEM αποτελεί το γεγονός ότι έχουν περιορισμένο αριθμό όσον αφορά τους συμμετέχοντες στην αγορά καθώς και στον όγκο που μπορεί να είναι στην αγορά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει μια περιορισμένη ρευστότητα αφού υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί, έτσι οι τοπικές αγορές πρέπει να μπορούν να ανταποκριθούν σε περιορισμένη ρευστότητα. Τα τελευταία χρόνια οι τοπικές αγορές ενέργειας συσχετίζονται αρκετά με την τεχνολογία του blockchain, η οποία μελετάται αρκετά και αυτή τα τελευταία χρόνια. Σχετικά πρόσφατα έχει αρχίσει η εφαρμογή τοπικών αγορών ενέργειας, όπως για παράδειγμα από τις γερμανικές εταιρίες Lumenaza GmbH2 και sonnen GmbH3 [21].

Οι παραδοσιακές αγορές ενέργειας χαρακτηρίζονται από αρκετές προκλήσεις στις οποίες μπορεί να βοηθήσει η εισαγωγή των τοπικών αγορών ενέργειας. Αυτές οι προκλήσεις είναι οι παρακάτω:

- Καθώς υπάρχει έλλειψη ανταγωνισμού και συνεχής αύξηση στους λογαριασμούς ηλεκτρικής ενέργειας δεν παρέχονται τα πλεονεκτήματα του λιανεμπορίου, ειδικά σε μικρούς καταναλωτές.
- Παρόλο που η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος μεταβάλλεται συνεχώς, ο πάροχος χρεώνει μια σταθερή τιμή στο καταναλωτή. Έτσι, ο καταναλωτής χάνει την ευκαιρία να επωφεληθεί από τις χαμηλότερες τιμές που υπάρχουν σε περιόδους μη αιχμής φορτίου.
- Υπάρχει μια μεγάλη δυσκολία για τον καταναλωτή ώστε να αλλάξει παροχέα. Αυτό οφείλεται στη δομή της όλης διαδικασίας αλλά και στο κόστος της.
- Σε απομακρυσμένες περιοχές, όπως είναι μακρινά χωριά ή νησιά, η ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι οικονομικά προσιτή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι επενδύονται μεγάλα ποσά για την μεταφορά και τη διανομή.
- Οι ανάγκες των καταναλωτών όσον αφορά την ηλεκτρική ενέργεια χαρακτηρίζονται ως έντονα μεταβλητές, απρόβλεπτες και επηρεάζονται ανάλογα των εποχών. Ο διαχειριστής του δικτύου διαχειρίζεται την παραγωγή καθώς και την στρεφόμενη εφεδρεία, ούτως ώστε το σύστημα να είναι ασφαλές. Η διείσδυση των ΑΠΕ και η ανάγκη για εφεδρεία αναγκάζει τον διαχειριστή να είναι ακόμα πιο ευέλικτος.
- Η μεταβλητή τιμή της χονδρικής αγοράς καθώς και οι επενδύσεις που γίνονται για την εγκατάσταση των ΑΠΕ έχουν άμεσο αντίκτυπο στο λογαριασμό του καταναλωτή. Επιπλέον, ο λογαριασμός επιβαρύνεται από τα κόστη των δικτύων μεταφοράς και διανομής τα οποία αυξάνονται λόγω περιορισμών των γραμμών καθώς και για ανάγκη περισσότερης ενέργειας [17].

2.6.2 Σχεδιασμός τοπικών αγορών ενέργειας

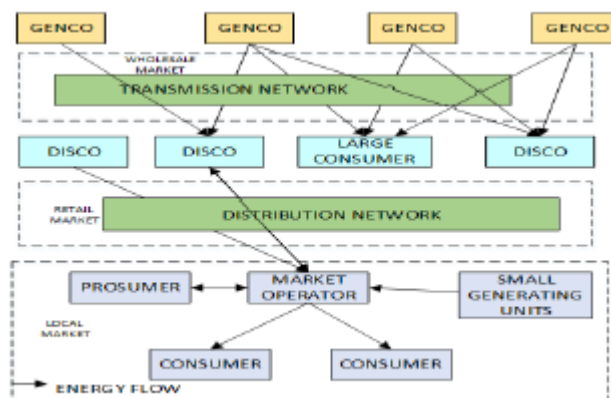
Η διανεμημένη παραγωγή μπορεί να βοηθήσει στη στήριξη του συστήματος. Αυτό διότι οι τοπικές αγορές επιτρέπουν την παροχή ενέργειας που παράγεται τοπικά, να διανέμεται σε καταναλωτές που βρίσκονται μέσα σε αυτό το τοπικό δίκτυο. Τα τοπικά δίκτυα αποτελούνται από τις πηγές ενέργειας, τα φορτία και τις μονάδες αποθήκευσης οι οποίες έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν απομονωμένα ή σε συνδυασμό με το κεντρικό δίκτυο για ικανοποίηση της ενεργειακής ζήτησης. Οι πηγές παράγουν κανονικά και όταν η παραγωγή γίνεται μεγαλύτερη της ζήτησης, τότε η ισχύς αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί όταν η παραγωγή θα είναι μικρότερη της ζήτησης. Τα τοπικά δίκτυα σχεδιάζονται για να συμπεριλαμβάνουν όλα τα είδη φορτίων και πηγών. Η ανταλλαγή πληροφοριών σε όλο το σύστημα γίνεται μέσω ενός ταχύτατου συστήματος επικοινωνίας. Για τον σχεδιασμό μιας τοπικής αγοράς δεσπόζουν κάποιοι τομείς οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω.



Σχήμα 2.6: Κύρια χαρακτηριστικά μιας τοπικής αγοράς ενέργειας [17]

Ιδιοκτησία: Η δημιουργία και η λειτουργία των τοπικών αγορών ενέργειας απαιτεί την ενεργή προσφορά των συμμετεχόντων καθώς και των μετόχων, οι οποίοι μπορεί να είναι οι ίδιοι καταναλωτές-παραγωγοί του δικτύου. Κύριος στόχος των τοπικών αγορών είναι η μείωση του λογαριασμού ηλεκτρικής ενέργειας πράγμα που παράλληλα μειώνει το αποτύπωμα διοξειδίου του άνθρακα στο περιβάλλον καθώς συμμετέχουν περισσότερες μονάδες ΑΠΕ στο δίκτυο. Αυτές οι μονάδες προέρχονται από τους ίδιους τους χρήστες του δικτύου και η χρήση τους προορίζεται επίσης για τους ίδιους. Η ιδιωτική τοπική ενέργεια προέρχεται από μη κερδοσκοπικές μονάδες παραγωγής με σκοπό τη διαχείριση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τη διασφάλιση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Η τοπική κοινότητα σε συνδυασμό με την ιδιωτική τοπική ενέργεια μπορούν να λειτουργήσουν μαζί προκειμένου να αποκομίζονται τα πλεονεκτήματα και των δύο.

Μηχανισμός παράδοσης: Η εγκατεστημένη ισχύς, ο τύπος ρεύματος (AC/DC), ο τύπος φορτίου και η ποσότητα παραγωγής σχηματίζουν το κύριο μηχανισμό σε μια τοπική αγορά ενέργειας. Το δίκτυο ανταλλαγών διαμορφώνει η μέθοδος ανταλλαγής, ο τρόπος εκκαθάρισης της αγοράς και οι τρόποι διαμόρφωσης της τιμής.



Σχήμα 2.7: Η δομή της τοπικής αγοράς ενέργειας σε συνδυασμό με την παραδοσιακή αγορά [17]

Σύνδεση με την τοπική κοινότητα: Η ενέργεια που παράγεται σε μια τέτοια κοινότητα έχει ως αποτέλεσμα την αποσυμφόρηση του παραδοσιακού δικτύου και λειτουργεί ως μια μορφή επένδυσης. Όμως, για να γίνει αποδεκτή από τον κόσμο θα πρέπει να γίνεται σωστή ενημέρωση ούτως ώστε να γίνει αποδεκτή η ιδέα της τοπικής αγοράς. Μόνο έτσι ο κόσμος θα κατανοήσει τη συμβολή που μπορούν να έχουν στην καταπολέμηση της περιβαλλοντικής μόλυνσης αλλά παράλληλα και στα ωφελήματα που θα έχουν οι ίδιοι. Το πιο κύριο είναι η χαμηλότερη τιμή ενέργειας καθώς και τα μειωμένα κόστη μεταφοράς και διανομής.

Μέγεθος: Το μέγεθος καθορίζεται από αρκετούς παράγοντες, όπως είναι η διαθεσιμότητα των πηγών καθώς και η ζήτηση. Ανάλογα με τους συμμετέχοντες ένα τοπικό δίκτυο μπορεί να έχει διάφορα μεγέθη. Σαφώς, καθώς η υλοποίηση της ιδέας βρίσκεται σε αρχικά στάδια θα αρχίσει από πιο μικρά μεγέθη όπου θα αντιμετωπίζονται τα προβλήματα και σιγά θα γίνεται και προσπάθεια για μεγαλύτερα δίκτυα.

Δομή αγοράς: Στο σχήμα 2.7 φαίνεται η δομή της τοπικής αγοράς ενέργειας σε συνδυασμό με τη παραδοσιακή αγορά. Η λιανική αγορά και η τοπική αγορά έχουν το ίδιο δίκτυο διανομής. Η δομή της τοπικής αγοράς ενέργειας χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, την τεχνική και την οικονομική. Στην τεχνική κατηγορία υπάρχουν θέματα όπως είναι η σταθερότητα ισχύος, τάσης και συχνότητας καθώς και η μεταβατική ευστάθεια. Επιπλέον, στον τομέα αυτό εμπεριέχεται η ρύθμιση ενεργού και άεργου ισχύος και η αποθήκευση ενέργειας. Όσον αφορά τον οικονομικό τομέα αυτός περιέχει το επιχειρηματικό μοντέλο, τη δομή της αγοράς, τη μέθοδο ανταλλαγής κ.α. [17]

2.6.3 Δυνατότητες και Πλεονεκτήματα

Η καθιέρωση των τοπικών αγορών ενέργειας έχει ως κύριο στόχο τη μείωση του αποτυπώματος διοξειδίου του άνθρακα στο περιβάλλον, εισάγοντας περισσότερες μονάδες ΑΠΕ, ενώ παράλληλα προσφέρει ενέργεια στους καταναλωτές σε μειωμένες τιμές δίνοντας τους κίνητρο να ενταχθούν σε τέτοιες αγορές. Όμως, πέρα αυτών τα τοπικά δίκτυα και αγορές παρέχουν και άλλα πλεονεκτήματα, όπως είναι τα παρακάτω:

- **Ασφάλεια και ευελιξία στους καταναλωτές:** Με την δυνατότητα ανταλλαγής ισχύος ο συμμετέχοντας σε ένα τέτοιο δίκτυο έχει την δυνατότητα να επιλέξει από που θα προμηθευτεί την ενέργεια του από ένα μεγάλο φάσμα. Όσο και η παραγωγή αλλά και η κατανάλωση έχουν την

δυνατότητα να είναι πιο εξισορροπημένες ειδικότερα σε περιόδους αιχμής. Τέλος, η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας έρχεται να βοηθήσει όποιες ατέλειες υπάρχουν.

- **Διαχείριση ζήτησης:** Όπως αναφέραμε και πιο πάνω, η αιχμή φορτίου μπορεί να μειωθεί αποτελεσματικά. Αυτό γίνεται όταν συνδυαστούν οι τιμές ηλεκτρικές ενέργειας μαζί με την πρόβλεψη φορτίου. Με αυτό το τρόπο δίνεται η δυνατότητα σε καταναλωτές και παροχείς να επωφεληθούν παρέχοντας παράλληλα μια βοήθεια στο δίκτυο, αφού μειώνεται η συμφόρηση σε περίοδο αιχμής. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, όλο και περισσότερες πληροφορίες γίνονται άμεσα διαθέσιμες βοηθώντας στην εξισορρόπηση της κατανάλωσης ενέργειας. Επιπλέον, ιδιωτικές μονάδες μπορούν να προσφέρουν βοήθεια σε περίπτωση που κρίνεται αναγκαίο.
- **Παροχή επικουρικών υπηρεσιών:** Η ανταπόκριση στο φορτίο εξαρτάται κατά κύριο λόγο από πολλές μικρές μονάδες ενέργειας. Έτσι, γίνεται αρκετά εύκολο αυτές οι μονάδες να προσφέρουν βοήθεια σε περιπτώσεις όπου υπάρχει κάποιο πρόβλημα όπως κάποια τοπική συμφόρηση. Οι λειτουργίες που μπορεί να προσφέρει μια τοπική αγορά είναι συνεχής ρύθμιση, παρακολούθηση φορτίου, χειρισμός ενεργειακών μεταβολών, στρεφόμενη εφεδρεία και εφεδρεία αντικατάστασης [18].
- **Μειωμένο κόστος λειτουργίας:** Καθώς το τοπικό δίκτυο αποτελεί μέρος του δικτύου διανομής δεν περιέχει στοιχεία υψηλής τάσης μειώνοντας έτσι αρκετά το κόστος λειτουργίας.
- **Στήριξη σε μονάδες ΑΠΕ μεσαίου μεγέθους:** Οι μονάδες μεσαίου μεγέθους (5-50 MW) αντιμετωπίζουν προβλήματα όσον αφορά τον ανταγωνισμό με μεγαλύτερους παροχείς ενέργειας. Με τη βοήθεια των τοπικών δικτύων μπορούν να ενταχθούν στο δίκτυο διανομής.
- **Εξέλιξη των έξυπνων δικτύων:** Τα LEM βοηθούν στην διείσδυση των έξυπνων δικτύων κάνοντας χρήση εξοπλισμού όπως είναι οι έξυπνοι μετρητές και συσκευές ενεργειακής αποδοτικότητας σε οικίες [17].

2.6.4 Προβλήματα και Εμπόδια

Παρόλο που τα πλεονεκτήματα είναι αρκετά από την υλοποίηση των τοπικών αγορών ενέργειας, υπάρχουν αρκετά εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν:

Τεχνικά: Σε αυτό το τομέα συμπεριλαμβάνεται προβλήματα όπως τον σχεδιασμό, εγκατάσταση, την διαθεσιμότητα των πηγών, δομή και οι απαιτήσεις για τον χειρισμό και συντήρηση τέτοιου δικτύου. Όσον αφορά τις μονάδες αποθήκευσης έχουν ένα μεγάλο κόστος, όμως τα τελευταία χρόνια υπάρχει μεγάλη μείωση στην τιμή των μονάδων συσσωρευτών καθώς βρίσκονται υπό έντονη μελέτη αφού θεωρούνται σημαντικό βήμα στην υλοποίηση της ολοκληρωτικής παροχής ενέργειας από ΑΠΕ. Η ανταλλαγή πληροφοριών αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι για τη σωστή λειτουργία των τοπικών αγορών ενέργειας, καθώς βοηθούν στη παρακολούθηση και διαχείριση των δεδομένων που είναι απαραίτητα. Οι συγκεκριμένοι περιορισμοί μπορούν να ξεπεραστούν με μεθόδους συσσωρευτικής εκπροσώπησης των μονάδων ΑΠΕ [19] ((EEM), 2020) και των μονάδων αποθήκευσης [20] (SEST 2021), που δίνουν την δυνατότητα στο διαχειριστή δικτύου διανομής να παρέχει υπηρεσίες ενεργού και άεργου ισχύος στο διαχειριστή μεταφοράς,

εξασφαλίζοντας παράλληλα την αξιόπιστη και ασφαλή λειτουργία του δικτύου διανομής. Παρόλο που ένα σημαντικό πλεονέκτημα των τοπικών αγορών είναι η αποσυμφόρηση των γραμμών, αφού η ζήτηση διανέμεται καλύτερα, δημιουργείται συμφόρηση στο δίκτυο διανομής καθώς πλέον υπάρχει αμφίδρομη ανταλλαγή ενέργειας.

Οικονομικά: Ο τομέας της ενέργειας και της οικονομίας είναι αλληλένδετοι, ειδικότερα όταν μιλάμε για τοπικές αγορές ενέργειας. Οι μονάδες ΑΠΕ έχουν μεγάλο κόστος και περίοδο αποπληρωμής ως αποτέλεσμα, ο καταναλωτής αρχικά μπορεί να επενδύσει σε ένα φθηνότερο σύστημα. Ο οικονομικός μηχανισμός είναι απαραίτητος για να μειωθεί το αρχικό κόστος του έργου. Αυτό ίσως γίνει και με τη βοήθεια κρατικών οργανισμών, δίνοντας έτσι ένα έναυσμα για αυτή τη μετάβαση. Οι συμφωνίες που έγιναν ή θα γίνουν συνήθως είναι αρκετά μακροχρόνιες πράγμα που δυσκολεύει την εφαρμογή των τοπικών αγορών αφού θα πρέπει να βρεθούν μέσες τομές. Για να γίνει επιτυχώς η ενσωμάτωση των τοπικών αγορών θα χρειαστεί η εφαρμογή διάφορων επιχειρηματικών και οικονομικών μοντέλων.

Περιβαλλοντικά: Ο πιο εύκολος και προσβάσιμος τρόπος για αποθήκευση ενέργειας αποτελεί η αποθήκευση σε μπαταρίες. Όμως όταν ο κύκλος ζωής της μπαταρίας έρθει στο τέλος, η αποσύνθεση της έχει αρνητικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Αρκετές μορφές μπαταριών είναι ανακυκλώσιμες, και καθώς είναι μια τεχνολογία που δέχεται συνεχή μελέτη, υπάρχουν πιθανότητες επίλυσης του προβλήματος. Επιπλέον, η γεωγραφική τοποθεσία για την εγκατάσταση μονάδων ΑΠΕ αποτελεί ένα ζήτημα. Ειδικά όσον αφορά την εγκατάσταση αιολικών πάρκων πρέπει να έχουν μια απόσταση από τις κατοικημένες περιοχές, λόγω του περιορισμένου χώρου, της ηχορύπανσης και μερικές φορές απλά για την οπτική ομορφιά.

Πολιτικές και συμφωνίες: Η ενσωμάτωση των τοπικών αγορών ενέργειας εμπλέκει πάρα πολλούς συμμετέχοντες για να επιτευχθούν οι στόχοι. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να πρέπει να γίνουν οι σωστές συμφωνίες μεταξύ των εμπλεκόμενων και να οριστεί ξεκάθαρη στρατηγική για την εφαρμογή των τοπικών αγορών ενέργειας. Προφανώς θα υπάρχουν θέματα σε νομικά και θεσμικά πλαίσια, όπως γίνεται πάντα στην εφαρμογή νέων τεχνολογιών, που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν [17].

2.6.5 Παρούσες μελέτες των τοπικών αγορών

Η ενσωμάτωση των τοπικών αγορών μπορεί να δώσει λύσεις σε προβλήματα που έχει το παραδοσιακό δίκτυο και αγορά, προσφέροντας παράλληλα μια μέθοδο ανταλλαγής ενέργειας που είναι πολύ φιλική στο περιβάλλον. Όπως αναφέραμε και πιο πάνω τα πλεονεκτήματα είναι αρκετά παρόλο που υπάρχουν ακόμα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Καθώς, η τοπική αγορά ενέργειας είναι ένα ζήτημα που βρίσκεται σε σχετικά πρώιμο στάδιο γίνονται ακόμα δοκιμές μικρού μεγέθους.

2.6.5.1 Landau Microgrid Project (LAMP)

Στη Γερμανία έχει τεθεί σαν κύριος στόχος η συμμετοχή των ΑΠΕ στην παραγωγή ενέργειας σε ποσοστό 60% μέχρι το 2050 [22]. Έτσι, έχουν αρχίσει κάποιες δοκιμές πρωτοτύπων όπως είναι αυτή στη περιοχή Landau γνωστή ως Landau Microgrid Project (LAMP).

Αυτό το έργο αφορά μια τοπική αγορά στη Β. Γερμανία όπου συμμετέχουν 20 οικίες. Οι συμμετέχοντες

μπορούν να αγοράζουν και να πουλάνε ενέργεια, γνωστή στα αγγλικά με τον όρο “prosumers”. Η παραγωγή γίνεται μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων που βρίσκονται στις οικίες και η συμμετοχή στην τοπική αγορά γίνεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικής εφαρμογής μέσω smartphone. Στην εφαρμογή μπορούν να ορισθούν ελάχιστες και μέγιστες τιμές που αφορούν την αγορά και πώληση ενέργειας. Το σύστημα για τις πληρωμές παρέχεται από τον παροχέα ενέργειας της περιοχής ενώ την όλη δομή της αγοράς και του blockchain την παρέχει μια εταιρεία ενεργειακών υπηρεσιών. Κάθε συμμετέχων στην αγορά έχει τη δυνατότητα να ζητήσει ή να προσφέρει ενέργεια ανά διαστήματα των 15 λεπτών. Ένας μηχανισμός κάνει ανάλογη αντιστοίχιση των καταχωρήσεων. Συνήθως, οι καταχωρήσεις γίνονται αυτόματα ανάλογα με τις τιμές που έχουν θέσει οι συμμετέχοντες μέσω της εφαρμογής. Με αυτό τον τρόπο οι συμμετέχοντες έχουν την δυνατότητα αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας σε τιμές που θέτουν οι ίδιοι. Με αυτό το τρόπο μπορεί να βοηθηθεί η τοπική κοινότητα, αφού όλη η ανταλλαγή γίνεται τοπικά χωρίς να επωφελείται κάποιος τρίτος εξωτερικά. Οι στόχοι που έχει αυτό το έργο είναι: 1) ο σχεδιασμός και η υλοποίηση μιας τοπικής αγοράς βασισμένη στην τεχνολογία του blockchain η οποία υπακούει τους κανονισμούς της γερμανικής κυβέρνησης. 2) Παρατήρηση και μελέτη πως λειτουργεί η αγορά καθώς και της συμπεριφοράς και της αποδοχής που παρουσιάζουν οι συμμετέχοντες στο πρόγραμμα. 3) Μελέτη της αυτάρκειας που παρέχεται, καθώς και των τιμών της προσομοίωσης σε σχέση με τις πραγματικές και σύγκριση αυτών με τις παρούσες επιβαρύνσεις για τις επιβαρύνσεις “καθαρής” ενέργειας.

Μετά από δοκιμές που έγιναν τα αποτελέσματα έδειξαν πως μόνο η τοπική παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν μπορεί να παρέχει ικανοποιητικά επίπεδα αυτάρκειας. Για αυτό το λόγο προστέθηκε στο έργο μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Αυτή η προσθήκη αναμένεται να αυξήσει την αυτάρκεια και να μειώσει την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας αφού, η χρέωση της συμπαραγωγής θα είναι χαμηλότερη από αυτή που πληρώνουν κανονικά οι καταναλωτές για την ηλεκτρική ενέργεια.

2.6.5.2 Αποφάσεις σε Πολιτικό και Κοινωνικό Πλαίσιο

Όπως τονίζεται στο άρθρο [23] υπάρχουν αρκετές αποφάσεις που πρέπει να παρθούν από τα κράτη και πρέπει να σχηματιστεί μια συγκεκριμένη “πράσινη” πολιτική. Στη Δανία εδώ και αρκετά χρόνια έχει γίνει προσπάθεια για μετάβαση σε μορφές ενέργειας πιο φιλικές προς το περιβάλλον. Η πρώτη φάση ήταν από το 1975 έως το 1996, όπου οι ΑΠΕ αποτελούσαν ελάχιστο κομμάτι της παραγωγής και η τιμή τους έφτασε κοντά σε αυτή των συμβατικών μονάδων. Η δεύτερη φάση είναι η παρούσα όπου οι ΑΠΕ αναλογούν σε σημαντικό ποσοστό της ενέργειας (18.6% το 2004 στη Δανία) ενώ η συμπαραγωγή ενέργειας και θερμότητας φτάνει μέχρι και το 50%. Η Δανία ξεπέρασε το αρχικό στάδιο όπου τα ΑΠΕ ήταν μια εντελώς άγνωστη τεχνολογία. Όμως, τώρα που γίνονται προσπάθειες για ακόμα μεγαλύτερη εγκατάσταση έχουν εμφανιστεί προβλήματα όπως είναι η αποδοχή από το κοινό καθώς και τεχνικά προβλήματα από την μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ στο δίκτυο. Μια ενεργή πολιτική αποδοχής θα μπορούσε να επιταχύνει την ανάπτυξη των ΑΠΕ.. Επιπλέον, η εγκατάσταση των τοπικών αγορών θα παίξει κρίσιμο ρόλο στην εισχώρηση περισσότερων μονάδων ΑΠΕ στο δίκτυο.

Οι πολιτικές που ακολουθούν οι κυβερνήσεις όσον αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι κυρίως

δύο: 1) Το “τροφοδοτικό μοντέλο” («feed-in-model» στα αγγλικά) όπου η τιμολόγηση της ενέργειας γίνεται μέσω πολιτικών αποφάσεων και η παραγόμενη ενέργεια καθορίζεται από την αγορά. 2) Η δεύτερη πολιτική είναι γνωστή με τον όρο «Certificate market model», και η πολιτική προσέγγιση αφορά την παραγωγή “καθαρής” ενέργειας, η οποία καθορίζεται από μία αγορά που χαρακτηρίζεται από πράσινα πιστοποιητικά σε συνδυασμό με τη τιμή που καθορίζεται από τη σκανδιναβική αγορά, Nordpool. Αυτή η αγορά θεωρείται η μεγαλύτερη αγορά ενέργειας στην Ευρώπη, εξυπηρετεί ανταλλαγή ενέργειας σε 16 χώρες ενώ προσφέρει τιμές ενέργειας για την επόμενη μέρα [24].

Στο άρθρο εξάγονται μερικά σημαντικά συμπεράσματα, που μπορούν να ληφθούν υπόψη για τη καλύτερη διεύθυνση των ΑΠΕ. Πρώτα, το “feed-in model” αποδίδει καλύτερα όταν λαμβάνονται υπόψη η αγορά εξοπλισμού, η αγορά των επενδυτών, η μεταβολή των φυσικών πόρων καθώς και προβλήματα ισχύς που ταλαιπωρούν το δίκτυο. Δεύτερο, η αποδοχή από το κόσμο και τις κοινότητες θεωρείται πάρα πολύ κρίσιμης σημασίας ειδικά καθώς προχωράμε σε στάδια μεγαλύτερης διεύθυνσης ΑΠΕ. Τέλος, τονίζεται η ανάγκη για τη δημιουργία μιας τεχνολογικής δομής που θα μπορεί να στηρίξει τη μετάβαση σε πιο καθαρές μορφές ενέργειας. Όπως έχουμε τονίσει και σε προηγούμενα σημεία, υπάρχουν αρκετά τεχνικά προβλήματα που πρέπει να ξεπεραστούν για να καθιερωθούν τεχνολογίες όπως αυτή των ΑΠΕ και των τοπικών αγορών ενέργειας.

Η μετάβαση στην αυριανή τεχνολογία παραγωγής ενέργειας, πέραν των τεχνικών προβλημάτων, έχει να αντιμετωπίσει και κοινωνικοπολιτικά προβλήματα. Όμως, τα τελευταία χρόνια έχει παρουσιαστεί μια ιδιαίτερη ευαισθητοποίηση για την προστασία του περιβάλλοντος, θέτοντας στόχους για το μέλλον και δίνοντας ελπίδα ότι ένα καλύτερο μέλλον για τον πλανήτη είναι εφικτό. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει τους εξής στόχους μέχρι το 2030:

- Τουλάχιστον 40% μείωση εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990
- Τουλάχιστον 32% συμμετοχή των ΑΠΕ στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Τουλάχιστον 32.5% βελτίωση στην ενεργειακή αποδοτικότητα

Μάλιστα παρουσιάζεται και η διάθεση για αύξηση στο 55% της μείωσης εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με τους κανονισμούς της Ενεργειακής Ένωσης και της Κλιματικής Δράσης, η Ε.Ε έχει υιοθετήσει κανονισμούς για την συνεχή παρακολούθηση και επίβλεψη των στόχων [25].

Η Ε.Ε έχει θέσει και μακροχρόνιους στόχους, μέχρι το 2050. Πιο συγκεκριμένα, τέθηκε ο στόχος των μηδενικών ρίπων αερίων του θερμοκηπίου. Αυτός ο στόχος αποτελεί τη βάση της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και ταυτόχρονα συμβαδίζει με το στόχο που έχει τεθεί από τη συμφωνία του Παρισιού. Όλες οι χώρες που συμμετείχαν στην συνθήκη του Παρισιού το 2020 έπρεπε να επικοινωνήσουν για τις στρατηγικές που θα ακολουθήσουν όσο αφορά τη μείωση των ρίπων. Για να επιτευχθεί αυτός ο γιγάντιος στόχος πρέπει να γίνουν μεγάλα βήματα ανάπτυξης σε κοινωνικούς, οικονομικούς και τεχνολογικούς τομείς. Με αυτούς τους στόχους η Ε.Ε δίνει το παράδειγμα σε όλο το πλανήτη για τις κινήσεις που πρέπει να γίνουν για τη διασφάλιση ενός πιο “πράσινου” αύριο [26].

Οι κοινωνικοπολιτικές αποφάσεις θα παίξουν και αυτές τον ρόλο τους στην ένταξη των ΑΠΕ στο δίκτυο. Η τεχνολογική ανάπτυξη αν και αποτελεί ένα πιο ορατό πρόβλημα δεν είναι το μόνο για την επίτευξη των στόχων.

2.7 Τοπικές Αγορές με Χρήση της Peer to Peer Τεχνολογίας

Η ανταλλαγή ενέργειας σε επίπεδο peer-to-peer (P2P) αφορά την αγοραπωλησία ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ δύο ή ακόμα και περισσότερων συμμετεχόντων που βρίσκονται στο ίδιο δίκτυο. Συνήθως, αυτή η ανταλλαγή ενέργειας γίνεται μέσω περίσσειας ενέργειας που έχουν τα φωτοβολταϊκά [27]. Για να είναι εφικτή αυτή η αγορά υπάρχουν κάποια θέματα, ειδικότερα ασφαλείας, που πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή. Στην ουσία, η ανταλλαγή ενέργειας σε επίπεδο P2P είναι η καρδιά των τοπικών αγορών ενέργειας που περιγράψαμε λεπτομερώς προηγουμένως. Ακολουθεί αναφορά στα στοιχεία που αποτελούν το δίκτυο P2P, στη δομή της αγοράς, στις δυσκολίες και προβλήματα που υπάρχουν και στις διάφορες τεχνικές προσεγγίσεις που μπορεί να έχει αυτή η τεχνολογία.

2.7.1 Στοιχεία του Δικτύου

Ένα διανεμημένο δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα δίκτυο P2P αν αυτοί που αποτελούν το δίκτυο μπορούν να ανταλλάξουν μεταξύ τους ενέργεια μέσω των ίδιων τους πόρων. Αυτή η συναλλαγή δεν απαιτεί την ανάμειξη κάποιου τρίτου παράγοντα αλλά παρά μόνο την επίβλεψη από το σύστημα. Σε ένα σύστημα P2P υπάρχει και το μεγάλο πλεονέκτημα ότι μπορεί να γίνει προσθήκη ή να αφαιρεθεί κάποιος συμμετέχοντας χωρίς το δίκτυο να δέχεται κάποια αλλαγή ή παραμόρφωση. Η δομή ενός δικτύου P2P χωρίζεται σε δύο μεγάλα στρώματα το εικονικό και το φυσικό. Στο εικονικό, συμπεριλαμβάνεται η διασφάλιση της ασφάλειας των συναλλαγών, η ομαλή λειτουργία της αγοράς αλλά και η σιγουριά ότι όλοι οι συμμετέχοντες στην αγορά έχουν ίσες ευκαιρίες. Όσον αφορά το φυσικό στρώμα, είναι υπεύθυνο για τη φυσική μεταφορά του ηλεκτρισμού αφού πρώτα έχει ξεκαθαρίσει το εικονικό στάδιο. Πρέπει να τονιστεί ότι παρόλο που μπορεί να υπάρχει συμφωνία σε εικονικό στάδιο, αυτό δεν σημαίνει ότι θα γίνει και η μεταφορά ενέργειας. Αυτό διότι, πρέπει να εξασφαλίζεται ότι το δίκτυο είναι ικανό να αναλάβει αυτή τη μεταφορά.

Εικονικό Στρώμα:

- 1) **Σύστημα Πληροφοριών:** Αποτελεί το κύριο κορμό του δικτύου, είναι ένα ασφαλές σύστημα ανταλλαγής πληροφοριών το οποίο διακρίνεται από την υψηλή του απόδοση καθώς καλείτε να χειριστεί τεράστιους όγκους δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα αποστολή του συστήματος πληροφοριών είναι: α) η διασφάλιση ότι όλοι οι συμμετέχοντες μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους β) να ενσωματώσει όλους τους συμμετέχοντες σε ένα κατάλληλο σύστημα ανταλλαγής γ) να δώσει στους συμμετέχοντες ίσα δικαιώματα στην αγορά δ) παρακολούθηση της λειτουργίας της αγοράς ε) να τίθενται περιορισμοί στις συναλλαγές προκειμένου να διασφαλίζεται η ασφάλεια και η ακεραιότητα του δικτύου.
- 2) **Λειτουργία της Αγοράς:** Η αγορά λειτουργεί μέσω και υπό την επίβλεψη του συστήματος πληροφοριών, αποτελείται από τους κανονισμούς πληρωμής, τη δομή bidding και τη κατανομή της αγοράς. Ο μεγάλος στόχος είναι η διασφάλιση ότι οι συναλλαγές γίνονται αποδοτικά και γρήγορα σε πραγματικό χρόνο.
- 3) **Μηχανισμός Τιμολόγησης:** Σχεδιάζεται ως ένα μέρος της λειτουργίας της αγοράς και έχει ως στόχο

την εξισορρόπηση μεταξύ προσφοράς και ζήτησης. Αυτούς τους μηχανισμούς τους διακρίνει μια σημαντική διαφορά σε σχέση με αυτούς των παραδοσιακών αγορών ενέργειας. Οι παραδοσιακές αγορές χαρακτηρίζονταν από το μεγάλο μερίδιο που είχαν δευτερεύοντες χρεώσεις όπως ήταν αυτές των φορολογιών. Λόγω και του γεγονότος ότι πλέον πολλές μορφές ΑΠΕ έχουν γίνει φθηνότερες από τις συμβατικές μορφές, υπάρχει ένα μεγάλο περιθώριο στη τιμολόγηση της ενέργειας. Αυτό πάντα θα γίνεται κρατώντας μια ισορροπία στην αγορά.

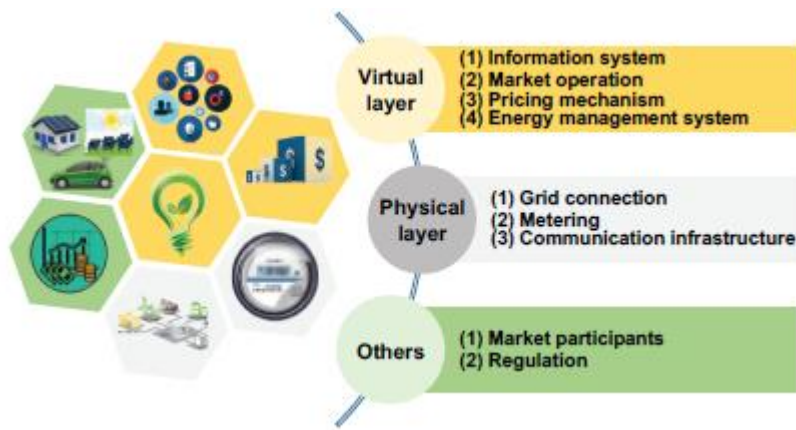
- 4) Σύστημα Διαχειρισμού Ενέργειας:** Το σύστημα αυτό διασφαλίζει ότι απαιτείται ή ότι μπορεί να προσφερθεί η αντίστοιχη ενέργεια. Αυτό γίνεται αφού το σύστημα παίρνει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο μέσω συσκευών μέτρησης. Με την εξέλιξη τέτοιων συσκευών μπορεί να γίνει και πραγματικότητα η ιδέα το σύστημα να σχηματίζει ένα προφίλ για το χρήστη και ανάλογα με κάποιες παραμέτρους να γίνονται αυτόματα οι συναλλαγές.

Φυσικό Στρώμα:

- 1) Σύνδεση με το Δίκτυο:** Η ανταλλαγή ενέργειας μέσω P2P μπορεί να γίνει σε συστήματα που είναι συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο αλλά και σε πιο αποκεντρωμένα συστήματα. Όσον αφορά για λειτουργία ενώ υπάρχει σύνδεση στο κύριο δίκτυο μπορεί να γίνεται επίβλεψη της αγοράς συνδέοντας μετρητές στα σημεία σύνδεσης με το δίκτυο. Όσον αφορά τα πιο αποκεντρωμένα συστήματα, τουλάχιστον για τη παραγωγή ο συμμετέχων θα πρέπει να διασφαλίζει ότι έχει ικανοποιητική εγκατεστημένη ισχύ για να συμμετέχει στην αγορά.
- 2) Μέτρηση:** Όλοι οι συμμετέχοντες είναι απαραίτητο να έχουν μετρητές για να μπορούν να συμμετέχουν στο εμπόριο ενέργειας. Μόνο με αυτό το τρόπο μπορεί να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία της αγοράς. Πιο συγκεκριμένα, εκτός από το παραδοσιακό μετρητή ενέργειας πρέπει να υπάρχουν και μεταδραστικοί μετρητές. Τέτοιοι μετρητές έχουν τη δυνατότητα να αποφασίζουν αν είναι κατάλληλη στιγμή για συμμετοχή στην αγορά αξιολογώντας πληροφορίες όπως τιμή, διαθεσιμότητα, συνθήκες κ.α.
- 3) Δομή Επικοινωνίας:** Όσον αφορά την ανταλλαγή μέσω P2P, κρίσιμη απαίτηση για την επικοινωνία είναι η εύρεση των συμμετεχόντων και η ανταλλαγή πληροφοριών στο δίκτυο. Υπάρχουν, αρκετές αρχιτεκτονικές στη βιβλιογραφία όπως είναι η δομημένη, η μη-δομημένη και η υβριδική [28].

Διάφορα Στοιχεία:

- 1) Συμμετέχοντες στο Δίκτυο:** Προκειμένου να λειτουργήσει μια αγορά P2P χρειάζεται επαρκής αριθμός συμμετεχόντων αλλά παράλληλα και επαρκής δυνατότητα παραγωγής ενέργειας. Ανάλογα των συμμετεχόντων υπάρχουν και συγκεκριμένα στόχοι για το κάθε δίκτυο για αυτό το λόγο πρέπει να γίνεται λεπτομερής σχεδιασμός της αγοράς βάσει των αναγκών και απαιτήσεων.
- 2) Ρυθμιστικές Πολιτικές:** Όπως τονίσαμε και στα τοπικά δίκτυα έτσι και εδώ, η εξέλιξη θα εξαρτηθεί από τις ρυθμιστικές πολιτικές που θα ακολουθηθούν. Κάθε κράτος ακόμα και οργανισμός μπορεί να θέσει τους δικούς του κανονισμούς για το μέγεθος της αγοράς, τις ποσότητες ενέργειας που μπορούν να ανταλλάσσονται, τους φόρους κ.α. Ανάλογα των προσεγγίσεων που θα δούμε από τα κράτη τα P2P μπορούν να ενταχθούν για τα καλά στη ζωή μας, ή να μείνουν μόνο στην ιδέα.



Σχήμα 2.8: Περίληψη των στοιχείων της αγοράς P2P [28]

2.7.2 Δομή της Αγοράς

Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές αγορές ενέργειας που δομή τους ήταν top-down τα συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν ως bottom-up συστήματα. Δηλαδή, στην ουσία τη δύναμη την έχουν οι ίδιοι prosumers αφού μέσω των ίδιων περνάει όλη η διαδικασία της ανταλλαγής ενέργειας. Για να γίνει αυτό όμως πραγματικότητα πρέπει να γίνει σωστή οργάνωση και θέσπιση κανονισμών. Προς το παρόν, υπάρχουν τρία είδη αγορών.

- 1) Πλήρως Αποκεντρωμένες Αγορές:** Σε αυτού το είδος αγοράς οι συμμετέχοντες έχουν την ελευθερία να διαπραγματεύονται χωρίς την επίβλεψη από κάποιο μεγάλη αρχή. Για να υλοποιηθεί όμως αυτού του είδους αγορά οι prosumers θα πρέπει να συμφωνούν σε κανονισμούς που θα τίθενται σε συμβόλαια προκειμένου να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία της αγοράς.
- 2) Αγορές Βασισμένες στην Κοινότητα:** Τέτοια αγορά μπορεί να εφαρμοστεί σε τοπικά δίκτυα και σε μια περιοχή όπου υπάρχουν αρκετοί prosumers, όπου υπάρχουν κοινά συμφέροντα. Τα μέλη μπορούν να δουλέψουν συλλογικά ή ανταγωνιστικά. Σε τέτοιες αγορές κάθε μέλος ανταλλάζει ενέργεια στην κοινότητα μέσω ενός ελεγκτή από την ίδια κοινότητα. Ένα μέλος μπορεί να επιλέξει να ανταλλάξει ενέργεια και εκτός της κοινότητας αλλά και πάλι μέσω του ελεγκτή. Αυτός ο ελεγκτής είναι στην ουσία υπεύθυνος για τις συναλλαγές που γίνονται μέσα στην κοινότητα αλλά και για συναλλαγές που γίνονται εκτός της κοινότητας.
- 3) Σύνθετη Αγορά:** Σε αυτό το είδος αγοράς συνδυάζονται οι δύο προηγούμενες αγορές. Κάθε κοινότητα και μέλος μπορούν να αναδράσουν μεταξύ τους διατηρώντας τα συμφέροντα τους [28].

2.7.3 Δυσκολίες και Προβλήματα

Για να επιτευχθεί η υλοποίηση και η ενσωμάτωση των αγορών P2P υπάρχουν εμπόδια που πρέπει ακόμα να ξεπεραστούν. Αυτά τα εμπόδια αφορούν τον εικονικό τομέα, αλλά και τον φυσικό. Πιο κάτω γίνεται αναφορά σε αυτά τα προβλήματα.

Εικονικός Τομέας

- **Μείωση του κόστους ενέργειας:** Για να επιτευχθεί μείωση στη τιμή της ενέργειας είναι απαραίτητο οι συμμετέχοντες στην αγορά που είναι μικροί παραγωγοί να πουλάνε την ενέργεια σε άλλους που

έχουν έλλειψη.

- **Εξισορρόπηση ζήτησης και προσφοράς:** Πρέπει να υπάρχει μια προετοιμασία και ένας συντονισμός στην αγορά προκειμένου ζήτηση και προσφορά να είναι αρκετά κοντά. Αλλιώς η αγορά κινδυνεύει να καταρρεύσει.
- **Κίνητρα για συμμετοχή:** Ανάπτυξη ενός μηχανισμού που θα αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τους συμμετέχοντες προκειμένου να πειστούν να συμμετάσχουν σε αγορά P2P.
- **Ανάπτυξη μηχανισμού τιμολόγησης:** Η τιμολόγηση πρέπει να γίνεται γρήγορα και αποτελεσματικά έτσι, ο μηχανισμός πρέπει να είναι άριστα σχεδιασμένος.
- **Ασφάλεια Συναλλαγών:** Ο κόσμος θα δεχθεί να συμμετέχει στην αγορά μόνο αν είναι βέβαιη η ασφάλεια των συναλλαγών.

Φυσικός Τομέας

Στο φυσικό τομέα η προτεραιότητα είναι η διασφάλιση της ακεραιότητας του δικτύου. Λόγω των ανταλλαγών σε μια αγορά P2P μπορούν να παρουσιαστούν τα εξής προβλήματα:

- **Περιορισμοί τάσης:** Από τις πολλαπλές συναλλαγές που μπορούν να γίνονται και μάλιστα ταυτόχρονα αυξάνεται ο κίνδυνος αυξομειώσεων της τάσης.
- **Απώλεια Ισχύος στο Δίκτυο:** Στο δίκτυο μπορούν να υπάρχουν απώλειες ισχύος, όπως άλλωστε και σε κάθε δίκτυο, όμως πρέπει να μελετηθεί το αντίκτυπο που μπορεί να έχει η αγορά P2P.
- **Ισχύς Δικτύου:** Η μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ ίσως μειώσει τη δύναμη του δικτύου αφού χάνεται η αδράνεια των σύγχρονων γεννητριών. [28]

2.7.4 Τεχνικές Προσεγγίσεις

Μέχρι στιγμής τέσσερις είναι οι τεχνικές οι οποίες βοήθησαν στη σχεδίαση των πρώτων αγορών P2P. Η πρώτη είναι η θεωρία παιγνίου, γνωστή στα αγγλικά με τον όρο «game theory». Αυτή η προσέγγιση λαμβάνει υπόψη τον ανταγωνισμό και την συνεργασία που υπάρχει σε τέτοια αγορά και δίνει μια σταθερή λύση, που μερικές φορές είναι και η βέλτιστη, ενώ παράλληλα επωφελούνται όλοι οι εμπλεκόμενοι από αυτή. Για την υλοποίηση της χρησιμοποιούνται μέθοδοι όπως είναι αυτή του παιγνίου του Stackelberg, γενικευμένο παίγνιο του Nash κ.α.

Η επόμενη προσέγγιση είναι η θεωρία της δημοπρασίας («auction theory» στα αγγλικά), όπου στόχος είναι η ανάδραση μεταξύ αγοραστών και πωλητών στην αγορά προκειμένου να κάνουν ανταλλαγή ενέργειας βήμα-βήμα. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι αυτή της διπλής δημοπρασίας. Τέτοιου είδους δημοπρασία έχει ως στόχο την ανάδραση μεταξύ των συμμετεχόντων με σκοπό την ανταλλαγή προϊόντων και υπηρεσιών. Τα άτομα που θέλουν να αγοράσουν δίνουν τις τιμές τους στον υπεύθυνο ενώ αυτή που θέλουν να πουλήσουν ζητάνε τιμές από τον υπεύθυνο. Συνήθως τα βήματα που ακολουθούνται είναι: 1) Οι πωλητές καταθέτουν τις τιμές που θέλουν να πουλήσουν σε αύξουσα σειρά 2) Το αντίθετο γίνεται για τις τιμές των αγοραστών 3) Τότε γίνεται μια γραφική της ζήτησης και προσφοράς και εντοπίζεται το σημείο που τέμνονται 4) Εκείνο το σημείο θέτει την τιμή της δημοπρασίας και τον τελικό αριθμό των εμπλεκόμενων στην ανταλλαγή.

Η τρίτη προσέγγιση είναι αυτή της περιορισμένης βελτιστοποίησης («constrained optimization», ο όρος στα αγγλικά). Αυτή η προσέγγιση κάνει χρήση τεχνικών μαθηματικού προγραμματισμού για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων σε μια αγορά P2P, υπό περιορισμούς και συνθήκες που τίθενται από την αγορά και το δίκτυο. Μερικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι αυτή του γραμμικού προγραμματισμού (LP), του μη γραμμικού προγραμματισμού (NLP) του μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP).

Τέλος, ίσως και η πιο γνωστή προσέγγιση, είναι αυτή του blockchain. Αυτή η προσέγγιση θεωρείται από πολλούς η ιδανικότερη αφού αυτή χρησιμοποιείται για αγορές κρυπτονομισμάτων οι οποίες είναι σε τεράστια άνοδο. Το blockchain είναι μια κατακεκολλημένη δομή δεδομένων που αντιγράφεται και μοιράζεται σε όλα τα μέλη που συμμετέχουν στο δίκτυο. Αυτή η προσέγγιση διευκολύνει τις συναλλαγές μεταξύ των χρηστών, χωρίς την παρουσία κάποιου τρίτου ενώ έχει την ίδια αποτελεσματικότητα και ασφάλεια. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι ακριβώς αυτά που χαρακτηρίζουν μια αγορά ενέργειας P2P στη θεωρία, για αυτό το λόγο αυτή η προσέγγιση είναι πολύ υποσχόμενη και έχει ήδη αρκετές εφαρμογές. Συνοπτικά, κάποιες μέθοδοι είναι: έξυπνα συμβόλαια, Elecbay, Hyperledger, Ethereum [28].

3 Βέλτιστη Ροή Ισχύος

3.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος, γνωστό στα αγγλικά ως Optimal Power Flow (OPF), αποτελεί ένα στατικό μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης όπου υπολογίζονται οι ιδανικότερες συνθήκες σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα δεδομένων κάποιων συνθηκών και περιορισμών. Ο προκάτοχος του προβλήματος OPF ήταν η λύση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου με τη μέθοδο ίσης αύξησης κόστους (EICC). Η οικονομική κατανομή φορτίου αλλά και το πρόβλημα OPF είναι προβλήματα βελτιστοποίησης. Όμως στο πρώτο υπάρχει μια μεγάλη απλότητα καθώς λαμβάνονται υπόψη μόνο οι ενεργές ισχύς και ο μόνος περιορισμός του δικτύου είναι το ισοζύγιο ισχύος [29]. Στο πρόβλημα OPF υπάρχει πάντα μία αντικειμενική συνάρτηση η οποία συνήθως αφορά το κόστος καυσίμων, τις απώλειες ισχύος, τις μεταβολές της τάσης κ.α. Οι περιορισμοί που τίθενται μπορούν να αφορούν τα όρια ενεργού και άεργου ισχύος, τάση των φορτίων, όρια των γραμμών κ.α. Οι παράμετροι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις παραμέτρους ελέγχου και τις εξαρτημένες. Στη πρώτη, συμπεριλαμβάνονται τα όρια ισχύος των γεννητριών, οι τάσεις των γεννητριών, οι άεργος ισχύς των πυκνωτών, κ.α. Στις εξαρτημένες μεταβλητές υπάρχουν άλλες μεταβλητές όπως είναι η άεργος ισχύς των γεννητριών, οι ισχύς των αγωγών και οι τάσεις στους ζυγούς φορτίων. Στην ουσία το πρόβλημα OPF αφορά τον έλεγχο κάποιων παραμέτρων σε ένα δίκτυο προκειμένου να ικανοποιούνται οι περιορισμοί που θέτονται και να βρεθεί η βέλτιστη λύση για την συνάρτηση. Στο παρελθόν η λύση του προβλήματος ήταν απλή αφού δεν λάμβανε μη-παραγωγίσιμες αντικειμενικές συναρτήσεις ούτε και περίπλοκους περιορισμούς [30]. Καθώς τα δίκτυα γίνονται όλο πιο περίπλοκα, ειδικά με την διεύδυση των ΑΠΕ και τη συμμετοχή των prosumers, η λύση του προβλήματος γίνεται όλο και πιο δύσκολη να βρεθεί. Ακολουθεί μια επισκόπηση των κλασικών μεθόδων DC-OPF και AC-OPF, καθώς και μια αναφορά στη μελέτη του προβλήματος OPF σε αποκεντρωμένα συστήματα.

3.2 DC Optimal Power Flow (DC-OPF)

3.2.1 Σχηματισμός του Προβλήματος DC-OPF

Ο όρος DC-OPF υπάρχει από τις αρχές τις δεκαετίας του '60. Δεν πρέπει κάποιος να κάνει τη σύνδεση ότι έχει να κάνει με συνεχές τάση ή ρεύμα. Όπως θα δούμε και στη συνέχεια οι εξισώσεις του AC-OPF είναι μη γραμμικές, ενώ στο DC-OPF οι εξισώσεις γίνονται γραμμικές απλοποιώντας πολύ τα πράγματα. Ο όρος DC-OPF ίσως προήλθε λόγω του ότι στη δεκαετία του 1960 όπου η μεταφορά με DC τάση ήταν στα πρώτα της βήματα και επιπλέον, λόγω του ότι δεν υπάρχουν ημιτονοειδείς όροι αλλά και άεργος ισχύς. Η μεγάλη διαφορά με την οικονομική κατανομή φορτίου είναι πως αυτή η μέθοδος λαμβάνει υπόψη τη ροή ισχύος στις γραμμές και τα όρια τους [31].

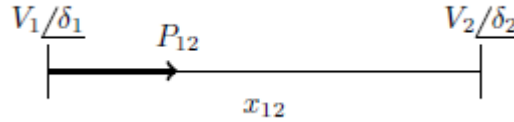
Όπως αναφέραμε ήδη η μέθοδος DC-OPF, απλοποιεί τις εξισώσεις της AC-OPF. Αυτό γίνεται με κάποιες υποθέσεις, η πρώτη είναι ότι η ωμική αντίσταση είναι κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με την αντίσταση σειράς έτσι η ισχύς μεταξύ δύο κόμβων παίρνει τη μορφή.

$$P_{12} = V_1 V_2 \frac{\sin(\delta_1 - \delta_2)}{x_{12}} \quad (3.1)$$

Οι επόμενες υποθέσεις που γίνονται είναι ότι: α) Οι τάσεις είναι σε ονομαστικές τιμές ($V_1=V_2=1$ α.μ) β) το ημίτονο των δύο γωνιών ισούται με την ίδια τη γωνία αφού οι γωνίες είναι αρκετά μικρές, $\sin(\delta_1 - \delta_2) = \delta_1 - \delta_2$. Άρα τελικά η εξίσωση ροής ισχύος παίρνει τη μορφή:

$$P_{12} = \frac{\delta_1 - \delta_2}{x_{12}} = b_{12}(\delta_1 - \delta_2) \quad (3.2)$$

Οι υποθέσεις για τις τάσεις και για τις γωνίες ισχύουν όταν εφαρμόζονται σε συστήματα που είναι ελαφρά φορτισμένα. Επιπλέον, η υπόθεση πως οι τάσεις παραμένουν σταθερές στην ονομαστική τιμή τους προνοεί ρύθμιση τάσης, πράγμα που δεν γίνεται σε όλους τους κόμβους σε ένα σύστημα ειδικά σε συστήματα διανομής. Συμπερασματικά, η απλότητα των εξισώσεων δίνει εύκολα και γρήγορα μια ιδέα για το σύστημα αλλά πρέπει να αντιμετωπίζεται με επιφύλαξη στην ακρίβεια.



Σχήμα 3.1: Η ροή ισχύος σε μια γραμμή μεταξύ δύο κόμβων [31]

Το πρόβλημα DC-OPF ορίζεται ως εξής:

$$\min \sum_i C_i P_{Gi} \quad (3.3)$$

με τους περιορισμούς:

$$B \cdot \delta = P_G - P_D \quad (3.4)$$

$$-P_{i,j,\max} \leq \frac{1}{x_{ij}}(\delta_i - \delta_j) \leq P_{i,j,\max} \quad \forall i, j \in L \quad (3.5)$$

$$P_{Gi,\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max} \quad \forall i \in N \quad (3.6)$$

Όπου L το σύνολο των γραμμών στο κύκλωμα και N το σύνολο των κόμβων του συστήματος.

3.2.2 Power Transfer Distribution Factors (PTDF)

Όπως είδαμε προηγουμένως, στη μέθοδο DC-OPF γίνεται χρήση των ορίων των γραμμών μεταφοράς. Αλλά για τον υπολογισμό τους είναι απαραίτητος πρώτα ο υπολογισμός των γωνιών δ . Οι σταθερές PTDF ορίζονται ως γραμμική δείκτες ευαισθησίας η οποία αντικατοπτρίζουν την αλλαγή ενεργού ισχύος κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς αν αλλάξει η έγχυση ισχύος σε ένα κόμβο. Για παράδειγμα ο δείκτης $PTDF_{13-2} = 0.33$, δείχνει ότι αν ο κόμβος 2 διοχετευτεί με 1 α.μ (μειώνεται ο κόμβος αναφοράς κατά 1 α.μ) η ισχύς στη γραμμή 1-3 θα αυξηθεί κατά 0.33. Ο ορισμός του δείκτη PTDF είναι:

$$\Delta P_{ij} = PTDF_{ij,m} \Delta P_m \quad (3.7)$$

Όπου, $i-j$ είναι η γραμμή στην οποία μελετάται η αλλαγή ισχύος και ο κόμβος m είναι αυτός που δέχεται έγχυση ισχύος (αντίστοιχη μείωση στο κόμβο αναφοράς).

Λόγω του ότι στην DC-OPF δεν υπάρχουν απώλειες ισχύος στη μεταφορά αποδεικνύεται εύκολα ότι οι ροές ισχύος στις γραμμές είναι ανεξάρτητες από την επιλογή κόμβου αναφοράς. Ο υπολογισμός των σταθερών PTDF γίνεται ως:

$$PTDF_{ij,mn} = \frac{X_{im} - X_{jm} - X_{in} + X_{jn}}{x_{ij}} \quad (3.8)$$

Όπου, $i-j$ είναι η γραμμή που εξετάζεται, η έγχυση γίνεται στο κόμβο m και απορρόφηση από το κόμβο n .

x_{ij} : η αντίσταση της γραμμής μεταξύ των κόμβων i και j .

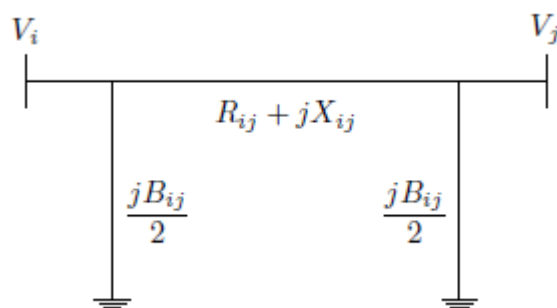
X_{im} : το στοιχείο στην i -γραμμή και m -στήλη στο πίνακα X

Αυτή η μέθοδος βοηθάει στην εύρεση της αλλαγής ισχύος κατά μήκος των γραμμών σε περιπτώσεις όπου δεν είναι γνωστές οι γωνίες δ των κόμβων.

3.3 AC Optimal Power Flow (AC-OPF)

Σε αυτή τη μέθοδο έχουμε ολόκληρες τις εξισώσεις AC ροής ισχύος. Αυτή η μέθοδος θεωρείται αρκετά ακριβές, δεδομένου οι παράμετροι που δίνονται είναι σωστοί. Εύρεση λύσης στο πρόβλημα δίνει τιμές πάρα πολύ κοντά σε αυτές που θα παίρναμε σε ένα πραγματικό περιβάλλον. Σε σχέση με τον αλγόριθμο DC-OPF είναι πιο αποτελεσματική μέθοδος αφού λαμβάνονται υπόψη οι τάσεις, οι άεργος ισχύς, τα ρεύματα και οι απώλειες ισχύος. Όμως, παρόλα αυτά τα θετικά αυτό που είναι πρόβλημα στην μέθοδο AC-OPF είναι οι εξισώσεις δευτέρου βαθμού, γεγονός που κάνει το πρόβλημα μη γραμμικό και μη κυρτό. Έτσι η λύση δεν είναι πάντα με βεβαιότητα η βέλτιστη. Συνεχές μελέτες γίνονται για την κυρτοποίηση του προβλήματος [31].

Για την υλοποίηση του προβλήματος, σημαντικό ρόλο έχει η αναπαράσταση των γραμμών. Συνήθως αυτή γίνεται με τη χρήση του π -μοντέλου. Το μοντέλο π , όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, αποτελείται από την σύνθετη αγωγιμότητα σειράς μεταξύ των δύο κόμβων ($y_{ij} = \frac{1}{R_{ij} + jX_{ij}}$) και δύο εγκάρσιους κλάδους που έχουν ίσες αγωγιμότητες ($y_{sh} = j\frac{B_{ij}}{2}$).



Σχήμα 3.2: Αναπαράσταση του π -μοντέλου

Το πρόβλημα της AC-OPF ορίζεται ως εξής:

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι ίδια με την DC-OPF,

$$\min \sum_i C_i P G_i \quad (3.9)$$

με τους περιορισμούς,

$$\text{Ροή AC} \quad S_G - S_L = \text{diag}(\bar{V}) \bar{Y}_{bus}^* \bar{V}^* \quad (3.10)$$

$$\text{Ρεύμα Γραμμής} \quad |\bar{Y}_{bus(i-j)} \bar{V}| \leq I_{\text{line,max}} \quad (3.11)$$

	$ \bar{Y}bus_{(j-i)} \bar{V} \leq I_{line,max}$	(3.12)
ή Ισοδύναμα Φαινόμενη Ισχύ	$ \bar{V}_i \bar{Y}line^*_{i-j} \bar{V}^* \leq S_{i-j,max}$	(3.13)
	$ \bar{V}_j \bar{Y}line^*_{j-i} \bar{V}^* \leq S_{j-i,max}$	(3.14)
Ενεργός Ισχύς	$0 \leq P_G \leq P_{G,max}$	(3.15)
Άεργος Ισχύς	$-Q_{G,max} \leq Q_G \leq Q_{G,max}$	(3.16)
Όρια Τάσης	$V_{min} \leq V \leq V_{max}$	(3.17)
Όρια Γωνιών	$\delta_{min} \leq \delta \leq \delta_{max}$	(3.18)

3.4 Αποκεντρωμένες Αγορές

Στις αγορές που δεν υπάρχει παρουσία κάποιου ελεγκτή δεν αρκεί η βέλτιστη λύση της οικονομικής κατανομής αλλά πρέπει να γίνεται και παράλληλα λύση για βέλτιστη ροή ισχύος [32]. Δηλαδή, η δυσκολία είναι διπλάσια αφού εκτός από τον κλασικό έλεγχο του δικτύου υπάρχει και ο έλεγχος στην αγορά. Οι προσεγγίσεις βέλτιστης ροής ισχύος που χρησιμοποιούνταν σε συστήματα που ήταν επικεντρωμένα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα που είναι χωρίς την παρουσία κεντρικού ελεγκτή. Αυτό διότι στις πλείστες αποκεντρωμένες αγορές δεν υπάρχει κάποιος υπεύθυνος για ανταλλαγή πληροφοριών. Ο τομέας της πληροφορίας και τον επικοινωνιών αναπτύσσεται διαρκώς για να δώσει λύση στο πρόβλημα του κεντρικού ελεγκτή. Η τεχνολογία που μελετάται αρκετά είναι αυτή των έξυπνων συμβολαίων μέσω blockchain, στα οποία έγινε αναφορά προηγουμένως [32]. Το Μάρτιο του 2016 έγινε μια μεγάλη συμφωνία μεταξύ τεσσάρων οργανισμών. Αυτοί οι οργανισμοί προέρχονται από την Ρωσία, Κίνα και τη Νότια Κορέα. Η συμφωνία αφορούσε τη μελέτη σε οικονομικά και τεχνικά θέματα όσον αφορά την υλοποίηση ενός δικτύου που θα ενώνει την Βορειοανατολική Ασία. Αυτή η ιδέα αν υλοποιηθεί θα μπορεί να φέρει κοντά τις ΑΠΕ που είναι διανεμημένες στις διάφορες χώρες. Αυτό θα γίνεται αφού τα κράτη θα μπορούν να ανταλλάξουν μεταξύ τους ηλεκτρική ενέργεια, αυξάνοντας την ευελιξία του συστήματος κάθε χώρας [33]. Όμως, σε τέτοια επικεντρωμένα συστήματα δεν είναι δυνατή η ανάλυση ροής ισχύος για λόγους μεγέθους και επιπλέον γιατί ο κάθε διαχειριστής συστήματος διανομής θα θέλει να διατηρήσει την αυτονομία του.

Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης σε συστήματα ενέργειας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, σε αυτά που έχουν κάποιο κεντρικό διαχειριστή και σε αυτά που δεν έχουν. Στα συστήματα με κεντρικό διαχειριστή, αν είναι επικεντρωμένα οι υπολογισμοί γίνονται στο κεντρικό διαχειριστή και στέλνονται στις υπόλοιπες περιοχές, ενώ αν είναι αποκεντρωμένα οι υπολογισμοί γίνονται τοπικά. Μια κλασική μέθοδος επίλυσης σε τέτοια συστήματα είναι η μέθοδος χαλάρωσης Lagrange [33]. Αυτή τη μέθοδο τη διακρίνει η απλότητα της και η λιγιστή ανταλλαγή πληροφοριών που απαιτείται. Όμως υπάρχουν προβλήματα όπως ο μεγάλος αριθμός επαναλήψεων και η αναγκαία παρουσία ενός κεντρικού διαχειριστή για την παροχή των πληροφοριών στις περιοχές. Ακόμα μία προσέγγιση είναι η μέθοδος Alternating Direction Multiplier Method (ADMM). Εδώ ένα σύστημα χωρίζεται σε υποπροβλήματα. Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης απαιτείται οργάνωση των επί μέρους προβλημάτων. Τα συστήματα με κεντρικό διαχειριστή, έχουν το μεγάλο μειονέκτημα ότι αν χαθεί αυτός, π.χ. από μια κυβερνοεπίθεση, καταρρέει όλο το σύστημα.

Όσον αφορά τα συστήματα χωρίς την παρουσία κάποιου κεντρικού διαχειριστή, συνήθως γίνεται χρήση

τεχνικών αποσύνθεσης. Αφού δεν υπάρχει κεντρικός χειριστής πρέπει οι οντότητες να αλλάζουν πληροφορίες μεταξύ τους. Μια μέθοδος που μπορεί να δώσει λύση είναι η ADMM που αναφέραμε πιο πάνω αλλά σε αυτή τη περίπτωση τη διακρίνει η ρύθμιση των παραμέτρων που οδηγεί σε αργό χρόνο υπολογισμού [33]. Επίσης, ακόμα μια γνωστή μέθοδος είναι η Interior Point Method (IPM). Αυτή η μέθοδος δεν απαιτεί την παρουσία κεντρικού διαχειριστή αλλά ούτε και ρύθμιση παραμέτρων. Οι περιοχές ανταλλάζουν μόνο βασικές πληροφορίες έτσι δεν μπορεί κάποιος τρίτος να πάρει πληροφορίες για φυσικές παραμέτρους όπως την τιμή. Τη μέθοδο την διακρίνει η γρήγορη σύγκλιση της αλλά και ο χειρισμός των περιορισμών με χρήση λογαριθμικών συναρτήσεων.

4 Σχεδιασμός Τοπικών Αγορών Ενέργειας

4.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός της τοπικής αγοράς ενέργειας αποτελεί την μεγαλύτερη πρόκληση όσον αφορά την ενσωμάτωση των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας σε ένα δίκτυο. Ο σωστός σχεδιασμός μπορεί να επιφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στα δίκτυα και για αυτό το λόγο γίνονται είδη διάφορα έργα σε επίπεδο διανομής όπως είναι το INTERFACE, το SmartNet και το FLEXGRID. Η Δανία πρωτοπορεί με τη δοκιμή ενός εθνικού έργου το EcoGrid 2.0 [1]. Πέραν της ευελιξίας οι αγορές μπορούν να βοηθήσουν την αποφυγή υπερφόρτισης των γραμμών καθώς και σε προβλήματα τάσεων. Καθώς τα συστήματα γίνονται συνεχώς πιο περίπλοκα, πρέπει οι περιορισμοί του δικτύου να ενσωματώνονται στους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται για την αγορά, για την αποφυγή περαιτέρω προβλημάτων στο δίκτυο. Πολλαπλές μελέτες έχουν δείξει ότι ο σωστός έλεγχος των ΜΔΠ μπορεί να επιφέρει οικονομικά συμφέροντα για τους συμμετέχοντες [34]. Στη σχεδίαση της αγοράς πρέπει να συμπεριλαμβάνεται και η παρουσία των διαχειριστών του συστήματος διανομής, Distribution System Operators (DSO), οι οποίοι θα επιτρέψουν την ομαλή λειτουργία του όλου συστήματος [1] [35] [36]. Οι σχεδιασμοί των αγορών διαφέρουν, αφού κάθε αγορά έχει τους δικούς της σκοπούς αλλά και λόγω του ότι το θέμα είναι σχετικά πρόσφατο και βρίσκεται υπό συνεχές μελέτη. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, θα γίνει αναφορά στην υπάρχουσα βιβλιογραφία και στις διάφορες προσεγγίσεις. Ακολούθως, διαμορφώνεται το πρόβλημα και γίνεται επεξήγηση της παραγωγής δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν στην εφαρμογή. Τέλος, γίνεται λεπτομερής ανάλυση της διαδικασίας επίλυσης, όπου παρουσιάζεται και ένα παράδειγμα για την καλύτερη κατανόηση της.

4.2 Αναφορά στη Βιβλιογραφία

Υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος στη βιβλιογραφία όσο αφορά τη προσέγγιση σχεδιασμού τοπικών αγορών. Ο λόγος είναι ότι κάθε αγορά μπορεί να έχει τους δικούς τους κανονισμούς, μέθοδο επίλυσης και ξεχωριστές υποθέσεις. Πιο κάτω γίνεται μια αναφορά στη παρούσα βιβλιογραφία.

Πολλές φορές γίνεται η υπόθεση ότι ο διαχειριστής του συστήματος διανομής αποτελεί μια οντότητα μαζί με το διαχειριστή ευελιξίας του δικτύου [36]-[38]. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο διαχειριστής του συστήματος διανομής έχει την ευκαιρία να διορθώσει προβλήματα που αφορούν ρύθμιση της τάσης και υπερφόρτιση των γραμμών, ρυθμίζοντας την ευελιξία. Αυτό, προς το παρόν σε αρκετές χώρες είναι παράνομο αφού δεν δίνεται η δυνατότητα στον διαχειριστή του συστήματος διανομής να δρα ως διαχειριστής της αγοράς [1]. Στο [36] η προσέγγιση της αγοράς είναι με τη μέθοδο της διαπραγμάτευσης ενώ το δίκτυο λύνεται με τη βοήθεια της AC-OPF. Στο [37] η αγορά λειτουργεί με τη μέθοδο της δημοπρασίας ενώ και πάλι το δίκτυο επιλύεται με τον αλγόριθμο AC-OPF. Στο [38] η προσέγγιση της αγοράς γίνεται με δημοπρασία ενώ το δίκτυο επιλύεται με τη μέθοδο SOC (Second Order Cone). Υπάρχουν και οι προσεγγίσεις που δεν λαμβάνουν υπόψη τους τον έλεγχο του δικτύου [35] [39] [40]. Στο [35] ο διαχειριστής δικτύου διανομής αποτελεί ξεχωριστή οντότητα από τον διαχειριστή ευελιξίας του δικτύου, η αγορά ελέγχεται με τη μέθοδο της δημοπρασίας ενώ δεν γίνεται έλεγχος του δικτύου. Στα [39] και [40] η διαφορά με το [35] είναι πως οι δύο φορείς αποτελούν μια οντότητα.

Στο [34] οι δύο φορείς αποτελούν ξεχωριστή οντότητα, γίνεται έλεγχος του δικτύου και η αγορά ελέγχεται με τη μέθοδο της δημοπρασίας. Για να λειτουργήσει αυτή η προσέγγιση πρέπει να είναι δυνατή η πρόσβαση σε δεδομένα του δικτύου διανομής. Σχετικά πρόσφατα έχουν γίνει μελέτες για την ενσωμάτωση της P2P αγοράς στο δίκτυο [41]-[43] οι οποίες μπορούν να επιφέρουν πολλά πλεονεκτήματα τα οποία έχουν αναφερθεί προηγουμένως. Στο [1] γίνεται μια πρώτη εισαγωγή στη συνεχή αγορά ενώ παράλληλα λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί του δικτύου. Αυτή τη προσέγγιση θα ακολουθήσουμε και εμείς στην επίλυση του προβλήματος μας.

4.3 Διαμόρφωση Προβλήματος

Το πρόβλημα μας αφορά το σχεδιασμό μιας αγοράς ενέργειας η οποία θα επιτρέπει την εκμετάλλευση ΑΠΕ (Φ/Β και ανεμογεννητριών) για παροχή ευελιξίας σε χρήστες που βρίσκονται σε ένα ακτινικό δίκτυο (οικιακή καταναλωτές και βιομηχανικοί καταναλωτές) ενώ παράλληλα δεν παραβιάζονται οι περιορισμοί που θέτονται από το δίκτυο. Ο έλεγχος του δικτύου γίνεται με τη βοήθεια των σταθερών PTDF, οι οποίες μας επιτρέπουν να υπολογίζουμε την αλλαγή της ενεργού ισχύος σε κάθε γραμμή για την κάθε μεταβολή που γίνεται στο δίκτυο. Αυτό μας εξασφαλίζει την προστασία του δικτύου από υπερφορτίσεις, καθώς κάθε φορά που υπολογίζεται η μέγιστη τιμή ισχύος, που ενώ ικανοποιεί την αγορά, διασφαλίζει ότι δεν θα υπερφορτιστεί καμία γραμμή του δικτύου. Επιπλέον, γίνεται πρόβλεψη τόσο για την παραγωγή αλλά όσο και για την κατανάλωση με τη βοήθεια της κανονικής κατανομής για κάθε ώρα της ημέρας. Λόγω του ότι η πρόβλεψη μπορεί να διαφέρει από την πραγματική τιμή δημιουργείται περίσσειμα ή έλλειμμα ανάλογα. Έτσι, δίνεται η ευκαιρία σε όλους τους συμμετέχοντες στο δίκτυο να μπορούν να αγοράσουν και να πωλήσουν ενέργεια. Δημιουργούμε τις προσφορές ανάλογα της διαφοράς που υπάρχει ανάμεσα στη πραγματική τιμή και τη πρόβλεψη. Οι προσφορές έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: ID (μοναδικός αριθμός που χαρακτηρίζει τη προσφορά), ο τύπος (Down αν είναι προσφορά και Up αν είναι ζήτηση ενέργειας), η ποσότητα και ο κόμβος που αφορά την εν λόγω προσφορά. Επίσης, εκτός από τις προσφορές που μόλις εξηγήσαμε, θα υπάρχει ακόμα μια κατηγορία προσφορών οι λεγόμενες προσφορές ευελιξίας ή *comfort bids*. Λόγω του ότι με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και ειδικά των *smart homes* είναι εφικτός ο χειρισμός του φορτίου αλλά και της παραγωγής. Έτσι, το φορτίο αφού μπορεί για παράδειγμα να είναι ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο μπορεί να έχει αλλαγή (αύξηση ή μείωση) στην ισχύ που καταναλώνει. Παρόμοια σε ένα Φ/Β μπορεί να μην απαιτείται η παραγωγή στο μέγιστο δυνατό λόγω αδυναμίας διανομής ή για άλλους λόγους. Έτσι, αυτή η περίσσεια ενέργεια για να μην πάει χαμένη μπορεί να πωληθεί στην αγορά. Στη παραγωγή τα *comfort bids* μπορούν να είναι μόνο για προσφορά καθώς τα ΑΠΕ θεωρούμε ότι μπορούν να έχουν μόνο περίσσειμα ενέργειας. Η κατασκευή των προσφορών θα επεξηγηθεί λεπτομερώς στη συνέχεια του κεφαλαίου. Όσον αφορά την λειτουργία της αγοράς, δουλεύει σε συνεχές ρυθμό δηλαδή μόλις δύο προσφορές ταιριάζουν μεταξύ τους, εννοείτε πως αρχικά γίνεται έλεγχος του δικτύου, η αγορά καθαρίζει. Δηλαδή η αγορά λειτουργεί με τη μέθοδο *first come-first served*. Ο στόχος μας στις προσομοιώσεις είναι η ορθή λειτουργία της αγοράς καθώς και η εξέταση και σύγκριση διαφόρων σεναρίων. Το πρόγραμμα που αφορά την αγορά γράφτηκε σε γλώσσα *python*, ενώ τα δεδομένα του δικτύου που θα χρησιμοποιηθούν εισάγονται με τη βοήθεια του προγράμματος *Matpower*.

4.4 Διαδικασία Υπολογισμού των Προσφορών Ευελιξίας

4.4.1 Προσφορές Ευελιξίας με χρήση μεθόδων πρόβλεψων

Κάθε είδος φορτίου και παραγωγής χαρακτηρίζεται από το ποσοστό που προβλέπεται πως θα παραχθεί/καταναλωθεί και επίσης από την απόκλιση που μπορεί να υπάρξει από την τιμή αυτή για κάθε ώρα της ημέρας. Επιπλέον, κάθε είδος φορτίου/παραγωγής έχει ένα ποσοστό αβεβαιότητας. Αυτή η αβεβαιότητα χαρακτηρίζει την πιθανότητα να μην παραχθεί/καταναλωθεί η εν λόγω ισχύς. Κάθε κόμβος στο δίκτυο έχει μια προσφορά για κάθε ώρα που εξετάζετε η αγορά. Για τον υπολογισμό των προσφορών, αρχικά υπολογίζεται η πρόβλεψη της ισχύος η οποία ισούται με το γινόμενο του ποσοστού παραγωγής/κατανάλωσης και της ονομαστικής ισχύς. Ακολούθως, υπολογίζεται η πραγματική τιμή της ισχύος με τη χρήση της κανονικής κατανομής. Πρώτα τυχαία επιλέγεται αν η εκτιμώμενη ισχύς θα είναι μεγαλύτερη η μικρότερη από την ονομαστική. Αν η ισχύς είναι μικρότερη από την ονομαστική, τότε η πραγματική ισχύς υπολογίζεται ως το γινόμενο της εγκατεστημένης ισχύς μαζί με την αντίστροφη συνάρτηση της κανονικής κατανομής, όπου μ = ποσοστό κατανάλωσης ή παραγωγής, σ = απόκλιση φορτίου ή παραγωγής και $f(x) = 0.5$ -αβεβαιότητα/2. Αν η ισχύς είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική η διαδικασία είναι η ίδια με τις διαφορές ότι το $f(x) = 1 - \text{αβεβαιότητα}/2$ και ότι η ισχύς υπολογίζεται ως (2-τιμή από την αντίστροφη κανονική κατανομή) επί την ονομαστική ισχύ. Αν αυτή η τιμή ξεπερνάει την ονομαστική, η ισχύς που υπολογίζεται ισούται με την ονομαστική. Η απόκλιση επιλέγεται τυχαία μεταξύ του περιθωρίου 0.01-0.2. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ισχύς που θα ενσωματωθεί στη προσφορά ως η αφαίρεση της εκτιμώμενης ισχύς από την υπολογιζόμενη ισχύ. Αν αυτή η ισχύς είναι μεγαλύτερο του μηδενός τότε η προσφορά είναι τύπου down διαφορετικά είναι τύπου up. Ακολουθεί ένα παράδειγμα για να γίνει πιο κατανοητή η διαδικασία. Έχουμε μια μονάδα Φ/Β, ένα Α/Π, μια οικία και ένα εργοστάσιο. Οι αβεβαιότητες είναι 25%, 20%, 10% και 3% αντίστοιχα τις οποίες θεωρήσαμε και στον κανονικό υπολογισμό των προσφορών. Υποθέτουμε ότι η ώρα που εξετάζουμε, είναι ώρα 2 το μεσημέρι. Ισχύουν τα πιο κάτω δεδομένα τα οποία είναι ενδεικτικά:

	Φ/Β	Ανεμογεννήτρια	ΟΙΚΙΑ	ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ
ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	0.955	0.75	0.98	0.95
ΑΠΟΚΛΙΣΗ	0.05	0.1	0.02	0.05
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (kW)	10	200	5	100

Οι υπολογισμοί που γίνονται φαίνονται παρακάτω:

Φ/Β: Εκτιμώμενη Ισχύς = $0.955 \cdot 10 \text{ kW} = 9.55 \text{ kW}$

Μικρότερη ισχύς από την ονομαστική

Για την κανονική κατανομή έχουμε $\mu = 0.955$, $\sigma = 0.05$ και $f(x) = 0.5 - 0.25/2 = 0.375$

Που μας δίνει $x = 0.939$

Συνεπώς, η υπολογιζόμενη ισχύς υπολογίζεται ως: $0.939 \cdot 9.55 \text{ kW} = 8.97 \text{ kW}$

Άρα η ισχύς υπολογίζεται: Ισχύς = Υπολογιζόμενη ισχύς – Εκτιμώμενη Ισχύς = $8.97 - 9.55 = -0.58 \text{ kW}$

Συνεπώς, η ισχύς που θα ζητηθεί είναι 0.58 kW (τύπου up)

Ανεμογεννήτρια: Εκτιμώμενη Ισχύς = $0.75 \cdot 200 \text{ kW} = 150 \text{ kW}$

Μεγαλύτερη ισχύς από την ονομαστική

Για την κανονική κατανομή έχουμε $\mu = 0.75$, $\sigma = 0.1$ και $f(x) = 1 - 0.2/2 = 0.9$, Που μας δίνει $x = 0.878$

Συνεπώς, η υπολογιζόμενη ισχύς υπολογίζεται ως: $(2 - 0.878) \cdot 150 \text{ kW} = 168.3 \text{ Kw}$

Άρα η ισχύς υπολογίζεται: Ισχύς = Υπολογιζόμενη ισχύς – Εκτιμώμενη Ισχύς = $168.3 - 150 = 18.3 \text{ kW}$

Συνεπώς, η ισχύς που θα προσφερθεί είναι 18.3 kW (τύπου down)

Οικία: Εκτιμώμενη Ισχύς = $0.98 \cdot 5 \text{ kW} = 4.90 \text{ kW}$

Μεγαλύτερη ισχύς από την ονομαστική

Για την κανονική κατανομή έχουμε $\mu = 0.98$, $\sigma = 0.02$ και $f(x) = 1 - 0.1/2 = 0.95$, Που μας δίνει $x = 1.013$

Συνεπώς, η υπολογιζόμενη ισχύς υπολογίζεται ως: $1.013 \cdot 4.90 \text{ kW} = 4.96 \text{ kW}$

Άρα η ισχύς υπολογίζεται: Ισχύς = Υπολογιζόμενη ισχύς – Εκτιμώμενη Ισχύς = $4.96 - 4.90 = 0.06 \text{ kW}$

Συνεπώς, η ισχύς που θα προσφερθεί είναι 0.06 kW (τύπου down)

Εργοστάσιο: Εκτιμώμενη Ισχύς = $0.95 \cdot 100 \text{ kW} = 95 \text{ kW}$

Μικρότερη ισχύς από την ονομαστική

Για την κανονική κατανομή έχουμε $\mu = 0.95$, $\sigma = 0.05$ και $f(x) = 0.5 - 0.03/2 = 0.485$, Που μας δίνει $x = 0.948$

Συνεπώς, η υπολογιζόμενη ισχύς υπολογίζεται ως: $0.948 \cdot 95 \text{ kW} = 90.06 \text{ kW}$

Άρα η ισχύς υπολογίζεται: Ισχύς = Υπολογιζόμενη ισχύς – Εκτιμώμενη Ισχύς = $90.06 - 95 = -4.94 \text{ kW}$

Συνεπώς, η ισχύς που θα ζητηθεί είναι 4.94 kW (τύπου up)

4.4.2 Προσφορές Ευελιξίας με Χρήση Μεθόδων Προβλέψεων και Διαχείρισης Φορτίου

Σε αυτή τη περίπτωση κάθε φορτίο/μονάδα παραγωγής έχει δύο προσφορές για κάθε ώρα που τρέχει η αγορά. Το ένα είδος προσφοράς υπολογίζεται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που υπολογίστηκε και προηγουμένως. Το άλλο είδος είναι τα comfort bids στα οποία αναφερθήκαμε πιο πάνω. Τα φορτία και οι μονάδες παραγωγής χαρακτηρίζονται από ένα ποσοστό ευελιξίας. Αυτό το ποσοστό θεωρούμε πως είναι στο εύρος 10-20%. Για τα φορτία μπορεί να είναι πάνω και κάτω από την υπολογιζόμενη ισχύ ενώ για την παραγωγή μόνο κάτω. Για τα φορτία επιλέγεται τυχαία αν θα είναι πάνω ή κάτω η αλλαγή στην ισχύ. Ο υπολογισμός είναι αρκετά απλός.

Για τα φορτία:

Ισχύς για comfort bids = Ποσοστό Ευελιξίας * Υπολογιζόμενη Ισχύς

Άρα η ισχύς που ζητείται είναι η παραπάνω (τύπου up)

ή

Ισχύς για comfort bids = - Ποσοστό Ευελιξίας * Υπολογιζόμενη Ισχύς

Άρα η ισχύς που προσφέρεται είναι η παραπάνω (τύπου down)

Για τις μονάδες παραγωγής:

Ισχύς για comfort bids = - Ποσοστό Ευελιξίας * Υπολογιζόμενη Ισχύς

Άρα η ισχύς που προσφέρεται είναι η παραπάνω (τύπου down)

Ισχύει ο περιορισμός ασφαλείας ότι αν η ισχύς των comfort bids πέσει κάτω από 0.05 της ονομαστικής ισχύς τότε να γίνει ίση με το 5% της ονομαστικής ισχύς

4.4.3 Τιμολόγηση των Προσφορών Ευελιξίας

Στο θέμα της τιμολόγησης δεν δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή καθώς δεν αποτελεί κύριο ζήτημα της παρούσας διπλωματικής και λόγω του ότι η τιμή είναι εξαιρετικά μεταβλητή παράμετρος ανάλογα με τη χώρα, τη περιοχή και τα συμφέροντα.

Για τις κανονικές προσφορές αν είναι τύπου down η τιμολόγηση γίνεται τυχαία μεταξύ του περιθωρίου €40-55.5/MW. Ενώ αν είναι τύπου up η τιμολόγηση γίνεται τυχαία μεταξύ του περιθωρίου €50-65/MW. Το περιθώριο των προσφορών τύπου up επιλέξαμε να είναι ακριβότερο διότι η αγορά βασίζεται στην ανισότητα τιμή τύπου up > τιμή τύπου down. Για τα comfort bids θεωρούμε ότι η τιμολόγηση ευνοεί περισσότερο τους συμμετέχοντες. Έτσι, στη περίπτωση που έχουμε αγορά ενέργειας (τύπος up), η τιμολόγηση κυμαίνεται στα 20-50 cent του ευρώ κάτω από την τιμή που κοστολογήθηκε η κανονική προσφορά. Ενώ αν το comfort bid είναι τύπου down η κοστολόγηση γίνεται στα 20-50 cent του ευρώ πάνω από την τιμή που κοστολογήθηκε η κανονική προσφορά. Αυτό το περιθώριο επιλέχθηκε μετά από μερικές δοκιμές που έγιναν στην αγορά που φτιάξαμε. Οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές και αντιστοιχούν σε ένα μικρό κέρδος που μπορεί να έχει ο συμμετέχοντας. Όπως, αναφέραμε και πιο πάνω το θέμα της τιμολόγησης μπορεί να μελετηθεί σε βάθος.

4.5 Διαδικασία Επίλυσης και Παράδειγμα

Αφού έγινε αναφορά στη μεθοδολογία δημιουργίας των προσφορών, θα εξηγήσουμε το τρόπο με τον οποίο λειτουργεί ο κώδικας ο οποίος μας επιτρέπει την λειτουργία της αγοράς ενώ παράλληλα διασφαλίζει την ακεραιότητα του δικτύου.

Καταρχάς πρέπει να γίνει αναφορά στο order book, το οποίο αποτελεί τη λίστα των προσφορών που αναμένουν να γίνουν matched και στην οποία εισάγονται όλες οι προσφορές που για οποιοδήποτε λόγο δεν ήταν δυνατό να γίνουν match όταν αυτές ελέγχθηκαν από την αγορά. Οι προσφορές μπορούν να γίνουν matched μια μια, δεν είναι δυνατό το matching μεταξύ τριών ή περισσότερων προσφορών. Κάθε προσφορά που εξετάζεται ελέγχεται με όλες τις προσφορές που βρίσκονται στο order book και στη συνέχεια επιλέγεται μια ή καμιά ανάλογα αν ικανοποιούνται οι κανονισμοί που θέτουμε. Επιπλέον, είναι δυνατό το matching της προσφοράς για ένα ποσοστό ενέργειας ενώ θα επιστρέφει στο order book μέχρι να ικανοποιηθεί πλήρως. Επίσης, λόγω του ότι μερικά φορτία ή πηγές μπορούν να ζητούν συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας αυτό τα καθιστά «fixed bids». Δηλαδή αυτές οι προσφορές θα πραγματοποιηθούν μόνο αν είναι δυνατό το matching τους για όλη την ποσότητα ισχύος ακόμα και αν χρειαστούν πολλά matchings. Οι αρχικές ισχύς που έχει κάθε κόμβος υπολογίζονται από το αρχικό ισοζύγιο ισχύος.

Αφού έγινε αναφορά στη δομή της αγοράς μπορούμε να εξηγήσουμε τη λειτουργία της. Η αγορά διαβάζει μια-μια τις προσφορές σε τυχαία σειρά. Προφανώς, η πρώτη προσφορά μπαίνει στο order book αφού δεν μπορεί να γίνει match αφού στο order book δεν υπάρχει καμία άλλη προσφορά. Για να γίνει ένα match μεταξύ δύο προσφορών προφανώς πρέπει να είναι αντίθετου τύπου, δηλαδή η μια να προσφέρει ενέργεια (τύπου down) και η άλλη να ζητάει ενέργεια (τύπου up). Αυτός ο έλεγχος γίνεται με όλες τις προσφορές του order book, όσες ικανοποιούν αυτό το περιορισμό περνούν στο επόμενο στάδιο του ελέγχου ενώ αν δεν υπάρχει καμία προσφορά που να ικανοποιεί την υπό έλεγχο προσφορά αυτή μπαίνει στο order book. Στην αγορά μας

θεωρούμε ότι πάντα πρέπει να ικανοποιείτε η τιμή αυτού που προσφέρει ενέργεια (τύπος down). Άρα για να γίνει ένα match πρέπει η τιμή του up πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή του down. Έτσι, όσες προσφορές ικανοποιούν αυτή τη συνθήκη προχωρούν στο επόμενο στάδιο ελέγχου, ενώ και πάλι αν δεν υπάρχει κάποια προσφορά που να ικανοποιεί την υπό έλεγχο προσφορά αυτή μπαίνει στο order book. Αφού έγιναν αυτοί οι έλεγχοι που θέσαμε για την αγορά, έχουμε τις προσφορές που είναι κατάλληλες. Τώρα όμως πρέπει να γίνει ο έλεγχος αν είναι δυνατή η ενεργοποίηση τους από το δίκτυο.

Ο έλεγχος του δικτύου γίνεται με τη βοήθεια των σταθερών PTDF σε ένα function. Αυτό το function δέχεται την παρούσα ισχύ όλων των κόμβων, την ισχύ που πρόκειται να μεταφερθεί και τους δύο κόμβους που εμπλέκονται και επιστέφει τη μέγιστη δυνατή μεταφερόμενη ισχύ. Ο πίνακας PTDF υπολογίζεται με τη βοήθεια του Matpower. Σε ένα ακτινικό δίκτυο μπορεί να υπολογιστεί εύκολα όμως αφού μπαίνει -1 στα στοιχεία του πίνακα όπου οι δύο αντίστοιχοι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους και 0 αν δεν συνδέονται. Γίνεται υπολογισμός της ισχύς που μπορεί να δεχτεί κάθε γραμμή στο δίκτυο. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια των κατάλληλων στοιχείων του πίνακα PDTF που μας επιτρέπουν τον υπολογισμό της παρούσας ισχύς κάθε γραμμής. Η διαφορά μεταξύ του ορίου γραμμής και της παρούσας ισχύς αποτελεί το περιθώριο ισχύος. Ακολούθως, με την εξίσωση (3.7) μπορεί να υπολογιστεί η μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα της ισχύος που μπορεί να δεχθεί κάθε γραμμή. Η τελική ποσότητα της προσφοράς είναι αυτή που επιτρέπει την λειτουργία του δικτύου χωρίς να ξεπερνάτε κανένα όριο γραμμής.

Μετά τον έλεγχο του δικτύου έχουμε όλες τις προσφορές που ικανοποιούν την υπό έλεγχο προσφορά αλλά παράλληλα είναι δυνατή και η μεταφορά ισχύος από το δίκτυο. Σε αυτό το σημείο η αγορά πρέπει να επιλέξει μια προσφορά που θα ικανοποιήσει την προσφορά που εξετάζεται. Θεωρήσαμε 4 μεθοδολογίες με τις οποίες μπορεί να επιλεγεί αυτή η προσφορά:

Social Welfare ορίζεται ως το ποσό που περισσεύει σε τυχών διαφορά μεταξύ των τιμών των προσφορών που γίνονται matched. Αυτό το ποσό μπορεί να πηγαίνει στη τοπική διαχείριση για να αξιοποιηθεί για βελτίωση του τοπικού δικτύου και αγοράς.

$$\text{Social welfare} = |\text{selected bid cost} - \text{matched bid cost}| * \text{energy transferred} \quad (4.2)$$

Highest social welfare: Επιλέγεται η προσφορά που δίνει το υψηλότερο social welfare, δηλαδή η προσφορά που έχει τη μεγαλύτερη διαφορά στη τιμή με την υπό έλεγχο προσφορά. Αυτή η προσέγγιση ευνοεί την τοπική διοίκηση καθώς περισσεύουν περισσότερα χρήματα όταν γίνονται ταίριασμα των προσφορών.

Lowest social welfare: Επιλέγεται η προσφορά που δίνει το χαμηλότερο social welfare, δηλαδή αυτή που έχει τη μικρότερη διαφορά στη τιμή με την υπό έλεγχο προσφορά. Αυτή η προσέγγιση ωφελεί τους συμμετέχοντες στην αγορά καθώς οι προσφορές που γίνονται matched έχουν τη μικρότερη δυνατή διαφορά στη τιμή.

Highest quantity: Επιλέγεται η προσφορά με τη μεγαλύτερη δυνατή μεταφερόμενη ισχύ. Αυτή η προσέγγιση ικανοποιεί πρώτα τις προσφορές που έχουν τη μεγαλύτερη ισχύ. Συνεπώς, αυτός ο τρόπος επιλογής είναι ιδανικός όταν προτεραιότητα στην αγορά είναι να ικανοποιηθούν οι προσφορές των πιο «ισχυρών» συμμετεχόντων.

Smallest quantity: Επιλέγεται η προσφορά με τη μικρότερη δυνατή μεταφερόμενη ισχύ. Αυτή η προσέγγιση

ικανοποιεί πρώτα τις προσφορές που έχουν τη μικρότερη ισχύ. Συνεπώς, αυτός ο τρόπος επιλογής είναι ιδανικός όταν προτεραιότητα στην αγορά είναι να ικανοποιηθούν οι προσφορές των πιο «αδύναμων» συμμετεχόντων.

Αφού επιλεχτεί η προσφορά γίνεται ανανέωση της ισχύος των δύο εμπλεκόμενων κόμβων. Αν η προσφορά που ήταν υπό έλεγχο δεν ολοκληρώθηκε τότε μπαίνει στο order book. Όσον αφορά την προσφορά με την οποία έγινε matched, αν αυτή ολοκληρώθηκε πλήρως φεύγει από το order book, διαφορετικά ανανεώνεται και παραμένει στο order book. Η διαδικασία γίνεται για όλες τις προσφορές που πρέπει να διαβαστούν. Όταν διαβαστεί η λίστα των προσφορών, τότε ο αλγόριθμος ελέγχει αν υπάρχουν τυχόν matches μέσα στο order book, αρχίζοντας τον έλεγχο από τη πρώτη προσφορά, κάνοντας την ίδια διαδικασία με προηγούμενως. Ο αλγόριθμος σταματάει όταν δεν υπάρχει κανένα match μεταξύ δύο προσφορών στο order book. Σημειώνουμε πως αν έχουμε fixed bid η διαδικασία είναι ακριβώς η ίδια με τη διαφορά ότι η προσφορά θα γίνει μόνο αν είναι δυνατή η πλήρης ικανοποίηση της ισχύος. Ο κώδικας ανέβηκε στο Github όπου μπορεί κανείς να τον δει μαζί με τα σχόλια του, τα δεδομένα και μια μικρή εξήγηση [44].

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται ένα λογικό διάγραμμα που αντικατοπτρίζει την λειτουργία της αγοράς στο πρώτο στάδιο όπου διαβάζονται οι προσφορές. Η διαδικασία που φαίνεται στο διάγραμμα είναι πάρα πολύ παρόμοια και μετά που τελειώσει το διάβασμα των προσφορών με τη διαφορά ότι πλέον οι προσφορές που ελέγχονται επιλέγονται από το order book και ότι πλέον αν μια προσφορά δεν μπορεί να γίνει matched επιστρέφεται στο order book δεν επανεπεντάσσεται.

Ακολουθεί ένα μικρό παράδειγμα σε ένα ακτινικό δίκτυο 3 κόμβων για την κατανόηση της λειτουργίας της αγοράς. Το δίκτυο φαίνεται στο σχήμα 4.2. Και οι 3 συμμετέχοντες στο δίκτυο είναι prosumers έχουν τη δυνατότητα δηλαδή να αγοράσουν και να πουλήσουν ενέργεια, αφού έχουν δικές τους μονάδες ΑΠΕ. Για να κρατήσουμε το παράδειγμα απλό υποθέτουμε ότι η γραμμή 1-2 είναι χωρητικότητας 2 MW και η γραμμή 2-3 1.5 MW. Δεν θα εξηγήσουμε πως υπολογίζονται οι προσφορές, αφού αυτό έγινε προηγούμενως, απλά θα αναφέρουμε ενδεικτικά 3 προσφορές για να μπορούμε να εξηγήσουμε το παράδειγμα. Αυτές είναι:

- **Προσφορά 1:**

Τύπος: down Ποσότητα: 2 MW Τιμή: 40 ευρώ/MW Κόμβος: 1

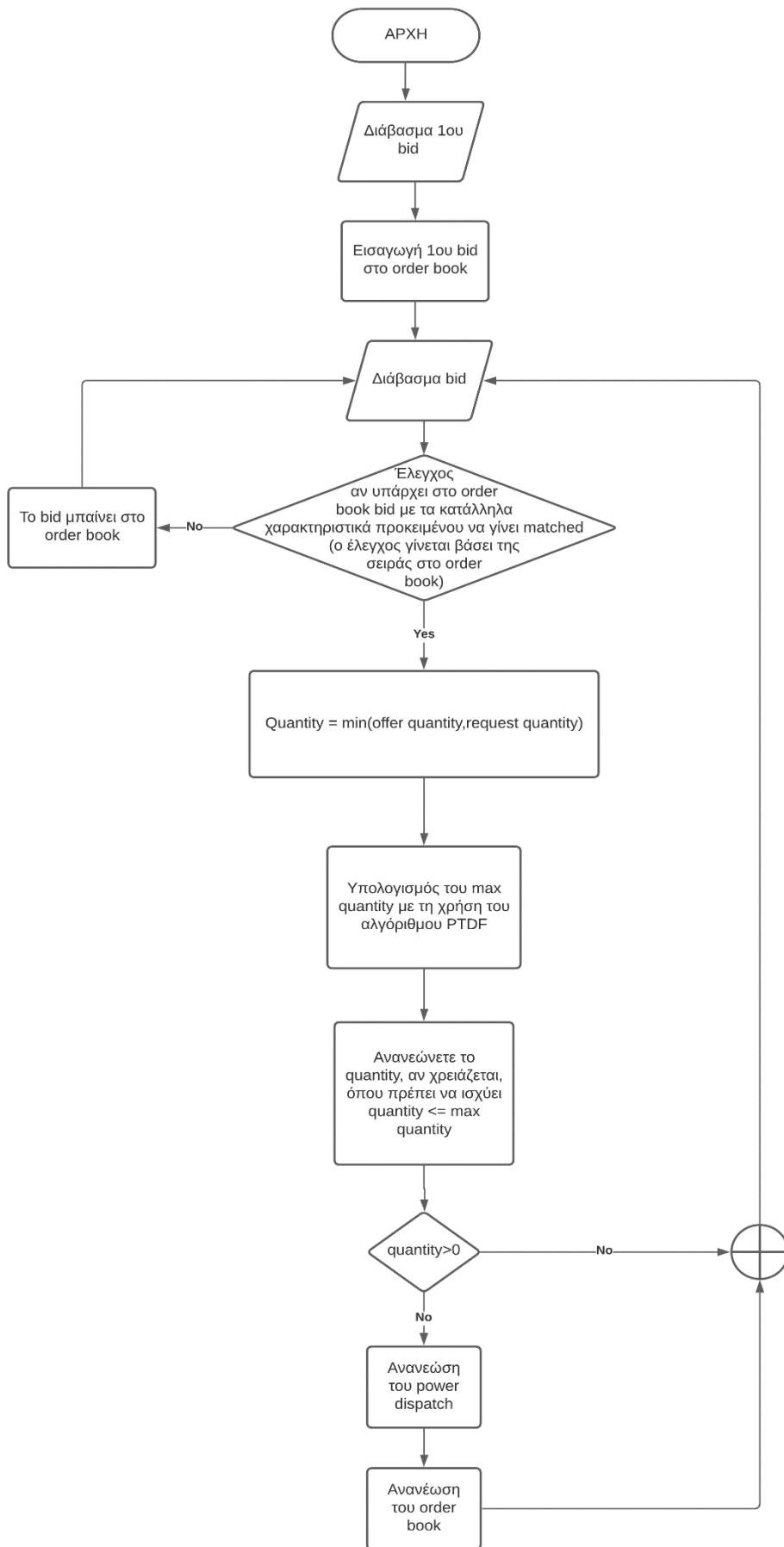
- **Προσφορά 2:**

Τύπος: up Ποσότητα: 0.5 MW Τιμή: 45 ευρώ/MW Κόμβος: 2

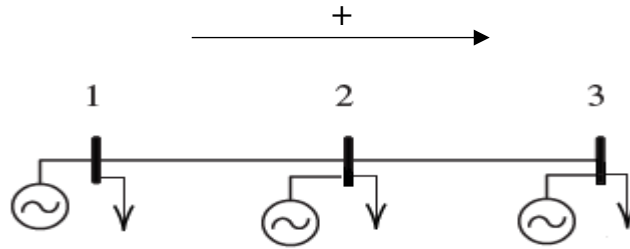
- **Προσφορά 3:**

Τύπος: up Ποσότητα: 1 MW Τιμή: 50 ευρώ/MW Κόμβος: 3

Υποθέτουμε ότι η αρχική ισχύς στους κόμβους 1,2 και 3 είναι 1 MW, -0.5 MW και -0.5 MW αντίστοιχα. Αρχικά εξετάζεται η προσφορά 1, όμως αφού το order book είναι άδειο δεν μπορεί να γίνει matched με καμία προσφορά και πάει στο order book. Ακολούθως διαβάζεται η προσφορά 2 και ελέγχεται με το order book. Εκεί βρίσκεται μόνο η προσφορά 1, με την οποία ταιριάζουν αφού η τιμή της προσφοράς 2 που είναι τύπου up είναι μεγαλύτερη από αυτή της προσφοράς 1 που είναι τύπου down. Η γραμμή 1-2 είναι ήδη φορτισμένη με 1 MW, άρα είναι δυνατή η πλήρης ικανοποίηση της προσφοράς 2. Συνεπώς, η γραμμή 1-2 είναι φορτισμένη με 1.5 MW και η γραμμή 2-3 παραμένει φορτισμένη με 0.5 MW. Η ισχύς σε κάθε κόμβο είναι 1.5 MW, 1 MW και -0.5 MW αντίστοιχα. Αφού η προσφορά 1 δεν πραγματοποιήθηκε πλήρως επιστρέφει



Σχήμα 4.1: Λογικό διάγραμμα της αγοράς



Σχήμα 4.2: Ένα απλό ακτινικό δίκτυο 3 κόμβων όπου και οι 3 συμμετέχοντες είναι prosumers

στο order book. Πλέον το order book είναι το παρακάτω:

- **Προσφορά 1:** Τύπος: down Ποσότητα: 1.5 MW Τιμή: 40 ευρώ/MW Κόμβος: 1

Επίσης, υπολογίζεται και το social welfare ως $(45-40 \text{ ευρώ/MW}) \cdot 0.5 = 2.5 \text{ ευρώ}$. Ακολουθως, ελέγχεται η επόμενη προσφορά η οποία είναι η προσφορά 3, ταιριάζει με τη προσφορά 1 αφού η τιμή της προσφοράς 3 που είναι τύπου up είναι μεγαλύτερη από την τιμή της προσφοράς 1 που είναι τύπου down. Η γραμμή 1-2 είναι ήδη φορτισμένη με 1.5 MW συνεπώς μπορούν να μεταφερθούν μόνο 0.5 MW από το κόμβο 1 στον 3. Η προσφορά 3 δεν πραγματοποιείται πλήρως συνεπώς μπαίνει στο order book. Η ισχύς του κάθε κόμβου είναι 2MW, -1 MW και -1MW ενώ οι φορτίσεις των γραμμών είναι 2 MW για τη γραμμή 1-2 και 1 MW για τη γραμμή 2-3 . Το social welfare υπολογίζεται ως $(50-40 \text{ ευρώ/MW}) \cdot 0.5 = 5 \text{ ευρώ}$. Το τελικό order book είναι το εξής:

- **Προσφορά 1:**

Τύπος: down Ποσότητα: 1 MW Τιμή: 40 ευρώ/MW Κόμβος: 1

- **Προσφορά 3:**

Τύπος: up Ποσότητα: 0.5 MW Τιμή: 50 ευρώ/MW Κόμβος: 3

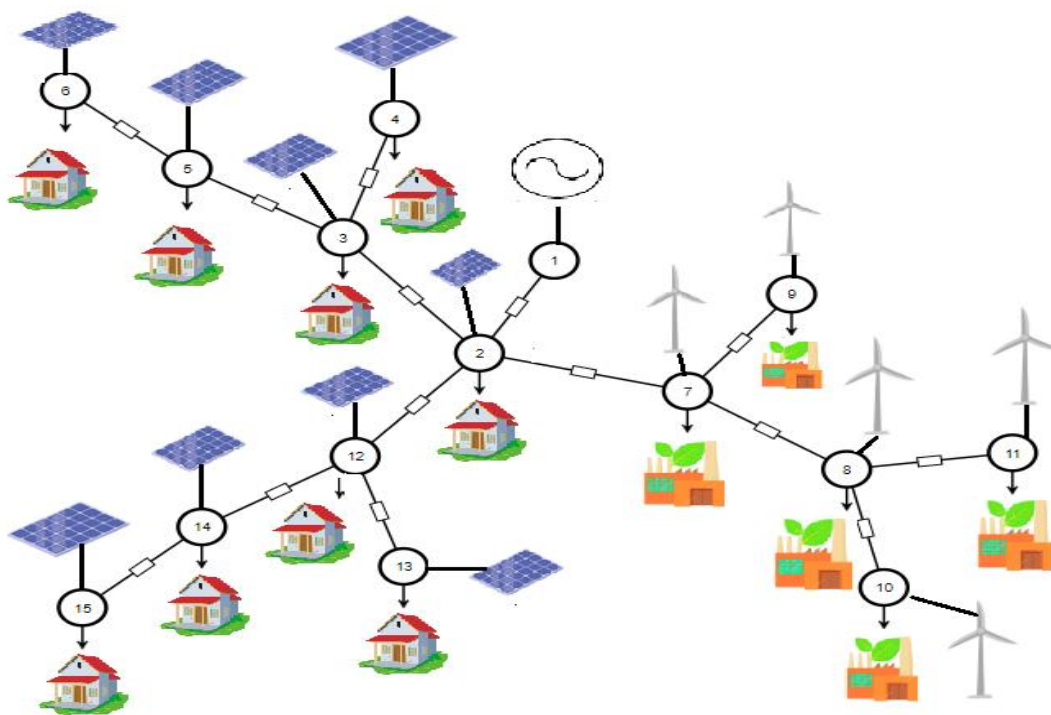
Μέσω αυτού του μικρού παραδείγματος έγινε μια εξήγηση της λειτουργίας της αγοράς. Είδαμε πως μια προσφορά μπορεί να πραγματοποιηθεί πλήρως ή μερικώς λόγω των περιορισμών του δικτύου. Επίσης, δείξαμε πως λαμβάνουμε υπόψη τους περιορισμούς του δικτύου κατά τη λειτουργία της αγοράς καθώς και πως υπολογίζεται το social welfare το οποίο μπορεί να είναι ένα εισόδημα για την τοπική κοινότητα στην οποία λειτουργεί η αγορά.

5 Εφαρμογές

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η εφαρμογή του κώδικα μας σε ένα ακτινικό δίκτυο. Τα δεδομένα του δικτύου εξάγονται από το Matpower. Θα εξετάσουμε τις δύο μεγάλες κατηγορίες προσφορών που αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, προσφορές με τη μέθοδο προβλέψεων και τη μέθοδο διαχείρισης φορτίου, καθώς και τις 4 κατηγορίες επιλογής προσφορών στις οποίες έγινε αναφορά προηγουμένως. Τα αποτελέσματα επικεντρώνονται στην ισχύ που μεταφέρθηκε καθώς και στους περιορισμούς της αγοράς και του δικτύου.

5.1 Περιγραφή του υπό Εξέταση Δικτύου

Το δίκτυο στο οποίο θα δουλέψουμε είναι το δίκτυο «case 16am» από τα δεδομένα του Matpower. Αφορά ένα ακτινικό δίκτυο 15 κόμβων τα δεδομένα του οποίου μπορούν να βρεθούν στο παράρτημα Α. Υποθέτουμε ότι κάθε κόμβος στο δίκτυο αντιστοιχεί σε ένα τοπικό δίκτυο, τα δίκτυα είναι ισχύος μερικών MW. Τα δίκτυα αποτελούνται από το φορτίο και την παραγωγή. Τα φορτία διακρίνονται σε οικιακά και βιομηχανικά. Στα οικιακά φορτία θεωρούμε ότι υπάρχουν εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών μονάδων, ενώ στα βιομηχανικά φορτία υπάρχει εγκατάσταση αιολικών πάρκων. Θεωρούμε ότι οι 9 κόμβοι του δικτύου αντιστοιχούν σε οικιακά φορτία και 5 σε βιομηχανικά φορτία. Η τοπολογία του δικτύου φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 5.1: Η τοπολογία του δικτύου μαζί με τα φορτία και τις πηγές παραγωγής

Για το δίκτυο υποθέτουμε ότι τα φωτοβολταϊκά καλύπτουν το 50% του οικιακού φορτίου ενώ για τα αιολικά πάρκα υποθέτουμε ότι καλύπτουν το 80% του βιομηχανικού φορτίου. Λόγω του ότι το φορτίο των ζυγών δεν καλύπτεται πλήρως από τη παραγωγή του αντίστοιχου τοπικού δικτύου, αυτή η ενέργεια πρέπει να έρθει από κάποια άλλη πηγή. Έτσι, ορίσαμε σαν ζυγό αναφοράς τον ζυγό 1 ο οποίος έχει τον ρόλο της αναπλήρωσης

τυχών υπολειπόμενης ενέργειας.

Η αγορά εξετάστηκε για 6 ακραίες περιπτώσεις, για τις κανονικές προσφορές άλλα και τις προσφορές μέσω ρύθμισης φορτίου. Αυτές οι περιπτώσεις είναι οι εξής:

- Μέγιστη/ελάχιστη παραγωγή ΑΠΕ
- Μέγιστο/ελάχιστο φορτίο
- Μέγιστο/ελάχιστο Net Load (φορτίο – παραγωγή)

Αυτές οι περιπτώσεις είναι αρκετά αντιπροσωπευτικές για την εξέταση ενός δικτύου αφού πάντα προτείνεται η ανάλυση της κατάστασης του δικτύου στις πιο δυσμενείς συνθήκες.

Όσον αφορά τα στοιχεία της παραγωγής και του φορτίου για κάθε ώρα, χρησιμοποιήθηκαν αληθινά δεδομένα από μετρήσεις σε οικιακά και βιομηχανικά φορτία και σε ΑΠΕ εγκατεστημένες στο δίκτυο διανομής. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα ποσοστά για κάθε είδος παραγωγής και φορτίου ανά ώρα:

HOUR	HOUSE	FACTORY	WIND	PV
1	0.65	0.63	0.93	0
2	0.63	0.73	0.95	0
3	0.63	0.62	0.94	0
4	0.63	0.64	0.97	0
5	0.65	0.63	0.96	0
6	0.7	0.61	0.95	0
7	0.8	0.77	0.95	0.04322377
8	0.91	0.88	0.94	0.20576317
9	0.96	0.9	0.86	0.45024764
10	0.98	0.95	0.77	0.69113012
11	1	0.98	0.73	0.86717695
12	1	1	0.83	0.97388564
13	0.97	0.99	0.88	1
14	0.98	0.98	0.75	0.95497524
15	0.96	0.98	0.76	0.82710491
16	0.93	0.95	0.78	0.63169743
17	0.9	0.95	0.81	0.40027015
18	0.94	0.92	0.91	0.17919856
19	0.9	0.87	0.91	0.03692031
20	0.85	0.8	0.93	0
21	0.82	0.72	0.89	0
22	0.82	0.82	0.95	0
23	0.77	0.75	0.94	0
24	0.7	0.71	0.91	0

Πίνακας 5.1: Δεδομένα κατανάλωσης και φορτίου

Για την εύρεση των έξι ακραίων καταστάσεων του δικτύου ο υπολογισμός είναι:

- Μέγιστη/ελάχιστη παραγωγή ΑΠΕ:

Παραγωγή = 9*ποσοστό Φ/Β*εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β + 5*ποσοστό Α/Γ*εγκατεστημένη ισχύς

- Μέγιστο/ελάχιστο φορτίο

Φορτίο = 9*ποσοστό οικιακού φορτίου*ονομαστική ισχύς οικιακού φορτίου + 5*ποσοστό βιομηχανικού φορτίου*ονομαστική ισχύς βιομηχανικού φορτίου

- Μέγιστο/ελάχιστο Net Load (φορτίο – παραγωγή)

Net Load = Φορτίο – Παραγωγή

HOUR	PRODUCTION (MW)	LOAD (MW)	NET LOAD (MW)
1	56.172	135.900	79.728
2	57.380	140.732	83.352
3	56.776	132.427 (MIN)	75.651
4	58.588	133.937	75.349 (MIN)
5	57.984	135.900	77.916
6	57.380	141.185	83.805
7	60.317	166.855	106.538
8	70.758	190.109	119.351
9	82.538	198.414	115.876
10	93.470	204.907	111.437
11	103.017	209.890	106.873
12	116.308	211.400 (MAX)	95.092
13	121.102 (MAX)	206.568	85.466
14	110.191	207.172	96.981
15	102.106	204.454	102.348
16	90.036	198.112	108.076
17	76.122	194.035	117.913
18	67.141	197.206	130.065
19	57.473	187.995	130.522 (MAX)
20	56.172	175.915	119.743
21	53.756 (MIN)	165.798	112.042
22	57.380	173.348	115.968
23	56.776	161.268	104.492
24	54.964	148.735	93.771

Πίνακας 5.2: Ισχύς παραγωγής και κατανάλωσης για κάθε ώρα

Με βάση τους υπολογισμούς οι ώρες που θα εξεταστούν είναι:

- **Μέγιστη/ελάχιστη παραγωγή ΑΠΕ:** 21 (ελάχιστη), 13 (μέγιστη)
- **Μέγιστο/ελάχιστο φορτίο:** 3 (ελάχιστη), 12 (μέγιστη)
- **Μέγιστο/ελάχιστο Net Load (φορτίο – παραγωγή):** 4 (ελάχιστη), 19 (μέγιστη)

Όσον αφορά την αρχική ισχύ (SetPoint) σε κάθε κόμβο για κάθε ώρα που εξετάστηκε αυτή υπολογιζόταν ως:
 $SetPoint = \text{εγκατεστημένη ισχύς παραγωγής} * \text{συντελεστής παραγωγής} - \text{ονομαστική ισχύς φορτίου} * \text{συντελεστής φορτίου}$

Το παράδειγμα που πήραμε από το Matpower δεν διαθέτει όρια γραμμών. Για τον υπολογισμό τους εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος της DC ροής ισχύος. Ο αλγόριθμος εκτελέστηκε για κάθε ώρα, όπου θέταμε το εκάστοτε ισοζύγιο ισχύος σε κάθε κόμβο. Με αυτό τον τρόπο πήραμε τις φορτίσεις των γραμμών για κάθε ώρα. Για κάθε γραμμή η μέγιστη ισχύς αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη ισχύ που υπήρχε μεταξύ αυτών των έξι ωρών. Όμως, θεωρήσαμε σκόπιμο για να μπορεί το δίκτυο να ανταπεξέλθει στη μεταφορά ισχύος λόγω της αγοράς ενέργειας, να αυξήσουμε τα όρια των γραμμών κατά 5%. Εξαιρέση αποτελούν οι γραμμές 8 και 9, όπου λόγω της μικρής ισχύος (0.34MW και 0.2 MW αντίστοιχα), θεωρήσαμε σκόπιμο να αυξηθούν μέχρι το 0.5 MW. Πιο κάτω φαίνεται ο πίνακας με τα όρια των γραμμών:

Γραμμή	Από κόμβο	Προς κόμβο	Μέγιστο από DC-PF	Όριο γραμμής (MW)
1	1	2	15.45	16.22
2	2	3	7.49	7.86
3	3	4	2.64	2.77
4	3	5	3.09	3.24
5	5	6	1.32	1.39
6	2	7	5.07	5.32
7	7	8	3.39	3.56
8	7	9	0.34	0.5
9	8	10	0.2	0.5
10	8	11	1.51	1.59
11	2	12	4.49	4.71
12	12	13	0.88	0.92
13	12	14	2.73	2.87
14	14	15	1.85	1.94

Πίνακας 5.3: Στοιχεία γραμμών του δικτύου

5.2 Παρουσίαση των Προσφορών Ευελιξίας

Οι προσφορές υπολογίστηκαν με τη μέθοδο που εξηγήθηκε λεπτομερώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Όπως αναφέραμε στη πρώτη περίπτωση όπου υπάρχουν μόνο οι προσφορές από την κανονική κατανομή κάθε κόμβος έχει μόνο μια προσφορά. Στην περίπτωση που υπάρχουν και τα comfort bids τότε κάθε κόμβος έχει 2 προσφορές. Ο κόμβος 1 που είναι και ζυγός αναφοράς δεν έχει καμία προσφορά αφού δεν συμμετέχει στην αγορά ενέργειας. Θεωρήσαμε σκόπιμο για τη καλύτερη σύγκριση των δύο μεθόδων να έχουν και τα δύο είδη προσφορών ακριβώς τις ίδιες προσφορές της κανονικής κατανομής. Δηλαδή οι προσφορές στη περίπτωση που έχουμε και τα comfort bids αποτελούνται από τις προσφορές της κανονικής κατανομής (ακριβώς τα ίδια με τη πρώτη περίπτωση) και ενδιάμεσα τυχαία μπαίνουν τα comfort bids. Για να εξεταστεί και η περίπτωση των fixed bids, θεωρήσαμε τους κόμβους 3(οικιακό φορτίο) και 9(βιομηχανικό φορτίο) ως fixed bids. Δηλαδή η πραγματοποίηση αυτών των προσφορών θα γίνει μόνο στη περίπτωση που μπορεί να γίνει όλη η ποσότητα της προσφοράς. Οι προσφορές παρουσιάζονται στο παράρτημα Β.

5.3 Αποτελέσματα για τη Μέθοδο Πρόβλεψης

Στους πάρακατω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του τρεξίματος της προσομοίωσης για κάθε ώρα και κάθε είδος επιλογής προσφοράς για τη περίπτωση που οι προσφορές υπολογίζονται μόνο με την μέθοδο της πρόβλεψης που περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 4. Τέλος, υπάρχει ο πίνακας των μέσο όρων για κάθε μέθοδο επιλογής προσφοράς.

Η πρώτη παρατήρηση είναι ότι η ώρα 12 όπου υπάρχει το μέγιστο φορτίο δεν έγινε κανένα matching των προσφορών και ως αποτέλεσμα μεταφέρθηκε μηδενική ισχύς. Επιπλέον, δημιουργήθηκαν μόνο 4 προσφορές αντί 14 που υπό κανονικές συνθήκες θα έπρεπε να υπάρχουν. Ο λόγος είναι οι κανόνες που θέσαμε για τη δημιουργία των προσφορών. Αφού το φορτίο σε αυτή την ώρα έχει ισχύ ίση με την ονομαστική είναι εξαιρετικά δύσκολο η πρόβλεψη να διαφέρει από την ονομαστική τιμή. Παρατηρούμε επίσης ότι για κάθε ώρα της αγοράς η μεταφερόμενη ισχύς είναι ίδια και για τους 4 τρόπους επιλογής προσφορών. Το ποσοστό των προσφορών που ολοκληρώνεται πλήρως είναι αρκετά υψηλό και βρίσκετε στο διάστημα 60-80%. Όμως, το ποσοστό ισχύς που μεταφέρεται φτάνει μέχρι το 40%. Αυτό μας δείχνει ότι οι περισσότερες προσφορές που ικανοποιούνται είναι μικρής ισχύς ενώ αυτές με μεγαλύτερη ισχύ ικανοποιούνται μερικώς ή καθόλου. Επιπλέον, είναι ευδιάκριτο ότι για τις ώρες 3, 4, 12 και 13 η αγορά και το δίκτυο δεν αντιμετωπίζουν κάποιο πρόβλημα καθώς οι προσφορές που δεν έγιναν λόγω προβλημάτων είναι ελάχιστες. Η ώρα 19, όπου υπήρχε και το μεγαλύτερο net load, είναι εμφανές ότι το δίκτυο αντιμετωπίζει πρόβλημα υπερφόρτισης αφού 9 προσφορές απορρίφθηκαν λόγω αδυναμίας του δικτύου. Αυτό συμβαίνει διότι σε αυτή την ώρα οι κόμβοι του δικτύου χρειάζονται την περισσότερη ενέργεια από τον ζυγό αναφοράς ως αποτέλεσμα οι γραμμές μεταφοράς είναι ήδη μερικώς φορτισμένες με αποτέλεσμα να δυσκολεύει η μεταφορά ενέργειας για παροχή ευελιξίας. Για την ώρα 21, όπου υπάρχει ελάχιστη παραγωγή, το δίκτυο απορρίπτει προσφορές αλλά το ίδιο κάνει και η αγορά. Όσον αφορά το δίκτυο ο λόγος είναι ο ίδιος με η ώρα 19, για την αγορά μπορεί να οφείλεται σε προβλήματα των τιμών ή της ισχύος. Το social welfare είναι μεγαλύτερο τις ώρες 3 και 4 όπου υπάρχει ελάχιστη παραγωγή. Παρατηρώντας τον πίνακα των μέσων όρων, γίνεται εύκολα

αντιληπτό πως δεν υπάρχει κάποια έντονη διαφορά μεταξύ των τρόπων επιλογής προσφοράς αφού τα αποτελέσματα δείχνουν όλες οι προσεγγίσεις είναι αρκετά κοντά.

ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΩΡΑ 3 (ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ) BIDS ΜΟΝΟ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ				
5.8					
ΣΥΝΟΛΟ BIDS	ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ BID				
14	HIGHEST SOCIAL WELFARE	LARGEST QUANTITY	LOWEST SOCIAL WELFARE	SMALLEST QUANTITY	AVERAGE
ΙΣΧΥΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΕΤΑΙ (MW)	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19
ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΣΧΥΣ (%)	37.76%	37.76%	37.76%	37.76%	37.76%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS (%)	78.57%	78.57%	85.71%	78.57%	80.36%
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	0	0	0	0	0.00
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ MARKET	2	2	0	0	1.00
ΖΕΥΓΑΡΙΑ BIDS ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ MATCHED	10	10	11	10	10.25
SOCIAL WELFARE (ΕΥΡΩ)	20.403	20.185	18.946	19.612	19.79

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα για ώρα 3-ελάχιστο φορτίο (μόνο προσφορές με τη μέθοδο πρόβλεψης)

ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΩΡΑ 4 (ΕΛΑΧΙΣΤΟ NET LOAD) BIDS ΜΟΝΟ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ				
4.1					
ΣΥΝΟΛΟ BIDS	ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ BID				
14	HIGHEST SOCIAL WELFARE	LARGEST QUANTITY	LOWEST SOCIAL WELFARE	SMALLEST QUANTITY	AVERAGE
ΙΣΧΥΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΕΤΑΙ (MW)	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΣΧΥΣ (%)	33.17%	33.17%	33.17%	33.17%	33.17%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS (%)	64.29%	64.29%	64.29%	78.57%	67.86%
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	0	0	0	0	0.00
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ MARKET	0	0	0	0	0.00
ΖΕΥΓΑΡΙΑ BIDS ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ MATCHED	9	9	9	11	9.50
SOCIAL WELFARE (ΕΥΡΩ)	22.442	16.026	14.42	20.641	18.38

Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα για ώρα 4-ελάχιστο net load (μόνο προσφορές με τη μέθοδο πρόβλεψης)

ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΩΡΑ 12 (ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ) BIDS ΜΟΝΟ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ				
0.08					
ΣΥΝΟΛΟ BIDS	ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ BID				
4	HIGHEST SOCIAL WELFARE	LARGEST QUANTITY	LOWEST SOCIAL WELFARE	SMALLEST QUANTITY	AVERAGE
ΙΣΧΥΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΕΤΑΙ (MW)	0	0	0	0	0
ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΣΧΥΣ (%)	0	0	0	0	0
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS (%)	0	0	0	0	0
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	0	0	0	0	0
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ MARKET	0	0	0	0	0
ΖΕΥΓΑΡΙΑ BIDS ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ MATCHED	0	0	0	0	0
SOCIAL WELFARE (ΕΥΡΩ)	0	0	0	0	0

Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα για ώρα 12-μέγιστο φορτίο (μόνο προσφορές με τη μέθοδο πρόβλεψης)

ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΩΡΑ 13 (ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ) BIDS ΜΟΝΟ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ				
0.7					
ΣΥΝΟΛΟ BIDS	ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ BID				
13	HIGHEST SOCIAL WELFARE	LARGEST QUANTITY	LOWEST SOCIAL WELFARE	SMALLEST QUANTITY	AVERAGE
ΙΣΧΥΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΕΤΑΙ (MW)	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΣΧΥΣ (%)	40.00%	40.00%	40.00%	40.00%	40.00%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS (%)	76.92%	84.62%	76.92%	76.92%	78.85%
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	0	0	0	0	0.00
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ MARKET	0	0	0	0	0.00
ΖΕΥΓΑΡΙΑ BIDS ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ MATCHED	9	8	7	9	8.25
SOCIAL WELFARE (ΕΥΡΩ)	3.237	3.201	3.129	3.129	3.174

Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα για ώρα 13-μέγιστη παραγωγή (μόνο προσφορές με τη μέθοδο πρόβλεψης)

ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΩΡΑ 19 (ΜΕΓΙΣΤΟ NET LOAD) BIDS ΜΟΝΟ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ				
2.26					
ΣΥΝΟΛΟ BIDS	ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ BID				
14	HIGHEST SOCIAL WELFARE	LARGEST QUANTITY	LOWEST SOCIAL WELFARE	SMALLEST QUANTITY	AVERAGE
ΙΣΧΥΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΕΤΑΙ (MW)	0.962	0.962	0.962	0.962	0.962
ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΣΧΥΣ (%)	42.57%	42.57%	42.57%	42.57%	42.57%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS (%)	71.43%	64.29%	71.43%	71.43%	69.64%
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	9	13	10	9	10.25
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ MARKET	0	0	0	0	0.00
ΖΕΥΓΑΡΙΑ BIDS ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ MATCHED	13	12	13	13	12.75
SOCIAL WELFARE (ΕΥΡΩ)	11.417	11.309	11.113	11.417	11.31

Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα για ώρα 19-μέγιστο net load (μόνο προσφορές με τη μέθοδο πρόβλεψης)

ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΩΡΑ 21 (ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ) BIDS ΜΟΝΟ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ				
4.22					
ΣΥΝΟΛΟ BIDS	ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ BID				
14	HIGHEST SOCIAL WELFARE	LARGEST QUANTITY	LOWEST SOCIAL WELFARE	SMALLEST QUANTITY	AVERAGE
ΙΣΧΥΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΕΤΑΙ (MW)	0.748	0.748	0.748	0.748	0.748
ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΣΧΥΣ (%)	17.73%	17.73%	17.73%	17.73%	17.73%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS (%)	64.29%	64.29%	64.29%	64.29%	64.29%
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	5	5	5	5	5
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ MARKET	7	7	7	7	7
ΖΕΥΓΑΡΙΑ BIDS ΠΟΥ ΕΠΙΝΑΝ MATCHED	10	10	10	10	10
SOCIAL WELFARE (ΕΥΡΩ)	5.737	5.726	4.907	5.726	5.524

Πίνακας 5.15: Αποτελέσματα για ώρα 21-ελάχιστη παραγωγή (μόνο προσφορές με τη μέθοδο πρόβλεψης)

	ΜΕΣΟΙ ΟΡΟΙ ΠΑ BIDS ΜΟΝΟ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ				
	ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ BID				
	HIGHEST SOCIAL WELFARE	LARGEST QUANTITY	LOWEST SOCIAL WELFARE	SMALLEST QUANTITY	AVERAGE
ΙΣΧΥΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΕΤΑΙ (MW)	1.108	1.108	1.108	1.108	1.11
ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΣΧΥΣ (%)	34.24%	34.24%	34.24%	34.24%	34.24%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS (%)	71.10%	71.21%	72.53%	73.96%	72.20%
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	2.8	3.6	3	2.8	3
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ MARKET	1.8	1.8	1.4	1.4	2
ΖΕΥΓΑΡΙΑ BIDS ΠΟΥ ΕΠΙΝΑΝ MATCHED	10.2	9.8	10	10.6	10.15
SOCIAL WELFARE (ΕΥΡΩ)	12.647	11.289	10.503	12.105	11.64

Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα των μέσων όρων για κάθε μέθοδο επιλογής προσφοράς (μόνο προσφορές με τη μέθοδο πρόβλεψης)

5.4 Αποτελέσματα για τη μέθοδο του forecast και των comfort bids

Στους πάρακατω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του τρεξίματος της προσομοίωσης για κάθε ώρα και κάθε είδος επιλογής προσφοράς για τη περίπτωση που τα bids υπολογίζονται με την μέθοδο του forecast αλλά και των comfort bids, που περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 4. Τέλος, υπάρχει ο πίνακας των μέσο όρων για κάθε μέθοδο επιλογής bid.

Και πάλι η ώρα 12 όπου υπάρχει η ελάχιστη παραγωγή τα bids είναι λιγότερα από αυτά που θα περιμέναμε, ο λόγος είναι ο ίδιος με την αντίστοιχη περίπτωση στα bids με τη μέθοδο του forecast. Παρατηρούμε ότι σε αρκετές ώρες η μεταφερόμενη ισχύς για κάθε τρόπο επιλογής bid είναι διαφορετική. Όσον αφορά τους περιορισμούς από την αγορά και το δίκτυο, η αγορά έχει πολύ περισσότερες απορρίψεις αφού μερικές φορές η μη πραγματοποίηση των bids λόγω της αγοράς φτάνει μέχρι και το 300. Παρατηρούμε ότι το ποσοστό ολοκλήρωσης των κανονικών bids είναι πολλαπλάσιο από αυτό των comfort bids. Περιμέναμε αυτό το αποτέλεσμα καθώς, τα comfort bids έχουν πιο συμφέρουσα τιμή για αυτόν που θέτει το bid. Αυτό κάνει πιο δύσκολο το matching του comfort bid σε σχέση με τα bid με τη μέθοδο του forecast. Όσον αφορά τη σύγκριση των 4 μεθόδων επιλογής bid υπάρχουν μικρές διαφορές μεταξύ τους. Πιο χαρακτηριστικά είναι ευδιάκριτο ότι στη περίπτωση του μέγιστου social welfare μεταφέρεται η μικρότερη ισχύς ενώ τα bids που απορρίπτονται λόγω του δικτύου και της αγοράς είναι τα περισσότερα.

ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΩΡΑ 3 (ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ) BIDS ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΙ COMFORT BIDS				
8.47					
ΣΥΝΟΛΟ BIDS	ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ BID				
28 (14 ΚΑΝΟΝΙΚΑ ΚΑΙ 14 COMFORT)	HIGHEST SOCIAL WELFARE	LARGEST QUANTITY	LOWEST SOCIAL WELFARE	SMALLEST QUANTITY	AVERAGE
ΙΣΧΥΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΕΤΑΙ (MW)	2.72	3.04	3.21	3.01	2.995
ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΣΧΥΣ (%)	32.11%	35.89%	37.90%	35.54%	35.36%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ (%)	71.43%	85.71%	71.43%	71.43%	75.00%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ COMFORT BIDS (%)	21.43%	28.57%	50.00%	57.14%	39.29%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS (%)	46.43%	57.14%	60.71%	64.29%	57.14%
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	0	0	0	0	0
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ MARKET	314	212	170	153	212.25
ΖΕΥΓΑΡΙΑ BIDS ΠΟΥ ΕΠΙΝΑΝ MATCHED	13	15	17	18	15.75
ΠΟΣΟΣΤΟ COMFORT BID ΣΤΑ MATCHED ΖΕΥΓΑΡΙΑ (%)	23.08%	23.33%	32.35%	30.56%	27.33%
SOCIAL WELFARE (ΕΥΡΩ)	25.418	23.265	18.939	19.81	21.858

Πίνακας 5.17: Αποτελέσματα για την 3-ελάχιστο φορτίο (υπάρχουν και προσφορές με τη μέθοδο διαχείρισης φορτίου)

ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΩΡΑ 4 (ΕΛΑΧΙΣΤΟ NET LOAD) BIDS ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΙ COMFORT BIDS				
6.88					
ΣΥΝΟΛΟ BIDS	ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ BID				
28 (14 ΚΑΝΟΝΙΚΑ ΚΑΙ 14 COMFORT)	HIGHEST SOCIAL WELFARE	LARGEST QUANTITY	LOWEST SOCIAL WELFARE	SMALLEST QUANTITY	AVERAGE
ΙΣΧΥΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΕΤΑΙ (MW)	2.908	2.748	3.078	3.078	2.953
ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΣΧΥΣ (%)	42.27%	39.94%	44.74%	44.74%	42.92%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ (%)	35.71%	85.71%	85.71%	92.86%	75.00%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ COMFORT BIDS (%)	35.71%	28.57%	78.57%	64.29%	51.79%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS (%)	35.71%	57.14%	82.14%	78.57%	63.39%
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	13	7	3	7	7.5
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ MARKET	142	119	73	77	102.75
ΖΕΥΓΑΡΙΑ BIDS ΠΟΥ ΕΠΙΝΑΝ MATCHED	18	16	23	22	19.75
ΠΟΣΟΣΤΟ COMFORT BID ΣΤΑ MATCHED ΖΕΥΓΑΡΙΑ (%)	30.56%	31.25%	34.78%	34.09%	32.67%
SOCIAL WELFARE (ΕΥΡΩ)	27.958	27.529	24.1	25.301	26.222

Πίνακας 5.18: Αποτελέσματα για ώρα 4-ελάχιστο net load υπάρχουν και προσφορές με τη μέθοδο διαχείρισης φορτίου)

ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΩΡΑ 12 (ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ) BIDS ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΙ COMFORT BIDS				
4.91					
ΣΥΝΟΛΟ BIDS	ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ BID				
18 (4 ΚΑΝΟΝΙΚΑ ΚΑΙ 14 COMFORT)	HIGHEST SOCIAL WELFARE	LARGEST QUANTITY	LOWEST SOCIAL WELFARE	SMALLEST QUANTITY	AVERAGE
ΙΣΧΥΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΕΤΑΙ (MW)	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266
ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΣΧΥΣ (%)	5.42%	5.42%	5.42%	5.42%	5.42%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ (%)	50.00%	50.00%	50.00%	75.00%	56.25%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ COMFORT BIDS (%)	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS (%)	11.11%	11.11%	11.11%	16.67%	12.50%
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	20	20	20	18	19.5
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ MARKET	276	276	271	261	271
ΖΕΥΓΑΡΙΑ BIDS ΠΟΥ ΕΠΙΝΑΝ MATCHED	4	4	4	5	4.25
ΠΟΣΟΣΤΟ COMFORT BID ΣΤΑ MATCHED ΖΕΥΓΑΡΙΑ (%)	75.00%	75.00%	75.00%	70.00%	73.75%
SOCIAL WELFARE (ΕΥΡΩ)	0.521	0.401	0.3654	0.401	0.422

Πίνακας 5.19: Αποτελέσματα για ώρα 12-μέγιστο φορτίο υπάρχουν και προσφορές με τη μέθοδο διαχείρισης φορτίου)

ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΩΡΑ 13 (ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ) BIDS ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΙ COMFORT BIDS				
5.15					
ΣΥΝΟΛΟ BIDS	ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ BID				
27 (13 ΚΑΝΟΝΙΚΑ ΚΑΙ 14 COMFORT)	HIGHEST SOCIAL WELFARE	LARGEST QUANTITY	LOWEST SOCIAL WELFARE	SMALLEST QUANTITY	AVERAGE
ΙΣΧΥΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΕΤΑΙ (MW)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΣΧΥΣ (%)	13.59%	13.59%	13.59%	13.59%	13.59%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ (%)	84.62%	69.23%	69.23%	100.00%	80.77%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ COMFORT BIDS (%)	14.29%	7.14%	7.14%	7.14%	8.93%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS (%)	48.15%	37.04%	37.04%	51.85%	43.52%
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	0	0	0	0	0
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ MARKET	68	76	76	91	77.75
ΖΕΥΓΑΡΙΑ BIDS ΠΟΥ ΕΠΙΝΑΝ MATCHED	13	9	10	14	11.5
ΠΟΣΟΣΤΟ COMFORT BID ΣΤΑ MATCHED ΖΕΥΓΑΡΙΑ (%)	34.62%	33.33%	45.00%	25.00%	34.49%
SOCIAL WELFARE (ΕΥΡΩ)	5.027	3.289	2.176	4.006	3.6245

Πίνακας 5.20: Αποτελέσματα για ώρα 13-μέγιστη παραγωγή υπάρχουν και προσφορές με τη μέθοδο διαχείρισης φορτίου)

ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΩΡΑ 19 (ΜΕΓΙΣΤΟ NET LOAD) BIDS ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΙ COMFORT BIDS				
6.2					
ΣΥΝΟΛΟ BIDS	ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ BID				
28 (14 ΚΑΝΟΝΙΚΑ ΚΑΙ 14 COMFORT)	HIGHEST SOCIAL WELFARE	LARGEST QUANTITY	LOWEST SOCIAL WELFARE	SMALLEST QUANTITY	AVERAGE
ΙΣΧΥΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΕΤΑΙ (MW)	1.694	1.96	1.99	1.99	1.9085
ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΣΧΥΣ (%)	27.32%	31.61%	32.10%	32.10%	30.78%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ (%)	78.57%	71.43%	71.43%	78.57%	75.00%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ COMFORT BIDS (%)	21.43%	35.71%	50.00%	50.00%	39.29%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS (%)	50.00%	53.57%	60.71%	64.29%	57.14%
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	20	11	5	9	11.25
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ MARKET	146	70	19	35	67.5
ΖΕΥΓΑΡΙΑ BIDS ΠΟΥ ΕΠΙΝΑΝ MATCHED	18	18	20	21	19.25
ΠΟΣΟΣΤΟ COMFORT BID ΣΤΑ MATCHED ΖΕΥΓΑΡΙΑ (%)	36.11%	44.44%	45.00%	42.86%	42.10%
SOCIAL WELFARE (ΕΥΡΩ)	17.198	13.678	11.534	12.282	13.673

Πίνακας 5.21: Αποτελέσματα για ώρα 19-μέγιστο net load υπάρχουν και προσφορές με τη μέθοδο διαχείρισης φορτίου)

ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΩΡΑ 21 (ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ) BIDS ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΙ COMFORT BIDS				
7.1					
ΣΥΝΟΛΟ BIDS	ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ BID				
28 (14 ΚΑΝΟΝΙΚΑ ΚΑΙ 14 COMFORT)	HIGHEST SOCIAL WELFARE	LARGEST QUANTITY	LOWEST SOCIAL WELFARE	SMALLEST QUANTITY	AVERAGE
ΙΣΧΥΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΕΤΑΙ (MW)	1.39	1.748	1.748	1.71	1.649
ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΣΧΥΣ (%)	19.58%	24.62%	24.62%	24.08%	23.23%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ (%)	64.29%	57.14%	57.14%	64.29%	60.71%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ COMFORT BIDS (%)	14.29%	35.71%	35.71%	28.57%	28.57%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS (%)	39.29%	46.43%	46.43%	46.43%	44.64%
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	7	7	7	12	8.25
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ MARKET	227	164	164	284	209.75
ΖΕΥΓΑΡΙΑ BIDS ΠΟΥ ΕΠΙΝΑΝ MATCHED	13	15	15	15	14.5
ΠΟΣΟΣΤΟ COMFORT BID ΣΤΑ MATCHED ΖΕΥΓΑΡΙΑ (%)	11.54%	16.67%	16.67%	16.67%	15.38%
SOCIAL WELFARE (ΕΥΡΩ)	8.702	6.738	5.842	7.238	7.13

Πίνακας 5.22: Αποτελέσματα για ώρα 21-ελάχιστη παραγωγή υπάρχουν και προσφορές με τη μέθοδο διαχείρισης φορτίου)

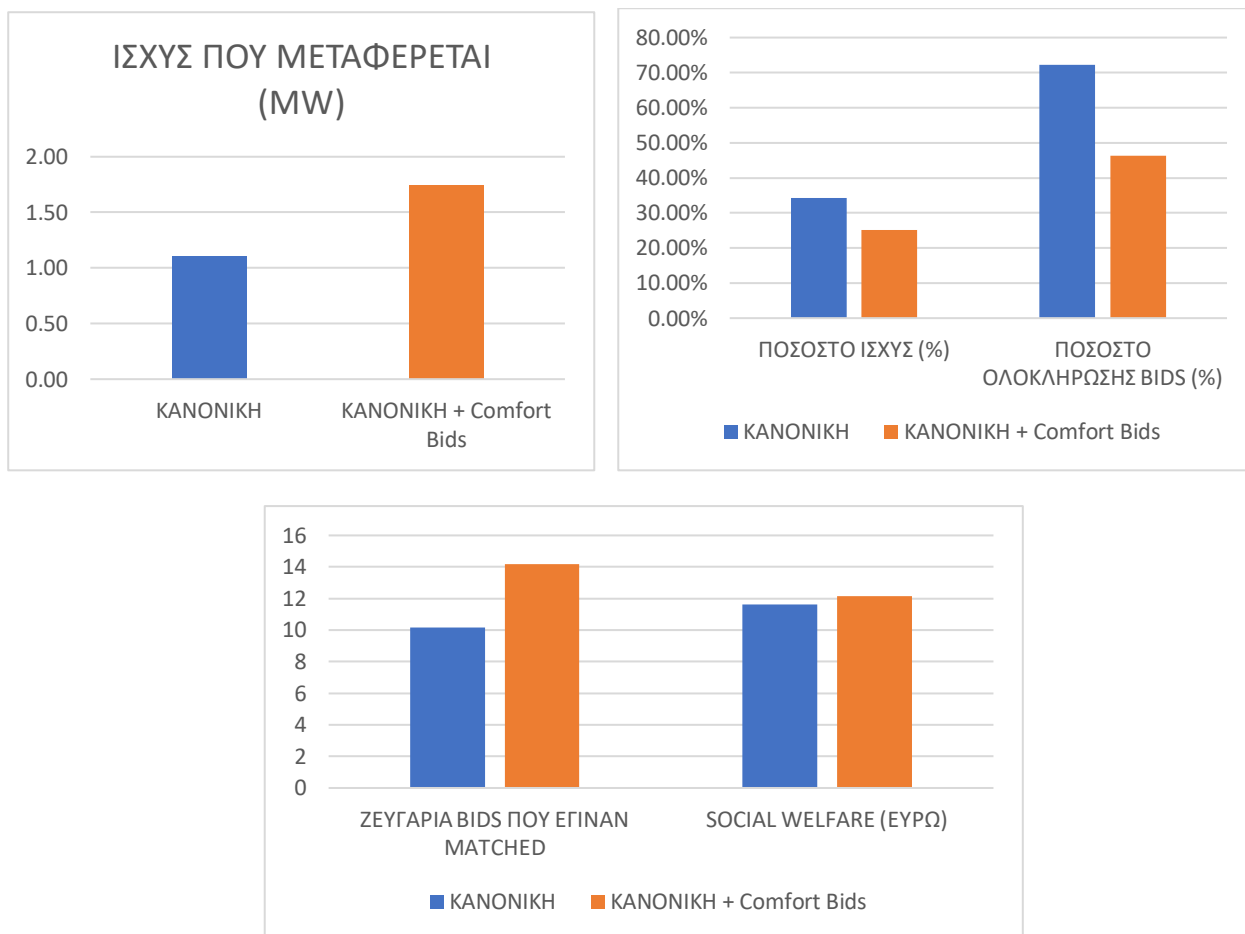
	ΜΕΣΟΙ ΟΡΟΙ ΓΙΑ BIDS ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΙ COMFORT BIDS				
	ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ BID				
	HIGHEST SOCIAL WELFARE	LARGEST QUANTITY	LOWEST SOCIAL WELFARE	SMALLEST QUANTITY	AVERAGE
ΙΣΧΥΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΕΤΑΙ (MW)	1.613	1.744	1.832	1.792	1.745
ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΣΧΥΣ (%)	23.38%	25.18%	26.39%	25.91%	25.22%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ (%)	64.10%	69.87%	67.49%	80.36%	70.46%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ COMFORT BIDS (%)	17.86%	22.62%	36.90%	34.52%	27.98%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ BIDS (%)	38.45%	43.74%	49.69%	53.68%	46.39%
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	10.00	7.50	5.83	7.67	8
ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ BID ΛΟΓΩ ΤΟΥ MARKET	195.50	152.83	128.83	150.17	157
ΖΕΥΓΑΡΙΑ BIDS ΠΟΥ ΕΠΙΝΑΝ MATCHED	13.167	12.833	14.833	15.833	14.167
ΠΟΣΟΣΤΟ COMFORT BID ΣΤΑ MATCHED ΖΕΥΓΑΡΙΑ (%)	35.15%	37.34%	41.47%	36.53%	37.62%
SOCIAL WELFARE (ΕΥΡΩ)	14.137	12.483	10.493	11.506	12.155

Πίνακας 5.23: Αποτελέσματα των μέσων όρων για κάθε μέθοδο επιλογής προσφοράς υπάρχουν και προσφορές με τη μέθοδο διαχείρισης φορτίου)

5.5 Σύγκριση των δύο μεθόδων

Η σύγκριση των δύο μεθόδων μπορεί να γίνει με παρατήρηση της στήλης average στους πίνακες 5.16 και 5.23. Μια μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο ειδών προσφορών είναι ότι στη περίπτωση που υπάρχουν και τα comfort bids η μεταφερόμενη ισχύς για κάθε είδος επιλογής δεν είναι ίδια. Αυτό ίσως να συμβαίνει επειδή υπάρχει μεγαλύτερο πλήθος προσφορών έτσι τα πιθανά ζευγάρια προσφορών που μπορούν να γίνουν matched είναι πολύ περισσότερα. Όπως ήταν αναμενόμενο η μεταφερόμενη ισχύς στη περίπτωση που υπάρχουν και τα comfort bids είναι μεγαλύτερη όμως το ποσοστό της μεταφερόμενης ισχύς είναι μικρότερο. Αυτό γίνεται διότι τα comfort bid γίνονται πιο δύσκολα matched ως αποτέλεσμα να μένουν αρκετά στο order book. Όσο αφορά το social welfare η διαφορά μεταξύ των δύο ειδών προσφορών είναι μικρή αφού η

προσθήκη των comfort bid δεν έφερε πολλά νέα matched bids. Η μεγαλύτερη διαφορά στα δύο είδη προσφορών παρατηρείται στην μη πραγματοποίηση προσφορών λόγω των κανόνων της αγοράς. Αυτό συμβαίνει γιατί βάσει των κανόνων που θέσαμε οι συμμετέχοντες στην αγορά ψάχνουν ένα εναλλακτικό τρόπο ανταλλαγής ενέργειας για να επωφελούνται περισσότερο οικονομικά. Αυτός ο τρόπος είναι ρυθμίζοντας το φορτίο ή τη παραγωγή. Όμως αφού τα comfort bid αποσκοπούν στο μεγαλύτερο κέρδος αναγκάζουν την αγορά να θέτει πιο αυστηρούς περιορισμούς για το ταίριασμα των προσφορών. Έτσι, ως αποτέλεσμα στη περίπτωση που υπάρχουν και τα comfort bids η αγορά απορρίπτει πολύ περισσότερες προσφορές.



Εικόνα 5.1: Γραφικές παραστάσεις για σύγκριση των δύο μεθόδων προσφορών

6 Συμπεράσματα

6.1 Σύνοψη

Αναφέραμε στην εισαγωγή μας ότι το θέμα των συνεχών αγορών ενέργειας και η διείσδυση των ΑΠΕ αποτελεί ένα πρόσφατο ζήτημα το οποίο ακόμα εξετάζεται και γίνονται τα πρώτα βήματα υλοποίησης του. Για να γίνει πραγματικότητα η λειτουργία των αποκεντρωμένων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας είναι κρίσιμης σημασίας η μελέτη και η εξέταση των αγορών αυτών. Η ιδέα που υπάρχει είναι ξεκάθαρη, κάθε καταναλωτής να μπορεί να γίνει εύκολα και παραγωγός, έχοντας έτσι την ευκαιρία να συμμετέχει στην αγορά ενέργειας. Στην αγορά αυτή μπορεί να συμμετέχει μόνος ή ακόμα και ως σύνολο ενός τοπικού δικτύου. Με αυτό τον τρόπο δίνεται δύναμη στους καταναλωτές, που πλέον γίνονται prosumers, και μπορούν να διαπραγματευτούν στην αγορά με βάση τα δικά τους συμφέροντα. Παράλληλα, οι αγορές ενέργειας φέρνουν πιο κοντά τη μετάβαση σε μια πιο φιλική παραγωγή ενέργειας. Ο λόγος είναι διότι, δίνεται το κίνητρο να εγκαθίστανται περισσότερες μονάδες ΑΠΕ.

Σε αυτή τη πτυχιακή εργασία κάναμε μια προσπάθεια υλοποίησης μιας συνεχούς αγοράς ενέργειας που θα παρέχει ευελιξία με τη βοήθεια των ΑΠΕ. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η περίπτωση όπου παρέχεται ευελιξία στο δίκτυο μέσω της αγοράς ενέργειας για τυχών ανακρίβειες στη πρόβλεψη ενέργειας. Ακόμα, εξετάστηκε και η περίπτωση των comfort bids τα οποία αποτελούν ακόμα ένα τρόπο αξιοποίησης των ΑΠΕ αλλά και του φορτίου για παροχή εισοδήματος. Εξετάστηκαν 4 προσεγγίσεις με τις οποίες μπορεί να επιλεγεί ένα bid μεταξύ όλων που ικανοποιούν την αγορά και τις συνθήκες του δικτύου. Ο έλεγχος του δικτύου έγινε με τη βοήθεια των συντελεστών PTDF, που μας επιτρέπουν τον γρήγορο υπολογισμό της αλλαγής ισχύος σε μια γραμμή για συγκεκριμένη έγχυση ισχύος σε ένα κόμβο.

6.2 Συμπεράσματα

Στο τρέξιμο της προσομοίωσης στο κεφάλαιο 5, είδαμε ότι είναι εφικτή η λειτουργία μιας συνεχούς αγοράς ενέργειας που λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς του δικτύου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ικανοποιείται ένα μεγάλο ποσοστό των προσφορών, αλλά το ποσοστό της δυνατής μεταφερόμενης ισχύς είναι σχετικά μικρό. Αυτό μας δείχνει ότι γίνονται αρκετές προσφορές, αλλά η ισχύς τους είναι σχετικά μικρή, ενώ συνήθως οι προσφορές με μεγαλύτερη ισχύ δεν ολοκληρώνονται. Έτσι, έγινε ευδιάκριτο ότι οι γραμμές του δικτύου πρέπει να υποστούν αναβάθμιση. Ο λόγος είναι ότι στις περιόδους που το δίκτυο είναι ήδη φορτισμένο, χάνεται η δυνατότητα μεταφοράς ενέργειας μέσω της τοπικής αγοράς ενέργειας. Στην εφαρμογή μας θεωρήσαμε γραμμές με όρια το 105% της ονομαστικής τους και φάνηκε ότι σε μερικές περιπτώσεις δεν ήταν αρκετό αυτό το περιθώριο. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η αγορά απορρίπτει αρκετά παραπάνω προσφορές σε σχέση με το δίκτυο. Ο λόγος είναι διότι ο αρχικός έλεγχος γίνεται στην αγορά και τους εκάστοτε κανόνες. Αν περάσει από τους ελέγχους της αγοράς τότε ελέγχεται από το δίκτυο.

Όσον αφορά τα comfort bids μπορούν να αποτελέσουν μια επιπλέον μορφή εισοδήματος για τους συμμετέχοντες στην αγορά. Όμως το ποσοστό πραγματοποίησης τους είναι πολύ μικρότερο. Ο λόγος είναι ότι τα comfort bids αποσκοπούν σε μεγαλύτερο κέρδος έτσι το δίκτυο κάνει πιο συγκεκριμένους ελέγχους

με αποτέλεσμα οι προσφορές που μπορούν να ταιριάσουν με την υπό έλεγχο προσφορά να μειώνονται αισθητά.

Κύριος στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η εισαγωγή ενός τρόπου επίλυσης της αγοράς ο οποίος διαφέρει από τις συνήθεις προσεγγίσεις. Αυτή η αγορά χαρακτηρίζεται από συνεχή λειτουργία ενώ ταυτόχρονα λαμβάνονται υπόψη και οι περιορισμοί του δικτύου. Για αυτό το λόγο δεν εστιάσαμε πάρα πολύ στα συμπεράσματα. Ο κώδικας που γράφτηκε για την παρούσα διπλωματική είναι διαθέσιμος online για περαιτέρω μελέτη και επέκταση του θέματος [44].

6.3 Μελλοντική επέκταση του θέματος

Το θέμα των τοπικών αγορών ενέργειας παρουσιάζουν ήδη αρκετό ενδιαφέρον και η εξέταση τους προβλέπεται ακόμη μεγαλύτερη στο άμεσο μέλλον αφού στόχος είναι η φυσική υλοποίηση τους. Αυτό διότι εξετάζονται όλο και αποδοτικότεροι, ασφαλέστεροι και καλύτεροι τρόποι υλοποίησης τους. Επέκταση αυτή της εργασίας μπορεί να γίνει κάνοντας ένα καλύτερο έλεγχο στο δίκτυο, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα της μέθοδο AC-OPF. Επιπλέον, μπορεί να γίνει μια συνεχή αγορά ενέργειας η οποία θα ανταλλάζει άεργο ισχύ μεταξύ των χρηστών. Ακόμα μπορεί να γίνεται προγραμματισμός των προσφορών για παράδειγμα μια προσφορά να διαβάζεται η ώρα 7 αλλά να πρέπει να πραγματοποιηθεί η ώρα 12. Επίσης, μπορεί η αγορά να επιτρέπει την ύπαρξη προσφορών που θα ισχύουν για πολλαπλές περιόδους εξέτασης της αγοράς. Όπως, για παράδειγμα ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο θα θέλει αρκετές ώρες για να φορτιστεί έτσι η προσφορά μπορεί να βρίσκεται στην αγορά για πολλαπλές ώρες. Σε αυτή την πτυχιακή εργασία αναφέραμε τα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την ασφαλή λειτουργία της αγοράς ενέργειας. Αυτό το θέμα μπορεί να εξεταστεί σε βάθος όπως και οι προσεγγίσεις που μπορούν να ακολουθηθούν για την επίτευξη μιας ασφαλής αγοράς που θα κάνει πραγματικότητα την peer-to-peer ανταλλαγή ενέργειας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟΥ

Γραμμές Δικτύου

Από κόμβο	Προς κόμβο	r (Ohm)	x (Ohm)	Όρια γραμμής (MW)
1	2	0	6.24E-10	16.22
2	3	0.0075	0.010002	7.86
3	4	0.007999	0.011	2.77
3	5	0.008997	0.018	3.24
5	6	0.003999	0.003999	1.39
2	7	0.011	0.011	5.32
7	8	0.007999	0.011	3.56
7	9	0.011	0.011	0.5
8	10	0.011	0.011	0.5
8	11	0.007999	0.011	1.59
2	12	0.011	0.011	4.71
12	13	0.008997	0.011998	0.92
12	14	0.007999	0.011	2.87
14	15	0.003999	0.003999	1.94

Φορτίο και Παραγωγή

Κόμβος	Ισχύς Φορτίου (MW)	Είδος Φορτίου	Αβεβαιότητα Φορτίου (%)	Ισχύς Παραγωγής (MW)	Είδος Παραγωγής	Αβεβαιότητα Παραγωγής (%)
1	-	-	-	15.45	Συμβατική	-
2	1.5	Οικιακό	10	0.75	Φ/Β	25
3	2	Οικιακό	10	1	Φ/Β	25
4	3	Οικιακό	10	1.5	Φ/Β	25
5	2	Οικιακό	10	1	Φ/Β	25
6	1.5	Οικιακό	10	0.75	Φ/Β	25
7	4	Βιομηχανικό	3	3.2	Α/Γ	20
8	5	Βιομηχανικό	3	4	Α/Γ	20
9	1	Βιομηχανικό	3	0.8	Α/Γ	20
10	0.6	Βιομηχανικό	3	0.48	Α/Γ	20
11	4.5	Βιομηχανικό	3	3.6	Α/Γ	20
12	1	Οικιακό	10	0.5	Φ/Β	25
13	1	Οικιακό	10	0.5	Φ/Β	25
14	1	Οικιακό	10	0.5	Φ/Β	25
15	2.1	Οικιακό	10	1.15	Φ/Β	25

Σημείωση:

Ο κόμβος 1 αποτελεί τον ζυγό αναφοράς. Θεωρητικά μπορεί να προσφέρει όση ενέργεια ζητηθεί από το δίκτυο μας. Η ισχύς παραγωγής του ζυγού 1 που θέσαμε είναι η μέγιστη που πρέπει να προσφέρει ο ζυγός 1 στις 6 ώρες τις οποίες εξετάζουμε. Επιπλέον, αφού κάθε ζυγός αντιστοιχεί σε ένα τοπικό δίκτυο η ονομαστική τάση σε κάθε κόμβο είναι 12.66 kV.

Πίνακας PTDF

Κ Γ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	0	-1.32E-23	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	-1.32E-23	0	-1.32E-23	-1.32E-23
3	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	-1.11E-16	-1.11E-16	-1	-1	-6.62E-24	0	-6.62E-24	0	0	0	-6.62E-24	0	0
5	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	3.31E-23	3.31E-23	3.31E-23	4.63E-23	4.63E-23	-1	-1	-1	-1	-1	3.31E-23	3.97E-23	3.31E-23	3.31E-23
7	0	2.65E-23	2.65E-23	2.65E-23	1.99E-23	1.99E-23	4.44E-16	-1	4.44E-16	-1	-1	2.65E-23	1.32E-23	2.65E-23	2.65E-23
8	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1
12	0	1.32E-23	1.32E-23	1.32E-23	1.32E-23	1.32E-23	1.32E-23	6.62E-24	1.32E-23	6.62E-24	6.62E-24	2.22E-16	-1	2.22E-16	2.22E-16
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1

Οι γραμμές του πίνακα αντιστοιχούν στην κάθε γραμμή του δικτύου ενώ οι στήλες αντιστοιχούν σε κάθε κόμβο του δικτύου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΛΙΣΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΦΟΡΩΝ ΕΥΕΛΙΞΙΑΣ

ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ- ΩΡΑ 3:

ID	Type	Cost	Quantity	Node	Fixed
14	Down	53.6	0.25	15	FALSE
2	Up	63.6	0.47	3	TRUE
F6	Down	57.2	0.26	7	FALSE
F2	Down	66.3	0.1	3	FALSE
F1	Up	41.8	0.14	2	FALSE
F8	Down	49.4	0.15	9	FALSE
F13	Down	56.3	0.05	14	FALSE
F14	Up	51.2	0.22	15	FALSE
F10	Down	44.7	0.6	11	FALSE
12	Up	57.7	0.25	13	FALSE
F12	Down	62.3	0.06	13	FALSE
3	Down	48.7	0.33	4	FALSE
10	Down	41.5	0.76	11	FALSE
F3	Down	52.5	0.27	4	FALSE
11	Down	49.6	0.12	12	FALSE
5	Down	46.8	0.33	6	FALSE
9	Down	50.2	0.05	10	FALSE
F11	Down	54.2	0.14	12	FALSE
6	Up	52.8	0.96	7	FALSE
7	Up	51.8	1.19	8	FALSE
1	Down	43.9	0.24	2	FALSE
F7	Down	54.3	0.25	8	FALSE
13	Up	51.4	0.25	14	FALSE
4	Up	50.1	0.49	5	FALSE
F4	Up	47.6	0.13	5	FALSE
F5	Up	43	0.26	6	FALSE
8	Down	47.1	0.11	9	TRUE
F9	Down	53.9	0.04	10	FALSE

Πίνακας 5.4: Προσφορές ευελιξίας για η ώρα 3 όπου υπάρχει ελάχιστο φορτίο

ΕΛΑΧΙΣΤΟ NET LOAD- ΩΡΑ 4:

ID	Type	Cost	Quantity	Node	Fixed
1	Up	59.1	0.36	2	FALSE
F13	Down	56.9	0.13	14	FALSE
F8	Down	64.8	0.07	9	FALSE
F2	Up	49.9	0.15	3	FALSE
2	Up	54.7	0.49	3	TRUE
14	Down	47.6	0.16	15	FALSE
F3	Up	36.8	0.2	4	FALSE
3	Down	41.6	0.08	4	FALSE
F5	Up	52.1	0.15	6	FALSE
5	Down	54.5	0.07	6	FALSE
8	Up	60.9	0.23	9	TRUE
9	Up	54.7	0.14	10	FALSE
13	Down	54.3	0.04	14	FALSE
F6	Down	47.1	0.55	7	FALSE
6	Down	44.1	0.7	7	FALSE
F9	Down	57	0.04	10	FALSE
F1	Down	63.9	0.08	2	FALSE
F10	Down	67.3	0.23	11	FALSE
10	Up	64.4	1.04	11	FALSE
F14	Down	52.6	0.27	15	FALSE
F7	Down	54.3	0.58	8	FALSE
7	Down	49.8	0.04	8	FALSE
F12	Down	46.5	0.1	13	FALSE
4	Up	51.4	0.48	5	FALSE
F4	Up	47.6	0.1	5	FALSE
F11	Down	53.7	0.13	12	FALSE
12	Down	41.9	0.11	13	FALSE
11	Down	50.5	0.16	12	FALSE

Πίνακας 5.5: Προσφορές ευελιξίας για η ώρα 4 όπου υπάρχει ελάχιστο net load

ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ- ΩΡΑ 12:

ID	Type	Cost	Quantity	Node	Fixed
F2	Up	59.6	0.32	3	FALSE
F3	Up	53.5	0.45	4	FALSE
F13	Up	58.8	0.2	14	FALSE
11	Up	61.4	0.01	12	FALSE
F6	Down	68.1	0.68	7	FALSE
F1	Up	49.4	0.21	2	FALSE
F7	Down	60.7	0.9	8	FALSE
F11	Down	66.1	0.18	12	FALSE
F4	Up	61.1	0.36	5	FALSE
F10	Down	60.5	0.49	11	FALSE
F9	Down	61.1	0.09	10	FALSE
F12	Up	53.2	0.11	13	FALSE
F5	Up	58.4	0.29	6	FALSE
14	Up	57.8	0.02	15	FALSE
F14	Up	53.8	0.39	15	FALSE
7	Up	56.2	0.02	8	FALSE
F8	Down	55.6	0.16	9	FALSE
1	Up	52.7	0.03	2	FALSE

Πίνακας 5.6: Προσφορές ευελιξίας για η ώρα 12 όπου υπάρχει μέγιστο φορτίο

Εδώ είναι εμφανές ότι υπάρχουν πιο λίγες προσφορές σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις. Ο λόγος είναι διότι οι συντελεστές του φορτίου είναι και οι δύο ίση με μονάδα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η πρόβλεψη του φορτίου να ξεπερνάει την ονομαστική, πράγμα που δεν επιτρέπεται για αυτό το λόγο θέσαμε τον περιορισμό όταν γίνεται αυτό η ισχύς να γίνεται ίση με την ονομαστική. Αφού η ισχύς είναι ίση με την ονομαστική τότε η εκτίμηση της ισχύς είναι ακριβής και δεν υπάρχει ανάγκη για δημιουργία προσφοράς.

ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ- ΩΡΑ 13:

ID	Type	Cost	Quantity	Node	Fixed
F5	Down	67.5	0.14	6	FALSE
F9	Down	59.3	0.06	10	FALSE
F14	Down	59.7	0.23	15	FALSE
13	Down	41.5	0.03	14	FALSE
1	Down	51.2	0.04	2	FALSE
F1	Down	55.2	0.22	2	FALSE
F3	Down	51.5	0.39	4	FALSE
11	Up	61.1	0.04	12	FALSE
F11	Down	65.1	0.15	12	FALSE
4	Down	51.6	0.06	5	FALSE
8	Down	44.2	0.01	9	TRUE
2	Up	56.8	0.1	3	TRUE
14	Up	56.3	0.09	15	FALSE
3	Down	48.3	0.09	4	FALSE
F12	Down	50.6	0.13	13	FALSE
10	Up	64.1	0.06	11	FALSE
9	Up	55.5	0.01	10	FALSE
F4	Down	55.6	0.34	5	FALSE
F8	Down	49	0.16	9	FALSE
F10	Down	67.9	0.75	11	FALSE
F2	Up	54.7	0.28	3	FALSE
F7	Down	52.4	0.95	8	FALSE
7	Down	50.1	0.05	8	FALSE
5	Up	63.5	0.06	6	FALSE
F6	Down	63	0.47	7	FALSE
6	Up	59.9	0.06	7	FALSE
F13	Up	39.5	0.18	14	FALSE

Πίνακας 5.7: Προσφορές ευελιξίας για η ώρα 13 όπου υπάρχει μέγιστη παραγωγή

ΜΕΓΙΣΤΟ NET LOAD- ΩΡΑ 19:

ID	Type	Cost	Quantity	Node	Fixed
2	Down	50.9	0.03	3	TRUE
10	Up	56.9	0.53	11	FALSE
F1	Up	55.8	0.2	2	FALSE
14	Down	45.4	0.16	15	FALSE
7	Down	52.2	0.19	8	FALSE
F12	Up	47.5	0.13	13	FALSE
1	Up	57.9	0.15	2	FALSE
6	Down	40.5	0.23	7	FALSE
F3	Down	44.7	0.39	4	FALSE
F8	Down	57.1	0.18	9	FALSE
F9	Down	59.1	0.07	10	FALSE
F14	Down	49.5	0.27	15	FALSE
9	Up	55.2	0.07	10	FALSE
F10	Down	61.6	0.41	11	FALSE
11	Up	64.9	0.1	12	FALSE
8	Down	54.3	0.02	9	TRUE
4	Down	47.6	0.2	5	FALSE
5	Up	60.6	0.15	6	FALSE
F7	Down	56.1	0.68	8	FALSE
F13	Up	49.1	0.16	14	FALSE
F6	Down	42.7	0.59	7	FALSE
F4	Down	49.7	0.26	5	FALSE
F5	Up	56	0.24	6	FALSE
12	Down	50.5	0.03	13	FALSE
3	Down	42.2	0.3	4	FALSE
F2	Up	46.1	0.26	3	FALSE
F11	Down	68.4	0.1	12	FALSE
13	Down	52.3	0.1	14	FALSE

Πίνακας 5.8: Προσφορές ευελιξίας για η ώρα 19 όπου υπάρχει μέγιστο net load

ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ- ΩΡΑ 21:

ID	Type	Cost	Quantity	Node	Fixed
F13	Up	47.9	0.1	14	FALSE
12	Down	53.2	0.05	13	FALSE
11	Up	56.7	0.15	12	FALSE
14	Down	53.6	0.23	15	FALSE
F11	Down	61.7	0.07	12	FALSE
8	Up	61.6	0.21	9	TRUE
2	Down	48.9	0.08	3	TRUE
1	Up	51.1	0.22	2	FALSE
9	Up	59.6	0.12	10	FALSE
13	Down	52	0.07	14	FALSE
F2	Up	46.6	0.26	3	FALSE
F1	Up	47.7	0.14	2	FALSE
3	Down	54.2	0.2	4	FALSE
6	Up	63.4	0.82	7	FALSE
4	Down	52.2	0.03	5	FALSE
F5	Up	47	0.16	6	FALSE
7	Up	57.9	1.03	8	FALSE
F14	Up	50.7	0.23	15	FALSE
10	Up	55.1	0.91	11	FALSE
F6	Down	65.4	0.33	7	FALSE
F10	Down	59.4	0.3	11	FALSE
F8	Down	64	0.06	9	FALSE
F4	Down	54.9	0.32	5	FALSE
F7	Down	62.4	0.36	8	FALSE
5	Down	51.7	0.1	6	FALSE
F3	Up	52.1	0.35	4	FALSE
F9	Down	62.1	0.03	10	FALSE
F12	Up	50.6	0.17	13	FALSE

Πίνακας 5.9: Προσφορές ευελιξίας για η ώρα 21 όπου υπάρχει ελάχιστη παραγωγή

Βιβλιογραφία

- [1] Prat, Eléa & Herre, Lars & Kazempour, Jalal & Chatzivasileiadis, Spyros. (2020). "Design of a Continuous Local Flexibility Market with Network Constraints."
- [2] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, "Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας", Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006.
- [3] Esteban A. Soto, Lisa B. Bosman, Ebisa Wollega, Walter D. Leon-Salas, Peer-to-peer energy trading: A review of the literature, Applied Energy, Volume 283
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116268>
- [4] Prabha Kundur, "Ευστάθεια και Έλεγχος Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας", Εκδόσεις Τζιόλα, 2019
- [5] João Inácio Da Silva Filho, Alexandre Shozo Onuki, Luís Fernando Pompeo Ferrara, Maurício Conceição Mário, José de Melo Camargo, Dorotéa Vilanova Garcia, Marcos Rosa dos Santos and Alexandre Rocco (December 5th 2012). Electric Power System Operation Decision Support by Expert System Built with Paraconsistent Annotated Logic, Advances in Expert Systems, Petrica Vizureanu, IntechOpen, DOI: 10.5772/51379
- [6] Μ. Π. Παπαδόπουλος, Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. ΕΜΠ, Αθήνα, 1994.
- [7] Antunes, Carlos & Barrico, Carlos & Gomes, Alvaro & Pires, Dulce & Martins, Antonio. (2021). On the Use of Evolutionary Algorithms for Reactive Power Compensation in Electrical Distribution Networks Experiments on a Case Study.
- [8] Νικόλαος Χ. Κουτσούκης, "Βελτιστοποίηση Λειτουργίας και Προγραμματισμού Ανάπτυξης Ενεργών Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας," Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Ιούνιος 2019.
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_grid
- [10] Π.Σ. Γεωργιάκης, "Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας", Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα 2015.
- [11] Carmen Lucia Tancredo Borges, An overview of reliability models and methods for distribution systems with renewable energy distributed generation, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16, Issue 6, 2012, Pages 4008-4015, ISSN 1364-0321
- [12] Balakrishnan, Muruganantham & Gnanadass, Ramachandran & Padhy, N.P.. (2017). Challenges with renewable energy sources and storage in practical distribution systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 73. 125-134.
- [13] Omar Ellabban, Haitham Abu-Rub, Frede Blaabjerg, Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 39, 2014, Pages 748-764, ISSN 1364-0321
- [14] Wilas, Janusz & Maśniak, Robert & Daniszewski, Piotr & Jadczyk, Paula. (2016). Renewable energy sources today and tomorrow. World Scientific News. 60. 103-112.
- [15] <https://think.ing.com/articles/wind-and-solar-get-increasingly-cheaper>
- [16] Ehsanul Kabir, Pawan Kumar, Sandeep Kumar, Adedeji A. Adelodun, Ki-Hyun Kim, Solar energy: Potential and future prospects, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 82, Part 1, 2018, Pages 894-900, ISSN 1364-0321
- [17] F. Teotia and R. Bhakar, "Local energy markets: Concept, design and operation," 2016 National Power Systems Conference (NPSC), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/NPSC.2016.7858975.
- [18] N. Savvopoulos, T. Konstantinou and N. Hatziargyriou, "TSO-DSO Coordination in Decentralized Ancillary Services Markets," 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), 2019, pp. 1-6
- [19] N. Savvopoulos and N. Hatziargyriou, "Estimating Operational Flexibility from Active Distribution Grids," 2020 17th International Conference on the European Energy Market (EEM), 2020, pp. 1-6
- [20] N. Savvopoulos, C. Y. Evrenosoglu, T. Konstantinou, T. Demiray and N. Hatziargyriou, "Contribution of Residential PV and BESS to the Operational Flexibility at the TSO-DSO Interface" 2021 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), 2021, pp. 1-6
- [21] Gärttner, Johannes & Mengelkamp, Esther & Weinhardt, Christof. (2018). Decentralizing Energy Systems Through Local Energy Markets: The LAMP-Project.
- [22] Maubach, K.-D.: 2050. Energiewende. In: Energiewende: Wege zu einer bezahlbaren Energieversorgung, pp. 167–176. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden (2014)
- [23] Frede Hvelplund, Renewable energy and the need for local energy markets, Energy, Volume 31, Issue 13, 2006, Pages 2293-2302, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.01.016>

- [24] <https://www.nordpoolgroup.com>
- [25] https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en
- [26] https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en
- [27] <https://www.infiniteenergy.com.au/peer-to-peer-energy-trading/>
- [28] W. Tushar, T. K. Saha, C. Yuen, D. Smith and H. V. Poor, "Peer-to-Peer Trading in Electricity Networks: An Overview," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 4, pp. 3185-3200, July 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.2969657.
- [29] Huneault, M., and F.D. Galiana. "A Survey of the Optimal Power Flow Literature." *IEEE Transactions on Power Systems* 6.2 (1991): 762–770. Web.
- [30] Momoh, J.A. & Koessler, R.J. & Bond, M.S. & Stott, Brian & DI, Sun & Papalexopoulos, Alex & Ristanovic, P.. (1997). Challenges to optimal power flow. *Power Systems*, *IEEE Transactions on*. 12. 444 - 455. 10.1109/59.575768.
- [31] S. Chatzivasileiadis, *Optimization in Modern Power Systems. Lecture Notes*, Technical University of Denmark (DTU), Copenhagen, 2018
- [32] T. AlSkaif and G. van Leeuwen, "Decentralized Optimal Power Flow in Distribution Networks Using Blockchain," 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/SEST.2019.8849153.
- [33] I. Murzakhanov, E. Gryazina and M. Farrokhifar, "Decentralized Optimal Power Flow Under Security Constraints," 2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/REEPE.2019.8708749.
- [34] Carsten Heinrich, Charalampos Ziras, Angeliki L.A. Syri, Henrik W. Bindner, *EcoGrid 2.0: A large-scale field trial of a local flexibility market*, *Applied Energy*, Volume 261, 2020, 114399, ISSN 0306-2619
- [35] C. A. Correa-Florez, A. Michiorri and G. Kariniotakis, "Optimal Participation of Residential Aggregators in Energy and Local Flexibility Markets," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 2, pp. 1644-1656, March 2020, doi: 10.1109/TSG.2019.2941687.
- [36] T. Morstyn, A. Teytelboym, and M. D. McCulloch, "Designing decentralized markets for distribution system flexibility," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 1–12, 2019.
- [37] A. Alanazi, H. Lotfi, and A. Khodaei, "Market clearing in microgrid integrated active distribution networks," *Electric Power Systems Re-search*, vol. 183, p. 106263, 2020.
- [38] S. S. Torbaghan et al., "Optimal flexibility dispatch problem using second-order cone relaxation of AC power flows," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 98–108, 2020.
- [39] C. Ziras, C. Heinrich, and H. W. Bindner, "Why baselines are not suited for local flexibility markets," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, p. 110357, 2021.
- [40] P. Olivella-Rosell et al., "Optimization problem for meeting distribution system operator requests in local flexibility markets with distributed energy resources," *Applied Energy*, vol. 210, pp. 881–895, 2018.
- [41] T. Morstyn, A. Teytelboym, and M. D. McCulloch, "Bilateral Contract Networks for Peer-to-Peer Energy Trading," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. PP, no. 99, 2018.
- [42] E. Sorin, L. Bobo, and P. Pinson, "Consensus-Based Approach to Peer-to-Peer Electricity Markets with Product Differentiation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PP, no. 99, 2018.
- [43] E. Mengelkamp, J. G"arttner, K. Rock, S. Kessler, L. Orsini, and C. Weinhardt, "Designing Microgrid Energy Markets. A Case Study: The Brooklyn Microgrid," *Applied Energy*, vol. 210, pp. 870–880, 2017.
- [44] <https://github.com/steliosiv/Continuous-Energy-Market-for-flexibility-using-renewable-energy>