



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Αποκεντρωμένος έλεγχος για την αποφυγή υπερτάσεων με χρήση  
κατανεμημένων αλγορίθμων με περικοπή φωτοβολταϊκής  
παραγωγής**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Παυλάκος Νικόλαος-Γεώργιος**

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Αποκεντρωμένος έλεγχος για την αποφυγή υπερτάσεων με χρήση  
κατανεμημένων αλγορίθμων με περικοπή φωτοβολταϊκής παραγωγής**

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παυλάκος Νικόλαος-Γεώργιος

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Χατζηαργυρίου Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .....

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

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

.....  
Γεωργιάκης Παύλος  
Επίκουρος Καθηγητής  
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017



.....

Παυλάκος Νικόλαος-Γεώργιος

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

Copyright © Παυλάκος Νικόλαος-Γεώργιος, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. Allrights 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 σκόπιμη 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.



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αφιερώνεται στην οικογένεια μου για τη στήριξη που μου παρείχαν σε όλα αυτά τα χρόνια σπουδών μου. Ευχαριστώ τον Κ. Χατζηαργυρίου που αποτέλεσε τον επιβλέπων καθηγητή στη διπλωματική. Θερμές ευχαριστίες και στην Κυριακή (Κέλλυ) Μαυρογένου η οποία με την καθοδήγηση της με βοήθησε στην εκπόνηση της διπλωματικής.





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εισάγεται μία πρόταση αντιμετώπισης υπερτάσεων σε οικίες με φωτοβολταϊκά. Ως εργαλεία επίλυσης θα χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος διπλής επανάληψης και σε αυτόν εμπεριέχονται ο αλγόριθμος συναίνεσης και ο αλγόριθμος κατανομής πόρων. Όλοι οι προαναφερθέντες αλγόριθμοι θα αναπτυχθούν στο πρόγραμμα Matlab σε συνδυασμό με το υπολογιστικό εργαλείο Matpower με στόχο τον προσδιορισμό της περικοπής της παραγομένης ισχύος των φωτοβολταϊκών. Για την εφαρμογή και την αξιολόγηση των αλγορίθμων χρησιμοποιήθηκε ένα δίκτυο χαμηλής τάσης με παραλλαγές στις τηλεπικοινωνιακές διασυνδέσεις του ώστε να εξεταστεί αν είναι αξιόπιστο για κάθε σενάριο τηλεπικοινωνιακής σύνδεσης του. Στόχος της διπλωματικής είναι μέσα από την εφαρμογή του αλγορίθμου διπλής επανάληψης να βρεθεί η απαιτούμενη ποσότητα ισχύος που πρέπει να περικοπεί σε ώρες με υψηλή φωτοβολταϊκή παραγωγή ώστε τελικά το δίκτυο να λειτουργεί σε φυσιολογικά επίπεδα τάσεων. Τέλος εκτιμώνται τα αποτελέσματα που λαμβάνονται και αξιολογείται η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου διπλής επανάληψης στην περικοπή ισχύος των φωτοβολταϊκών.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Αλγόριθμος διπλής επανάληψης, αλγόριθμος συναίνεσης, αλγόριθμος κατανομής πόρων, περικοπή ισχύος φωτοβολταϊκών, ευφυή δίκτυα.



## ABSTRACT

The current thesis introduces an approach for dealing with overvoltages in houses with photovoltaics. The consensus and resource coordination algorithm will be included in the double iteration algorithm, which will be used as tools for implementation of this project. All the previous algorithms were developed in Matlab and in combination with Matpower toolbox were used in order to succeed in active power curtailment of photovoltaics to avoid overvoltages. For the evaluation of the algorithms, a low voltage network with different telecommunication connections in each scenario was used for proving the reliability of the proposal. Scope of this thesis is to define the energy curtailed in order to ensure the normal operation of the network. Afterwards with the implementation of double iteration algorithm the necessary curtailed power will be calculated in order to bring voltages within safe limits. Finally, an assessment of power curtailment results is done and the efficiency of double iteration algorithm is being considered.

## KEYWORDS

Double iteration algorithm, consensus algorithm, resource coordination algorithm, active power curtailment photovoltaics, smart grids.



## Πίνακας περιεχομένων

<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ</b>	<b>15</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b>	<b>17</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ</b>	<b>19</b>
<b>ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ – ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ</b>	<b>21</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>23</b>
<b>1. Δίκτυα διανομής</b>	<b>27</b>
1.1 Δίκτυα διανομής ΧΤ	27
1.2 Δίκτυα διανομής ΜΤ	28
1.3 Ποιότητα και αξιοπιστία δικτύων διανομής	30
1.4 Διεσπαρμένη παραγωγή στη ΧΤ&ΜΤ	32
1.5 Έξυπνα δίκτυα	36
1.6 Ανάλυση Ροής Φορτίου	43
<b>2. Καταναμημένοι αλγόριθμοι</b>	<b>53</b>
2.1 Θεωρία γράφων	53
2.2 Προβλήματα βελτιστοποίησης	54
2.3 Αλγόριθμοι κατανομής πόρων	60
2.4 Αλγόριθμοι συναίνεσης	62
2.5 Αλγόριθμος διπλής επανάληψης	65
<b>3. Περιγραφή προβλήματος - Μεθοδολογία</b>	<b>67</b>
<b>4. Εφαρμογή σε δίκτυο ΧΤ</b>	<b>73</b>
4.1 Περιγραφή δικτύου ΧΤ	73
4.2 Χωρίς απώλεια σύνδεσης	76
4.3 Με απώλεια σύνδεσης οικιών	79
4.4 Δίκτυο με συνδεσμολογία δύο αστέρων	83
4.5 Δίκτυο με συνδεσμολογία δύο αστέρων και απώλεια επικοινωνίας	87
4.6 Δίκτυο με κεντρικούς κόμβους	92
<b>5. Συμπεράσματα</b>	<b>97</b>
<b>6. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα</b>	<b>99</b>
<b>7. Βιβλιογραφία</b>	<b>101</b>



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά γραμμών δικτύου φωτοβολταϊκών .....	73
Πίνακας 4.2 Κατανάλωση και παραγωγή ισχύος ανά οικία .....	74
Πίνακας 4.3 Ζυγοί με δυνατότητα περικοπής ισχύος .....	76
Πίνακας 4.4 Αριθμός γειτόνων ανά οικία .....	77
Πίνακας 4.5 Ισχύς που μπορεί να κοπεί.....	77
Πίνακας 4.6 Συνολική ισχύς που μπορεί να κοπεί ανά ώρα.....	77
Πίνακας 4.7 Η ισχύς για κάθε φωτοβολταϊκό ανά ώρα της κάθε οικίας-φωτοβολταϊκού που πρέπει να μειωθεί .....	78
Πίνακας 4.8 Αριθμός γειτόνων ανά οικία (με απώλεια σύνδεσης οικιών 5,6).....	80
Πίνακας 4.9 Ισχύς που μπορεί να περικοπεί (με απώλεια σύνδεσης οικιών 5,6).....	80
Πίνακας 4.10 Συνολική ισχύς που μπορεί να περικοπεί ανά ώρα (με απώλεια σύνδεσης οικιών 5,6).....	80
Πίνακας 4.11 Η ισχύς ανά ώρα της κάθε οικίας-φωτοβολταϊκού που πρέπει να μειωθούν (με απώλεια σύνδεσης οικιών 5,6).....	81
Πίνακας 4.12 Αριθμός γειτόνων ανά οικία (με συνδεσμολογία αστέρα) .....	84
Πίνακας 4.13 Ισχύς που μπορεί να περικοπεί (με συνδεσμολογία αστέρα) .....	85
Πίνακας 4.14 Συνολική ισχύς που μπορεί να περικοπεί ανά ώρα (με συνδεσμολογία αστέρα) .....	85
Πίνακας 4.15 Η ισχύς ανά ώρα της κάθε οικίας-φωτοβολταϊκού που πρέπει να μειωθούν (με συνδεσμολογία αστέρα) .....	85
Πίνακας 4.16 Αριθμός γειτόνων ανά οικία (με συνδεσμολογία αστέρα και απώλεια σύνδεσης μεταξύ των οικιών 5-7) .....	88
Πίνακας 4.17 Ισχύς που μπορεί να περικοπεί (με συνδεσμολογία αστέρα και απώλεια σύνδεσης μεταξύ των οικιών 5-7).....	89
Πίνακας 4.18 Συνολική ισχύς που μπορεί να περικοπεί (με συνδεσμολογία αστέρα και απώλεια σύνδεσης μεταξύ των οικιών 5-7) .....	89
Πίνακας 4.19 Η ισχύς ανά ώρα της κάθε οικίας-φωτοβολταϊκού που πρέπει να μειωθούν ...	89
Πίνακας 4.20 Αριθμός γειτόνων ανά οικία σε συνδεσμολογία με κεντρικούς κόμβους .....	92
Πίνακας 4.21 Ισχύς που μπορεί να περικοπεί σε συνδεσμολογία με κεντρικούς κόμβους ....	93
Πίνακας 4.22 Η ισχύς ανά ώρα της κάθε οικίας-φωτοβολταϊκού που πρέπει να μειωθούν σε συνδεσμολογία με κεντρικούς κόμβους.....	93
Πίνακας 4.23 Η ισχύς ανά ώρα της κάθε οικίας-φωτοβολταϊκού που πρέπει να μειωθούν σε συνδεσμολογία με κεντρικούς κόμβους.....	94





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.1 Γραφική ροή επίλυσης αλγορίθμου .....	71
Σχήμα 4.1 Κυματομορφές φωτοβολταϊκών και κατανάλωσης.....	74
Σχήμα 4.2 Κυματομορφή τάσης πριν την εφαρμογή του αλγόριθμου διπλής επανάληψης ...	75
Σχήμα 4.3 Περικοπής ισχύος στις 12μ.μ.....	78
Σχήμα 4.4 Κυματομορφή της τάσης μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου διπλής επανάληψης .....	79
Σχήμα 4.5 Περικοπή ισχύος ανά οικία (με απώλεια σύνδεσης οικιών 5,6).....	82
Σχήμα 4.6 Κυματομορφή της τάσης μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου διπλής επανάληψης (με απώλεια σύνδεσης οικιών 5,6).....	83
Σχήμα 4.7 Περικοπή ισχύος ανά οικία στις 12μ.μ. (με συνδεσμολογία αστέρα) .....	86
Σχήμα 4.8 Κυματομορφή της τάσης μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου διπλής επανάληψης .....	87
Σχήμα 4.9 Περικοπή ισχύος ανά οικία στις 12μ.μ. (με συνδεσμολογία αστέρα και απώλεια επικοινωνίας 5-7) .....	90
Σχήμα 4.10 Κυματομορφή της τάσης μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου διπλής επανάληψης.....	91
Σχήμα 4.11 Περικοπή ισχύος ανά οικία στις 12μ.μ. σε συνδεσμολογία με κεντρικούς κόμβους.....	94
Σχήμα 4.12 Κυματομορφή της τάσης μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου διπλής επανάληψης σε συνδεσμολογία με κεντρικούς κόμβους.....	95



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Γραμμές ΧΤ .....	28
Εικόνα 1.2 Δίκτυο Διανομής ΜΤ.....	29
Εικόνα 1.3 Διεσπαρμένη Παραγωγή στο παρόν και στο μέλλον.....	36
Εικόνα 1.4 Έξυπνο δίκτυο .....	42
Εικόνα 2.1 Πρόβλημα βελτιστοποίησης .....	57
Εικόνα 2.2 Δίκτυο συσχετίσεων .....	62
Εικόνα 2.3 Δίκτυο συναίνεσης ηλεκτρονικών υπολογιστών .....	64
Εικόνα 4.1 Ηλεκτρικό δίκτυο οικιών-φωτοβολταϊκών.....	73
Εικόνα 4.2 Δίκτυο οικιών – φωτοβολταϊκών.....	76
Εικόνα 4.3 Δίκτυο οικιών – φωτοβολταϊκών (με απώλεια σύνδεσης οικιών 5,6).....	79
Εικόνα 4.4 Δίκτυο σε συνδεσμολογία αστέρα .....	84
Εικόνα 4.5 Δίκτυο σε συνδεσμολογία αστέρα (με απώλεια σύνδεσης οικιών 5-7).....	88
Εικόνα 4.6 Δίκτυο συνδεσμολογίας με κεντρικούς κόμβους .....	92



## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ – ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
Ε.Ε.	Ευρωπαϊκή Ένωση
Η.Υ.	Ηλεκτρονικοί Υπολογιστές
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
ΜΤ	Μέση Τάση
ΥΤ	Υψηλή Τάση
Υ/Σ	Υποσταθμός
Σ.Η.Ε	Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΧΤ	Χαμηλή Τάση

AC	Alternating Current
AMI	Advanced Metering Infrastructure
APC	Active Power Curtailment
DC	Direct Current
DER	Distributed Energy Resources
ICT	Information Communication Technology
IED	Intelligent Electronic Devices
Kbps	Kilo byte per second
KWh	Kilo watt per hour
LP	Linear Programming
MP2P	Multi point to point
MPC	Model Predictive Control
P2MP	Point-to-Multipoint
RTO	Real Time Optimization
SDP	Semidefinite programming
SMG	Statistical Multiplexing Gain
SOCP	Second order cone programming
SPSA	Simultaneous perturbation stochastic approximation
UAV	Unmanned Air Vehicle
V2G	Vehicle to Grid



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας οι καθημερινές ανάγκες των ανθρώπων έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Περισσότερες ηλεκτρικές συσκευές κατά άτομο, υπολογιστές, τηλεοράσεις, ηχοσυστήματα, ηλεκτρικά οχήματα, όλα απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια. Ταυτόχρονα όλες οι συσκευές που λειτουργούσαν και παλιότερα συνεχίζουν να είναι απαραίτητες για την καθημερινότητα κάθε οικογένειας. Για αυτό και οι πάροχοι ηλεκτρικής ενέργειας αναζητούν καλύτερους και περισσότερους τρόπους προκειμένου να ανταπεξέλθουν στην αύξηση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι τώρα, τουλάχιστον στην Ελλάδα, ένα μεγάλο μέρος της παραγωγής και ηλεκτρικής ενέργειας καλυπτόταν από εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούσαν λιγνίτη ως καύσιμο για να παράξουν ηλεκτρική ενέργεια. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούσαν ένα μικρό ποσοστό της συνολικής ισχύος που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών των ανθρώπων σε ηλεκτρική ενέργεια. Συνήθεις πόροι ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι τα υδροηλεκτρικά, οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά και υπό συνθήκη τα πυρηνικά εργοστάσια.

Τα υδροηλεκτρικά δεν είναι αξιόπιστα διότι υπάρχει περίπτωση ανομβρίας οπότε και απουσίας νερού που είναι απαραίτητο για τη λειτουργία τους. Ειδικά σε χώρες όπως η Ελλάδα, που δεν υπάρχουν πολλά και μεγάλα ποτάμια ενώ παρατηρείται συχνά λειψυδρία, τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένα αξιόπιστο μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες, έχει γίνει επένδυση σε αιολικά πάρκα σε αρκετές περιοχές της Ελλάδας αλλά και πάλι δεν μπορεί να βασιστεί η ενεργειακή επάρκεια μίας χώρας σε ένα αβέβαιο μέσο όπως ο αέρας. Για αυτό παλιότερα, ο κυρίαρχος (λόγω των συνδρομητών που έχει) πάροχος και διανομέας ηλεκτρικής ενέργειας (Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού – Δ.Ε.Η.) έδωσε ευκαιρίες ανάπτυξης και εγκατάστασης φωτοβολταϊκών από ιδιώτες. Το κράτος έδωσε επιδοτήσεις δανείων και κίνητρα για την ανάπτυξη τέτοιων εγκαταστάσεων από ιδιώτες ειδικά σε περιοχές με μεγάλη ετήσια ηλιοφάνεια. Με την πάροδο του χρόνου και σύμφωνα με τις κοινοτικές οδηγίες αλλά και τη στήριξη της Ε.Ε. πολλοί καταναλωτές έγιναν στη συνέχεια και παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας. Δηλαδή πολλοί ιδιώτες εγκατέστησαν φωτοβολταϊκά στις στέγες των σπιτιών και μερικές φορές μετέτρεψαν και κομμάτια γης (κτήματα, οικόπεδα) σε φωτοβολταϊκά πάρκα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικά τον πρώτο καιρό η τιμή αγοράς της κιλοβατώρας (KWh) από την Δ.Ε.Η. ήταν ιδιαίτερα υψηλή

προκειμένου να προσελκύσει περισσότερους ιδιώτες αλλά και περισσότερες επενδύσεις. Τέτοιες πρακτικές όμως δημιούργησαν πολλούς και «μικρούς» παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα φωτοβολταϊκά, όπως είναι προφανές, παράγουν την μεγαλύτερη ισχύ τους σε ώρες ηλιοφάνειας. Αυτές οι ώρες μεγάλης παραγωγής ενέργειας είναι ανάμεσα στις 11π.μ. – 2μ.μ.. Ακριβώς σε αυτές τις ώρες εντοπίζεται και το πρόβλημα υπερτάσεων. Εκείνες τις ώρες οι περισσότεροι ιδιώτες απουσιάζουν από τις οικίες τους λόγω εργασίας. Άρα και η κατανάλωση ενέργειας είναι μηδαμινή, αφού συσκευές όπως ηλεκτρική κουζίνα, θερμοσίφωνα, πλυντήριο είναι ανενεργά ή σε κατάσταση αναμονής. Η ταυτόχρονη μεγάλη παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και η μηδαμινή οικιακή κατανάλωση δημιουργεί μία μεγάλη ροή ισχύος (ανάστροφη ροή) από τους καταναλωτές προς το δίκτυο. γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υπερτάσεων.

Είναι λογικό η μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής να θέτει ζητήματα ελέγχου και διαχείρισής της. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται μέσα της τεχνολογίας των πληροφοριών και των επικοινωνιών (ICT). Η προαναφερθείσα τεχνολογία βασίζεται στη χρήση των ενοποιημένων επικοινωνιών και της ολοκλήρωσης των τηλεπικοινωνιών (τηλεπικοινωνιακές γραμμές, και ασύρματα σήματα), των υπολογιστών καθώς και του αναγκαίου επιχειρησιακού λογισμικού, τα οποία επιτρέπουν στους χρήστες να έχουν πρόσβαση, να αποθηκεύουν, να μεταδίδουν και να χειρίζονται πληροφορίες. Στην περίπτωση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, η συμβολή των μέσων αυτών στην εποπτεία και τη βέλτιστη διαχείρισή τους είναι καθοριστικής σημασίας για την εύρυθμη λειτουργία των σημερινών δικτύων. Η μεταξύ τους επικοινωνία ή η επικοινωνία με κεντρικούς σταθμούς/κόμβους ελέγχου, επιτρέπει τόσο την αποκεντρωμένη λειτουργία όσο και τον ταχύτερο έλεγχο των παραγωγών και των φορτίων των δικτύων διανομής.

Συχνά η μετάδοση των πληροφοριών σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο με διεσπαρμένη παραγωγή τίθενται και προβλήματα βελτιστοποίησης. Αντικείμενα προβλημάτων βελτιστοποίησης παρατηρούνται στα μαθηματικά, στην επιστήμη των υπολογιστών και στην έρευνα λειτουργιών. Η μαθηματική βελτιστοποίηση (εναλλακτικά ονομαζόμενος μαθηματικός προγραμματισμός ή απλή βελτιστοποίηση), είναι η επιλογή ενός καλύτερου



στοιχείου (σε σχέση με κάποιο κριτήριο) από κάποια σειρά διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων. Στην απλούστερη περίπτωση, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης συνίσταται στη μεγιστοποίηση ή την ελαχιστοποίηση μιας πραγματικής λειτουργίας με τη συστηματική επιλογή των τιμών εισόδου από ένα επιτρεπτό σύνολο και την υπολογισμό της τιμής της συνάρτησης. Η γενίκευση της θεωρίας και τεχνικών βελτιστοποίησης σε άλλες συνθέσεις περιλαμβάνει μια μεγάλη περιοχή εφαρμοσμένων μαθηματικών. Γενικότερα, η βελτιστοποίηση περιλαμβάνει την εύρεση των "καλύτερων διαθέσιμων" τιμών κάποιας αντικειμενικής συνάρτησης δεδομένου ενός ορισμένου τομέα (ή εισόδου), που περιλαμβάνει μια ποικιλία διαφορετικών τύπων αντικειμενικών λειτουργιών και διαφορετικών τύπων τομέων επιστήμης. Έτσι χρησιμοποιώντας τη θεωρία των προβλημάτων βελτιστοποίησης θα αναλυθεί και θα μελετηθεί στη συγκεκριμένη διπλωματική μία πρόταση αντιμετώπισης φαινομένων υπερτάσεων σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις.

Στη συνέχεια, περιγράφεται επιγραμματικά το αντικείμενο των κεφαλαίων που θα ακολουθήσει. Θα παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά των δικτύων χαμηλής (XT) και μέσης τάσης (MT), καθώς και τα έξυπνα δίκτυα και η διεσπαρμένη παραγωγή. Θα αναπτυχθούν τα χαρακτηριστικά τους και ταυτόχρονα θα παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους. Η πρόταση που θα εισάγουμε θα βασίζεται πάνω στη θεωρία γράφων η οποία είναι ευρέως διαδεδομένη στα ηλεκτρικά δίκτυα. Θα παρουσιαστεί η θεωρία των προβλημάτων βελτιστοποίησης, των αλγορίθμων συναίνεσης και κατανομής πόρων. Θα συνδυαστούν και οι δυο αλγόριθμοι προκειμένου τελικά να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος διπλής επανάληψης που θα είναι η μέθοδος με την οποία θα επιλυθεί το πρόβλημα των υπερτάσεων ενός δικτύου οικιών-φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Στην πραγματικότητα ο αλγόριθμος συναίνεσης χρησιμοποιείται ώστε η περικοπή ισχύος να είναι μικρότερη δυνατή ικανοποιώντας ταυτόχρονα τις ενεργειακές ανάγκες των καταναλωτών. Ο αλγόριθμος κατανομής πόρων οδηγεί στη βέλτιστη περικοπή ισχύος των φωτοβολταϊκών κάθε οικίας, λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη και τη στιγμιαία παραγωγή ισχύος .

Μετά τη θεωρητική ανάλυση, θα ακολουθήσει η παρουσίαση του δικτύου μελέτης και αποτελέσματα από την εφαρμογή των αλγορίθμων σε αυτό αλλά και σε παραλλαγές αυτού. Τέλος θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα αλλά και πιθανές μελλοντικές ερευνητικές μελέτες που είναι πιθανόν να προκύψουν από τη διπλωματική εργασία.



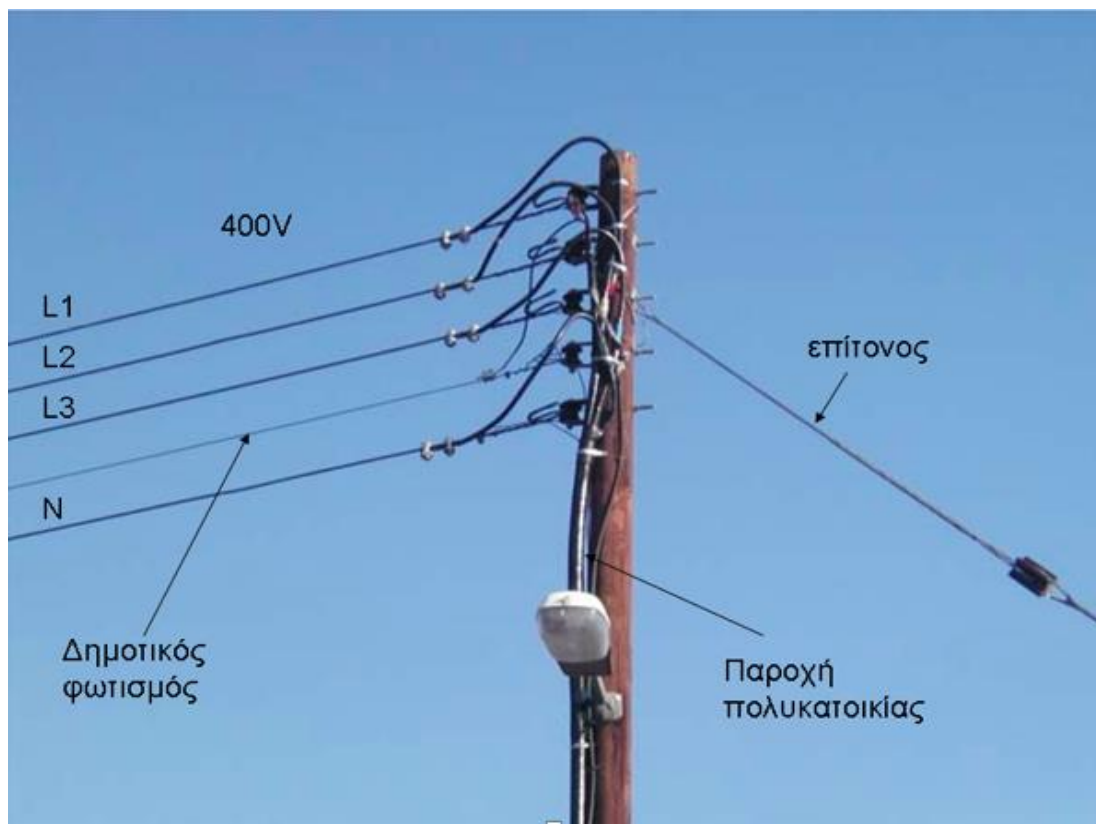
# 1. Δίκτυα διανομής

## 1.1 Δίκτυα διανομής ΧΤ

Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας σε καταναλωτές με μικρή ζήτηση ισχύος γίνεται μέσω δικτύου χαμηλής τάσης. Οι καταναλωτές χωρίζονται σε οικιακούς, εμπορικούς βιομηχανικούς και αρδευτικούς. Προκειμένου να υπάρχει παροχή χαμηλής τάσης θα πρέπει να υποβιβαστεί η μέση τάση σε χαμηλή μέσω ενός μετασχηματιστή. Στην Ελλάδα τα δίκτυα μέσης τάσης είναι 20kV και τα δίκτυα χαμηλής 230V σε μονοφασική γραμμή και 400V σε τριφασική γραμμή. Ο μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης είναι στις περιοχές ζήτησης. Η απώλεια ισχύος είναι μεγαλύτερη όταν τα δίκτυα χαμηλής τάσης εκτείνονται για πολλά χιλιόμετρα για αυτό άλλωστε χρησιμοποιούμε δίκτυα μέσης τάσης για να περιοριστεί η απώλεια ισχύος σε ανεκτά επίπεδα. Τα δίκτυα διανομής ΧΤ χωρίζονται σε 2 κατηγορίες, δικτυωτά ή ακτινικά. Τα δικτυωτά αποτελούνται από υπόγεια καλώδια συνδεδεμένα μεταξύ τους ώστε να τα αποτελούν ένα κλειστό δικτυωτό πλέγμα. Κάθε ένα από τα τετράγωνα που σχηματίζουν μπορεί να θεωρηθεί ότι καλύπτει τους δρόμους ενός οικοδομικού τετραγώνου. Κάθε πλευρά του τετραγώνου μπορεί να έχει περισσότερα τους ενός καλώδια. Στις διασταυρώσεις των δρόμων και κάτω από τα πεζοδρόμια τοποθετούνται ασφάλειες ΧΤ. Τα ακτινικά δίκτυα αναπτύσσονται με 3 διαφορετικούς τρόπους:

- Με χρήση καλωδίων ενιαίας διατομής που δίνουν τη δυνατότητα διπλής τροφοδότησης κάθε πλευράς του οικοδομικού τετραγώνου.
- Διαμορφώνοντας κύριους βρόχους ανά 2 αναχωρήσεις Y/Σ ΜΤ/ΧΤ, χρησιμοποιώντας όμως για την τροφοδότηση των καταναλωτών καλώδια μικρότερης διατομής.
- Χωρίς την ύπαρξη κλειστών βρόχων, χρησιμοποιώντας καλώδια πολλών διατομών ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί φορτίσεων και πτώσεων τάσεων, χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα διπλής τροφοδότησης σε περίπτωση βλάβης.

Είναι ξεκάθαρό ότι ο πρώτος τρόπος παρέχει μεγαλύτερο βαθμό εξυπηρέτησεως από ότι ο τρίτος τρόπος, αλλά οδηγεί σε μεγαλύτερα κόστη κατασκευής. Ο δεύτερος τρόπος είναι μεταξύ των δύο. Στόχος των παρόχων και συγκεκριμένα της ΔΕΗ είναι να υπολογίσει τη ζήτηση ισχύος είτε σε περιοχές υψηλής είτε χαμηλής ζήτησης. Θα πρέπει η ζήτηση ισχύος να είναι συμμετρική αλλά και να λαμβάνονται υπόψη πιθανοί νέοι καταναλωτές οι οποίοι μπορεί να χρειαστεί να συνδεθούν στο μέλλον, χωρίς να επηρεάζεται το ισοζύγιο ισχύος. Για αυτό το λόγο θα πρέπει η ζήτηση ισχύος να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στις τρεις φάσεις του δικτύου διανομής. Εκτός από τις τρεις φάσεις το δίκτυο χαμηλής περιλαμβάνει και τον ουδέτερο.



Εικόνα 1.1 Γραμμές ΧΤ

## 1.2 Δίκτυα διανομής ΜΤ

Το δίκτυο διανομής μέσης τάσης μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής. Οι γραμμές Μέσης Τάσης (20kV) τροφοδοτούν τις γραμμές χαμηλής τάσης μέσω των υποσταθμών διανομής. Τα δίκτυα ΜΤ χωρίζονται σε 2 κατηγορίες τα εναέρια και τα υπόγεια. Τα εναέρια τείνουν να έχουν «δενδροειδή μορφή». Αποτελούνται από τον κορμό που κατασκευάζεται με αγωγούς μεγάλης διατομής και από «διακλαδώσεις» πάνω στις οποίες συνδέονται οι Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ. Οι διακλαδώσεις κατασκευάζονται με αγωγούς μικρότερης διατομής απ' ότι ο κορμός. Η δενδροειδής μορφή επιτυγχάνεται σχετικά εύκολα στις αγροτικές περιοχές αλλά όχι όμως στις ημιαστικές περιοχές όπου οι οδεύσεις των γραμμών υπάγονται σε περιορισμούς. Τα υπόγεια δίκτυα ΜΤ τροφοδοτούν περιοχές με μεγάλη σχετικά πυκνότητα φορτίου αλλά και με αυξημένες απαιτήσεις συνεχούς τροφοδότησης. Το πρόβλημα των υπογείων δικτύων, σε αντίθεση με τα εναέρια, είναι ο εντοπισμός των βλαβών. Σε μία εναέρια γραμμή ΜΤ η βλάβη διορθώνεται σε διάστημα λίγων ωρών αντίθετα στα υπόγεια μπορούν να χρειαστούν και παραπάνω από 24 ώρες για την επιδιόρθωση. Τα υπόγεια δίκτυα χωρίζονται σε 2 κατηγορίες.

- Το «βρογχοειδές» που απαρτίζεται από τμήματα βρόγχων που αρχίζουν και τελειώνουν στο ίδιο Υ/Σ ΥΤ/ΜΣ

- Το «ατρακτοειδές» που απαρτίζεται από γραμμές που αρχίζουν από Υ/Σ ΥΤ/ΜΣ και καταλήγουν σε έναν άλλον

Στην Ευρώπη οι γραμμές διανομής ΜΤ περιλαμβάνουν μόνο τους 3 αγωγούς και των φάσεων δηλαδή δεν ακολουθεί ουδέτερος. Αντίθετα σε ΗΠΑ και Καναδά ο ουδέτερος διανέμεται μαζί με τις φάσεις των εναέριων δικτύων όπου και γειώνεται ανά διαστήματα. Όπως γίνεται και στην Ευρώπη μόνο για τις γραμμές ΧΤ. Οι σταθμοί διανομής είναι πολύ συνηθισμένα στοιχεία του δικτύου ακόμα και μέσα στις πόλεις, αφού αντιστοιχεί ένας ανά μερικές δεκάδες ή εκατοντάδες οικίες. Τοποθετούνται συνήθως πάνω σε κατασκευές που αποτελούνται από 2 κολώνες ή σε εσωτερικούς χώρους στα υπόγεια κτιρίων. Βέβαια υπάρχουν και επιχειρήσεις που είναι καταναλωτές μέσης τάσης. Το ΕΜΠ είναι καταναλωτής μέσης τάσης και για τις ανάγκες του υποβιβάζει την μέση τάση στη χαμηλή μέσω μετασχηματιστών. Γνωστοί τύποι καλωδίων είναι ACSR 95, ACSR 35, ACSR 16



Εικόνα 1.2 Δίκτυο Διανομής ΜΤ

### 1.3 Ποιότητα και αξιοπιστία δικτύων διανομής

Είναι συχνό φαινόμενο να διακόπτεται η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές για μικρά συνήθως αλλά και μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Επίσης συχνά παρατηρούμε απόκλιση από τις ονομαστικές τιμές της τάσης αλλά και της συχνότητας του δικτύου. Αυτό έχει επιπτώσεις στην ωφελιμότητα των συσκευών που λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια και επομένως στην παραγωγική αλλά και κοινωνική δραστηριότητα. Ας μη διαφεύγει της προσοχής η μεγάλη χρήση Η.Υ. σε πολλά συστήματα τηλεπικοινωνιών, τραπεζικών συναλλαγών, ελέγχου εναέριας και επίγειας κυκλοφορίας κλπ. Με βάση τα παραπάνω είναι φυσικό να δίνεται μεγάλη βαρύτητα σε αυτό που ονομάζουμε ποιότητα εξυπηρέτησης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας προς τους πελάτες τους.

Η ποιότητα εξυπηρέτησης σηματοδοτείται από τους πιο κάτω παράγοντες, όπως ιεραρχούνται κατά σειρά σπουδαιότητας :

- την συνεχή παροχή (χωρίς διακοπές) ηλεκτρικής ενέργειας
- την σταθερότητα της αποδιδόμενης τάσης τροφοδοτήσεως
- την σταθερότητα της συχνότητας
- τον περιορισμό των αρμονικών ( να είναι «καθαρό» το κύμα της τάσης τροφοδοσίας)
- την απόκλιση από το καθαρά συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων

Από τους πιο πάνω παράγοντες η σταθερότητα στη συχνότητα δεν εξαρτάται από τα δίκτυα διανομής αλλά από το σύστημα παραγωγής. Η συνεχής παροχή ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζεται μερικώς από το δίκτυο διανομής ενώ οι υπόλοιποι παράγοντες εξαρτώνται αποκλειστικά από το δίκτυο διανομής.

Η πλήρης εξασφάλιση μιας συνεχούς παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε όλους τους καταναλωτές του δικτύου είναι πρακτικά αδύνατη. Εάν επιδιωκόταν η οπωσδήποτε επίτευξή της θα οδηγούσε σε πολύ αυξημένες δαπάνες σε τέτοιο βαθμό που θα μπορούσαμε να τις θεωρήσουμε αδικαιολόγητες. Εάν επιτυγχάνεται και σε ποιο βαθμό η συνέχεια της τροφοδότησης, αυτό το εκφράζει η λεγόμενη αξιοπιστία τροφοδότησης. Συγκεκριμένα η αξιοπιστία αυτή εκφράζεται μέσω της πιθανότητας να μην παρουσιάζεται διακοπή της τροφοδότησης όπως θα δούμε αναλυτικά πιο κάτω. Είναι προφανές ότι η διακοπή της τροφοδοσίας δεν προκαλεί την ίδια ζημιά σε όλους τους καταναλωτές. Ένα παράδειγμα δύο ακραίων κατά κάποιο τρόπο περιπτώσεων είναι μια βιομηχανία όπου μια διακοπή της παροχής μπορεί να επιφέρει σημαντική ζημιά ενώ σε μια αγροτική εγκατάσταση άρδευσης η ίδια διακοπή δεν θα έχει σημαντικές επιπτώσεις. Πρέπει να τονιστεί ότι στις αστικές περιοχές μπορεί η διακοπή να προκαλέσει πολύ οδυνηρά αποτελέσματα σε νοσοκομεία ή να έχουμε εγκλωβισμούς σε ανελκυστήρες. Να μη παραβλεφθεί το γεγονός ότι πολλά δίκτυα υπολογιστών μπορεί να τεθούν εκτός λειτουργίας με απρόβλεπτες επιπτώσεις. Βεβαίως υπάρχουν νομοθετικές προβλέψεις ώστε καταναλωτές όπως νοσοκομεία να διαθέτουν δικές τους εφεδρικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης σε χώρους συνάθροισης πολλών ατόμων

(θέατρα, κινηματογράφοι κλπ.) υπάρχει η υποχρέωση ύπαρξης φωτισμού ασφαλείας για περιπτώσεις διακοπής της ηλεκτροδότησης.

Η σταθερότητα της τάσης τροφοδότησης είναι καθοριστικής σημασίας στα δίκτυα διανομής. Οι μεταβολές της τάσης τροφοδότησης και οι συνεπαγόμενες αποκλίσεις μπορούν να διαχωριστούν σε :

- «αργές» διακυμάνσεις της τάσης που προκαλούνται από διακυμάνσεις του φορτίου οι οποίες δημιουργούν πτώση τάσης στις γραμμές μεταφοράς και στους μετασχηματιστές.
- Απότομες μεταβολές που μπορεί να είναι είτε περιοδικές είτε όχι. Αυτές επιδρούν κυρίως στην ομαλή λειτουργία των πηγών φωτισμού αλλά και στην ομαλή λειτουργία ορισμένων ηλεκτρονικών συσκευών.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αργές μεταβολές της τάσης πέρα ορισμένων ορίων, γίνεται κατάλληλη μελέτη των δικτύων με επιλογή και ρύθμιση της τάσης του δικτύου διανομής (μέσες ρυθμίσεις τάσης). Σε ότι αφορά τις ενοχλητικές απότομες μεταβολές της τάσης, το ζήτημα αντιμετωπίζεται με τους περιορισμούς που θέτουν τόσο οι κανονισμοί όσο και οι ηλεκτρικές εταιρείες σε σχέση με τις συσκευές κατανάλωσης.

Επειδή είναι πρακτικά αδύνατον να παρέχεται συνεχώς στις συσκευές κατανάλωσης τάση με την ονομαστική τιμή λειτουργίας τους καθιερώθηκαν ορισμένα «επιτρεπτά-ανεκτά» όρια διακύμανσης τα οποία είναι υποχρεωμένες να τηρούν οι επιχειρήσεις διανομής. Τάση τροφοδότησης νοείται για ένα καταναλωτή αυτή που μετριέται στο σημείο σύνδεσης του καταναλωτή στο δίκτυο (εκεί εγκαθίσταται και ο μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας).

Για τα δίκτυα χαμηλής τάσης η Ε.Ε. αναφέρεται σε «επιθυμητά» και «ανεκτά» όρια τροφοδότησης. Τα ποσοστά που ακολουθούν αναφέρονται σε ονομαστική τάση δικτύου 230/400 Volt (φασική – πολική τάση)

ΠΕΡΙΟΧΕΣ	ΕΠΙΘΥΜΗΤΑ ΟΡΙΑ	ΑΝΕΚΤΑ ΟΡΙΑ
Αστικές	+/- 5%	+/- 8%
Αγροτικές	+/- 7%	+/- 10%

Ο διαχωρισμός σε επιθυμητά και ανεκτά όρια σημαίνει ότι κατά την εκμετάλλευση των δικτύων η μελέτη και η φροντίδα πρέπει να κατατείνουν στη διατήρηση της τάσης στα επιθυμητά επίπεδα αλλά αν αυτό δεν είναι πάντα δυνατόν και μέχρι την ενίσχυση του δικτύου τουλάχιστον η τάση να διατηρείται μέσα στα ανεκτά όρια. Η διάκριση σε αστικές (άνω των 2000 κατοίκων) και αγροτικές περιοχές γίνεται διότι γενικά οι συσκευές των αστικών περιοχών έχουν μεγαλύτερη απαίτηση σταθερότητας σε σχέση με αυτές των αγροτικών περιοχών.

Τα όρια για τη μέση τάση πρέπει να συμβαδίζουν με τα όρια που ορίζονται και για τους καταναλωτές της χαμηλής τάσης λαμβάνοντας υπόψη και την πτώση τάσης στους μετασχηματιστές (Μ/Σ) μέσης τάσης/ χαμηλής τάσης αλλά και τη δυνατότητα ρύθμισης της σχέσης μεταφοράς των Μ/Σ («λήψη»). Στην Ελλάδα οι τυποποιημένες λήψεις Μ/Σ για μέση τάση/χαμηλή τάση είναι:

Λήψεις Μ/Σ	-5%	-2.5%	0%	+2.5%	+5%
------------	-----	-------	----	-------	-----

Η ΔΕΗ έχει υιοθετήσει τα παρακάτω όρια:

- η διακύμανση της τάσης να μη υπερβαίνει το  $\pm 3\%$  της μέσης τιμής της μετρούμενης τάσης
- η μέση τιμή της τάσης να βρίσκεται μέσα στα όρια  $\pm 5\%$  της ονομαστικής τάσης του δικτύου.

Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η μέση και η χαμηλή τάση στους καταναλωτές καθίσταται ανεξάρτητη από της διακυμάνσεις του δικτύου μεταφοράς υψηλής τάσης με χρήση των «ρυθμίσεων τάσης υπό φορτίο» στους υποσταθμούς υψηλής τάσης- μέσης τάσης. Η περιοχή των ρυθμίσεων αυτών είναι γενικά  $\pm 10\%$  της ονομαστικής και έτσι διευκολύνει την διακύμανση της τάσης σε εκτεταμένα όρια που καθορίζονται από τις διακυμάνσεις του δικτύου μεταφοράς. Η πιο πάνω ρύθμιση γίνεται συνήθως αυτόματα και καθορίζεται με αποκλειστικό κριτήριο της ανάγκες του δικτύου διανομής.

#### 1.4 Διεσπαρμένη παραγωγή στη ΧΤ&ΜΤ

Τα τελευταία χρόνια στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει αρχίσει να παρατηρείται η αύξηση της διείσδυσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή αυτή κυμαίνεται σε ποσά μεταξύ 1KW ως 100 MW. Η παραγωγική μονάδα διασυνδέεται άμεσα στο δίκτυο διανομής ή θα συνδεθεί στο ακραίο τμήμα του δικτύου προς το μέρος του καταναλωτή. Όταν άρχισε πολύ παλιότερα να παράγεται ηλεκτρική ενέργεια για ευρύτερη χρήση η διεσπαρμένη παραγωγή ήταν ο γενικευμένος τρόπος προσφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μονάδες παραγωγής της εποχής εκείνης εξυπηρετούσαν καταναλωτές που βρίσκονταν πολύ κοντά σε αυτούς. Δεδομένου ότι τα δίκτυα μεταφοράς βασίζονταν σε δατάση, η παροχή τάσης ήταν περιορισμένη και όπως προαναφέραμε αφορούσε περιοχές κοντά στην πηγή παραγωγής. Σε κάποιες περιπτώσεις αυξημένης ζήτησης χρησιμοποιούνταν και μπαταρίες που ήταν δυνατόν να συνδέονται απευθείας στο δίκτυο DC. Σήμερα έχει ξανά αρχίσει να απασχολεί το ζήτημα αυτό της τοπικής αποθήκευσης τον τομέα παραγωγής και διάθεσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Αργότερα η χρήση των δικτύων AC έδωσε τη δυνατότητα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας μακριά από τον τόπο παραγωγής της. Ο τρόπος αυτός μεταφοράς και οι οικονομίες που συνεπάγεται είχαν ως φυσικό αποτέλεσμα την πολύ μεγάλη αύξηση της ισχύος εξόδου στις παραγωγικές μονάδες. Η όλη αυτή εξέλιξη περιόρισε σημαντικά τα κόστη και επέτρεψε να δημιουργηθούν μεγάλα κέντρα παραγωγής με εξίσου πολύ μεγάλα δίκτυα μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Προφανώς η



διασύνδεση πολλών παραγωγικών μονάδων μεταξύ τους επέτρεπε την απρόσκοπτη παροχή ενέργειας και στην περίπτωση που κάποια μονάδα έβγαινε εκτός του όλου συστήματος. Το ενδιαφέρον για την διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει αρχίσει να αναζωπυρώνεται. Οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτή τη νέα θεώρηση στηρίζονται σε νέες τεχνολογίες αλλά και σε σύγχρονους οικονομικούς παράγοντες. Ειδικότερα πέρα από την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών στο συγκεκριμένο τρόπο παραγωγής αιτίες που προκάλεσαν το ενδιαφέρον για την διεσπαρμένη παραγωγή ήταν οι απαιτήσεις των καταναλωτών για αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, οι επιπτώσεις της ρύπανσης του περιβάλλοντος και το γεγονός ότι η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας έγινε ανοικτή ξεφεύγοντας από μονοπωλιακές αντιλήψεις του παρελθόντος. Δεν πρέπει να διαφεύγει της προσοχής μας και η σημασία που δίνεται πλέον με πολύ έντονο τρόπο στις λεγόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οι οποίες σχετίζονται με φυσικούς πόρους πρακτικά ανεξάντλητους και καθιστούν πιο «καθαρή» την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας σημαντικός λόγος που υπάρχει σήμερα αυτό το ενδιαφέρον για τις ΑΠΕ έγκειται και στην απαίτηση της Ε.Ε. τα κράτη μέλη να παράγουν το 20% της ηλεκτρικής τους ενέργειας από τις πηγές αυτές ως το 2050. Οι συγκεκριμένες πηγές είναι κυρίως οι εξής:

- Ήλιος(φωτοβολταϊκά)
- Βιομάζα (καύση δασικών και γεωργικών προϊόντων και άλλων καταλοίπων σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς)
- Αέρας (ανεμογεννήτριες)
- Υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις (μικρές πηγές)
- Γεωθερμικές πηγές (εκμετάλλευση της θερμότητας που προέρχεται από το εσωτερικό της γης)

Στη διεσπαρμένη παραγωγή μπορούν επίσης να ενταχθούν και κάποιες άλλες νέες τεχνολογίες που έχουν ως βάση τα ορυκτά καύσιμα. Πρόκειται για μηχανές με έμβολα, κυψέλες καυσίμου καθώς και μικροτουρμπίνες και τουρμπίνες αερίου. Οι εμβολοφόρες μηχανές είναι από παλιά γνωστές. Πρόκειται για θερμικές μηχανές οι οποίες μέσω των εμβόλων μετατρέπουν την παλινδρομική κίνηση σε περιστροφική. Τα έμβολα κινούνται μέσα σε κυλίνδρους που δέχονται ένα αέριο ήδη υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης (ατμομηχανές) ή θερμαίνεται εντός των κυλίνδρων μέσω ενός μείγματος αερίων καυσίμων (μηχανές εσωτερικής καύσης) ή θερμαίνεται ερχόμενο σε επαφή με ένα θερμό εναλλάκτη θερμότητας εντός του κυλίνδρου. Οι χρήσεις της διεσπαρμένης παραγωγής μπορούν να επιμεριστούν στις εξής:

- Οικιακή και εμπορική (ηλεκτρισμός και θέρμανση)
- Θερμοκήπια (ηλεκτρισμός, θέρμανση και CO<sub>2</sub> από την γονιμοποίηση της σοδειάς)
- Παροχή ισχύος σε δίκτυο
- Βιομηχανική (ηλεκτρισμός και ατμός)
- Περιφερειακή θέρμανση (ηλεκτρισμός και θέρμανση μέσω ενός δικτύου διανομής θέρμανσης)

Οι ωφέλειες που προκύπτουν από την συμμετοχή και ενσωμάτωση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να ταξινομηθούν στις εξής:

- Οικονομικές
- Περιβαλλοντικές
- Τεχνικές

Ειδικότερα:

A) Οικονομικές:

Ευνοεί την παραγωγή καυσίμων σε τοπικό επίπεδο με χαμηλό κόστος και την άμεση χρήση τους χωρίς επιβαρύνσεις μεταφοράς στους τόπους αξιοποίησής τους. Μικρή ανάλωση κεφαλαίου και χρόνου σε σχέση με την κατασκευή ενός μεγάλου και κεντρικού σταθμού παραγωγής. Δυνατότητα ελέγχου της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας και σχετική σταθερότητα της εξαιτίας της ανεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και της διακύμανσης των τιμών τους. Μείωση του ενεργειακού κόστους συνολικά για τους καταναλωτές ή περιορισμός υψηλού τιμολογίου κατά τις περιόδους αιχμής φορτίου. Όταν υπάρχει μεγάλος όγκος χρηστών των πηγών διεσπαρμένης παραγωγής που λειτουργούν με ανανεώσιμες πηγές, υπάρχει και μείωση του συνολικού φορτίου αιχμής για την εταιρεία διανομής και έτσι παρακάμπτεται η ανάγκη βελτίωσης του δικτύου και αναβάθμισής του, το κόστος των οποίων θα μετακυλιόταν στους καταναλωτές δεδομένου ότι η διεσπαρμένη παραγωγή διευκολύνει στο να ελαττωθεί η συμφόρηση των λειτουργούντων γραμμών μεταφοράς. Πρακτικά είναι ευκολότερο να εντοπιστούν περιοχές που προσφέρονται για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και κατ' επέκταση για διεσπαρμένη παραγωγή και ευκολία διασύνδεσής τους στο δίκτυο δημιουργούνται προϋποθέσεις μικρότερης επενδυτικής διακινδύνευσης σε σχέση με μια κεντρική μονάδα παραγωγής. Προφανώς και οι δαπάνες θα είναι σαφώς μικρότερες. Είναι ξεκάθαρο ότι καταναλωτές που βρίσκονται σε περιοχές που οι κλιματικές συνθήκες (ηλιοφάνεια, άνεμοι) ευνοούν την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών θα έχουν προφανές όφελος από την εγκατάσταση διεσπαρμένης παραγωγής. Όφελος επίσης θα προκύψει σε καταναλωτές που έχουν την δυνατότητα πρόσβασης σε χαμηλού κόστους καύσιμα όπως βιοκαύσιμα ή φυσικό αέριο. Περιορισμένες απώλειες ενέργειας κατά την μεταφορά της λόγω εγγύτητας με τους καταναλωτές αλλά και μειωμένο κόστος μεταφοράς που αποτελεί μια από τις μεγάλες επιβαρύνσεις του συνολικού κόστους του ηλεκτρισμού. Συμμόρφωση με τις επιταγές μείωσης εκπομπής ρύπων και επομένως αποφυγή τυχόν κυρώσεων.

B) Περιβαλλοντικές:

Λόγω ευρείας χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας πραγματοποιείται περιορισμός του φαινομένου θερμοκηπίου. Παράλληλη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων με αποτέλεσμα την μείωση της εξάρτησης από τις χώρες – παραγωγούς τους και τη μειωμένη εκπομπή τοξικών οξειδίων του αζώτου και του θείου που δημιουργούν την όξινη βροχή.

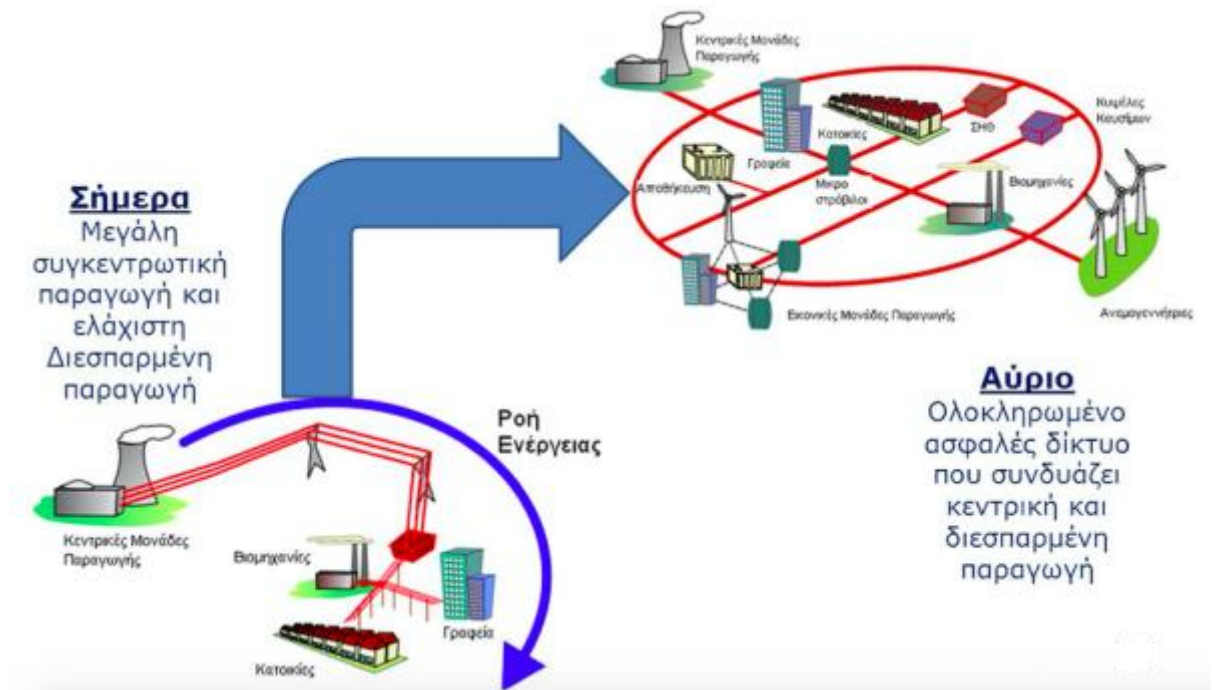
Γενικά οι περιβαλλοντικές συνέπειες της διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να εκτιμηθούν ως φιλικές προς το περιβάλλον σε σχέση με μια κεντρική μονάδα παραγωγής. Βεβαίως η αποτίμηση των επιπτώσεων στο περιβάλλον δεν είναι μια τόσο απλή διαδικασία. Υπάρχει η εκτίμηση ότι η ευρεία χρήση των σταθμών διεσπαρμένης παραγωγής θα οδηγήσει σε υποτονική λειτουργία τους κεντρικούς σταθμούς και πιθανόν αυτό να συντελέσει στην αυξημένη εκπομπή ρύπων. Εξάλλου πάντα παρατηρούνται διχογνωμίες σε διάφορα ανάλογα ζητήματα όπως οι αντιδράσεις στην εγκατάσταση σταθμών πυρηνικής ενέργειας ή οι αιτιάσεις για την αντιαισθητική παρουσία των ανεμογεννητριών

#### Γ) Τεχνικές :

Η διεσπαρμένη παραγωγή μπορεί να εξασφαλίσει την σταθερότητα της προσφερόμενης ισχύος σε τοπικό επίπεδο αν εμφανιστεί κάποια βύθιση της τάσης. Μπορεί να αποσυμφορήσει το ήδη υπάρχον κεντρικό δίκτυο. Σε περιπτώσεις μικρής διάρκειας διακοπής ρεύματος να λειτουργήσει εναλλακτικά ως εφεδρική ισχύς. Υπάρχουν όμως και κάποια προβλήματα στη χρησιμοποίηση σε ευρεία κλίμακα της διεσπαρμένης παραγωγής που αξίζει να παρουσιαστούν. Υπάρχει περίπτωση να εμφανιστούν προβλήματα στον έλεγχο της τάσης.

Εμφάνιση βραχυκυκλωμάτων και υπερφορτίσεις του δικτύου προερχόμενες από την ταυτόχρονη λειτουργία πολλών πηγών ισχύος με αποτέλεσμα να υπάρχει δυσκολία στην ανίχνευση των εκάστοτε σφαλμάτων του δικτύου. Στο επίπεδο μέσης τάσης υπάρχει πρόβλημα μεταβολής της τάσης στα σημεία σύνδεσης που είναι κρίσιμο ζήτημα για την σύνδεση των διεσπαρμένων πηγών. Στις χαμηλές τάσεις κύριο ζήτημα είναι η ποιότητα της τάσης που παρέχεται στους πελάτες λόγω εμφάνισης υπέρτασης εξαιτίας της σύνδεσης των διεσπαρμένων πηγών παραγωγής ενέργειας. Άλλη μια δυσάρεστη επίπτωση από την παρουσία μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι η επίδρασή τους στη συχνότητα του συστήματος καθώς πολλές φορές στερούνται του κατάλληλου τεχνικού εξοπλισμού για να ελέγχεται η σχέση του φορτίου με την συχνότητα. Εκτός των παραπάνω τεχνικής φύσεως προβλημάτων υπάρχουν και κάποιες οικονομικές διάστασης αρνητικές συνέπειες. Το κεφάλαιο που απαιτείται μπορεί αρχικά να είναι μικρό λόγω του μικρού μεγέθους της μονάδας αλλά είναι συγκριτικά υψηλό σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ (κεφάλαιο ανά μονάδα ισχύος). Ανάλογα με την τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί για την διεσπαρμένη παραγωγή μπορεί να υπάρξουν διακυμάνσεις κόστους από 1000\$/KW ως 20000\$/KW (τουρμπίνες καύσης για την πρώτη περίπτωση και κυψέλες καυσίμου για την τελευταία). Αυξημένη εξάρτηση από τις διεθνείς τιμές του φυσικού αερίου δεδομένου ότι οι πλειονότητα των τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής βασίζονται σε αυτό. Η παροχή του καυσίμου της εγκατάστασης αρχικά προϋπολογίζεται υψηλότερη σε κόστος σε σχέση με το κόστος παροχής σε μια κεντρική μονάδα παραγωγής. Σε περιπτώσεις που για την λειτουργία της εγκατάστασης χρειάζεται ήλιος (φωτοβολταϊκά) ή άνεμος (αιολική ενέργεια) είναι φανερό ότι υπάρχει άμεση σχέση της ποσότητας ισχύος που παράγεται με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες οπότε μέχρι ενός ορισμένου ποσοστού της ζήτησης μπορούμε να βασιζόμαστε σε αυτού του είδους

τις ανανεώσιμες πηγές. Οπότε η ύπαρξη και λειτουργία εκ παραλλήλου συμβατικών μονάδων παραγωγής κρίνεται απαραίτητη.



Εικόνα 1.3 Διεσπαρμένη Παραγωγή στο παρόν και στο μέλλον

## 1.5 Έξυπνα δίκτυα

Ο χαρακτηρισμός έξυπνο δίκτυο αφορά σύγχρονα ηλεκτρικά δίκτυα που εμπεριέχουν παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα δίκτυα αυτά μπορούν να τα αντιμετωπιστούν ως ανεξάρτητες μονάδες. Προκειμένου να θεωρηθούν ως τέτοιες είναι αναγκαία η επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων και να είναι αυτόνομες και αποκεντρωμένες όλες οι διαδικασίες ελέγχου. Τα σημερινά δίκτυα παρουσιάζουν κάποιες ομοιότητες μεταξύ τους όπως είναι το μεγάλο τους μέγεθος, η συνεχόμενη ροή ισχύος προς μία κατεύθυνση, όπου η ηλεκτρική ισχύς φτάνει στους καταναλωτές από μακρινούς σταθμούς παραγωγής σε ακτινικά δίκτυα διανομής. Η εμφάνιση όμως οικονομικών και περιβαλλοντικών ζητημάτων καθώς και η εξέλιξη στις αντίστοιχες τεχνολογίες δημιούργησαν νέες απαιτήσεις σχετικές με την απόδοση και την αξιοπιστία των δικτύων. Με μια σύγχρονη ματιά μπορεί να θεωρηθεί ότι τα ήδη λειτουργούντα δίκτυα είναι ξεπερασμένα.

Παρότι μπορούμε να δούμε το ζήτημα των έξυπνων δικτύων από πολλές μεριές, εν τούτοις υπάρχουν κάποια σημεία που έχουν μια ιδιαίτερη σημασία. Αυτά είναι:

- Η χρήση ψηφιακών τεχνολογιών πληροφορίας που θα επικεντρώνονται στον έλεγχο, την προστασία και γενικότερα στην άριστη λειτουργία του δικτύου
- Η αποτελεσματική εκμετάλλευση διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής στις οποίες θα περιληφθούν και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- Η ενεργή συμμετοχή και των καταναλωτών σε συστήματα διαχείρισης ενέργειας, με λειτουργίες ζήτησης- απόκρισης (demand-response)
- Η χρήση προηγμένων («ευφών») συστημάτων μέτρησης όπου σε πραγματικό χρόνο θα έχουμε πλήρη και σαφή εικόνα της όλης κατάστασης και λειτουργίας του δικτύου

Είναι ξεκάθαρο από τα παραπάνω ότι κρίνεται αναγκαία η εξέλιξη «ευφών» συσκευών (όπως προχωρημένα μετρητικά εργαλεία, αισθητήρες κλπ.) τα οποία θα συγκεντρώνουν σε πραγματικό χρόνο δεδομένα από όλα τα μέρη του δικτύου. Όλες αυτές οι ετερόκλητες πληροφορίες θα πρέπει με ακρίβεια και ασφάλεια να διοχετεύονται στα διάφορα συστήματα διαχείρισης ενέργειας. Τα συστήματα αυτά θα έχουν την ευθύνη να επεξεργαστούν τις πληροφορίες αυτές ώστε να προβλέψουν και να επισημάνουν πιθανές αστοχίες ενώ παραλλήλως θα πραγματοποιούν ελέγχους που θα αποβλέπουν στην βέλτιστη απόδοση του συστήματος.

Για να καταστούν εφικτοί οι παραπάνω στόχοι πρέπει ο μηχανισμός επικοινωνίας ενός έξυπνου δικτύου να περιλαμβάνει κατά τη γνώμη μας τα παρακάτω 2 μέρη:

- A. Εξοπλισμό επικοινωνίας (communication infrastructure)
- B. Ενδιάμεση πλατφόρμα (middleware platform)

Ο βασικός εξοπλισμός επικοινωνίας θα ενσωματώνει δίκτυα και πρωτόκολλα τα οποία θα εξασφαλίζουν την επικοινωνία των διαφόρων συσκευών του δικτύου καθώς και τη ροή πληροφοριών και εντολών μέσα στο δίκτυο.

Ένα τέτοιο σύστημα επικοινωνίας έχει ως βασικά προσόντα την αξιοπιστία, την ταχύτητα, την ασφάλεια αλλά και την δυνατότητα επέκτασής του.

Σε ότι αφορά την ενδιάμεση πλατφόρμα αυτή συγκροτείται από ένα λογισμικό το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ του επιπέδου επικοινωνίας και στην εκάστοτε εφαρμογή, προσφέροντας τις απαραίτητες υπηρεσίες ώστε να δομηθεί ένα διανεμημένο σύστημα. Αναλυτικά, το συγκεκριμένο λογισμικό περιέχεται μέσα σε κάθε «ευφυή» συσκευή με σκοπό να προσφέρει:

- προφίλ επικοινωνίας για διανεμημένες εφαρμογές
- υπηρεσίες που σχετίζονται με διαχείριση πληροφοριών (επεξεργασία πληροφοριών, αποθήκευση τους, προώθησή και διαμοίρασμά τους κλπ.)

Από όλα όσα αναφέρθηκαν εντοπίζεται ένα ουσιαστικό ζήτημα, αυτό της ασφάλειας σε επίπεδο πληροφοριών, συσκευών και επικοινωνίας. Αυτό κρίνεται απαραίτητο ώστε να

υπάρχει ακεραιότητα, πιστότητα αλλά και αυθεντικότητα των διακινουμένων δεδομένων ενώ θα εξυπηρετείται και η παροχή ηλεκτρικής ισχύος

Τα κύρια χαρακτηριστικά των έξυπνων δικτύων διακρίνονται στα εξής:

- i. Εξελιγμένη μετρητική δυνατότητα-υποδομή
- ii. Διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής
- iii. «Ευφυή» μικροδίκτυα
- iv. Τεχνολογία ηλεκτρικών οχημάτων

Πιο αναλυτικά:

#### A) Εξελιγμένη μετρητική υποδομή

Οι εφαρμογές «ευφών» δικτύων απαιτούν ο έλεγχος κάθε στοιχείου του δικτύου να γίνεται σε πραγματικό χρόνο. Επομένως είναι απαραίτητο να είναι ενσωματωμένη στα δίκτυα αυτά μια αμφίδρομη μορφή επικοινωνίας σε εκτεταμένη κλίμακα που θα δίνει την δυνατότητα να δίνονται αποκεντρωμένα εντολές για τον έλεγχο και τη διαχείριση του δικτύου. Στοιχείο κεντρικό αυτής της επικοινωνίας είναι μία εξελιγμένη μετρητική υποδομή (AMI) που χρησιμεύει για να εξασφαλίσει την διασύνδεση των ευφών μετρητικών συστημάτων (smart meters), που μπορούν να διαχειρίζονται δεδομένα με ταυτόχρονη δικτύωσή τους. Τα συστήματα αυτά εγκαθίστανται στους τελικούς καταναλωτές. Με τον τρόπο αυτό θα είναι εφικτή η συγκέντρωση και η καταχώρηση πληροφοριών που θα σχετίζονται με:

- i. την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος
- ii. την παραγόμενη ποσότητα ενέργειας από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής γ) την καταναλισκόμενη ποσότητα ενέργειας.

Η μεγάλη ποσότητα πληροφοριακών δεδομένων που συλλέγεται είναι εύκολο να χρησιμοποιηθεί για την έγκαιρη πρόβλεψη αποτυχίας και έτσι να παρθούν τα όποια κατάλληλα μέτρα (π.χ. προγραμματισμός φορτίων ή δυναμική τιμολόγηση ενέργειας). Συνολικά μία εξελιγμένη μετρητική υποδομή (AMI) μπορεί όχι μόνο να επιτελέσει την διασύνδεση ευφών μετρητικών συστημάτων αλλά να επιτύχει το ίδιο και για ευφυείς ηλεκτρονικές συσκευές (IED). Είναι προφανές ότι υπάρχει συγκέντρωση μεγάλου όγκου διαφορετικών δεδομένων που προέρχονται από πλήθος διαφορετικών πηγών. Αυτή η νέα πραγματικότητα οδηγεί στην αναζήτηση νέων τρόπων ανάλυσης δεδομένων αλλά και αποθήκευσής τους.

#### B) Διεσπαρμένη παραγωγή

Στην σημερινή εποχή έχει αρχίσει να αμφισβητείται το μοντέλο της κεντρικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και να προωθείται ένα άλλο αποκεντρωμένο μοντέλο που ονομάζεται διεσπαρμένη παραγωγή. Η επιλογή αυτή κερδίζει έδαφος καθώς εξελίσσεται η τεχνολογία που αφορά τις γεννήτριες με παράλληλη προώθηση συστημάτων που αφορούν την

αποκεντρωμένη παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας. Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (DER) θα μας απασχολήσουν πιο κάτω.

### Γ) Ευφυή μικροδίκτυα (SMG)

Με τον όρο μικροδίκτυο εννοούμε ένα αυτόνομο και ενιαίο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο είναι συνδεδεμένες διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και οι οποίες εξυπηρετούν διάφορα φορτία τα οποία ευρίσκονται εγγύς το ένα με το άλλο. Ένα μικροδίκτυο πέραν της αυτόνομης λειτουργίας του μπορεί να είναι διασυνδεδεμένο με το υπόλοιπο δίκτυο. Προφανώς πρέπει ένα μικροδίκτυο λόγω των ανωτέρω τρόπων λειτουργίας του πρέπει να έχει ένα δικό του σύστημα διαχείρισής του. Αυτό θα του δίνει την δυνατότητα να υποστηρίξει λειτουργίες ελέγχου στη ροή ενέργειας και επιπλέον να συμμετέχει στην αγορά ενέργειας για την διάθεσή της. Τα μικροδίκτυα δεν είναι κάτι εντελώς νέο καθώς υπάρχουν εφαρμογές τους από παλαιότερα, υπό μορφή βιομηχανικών μικροδικτύων τα οποία παρέχουν ποιοτική ενέργεια σε βιομηχανικά φορτία. Επίσης εμφανίζονται ως συμπληρωματικά μικροδίκτυα που καλύπτουν τις ανάγκες σε ενέργεια σε περιοχές μεγάλης πληθυσμιακής πυκνότητας ή σε αγροτικές περιοχές. Πάντως είναι λογικό να αναμένεται μια περαιτέρω σημαντική αύξηση των μικροδικτύων διότι αφενός αυτά παρουσιάζονται ως η πλέον κατάλληλη τεχνολογία για να επιτευχθεί η ανάπτυξη των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και αφετέρου το μοντέλο μικροδικτύου παρουσιάζεται ως η καλύτερη εκδοχή για επιτυχή εξυπηρέτηση των πολύπλοκων εφαρμογών ελέγχου και διαχείρισης ενός ηλεκτρικού συστήματος. Μπορεί να χαρακτηριστεί ένα μικροδίκτυο ως ένα έξυπνο δίκτυο περιορισμένης κλίμακας. Ένα έξυπνο δίκτυο θα μπορούσε να δημιουργηθεί και από μια διομότιμη (peer-to-peer) διασύνδεση πολλών επί μέρους μικροδικτύων.

### Δ) Τεχνολογίες ηλεκτρικών οχημάτων

Σήμερα παρατηρείται μια αύξηση στη χρήση ηλεκτρικών οχημάτων, γεγονός που έχει συνέπειες στα ηλεκτρικά δίκτυα διότι συνεπάγεται αύξηση στη ζήτηση ενέργειας. Έχει αρχίσει μια μεγάλη έρευνα επί του θέματος που σχετίζεται με στρατηγικές ελέγχου τόσο για την επιλογή του τόπου όσο και του χρόνου φόρτισης των οχημάτων. Αυτό είναι απαραίτητο να μελετηθεί ώστε να μη παρατηρούνται αιχμές φορτίου. Όμως ένα ηλεκτρικό όχημα μπορεί να είναι χρήσιμο σε ένα έξυπνο δίκτυο. Όπως δείχνουν διάφορες μελέτες αλλά και η καθημερινή εμπειρία τα ηλεκτρικά οχήματα στο μεγαλύτερο μέρος της μέρας είναι ακινητοποιημένα. Με τη συνθήκη αυτή θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως εν δυνάμει «αποθήκες» ηλεκτρικής ενέργειας και εφόσον είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο να λειτουργούν ως εφεδρικό σύστημα ενέργειας. Αυτή η νέα αντίληψη για τα ηλεκτρικά οχήματα έχει γίνει γνωστή ως όχημα στο δίκτυο (V2G). Για ορισμένους αυτού του είδους η τεχνολογία μπορεί να συμπεριληφθεί ως μια ξεχωριστή περίπτωση διεσπαρμένης παραγωγής, αν και πρόκειται για ενός είδους κινητές μονάδες παραγωγής.

Μια παράμετρος που πρέπει να τονιστεί και σχετίζεται με τα έξυπνα δίκτυα είναι οι επικοινωνίες τους, διότι είναι και αυτές μέρος των καινοτομιών που εισάγουν τα ευφυή δίκτυα. Θα αναφερθούμε στα ζητούμενα που πρέπει να καλύπτει ένα σύστημα επικοινωνίας ώστε να είναι ικανό να καλύψει ότι χρειάζεται ένα έξυπνο δίκτυο. Επιγραμματικά τα ζητούμενα αυτά είναι τα παρακάτω.

**Αξιοπιστία:** Τα έξυπνα δίκτυα έχουν λειτουργίες που προϋποθέτουν υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας. Ειδικότερα πρέπει το ποσοστό αξιοπιστίας που απαιτείται να φτάνει στο 99,9999 % πράγμα που σημαίνει ότι ο χρόνος διακοπής θα περιορίζεται κάτω από 1 sec ανά έτος. Αυτό προφανώς απαιτεί ανάλογες τεχνολογίες που να μπορούν να υποστηρίξουν τόσο αξιόπιστες επικοινωνίες. Επιπλέον υπάρχουν πολλές αιτίες για αποτυχία του δικτύου όπως είναι η αποτυχία κόμβων, ασυνέπειες στην δρομολόγηση, υπερφόρτωση κλπ., για την αντιμετώπιση των οποίων να χρειάζονται διαφορετικές για καθεμιά τεχνικές. Ένας ενισχυτικός παράγοντας αξιοπιστίας είναι ο λεγόμενος «πλεονασμός». Αυτός συνίσταται από πολλαπλά αντίγραφα των μηνυμάτων, πολλούς δρόμους για την ίδια ροή πληροφορίας και πολλούς server για την εκτέλεση μιας εργασίας. Επίσης τα δεδομένα μπορούν να ομαδοποιηθούν με βάση την σημαντικότητα και την κρισιμότητα τους σε 2 κατηγορίες. Η μια θα περιλαμβάνει τα σημαντικά δεδομένα και η άλλη αυτά για τα οποία η αποτυχίες είναι ανεκτές. Με την παραπάνω μεθόδευση το επικοινωνιακό σύστημα θα πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει μετάδοση δεδομένων με διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας.

**Λανθάνων χρόνος φορτίου:** Γενικά οι μηχανισμοί ελέγχου και προστασίας στα Σ.Η.Ε. υπόκεινται σε αυστηρούς περιορισμούς σε σχέση με την καθυστέρηση και για το λόγο αυτό απαιτούν ταχεία διαβίβαση πληροφοριών. Ως παράδειγμα αξίζει να αναφερθεί ότι οι ευφυείς ηλεκτρονικές συσκευές (IED) στους υποσταθμούς θα πρέπει να διαβιβάζουν διάφορες πληροφορίες σε συσκευές που συλλέγουν δεδομένα μέσα σε χρόνο 4 msec. Παράλληλα οι συσκευές μετρήσεων πρέπει να επικοινωνούν τόσο μεταξύ τους όσο και με τα κέντρα ελέγχου σε χρόνους μεταξύ 8 ως 12 msec. Εξ αντιθέτου υπάρχουν άλλες συσκευές που έχουν περισσότερη ανοχή σε χρονικές καθυστερήσεις. Τέτοιες είναι π.χ. οι περισσότεροι έξυπνοι μετρητές οι οποίοι αποστέλλουν τις μετρήσεις τους με περιοδικότητα 15 min.

**Ρυθμός δεδομένων:** Οι έξυπνοι μετρητές αλλά και άλλοι αισθητήρες που λειτουργούν στα ηλεκτρικά δίκτυα έχουν εύρος ζώνης που δεν είναι τυπικά πολύ μεγάλο (καθένα χρειάζεται περίπου 300 kbs). Όμως οι ανάγκες για το εύρος ζώνης αυξάνονται και έτσι το εύρος ζώνης που χρησιμοποιεί κάθε ευφυή ηλεκτρονική συσκευή (IED) είναι της τάξεως από 10 kbs ως 100 kbs. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι αναγκαίος ο υψηλός ρυθμός δεδομένων του διαύλου επικοινωνίας λόγω των πολλών ευφύων ηλεκτρονικών συσκευών (IED) που πρόκειται να συνδεθούν σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο.

**Επεκτασιμότητα:** Ο αριθμός των καταναλωτών ενός ηλεκτρικού δικτύου καθώς και ο αριθμός των διασυνδεδεμένων στο δίκτυο συσκευών συνεχώς αυξάνεται. Έτσι η επεκτασιμότητα του επικοινωνιακού του δικτύου κρίνεται απολύτως απαραίτητη. Μπορεί να



διακριθεί η επεκτασιμότητα ενός δικτύου σε 2 κατηγορίες, αυτή της επεκτασιμότητας φορτίου οπότε το επικοινωνιακό σύστημα πρέπει να υποστηρίζει μια αυξανόμενη ροή δεδομένων όπως και αιτήσεις υπηρεσιών (service requests) και αυτή της γεωγραφικής επεκτασιμότητας, κάτι που απαιτεί ένα δίκτυο που έχει την δυνατότητα να αναπτύσσεται και να διαμορφώνεται ώστε να παραμένει λειτουργικό. Στο παρελθόν έχουν χρησιμοποιηθεί κατακεντρωμένες αρχιτεκτονικές επικοινωνίας προκειμένου να υποστηριχθούν υπηρεσίες internet, όπως τα διομότιμα (peer-to-peer) δίκτυα τα οποία μπορούν να βρουν θέση και στα έξυπνα δίκτυα. Το πρόβλημα της επεκτασιμότητας του δικτύου επικοινωνίας εμφανίζεται λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων που διαθέτουν οι συσκευές που συναποτελούν το έξυπνο δίκτυο, σε σχέση με την αποθήκευση, την επεξεργασία των πληροφοριών και την επικοινωνία.

**Λειτουργικότητα:** Όπως είναι γνωστό, σε ένα έξυπνο δίκτυο χρησιμοποιούμε πολλές διαφορετικές συσκευές, επικοινωνιακές τεχνολογίες και πρωτόκολλα. Αυτό καθιστά απαραίτητη την λειτουργικότητα μεταξύ τους. Για το σκοπό αυτό υπάρχει η συμβολή τόσο των προτύπων όσο και των «ανοικτών» αρχιτεκτονικών επικοινωνίας (π.χ. IP-based networks), που συμβάλλουν στην λειτουργικότητα διαφορετικών συσκευών και τεχνολογιών επικοινωνίας. Εκ των πραγμάτων εμφανίζεται η ανάγκη να υπάρχουν στοιχεία στο δίκτυο που θα «μεταφράζουν» υπηρεσίες και δεδομένα στα διάφορα πρότυπα που προαναφέραμε. Η λειτουργικότητα είναι αποφασιστικής σημασίας αφενός σε επίπεδο επικοινωνίας όσο και σε επίπεδο εφαρμογών ώστε να είναι ακριβής η ανταλλαγή και η επεξεργασία δεδομένων.

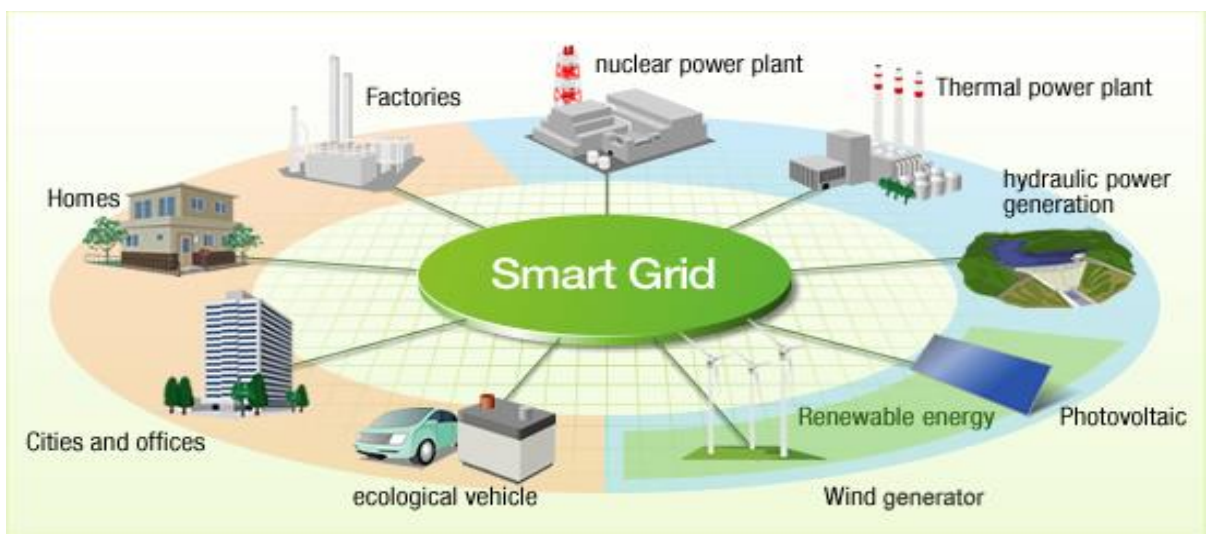
**Ευελιξία:** Η ευελιξία που παρουσιάζει το επικοινωνιακό σύστημα ενός ευφυούς δικτύου γίνεται εμφανής σε πολλά επίπεδα. Πρώτα η εντοπίζεται η δυνατότητα που πρέπει να έχει το σύστημα ώστε να είναι ικανό να υποστηρίξει ετερογενείς υπηρεσίες για τις εφαρμογές του έξυπνου δικτύου, οι οποίες έχουν διαφορετικές προτεραιότητες και χρονικές απαιτήσεις. Δευτερευόντως στα πλαίσια της ευελιξίας του συστήματος περιλαμβάνεται και η ικανότητά του να προσφέρει διαφορετικά μοντέλα επικοινωνίας. Ως παράδειγμα θα μπορούσαν να αναφερθούν οι επικοινωνίες από πολλά σημεία σε ένα σημείο (MP2P) οι οποίες χρησιμοποιούνται σε συστήματα παρακολούθησης (monitoring). Η λειτουργία αυτή απαιτεί την στιγμιαία και περιοδική συλλογή δεδομένων από διαφορετικούς αισθητήρες. Αντίθετα, επικοινωνίες από σημείο σε πολλά σημεία (P2MP) χρησιμοποιούνται προκειμένου να αποστέλλονται εντολές ελέγχου και ρύθμισης στις διάφορες συσκευές του δικτύου. Από τα παραπάνω γίνεται εμφανές ότι η ευελιξία του επικοινωνιακού συστήματος είναι μια αποφασιστική παράμετρος διότι η όλη επικοινωνιακή υποδομή καλείται να ανταποκριθεί σε πολλές και διαφορετικές εφαρμογές.

**Ασφάλεια:** Μια κρίσιμη ιδιότητα ενός επικοινωνιακού συστήματος είναι η ασφάλεια που μπορεί να διαθέτει σε πολλά επίπεδα. Εν πρώτοις πρέπει να διασφαλίζεται η ιδιωτικότητα των χρηστών και δευτερευόντως να αποκλείεται η χωρίς εξουσιοδότηση πρόσβαση σε δεδομένα. Ακόμη πρέπει να είναι βέβαιο ότι τα δεδομένα μεταφέρονται ακέραια χωρίς να αλλοιώνονται ή να χάνονται. Κάποιοι τρόποι που χρησιμοποιούνται για να υπάρχει ασφάλεια είναι η πιστοποίηση, η ανίχνευση μιας εισβολής και η κρυπτογράφηση. Αυτοί οι τρόποι έχουν ως

σκοπό τους την πρόληψη, την ανίχνευση και γενικά την σμίκρυνση διαφόρων επιθέσεων που μπορεί να υποστεί το δίκτυο.

Η υιοθέτηση διεσπαρμένων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως όπως φωτοβολταϊκά σε στέγες σπιτιών, ηλεκτρικά οχήματα, υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα αυξάνεται συνεχώς. Αυτή η αλλαγή δικαιολογείται λόγω υψηλών τιμών παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, φόρους σε εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αλλά και κυβερνητικές πρωτοβουλίες που ευνοούν την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων. Αυτή η προσπάθεια γίνεται προκειμένου να δημιουργηθεί ένα πιο οικολογικό σπίτι μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων. Οι στόχοι που έχουν τεθεί από κυβερνήσεις είναι υψηλοί για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας όσο γίνεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ειδικά οι κάτοικοι της Αυστραλίας έχουν ιδιαίτερα ανεπτυγμένη την οικολογική τους συνείδηση και ταυτόχρονα υπολογίζεται ότι οι ενεργειακές τους ανάγκες θα αυξηθούν κατά 30% μέσα στα επόμενα χρόνια. Είναι αποδεδειγμένο ότι θα υπάρξουν ζητήματα ποιότητας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας όπως υπερτάσεις. Για αυτό, οι πάροχοι ηλεκτρικής ενέργειας περιορίζουν την εγκατάσταση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από ιδιώτες. Αυτό αποτελεί ένα εμπόδιο για την ανάπτυξη και εγκατάσταση φωτοβολταϊκών από ιδιώτες. Για την αντιμετώπιση των ζητημάτων ποιότητας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ερευνηθεί, αναλυθεί, ανακαλυφθεί πολλές λύσεις. Οι τρεις σημαντικότερες κατηγορίες λύσεων είναι:

- Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μπαταριών
- Χαμηλή επαγωγική αντίδραση γραμμών μεταφοράς
- Διαχείριση ροή ισχύος
- Μεταβολή διακόπτη/ρυθμιστή τάσης μετασχηματιστή



Εικόνα 1.4 Έξυπνο δίκτυο

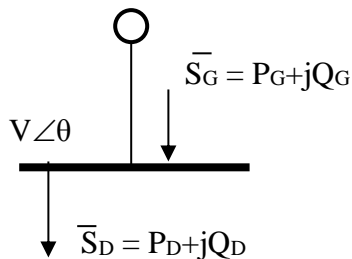
## 1.6 Ανάλυση Ροής Φορτίου

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) έχουν ως στόχο την παροχή πραγματικής και άεργου ισχύος στα διασυνδεδεμένα φορτία. Η ροή της ισχύος στο δίκτυο για την ενεργειακή κάλυψη της κατανάλωσης, αποτελεί την σημαντικότερη κατάσταση λειτουργίας για ένα Σ.Η.Ε.. Επιπλέον, πρέπει να υπάρχει η βεβαιότητα ότι η συχνότητα και η τάση στους διαφόρους ζυγούς θα βρίσκονται μέσα σε προδιαγεγραμμένα και ανεκτά όρια λειτουργίας παρά το γεγονός ότι τα φορτία συχνά μεταβάλλονται. Στα δίκτυα που έχουν τη μορφή ακτινικού δικτύου, η ροή της ισχύος είναι καθορισμένη. Όμως στα διασυνδεδεμένα δίκτυα μεταφοράς και σε περιπτώσεις όπου η διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής είναι αυξημένη, η κατανομή και η διαχείριση των ροών ισχύος έχει ένα πολύ σημαντικό ρόλο (τεχνικά και οικονομικά). Έτσι, η μελέτη της ροής φορτίου σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη για την καθημερινή λειτουργία του, την επέκτασή του, την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής καθώς και για τη διασύνδεσή του με άλλα συστήματα.

Το πρόβλημα των ροών φορτίου αποτελείται από τον προσδιορισμό των μεταβλητών του συστήματος (ισχύων, ρευμάτων, τάσεων) και την υπάρχουσα κατάσταση μόνιμης λειτουργίας. Πλέον, η ανάλυση ροών φορτίου γίνεται με τη χρήση υπολογιστών/προγραμμάτων που επιτρέπουν την ανάλυση δικτύων με πολλούς κόμβους και διασυνδέσεις, επιλέγοντας και την επιθυμητή μέθοδο ανάλυσης. Ο στόχος κάθε προγράμματος ανάλυσης ροής φορτίου είναι να παράγει σε μια δεδομένη κατάσταση λειτουργίας τις παρακάτω πληροφορίες:

- Το μέτρο της τάσης και τη φασική γωνία σε κάθε ζυγό.
- Την ενεργό και άεργο ισχύ που εγχέεται σε κάθε στοιχείο.
- Την άεργο ισχύ φόρτισης κάθε γεννήτριας

Θεωρώντας τη γενική περίπτωση ενός ζυγού του συστήματος, με παραγωγή και φορτίο, που εκφράζονται ως ισχύς, διακρίνουμε τα ακόλουθα μεγέθη, όπως φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:



$P_G$ : Παραγόμενη ενεργός ισχύς

$Q_G$ : Παραγόμενη άεργος ισχύς

$P_D$ : Ενεργός ισχύς φορτίου

$Q_D$ : Άεργος ισχύς φορτίου

$V$ : Τάση ζυγού (μέτρο)

$\theta$ : Γωνία (τάσεως) ζυγού

Σε ένα σύστημα με  $N$  ζυγούς υπάρχουν συνολικά  $6N$  μεταβλητές, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες. Τα φορτία, ή μεταβλητές ζήτησεως ( $P_D$ ,  $Q_D$  είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος και χαρακτηρίζονται ως μεταβλητές διαταραχής. Οι ισχύες παραγωγής ( $P_G$ ,  $Q_G$ ) χαρακτηρίζονται σαν μεταβλητές ελέγχου και οι τάσεις και οι γωνίες των ζυγών, οι οποίες είναι οι εξαρτημένες μεταβλητές, χαρακτηρίζονται ως μεταβλητές καταστάσεως.

Η συνισταμένη ισχύς του ζυγού δίνεται από τη σχέση:

Η συνισταμένη ισχύς του ζυγού δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{S} = \bar{S}_G - \bar{S}_D = P_G - P_D + j(Q_G - Q_D)$$

Αντίστοιχα, ορίζεται το ρεύμα ζυγού:

$$\bar{J} = \frac{\bar{S}^*}{\bar{V}^*} = \frac{\bar{S}_G^* - \bar{S}_D^*}{\bar{V}^*} = \bar{J}_G - \bar{J}_D = \frac{P_G - P_D - j(Q_G - Q_D)}{\bar{V}^*} = \frac{P - jQ}{\bar{V}^*}$$

Για την πραγματοποίηση της μελέτης ροής φορτίου ορίζουμε τρεις τύπους ζυγών:

- Ζυγοί φορτίου (PQ), στους οποίους είναι γνωστή η ισχύς ζήτησης ή φορτίου και άγνωστη είναι η τάση (κατά μέγεθος και γωνία).
- Ζυγοί παραγωγής (PV), στους οποίους είναι δοσμένα, η παραγόμενη ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσεως και αναζητείται η άεργος ισχύς και η γωνία της τάσεως
- Ζυγός ταλαντώσεως ή ζυγός αναφοράς, στον οποίο επιβάλλεται σταθερή τάση κατά μέτρο και γωνία ενώ προσδιορίζεται οι ισχύς παραγωγής. Ο ζυγός αναφοράς χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει τις απώλειες του δικτύου, που δεν είναι γνωστές εξ' αρχής και γενικά για άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος.

Η μαθηματική ανάλυση καταλήγει στη διαμόρφωση ενός συστήματος  $2N$  μη γραμμικών εξισώσεων, όπου  $N$  ο αριθμός των κόμβων (ζυγών) του δικτύου. Οι γραμμές μεταφοράς παριστάνονται με το ισοδύναμο  $\Pi$  με ανηγμένες παραμέτρους και τα φορτία θεωρούνται συμμετρικά. Οι εγκάρσιες αγωγιμότητες προς τη γη των γραμμών μεταφοράς συγκεντρώνονται στους ζυγούς, οπότε για το θεωρούμενο ζυγό θα είναι:

$$Y_{io} = \sum_{j=1}^N Y_{ijo}$$

Εάν  $Y_{i1}, Y_{i2}, \dots, Y_{iN}$ , είναι οι αγωγιμότητες σειράς των γραμμών οι οποίες συνδέονται στο ζυγό  $i$  και  $V_1, V_2, \dots, V_N$ , οι τάσεις προς τη γη των ζυγών του δικτύου, τότε:

$$y_{ii} = Y_{io} + \sum_{j \neq i}^N Y_{ij}$$

και

$$y_{ij} = -Y_{ij} = -Y_{ji}$$

Επομένως, η εξίσωση των ρευμάτων στο ζυγό γράφεται:

$$\bar{J}_i = y_{i1} \bar{V}_1 + y_{i2} \bar{V}_2 + \dots + y_{ii} \bar{V}_i + \dots + y_{iN} \bar{V}_N = \sum_{j=1}^N y_{ij} \bar{V}_j$$

Ή σε μορφή μήτρας :

$$\begin{bmatrix} \bar{J}_1 \\ \bar{J}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{J}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1N} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ y_{N1} & y_{N2} & \dots & y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{V}_N \end{bmatrix}$$

$$\text{ή } [Jz] = [Yz] [Vz]$$

όπου  $[Jz]$ ,  $[Vz]$ , τα διανύσματα ρευμάτων και τάσεων ζυγών, διαστάσεων  $N$ ,  $[Yz]$ , η μήτρα αγωγιμοτήτων ζυγών του συστήματος, διαστάσεων  $N \times N$ , με μιγαδικά στοιχεία.

Όμως ισχύει ότι:

$$\bar{J}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{V}_i^*}$$

Όπότε η εξίσωση ροών φορτίου γίνεται:

$$P_i - jQ_i = y_{i1} \bar{V}_i \bar{V}_i^* + y_{i2} \bar{V}_2 \bar{V}_i^* + \dots + y_{ii} \bar{V}_i \bar{V}_i^* + \dots + y_{iN} \bar{V}_N \bar{V}_i^* = \bar{V}_i^* \sum_{j=1}^N y_{ij} \bar{V}_j$$

Χωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη, προκύπτουν δύο εξισώσεις της μορφής:

$$P_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^N |V_j| \cdot [g_{ji} \cdot \cos(\theta_j - \theta_i) - b_{ji} \cdot \sin(\theta_j - \theta_i)]$$

$$-Q_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^N |V_j| \cdot [g_{ji} \cdot \sin(\theta_j - \theta_i) + b_{ji} \cdot \cos(\theta_j - \theta_i)]$$

όπου  $y_{ji} = g_{ji} + jb_{ji}$ .

Η αντιστροφή της εξισώσεως, δίνει την εξίσωση:

$$[Vz] = [Zz] [Jz]$$

όπου

$$[Zz] = [Yz]^{-1} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1N} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{N1} & \dots & \dots & z_{NN} \end{bmatrix}$$

η μήτρα σύνθετων αντιστάσεων ζυγών, επίσης με μιγαδικά στοιχεία.

Συνεπώς, για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας N ζυγών, έχουμε 2N εξισώσεις ροών φορτίου. Οι εξισώσεις είναι αλγεβρικές και μη γραμμικές, εφόσον αναφέρονται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, γεγονός που κάνει προτιμότερη την αριθμητική επίλυση με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Μια από τις ψηφιακές μεθόδους για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου είναι η μέθοδος Newton – Raphson. Η μέθοδος αυτή απαιτεί στην επίλυση την κατάστρωση των

εξισώσεων που περιγράφουν το πρόβλημα σαν σύστημα  $F(x) = 0$ . Έστω ότι το προς επίλυση σύστημα είναι:

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

.

.

.

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

και  $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$  η αρχική λύση. Υποθέτουμε ότι  $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$  είναι οι διαφορές, οι οποίες προστιθέμενες στην αρχική λύση δίνουν την τελική λύση, της μορφής

$$x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}$$

Παίρνοντας το ανάπτυγμα Taylor των εξισώσεων γύρω από τα σημεία  $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$  έχουμε:

$$f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) = \\ f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \left( \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right)^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \left( \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right)^{(0)} + \dots + \Delta x_n^{(0)} \left( \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right)^{(0)}$$

και καταστρώνουμε το γενικό σύστημα εξισώσεων

$$[\Delta f] = [J] [\Delta x]$$

όπου το διάνυσμα των διαφορών των συναρτήσεων είναι:

$$[\Delta f] = \begin{bmatrix} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \vdots \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) - f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix}$$

και το διάνυσμα διαφορών είναι

$$[\Delta x] = \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix}$$

Η Ιακωβιανή μήτρα του συστήματος είναι:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

Στην περίπτωση των ροών φορτίου οι μεταβλητές  $x$  και  $f$  παριστάνουν τα ακόλουθα μεγέθη:

$$[x] = \begin{bmatrix} -\frac{\delta_i}{|V_i|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_n \\ |V_1| \\ \vdots \\ |V_n| \end{bmatrix}$$

$$\text{και } [x_0] = \begin{bmatrix} -\frac{\delta_{0,i}}{|V_{0,i}|} \end{bmatrix}$$

όπου  $[x]$  το διάνυσμα τελικής καταστάσεως και  $[x_0]$  το διάνυσμα αρχικών τιμών.

Οπότε, το διάνυσμα που περιέχει τις προσδιορισμένες τιμές των ισχύων  $P_S$  και  $Q_S$  είναι:

$$[f(x)] = \begin{bmatrix} -\frac{P_{Si}}{Q_{Si}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{S1} \\ \vdots \\ P_{Sn} \\ Q_{S1} \\ \vdots \\ Q_{Sn} \end{bmatrix}$$

$$\text{και } [f(x_0)] = \begin{bmatrix} -\frac{P_i}{Q_i} \end{bmatrix}$$

το διάνυσμα των κάθε φορά προσεγγίσεων.

Τα  $P$ ,  $Q$  υπολογίζονται κάθε φορά από τις προσεγγίσεις  $\delta_0$ ,  $|V_0|$  ενώ τα  $P_S$ ,  $Q_S$  είναι δεδομένα του προβλήματος ροής φορτίου.

Οι διορθώσεις των ζυγών κατάστασης είναι:

$$[\Delta x] = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta \delta_i}{|\Delta V_i|} \end{bmatrix}$$



ενώ τα σφάλματα των ζυγών:

$$[\Delta f(x)] = \begin{bmatrix} -\frac{P_{Si}-P_i}{Q_{Si}-Q_i} \end{bmatrix}$$

Οπότε η ιακωβιανή μήτρα έχει τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \vdots & \frac{\partial P}{|\partial V|} \\ -\frac{\partial Q}{\partial \delta} & \vdots & -\frac{\partial Q}{|\partial V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & \vdots & J_2 \\ J_3 & \vdots & J_4 \end{bmatrix}$$

Οι ισχύεις των ζυγών δίνονται συναρτήσει των μεταβλητών κατάστασης από τις σχέσεις:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^N y_{ij} V_j = |V_i|^2 |y_{ij}| + \sum_{j=1, j \neq i}^N V_i^* y_{ij} V_j$$

Και θεωρώντας ότι  $V_i = |V_i| \angle \delta$  και  $y_{i,j} = |y_{i,j}| \angle \delta$ , έχουμε:

$$P_i = |V_i^2 y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^N |V_i y_{ij} V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)$$

$$Q_i = |V_i^2 y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^N |V_i y_{ij} V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τις μερικές παραγώγους που αποτελούν τα στοιχεία της Ιακωβιανής. Για κάθε υπομήτρα ( $J_1 - J_4$ ) υπολογίζουμε χωριστά τα διαγώνια και τα μη διαγώνια στοιχεία.

$$J1_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_i V_j y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)$$

$$J1_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -\sum_{j \neq i} |V_i V_j y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = -Q_i + |V_i^2 y_{ii}| \sin \theta_{ii}, j \neq i$$

$$J2_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = |V_i y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)$$

$$J2_{ii} = \frac{\partial P_i}{|\partial V_i|} = 2|V_i y_{ii}| \cos \delta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_i y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = |V_i y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \frac{P_i}{|V_i|}, j \neq i$$

$$J3_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i V_j y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)$$

$$J3_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i V_j y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = P_i - |V_i^2 y_{ii}| \cos \theta_{ii}, j \neq i$$

$$J4_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = |V_i y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)$$

$$J4_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = 2|V_i y_{ii}| \sin \delta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = |V_i y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \frac{Q_i}{|V_i|}, j \neq i$$

Οι πλήρεις διαστάσεις της Ιακωβιανής μήτρας για ένα σύστημα N ζυγών είναι 2Nx2N. Δεν είναι απαραίτητο να υπολογιστούν όλες οι παράμετροι γιατί στο ζυγό αναφοράς το μέτρο και η γωνία της τάσης είναι γνωστά και στους ζυγούς παραγωγής είναι γνωστά τα μέτρα των τάσεων και άγνωστα τα Qs.

Έτσι, αριθμώντας τους ζυγούς ώστε ο ζυγός 1 να είναι ζυγός ταλάντωσης, οι ζυγοί 2 έως m ζυγοί παραγωγής και οι ζυγοί m+1 έως N ζυγοί φορτίου, η Ιακωβιανή που χρειάζεται είναι:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right] & \left[ \frac{\partial P}{\partial V} \right] \\ \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] & \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

$$[\Delta P] = \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \cdot [\Delta \delta] + \left[ \frac{\partial P}{\partial V} \right] \cdot [\Delta V]$$

$$[\Delta Q] = \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \cdot [\Delta \delta] + \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right] \cdot [\Delta V]$$

$$[\Delta \delta] = ([\Delta P] - \left[ \frac{\partial P}{\partial V} \right] \cdot [\Delta V]) \cdot \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right]^{-1}$$

$$[\Delta V] = ([\Delta Q] - \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \cdot [\Delta \delta]) \cdot \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right]^{-1}$$

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου Newton – Raphson είναι ο τετραγωνικός ρυθμός σύγκλισης, ο οποίος είναι ταχύτερος κάθε άλλης μεθόδου. Επίσης είναι μια πολύ αξιόπιστη μέθοδος που δεν επηρεάζεται από παράγοντες όπως η επιλογή του ζυγού ταλαντώσεως ή μικρές επαγωγικές αντιδράσεις μεταξύ των ζυγών. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η

αναγκαιότητα διαμόρφωσης και αντιστροφής της Ιακωβιανής μήτρας σε κάθε ανακύκλωση. Ένα άλλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι εφαρμόζεται μόνο σε κοίλες συναρτήσεις και ότι συγκλίνει στη λύση που βρίσκεται πλησιέστερα στην αρχική τιμή. Αποδεικνύεται θεωρητικά ότι το πρόβλημα της ροής φορτίου έχει διπλάσιο αριθμό πιθανών λύσεων από τον αριθμό των κόμβων του δικτύου. Στην πράξη όμως η σωστή λύση είναι διακριτή και επιτυγχάνεται πάντοτε ή η λύση αποκλίνει.

Ένας συνοπτικός αλγόριθμος της μεθόδου Newton – Raphson που μπορεί να δοθεί είναι ο ακόλουθος:

1. Δίνονται οι αρχικές τιμές στα  $|V|$  και  $\delta$ , όπου αυτά δεν είναι καθορισμένα.
2. Υπολογίζονται οι ισχύεις των ζυγών από τις εξισώσεις. Είναι γνωστά τα  $P$  για όλους τους ζυγούς (πλην του ζυγού αναφοράς) και τα  $Q$  για τους ζυγούς φορτίου. Συνεπώς χρειάζεται ο υπολογισμός των  $P_2, \dots, P_N$  και μόνο των  $Q_{m+1}, \dots, Q_N$  που θα δώσουν τις αποκλίσεις  $[\Delta P]$  και  $[\Delta Q]$ .
3. Υπολογίζεται η Ιακωβιανή μήτρα.
4. Επιλύεται το σύστημα και υπολογίζονται οι αποκλίσεις  $[\Delta V]$  και  $[\Delta \delta]$ .
5. Αν οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες από τα όρια ανοχής, επανερχόμαστε στο βήμα (2).
6. Μετά την σύγκλιση των αποτελεσμάτων υπολογίζονται τα  $P$  και  $Q$  του ζυγού αναφοράς και κατόπιν οι ροές φορτίου στις γραμμές.



## 2. Κατανεμημένοι αλγόριθμοι

### 2.1 Θεωρία γράφων

Στα μαθηματικά, η θεωρία των γράφων είναι η μελέτη γράφων, τα οποία είναι μαθηματικές δομές που χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιούν ζεύγη σχέσεων μεταξύ αντικειμένων. Ένας γράφος σε αυτό το πλαίσιο αποτελείται από κορυφές, κόμβους ή σημεία που συνδέονται με άκρα, τόξα ή γραμμές. Ένας γράφος μπορεί να μην είναι προσανατολισμένος, πράγμα που σημαίνει ότι δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ των δύο κορυφών που συνδέονται με κάθε άκρη, ή οι άκρες της μπορεί να κατευθύνονται από μια κορυφή στην άλλη. Οι γράφοι είναι ένα από τα πρωταρχικά αντικείμενα της μελέτης στα διακριτά μαθηματικά. Στην πιο κοινή έννοια του όρου, ένας γράφος είναι ένα ορισμένο ζεύγος  $G = (V, E)$  που περιλαμβάνει ένα σύνολο  $V$  κορυφών ή κόμβων ή σημείων μαζί με ένα σύνολο  $E$  άκρων ή τόξων ή γραμμών που είναι 2 (Δηλαδή μια άκρη συνδέεται με δύο κορυφές και αυτή η σύνδεση παίρνει τη μορφή του ζεύγους που περιλαμβάνει αυτές τις δύο κορυφές). Για να αποφευχθεί η ασάφεια, αυτός ο τύπος γραφήματος μπορεί να περιγραφεί με ακρίβεια ως μη κατευθυνόμενος και απλός. Οι γράφοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μοντελοποιήσουν πολλούς τύπους σχέσεων και διαδικασιών όπως σε συστήματα φυσικής, βιολογίας, κοινωνιολογίας και πληροφορικής. Πολλά πρακτικά προβλήματα μπορούν να αναπαρασταθούν από γράφους. Δίνοντας έμφαση στην εφαρμογή τους στα συστήματα του πραγματικού κόσμου, ο όρος δίκτυο συχνά ορίζεται ως ένα γράφημα στο οποίο τα χαρακτηριστικά (π.χ. ονόματα) συνδέονται με τους κόμβους ή / και τις άκρες.

Στην επιστήμη των υπολογιστών, οι γράφοι χρησιμοποιούνται για να αντιπροσωπεύουν δίκτυα επικοινωνίας, οργάνωση δεδομένων, υπολογιστικές συσκευές, ροή υπολογισμού, κλπ. Για παράδειγμα, η δομή σύνδεσης μιας ιστοσελίδας μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα κατευθυνόμενο γράφημα, στο οποίο οι κορυφές αντιπροσωπεύουν ιστοσελίδες και οι κατευθυνόμενες ακμές αντιπροσωπεύουν συνδέσμους από τη μια σελίδα στην άλλη.

Η θεωρία των γράφων χρησιμοποιείται επίσης για τη μελέτη μορίων στη χημεία και στη φυσική. Στη φυσική της συμπυκνωμένης ύλης, η τρισδιάστατη δομή των πολύπλοκων προσομοιωμένων ατομικών δομών μπορεί να μελετηθεί ποσοτικά συγκεντρώνοντας στατιστικά στοιχεία σχετικά με τις ιδιότητες που σχετίζονται με την τοπολογία των ατόμων. Στη χημεία ένας γράφος κάνει ένα φυσικό μοντέλο για ένα μόριο, όπου οι κορυφές αντιπροσωπεύουν δεσμούς ατόμων και άκρων. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στην επεξεργασία ηλεκτρονικών υπολογιστών των μοριακών δομών, που κυμαίνονται από τους χημικούς συντάκτες μέχρι την αναζήτηση βάσεων δεδομένων.

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω θεωρία μπορεί να απεικονιστεί ένα ηλεκτρικό δίκτυο με τηλεπικοινωνιακές διασυνδέσεις μεταξύ των κόμβων του. Το ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να

απεικονιστεί γραφικά με τη χρήση ενός μη κατευθυνόμενου γράφου  $G$  που ορίζεται ως ένα ζευγάρι  $(V, E)$ , όπου  $V$  είναι ένα συγκεκριμένο σε πλήθος σύνολο κόμβων που αποτελούν τα στοιχεία ενός συστήματος – στο πρόβλημα που μελετάται αναφερόμαστε σε ζυγούς ηλεκτρικού δικτύου – και  $E$  είναι το σύνολο των γραμμών που απεικονίζουν τις συνδέσεις μεταξύ ενός ηλεκτρικού δικτύου. Ο μη κατευθυνόμενος γράφος παρέχει τη δυνατότητα στους κόμβους του να επικοινωνούν αμφίδρομα μεταξύ τους και να ανταλλάσσουν πληροφορίες εφόσον είναι εφικτή η σύνδεση μεταξύ τους, δηλαδή αν και εφόσον συνδέονται μεταξύ τους μέσω μίας γραμμής. Για την απεικόνιση αυτών των διασυνδέσεων ενός μη κατευθυνόμενου γράφου χρησιμοποιείται ένας πίνακας που παρουσιάζει τις γειτνιάσεις μεταξύ των κόμβων. Ο πίνακας αυτός μπορεί να ονομαστεί πίνακας γειτνίασης  $A$ , ο οποίος ενημερώνει το αν υφίσταται γραμμή και κατ' επέκταση σύνδεση μεταξύ δυο στοιχείων. Τα στοιχεία αυτού του πίνακα ορίζονται ως εξής:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν υπάρχει σύνδεση μεταξύ των στοιχείων } i, j \\ 0, & \text{αν δεν υπάρχει σύνδεση μεταξύ των στοιχείων } i, j \end{cases}$$

Αυτός ο πίνακας γειτνίασης είναι απαραίτητος για την τοπολογία του ηλεκτρικού δικτύου που θα μελετηθεί και παρουσιάζει με ένα απλό και μαθηματικό τρόπο τις διασυνδέσεις του δικτύου.

## 2.2 Προβλήματα βελτιστοποίησης

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να αναπαρασταθεί με τον ακόλουθο τρόπο:

Δεδομένης: μια συνάρτησης  $f: A \rightarrow R$  από κάποιο σύνολο  $A$  στους πραγματικούς αριθμούς

Έστω: ένα στοιχείο  $x_0$  του  $A$  έτσι ώστε  $f(x_0) \leq f(x)$  για όλα τα  $x$  στο  $A$  ("ελαχιστοποίηση") ή τέτοια ώστε  $f(x_0) \geq f(x)$  για όλα τα  $x$  του  $A$  («μεγιστοποίηση»).

Μια τέτοια διατύπωση ονομάζεται πρόβλημα βελτιστοποίησης ή πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού. Πολλά πραγματικά και θεωρητικά προβλήματα μπορούν να διαμορφωθούν σε αυτό το γενικό πλαίσιο. Τα προβλήματα που διατυπώνονται χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική στους τομείς της φυσικής και της όρασης του υπολογιστή μπορούν να αναφέρονται στην τεχνική ως ελαχιστοποίηση της ενέργειας, μιλώντας για την αξία της συνάρτησης  $f$  που αντιπροσωπεύει την ενέργεια του μοντέλου συστήματος. Η συνάρτηση  $f$  ονομάζεται ποικιλοτρόπως αντικειμενική συνάρτηση, συνάρτηση απώλειας ή συνάρτηση κόστους (ελαχιστοποίηση), συνάρτηση χρησιμότητας ή λειτουργία φυσικής κατάστασης (μεγιστοποίηση), ή σε ορισμένα πεδία, ενεργειακή λειτουργία. Μια εφικτή λύση που ελαχιστοποιεί (ή μεγιστοποιεί, εάν αυτός είναι ο στόχος) η αντικειμενική λειτουργία ονομάζεται βέλτιστη λύση.

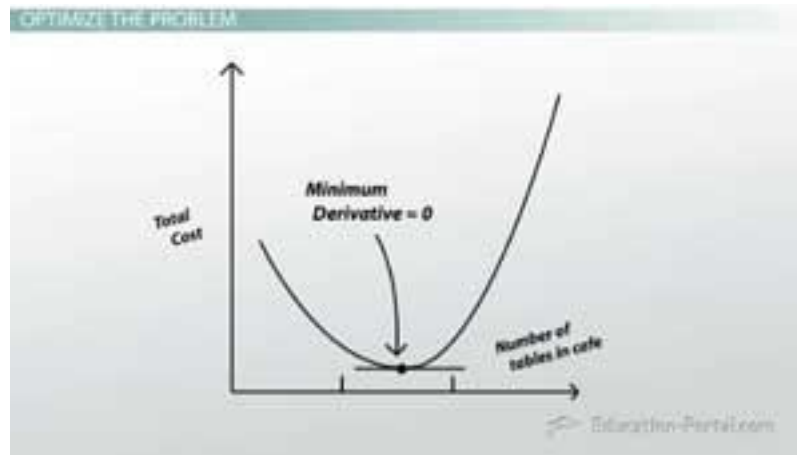
Όλα τα σχετικά με τη βελτιστοποίηση προβλήματα έχουν ως σκοπό την επιλογή μιας τιμής εισόδου που επιλέγεται από ένα σύνολο και η οποία θα μεγιστοποιεί ή θα ελαχιστοποιεί την τιμή μιας δεδομένης συνάρτησης. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης έχουν ξεχωριστές ιδιαιτερότητες με αποτέλεσμα το καθένα να χρειάζεται την δική του συγκεκριμένη προσέγγιση. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες σημαντικές κατηγορίες εφαρμογής προβλημάτων βελτιστοποίησης.

- Ο κυρτός προγραμματισμός μελετά την περίπτωση όταν η αντικειμενική λειτουργία είναι κυρτή (ελαχιστοποίηση) ή κοίλη (μεγιστοποίηση) και το σύνολο περιορισμού είναι κυρτό. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως μια ιδιαίτερη περίπτωση μη γραμμικού προγραμματισμού ή ως γενίκευση γραμμικού ή κυρτού τετραγωνικού προγραμματισμού.
- Ο γραμμικός προγραμματισμός (LP), ένας τύπος κυρτού προγραμματισμού, μελετά την περίπτωση στην οποία η αντικειμενική συνάρτηση  $f$  είναι γραμμική και οι περιορισμοί προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας μόνο γραμμικές ισοτιμίες και ανισότητες. Ένα τέτοιο σύνολο ονομάζεται πολυεδρικό ή πολυτοπικό εάν είναι οριοθετημένο.
- Ο προγραμματισμός κώνων δεύτερης τάξης (SOCP) είναι ένα κυρτό πρόγραμμα και περιλαμβάνει ορισμένους τύπους τετραγωνικών προγραμμάτων.
- Ο ημι-ορισμένος προγραμματισμός (SDP) είναι μία υποπεριοχή κυρτή βελτιστοποίηση όπου οι υποκείμενες μεταβλητές είναι ημιτελείς πίνακες. Πρόκειται για γενίκευση του γραμμικού και κυρτού τετραγωνικού προγραμματισμού.
- Ο κωνικός προγραμματισμός είναι μια γενική μορφή κυρτού προγραμματισμού. Μπορούν όλοι να θεωρηθούν ως κωνικά προγράμματα με τον κατάλληλο τύπο κώνου.
- Ο γεωμετρικός προγραμματισμός είναι μια τεχνική με την οποία οι περιορισμοί αντικειμενικών και ανισοτήτων και ισοτήτων μπορούν να μετατραπούν σε ένα κυρτό πρόγραμμα.
- Ο προγραμματισμός ακέραιων γραμμών προγραμματίζει γραμμικά προγράμματα στα οποία μερικές ή όλες οι μεταβλητές περιορίζονται να πάρουν ακέραιες τιμές. Αυτό δεν είναι κυρτό, και γενικά πολύ πιο δύσκολο από τον κανονικό γραμμικό προγραμματισμό.
- Ο τετραγωνικός προγραμματισμός επιτρέπει στην αντικειμενική συνάρτηση να έχει τετραγωνικούς όρους, ενώ το εφικτό σύνολο πρέπει να προσδιορίζεται με γραμμικές ισοτιμίες και ανισότητες. Για συγκεκριμένες μορφές του τετραγωνικού όρου, αυτός είναι ένας τύπος κυρτού προγραμματισμού.
- Μελέτες κλασματικού προγραμματισμού βελτιστοποιούν τις αναλογίες δύο μη γραμμικών λειτουργιών. Η ειδική κλάση των κοίλων κλασματικών προγραμμάτων μπορεί να μετατραπεί σε ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης.
- Ο μη γραμμικός προγραμματισμός μελετά τη γενική περίπτωση στην οποία η αντικειμενική λειτουργία ή οι περιορισμοί ή και τα δύο περιέχουν μη γραμμικά μέρη.

Αυτό μπορεί να είναι ή να μην είναι ένα κυρτό πρόγραμμα. Γενικά, το αν το πρόγραμμα είναι κυρτό επηρεάζει τη δυσκολία επίλυσης αυτού.

- Ο στοχαστικός προγραμματισμός μελετά την περίπτωση στην οποία ορισμένοι από τους περιορισμούς ή οι παράμετροι εξαρτώνται από τυχαίες μεταβλητές.
- Ο ισχυρός προγραμματισμός είναι, όπως ο στοχαστικός προγραμματισμός, μια προσπάθεια να καταγραφεί η αβεβαιότητα στα δεδομένα που αποτελούν το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Οι ισχυροί στόχοι βελτιστοποίησης για την εξεύρεση λύσεων που ισχύουν υπό όλες τις πιθανές πραγματοποιήσεις των αβεβαιοτήτων.
- Η συνδυαστική βελτιστοποίηση αφορά προβλήματα όπου το σύνολο εφικτών λύσεων είναι διακριτό ή μπορεί να μειωθεί σε ένα διακεκριμένο.
- Η στοχαστική βελτιστοποίηση χρησιμοποιείται με τυχαίες (θορυβώδεις) μετρήσεις λειτουργίας ή τυχαίες εισόδους στη διαδικασία αναζήτησης.
- Η βελτιστοποίηση απεριόριστων διαστάσεων μελετά την περίπτωση όπου το σύνολο εφικτών λύσεων είναι ένα υποσύνολο ενός απεριόριστου διαστάσεων χώρου, όπως ένας χώρος λειτουργιών.
- Τα ευρετικά και τα μετα-ευρετικά στοιχεία κάνουν λίγες ή καθόλου υποθέσεις σχετικά με το βελτιστοποιημένο πρόβλημα. Συνήθως, τα ευρετικά δεν εγγυώνται ότι πρέπει να βρεθεί βέλτιστη λύση. Από την άλλη πλευρά, οι ευρετικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την εξεύρεση προσεγγιστικών λύσεων για πολλά περίπλοκα προβλήματα βελτιστοποίησης.
- Η ικανοποίηση περιορισμού μελετά την περίπτωση στην οποία η αντικειμενική συνάρτηση  $f$  είναι σταθερή (αυτό χρησιμοποιείται στην τεχνητή νοημοσύνη, ιδιαίτερα στην αυτοματοποιημένη συλλογιστική). Ο προγραμματισμός περιορισμού είναι ένα παράδειγμα προγραμματισμού όπου οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών δηλώνονται με τη μορφή περιορισμών.
- Ο διακριτικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται όταν τουλάχιστον ένας περιορισμός πρέπει να ικανοποιηθεί, αλλά όχι όλα. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στον προγραμματισμό.
- Η χαρτογράφηση χώρου είναι μια ιδέα για τη μοντελοποίηση και τη βελτιστοποίηση ενός μηχανικού συστήματος με ακρίβεια μοντέλου υψηλής ακρίβειας (fine) που εκμεταλλεύεται ένα κατάλληλο φυσικά ουσιαστικό χονδρό ή υποκατάστατο μοντέλο.





Εικόνα 2.1 Πρόβλημα βελτιστοποίησης

### Υπολογιστικές τεχνικές βελτιστοποίησης

- Η μέθοδος του Νεύτωνα
- Διαδοχικός τετραγωνικός προγραμματισμός: Μια μέθοδος βασισμένη στο Νεύτωνα για περιορισμένα προβλήματα μικρής και μεσαίας κλίμακας.
- Μέθοδοι εσωτερικών σημείων: Πρόκειται για μια μεγάλη κατηγορία μεθόδων για περιορισμένη βελτιστοποίηση.
- Μέθοδοι καθορισμού συντεταγμένων: Αλγόριθμοι οι οποίοι ενημερώνουν μία μόνο συντεταγμένη σε κάθε επανάληψη
- Μέθοδοι κλίσης συζυγούς: Επαναληπτικές μέθοδοι για μεγάλα προβλήματα. (Θεωρητικά, αυτές οι μέθοδοι καταλήγουν σε ένα πεπερασμένο αριθμό βημάτων με τετραγωνικές αντικειμενικές λειτουργίες, αλλά αυτός ο πεπερασμένος τερματισμός δεν παρατηρείται στην πράξη σε υπολογιστές πεπερασμένης ακριβείας.)
- Βαθμιαία κάθοδος (εναλλακτικά, "απότομη κάθοδος" ή "απότομη ανάβαση"): Μια (αργή) μέθοδος ιστορικού και θεωρητικού ενδιαφέροντος, η οποία έχει ανανεώσει το ενδιαφέρον για την εξεύρεση προσεγγιστικών λύσεων τεράστιων προβλημάτων.
- Υποτακτικές μέθοδοι - Μια επαναληπτική μέθοδος για μεγάλες τοπικές λειτουργίες Lipschitz χρησιμοποιώντας γενικευμένες κλίσεις.
- Μέθοδος κατάβασης δέσμης: Μια επαναληπτική μέθοδος για προβλήματα μικρού και μεσαίου μεγέθους με τοπικές λειτουργίες Lipschitz, ιδιαίτερα για κυρτά προβλήματα ελαχιστοποίησης. (Παρόμοια με τις μεθόδους κλίσης του συζυγούς)
- Μέθοδος ελλειψοειδούς: Μια επαναληπτική μέθοδος για μικρά προβλήματα με αντικειμενικές λειτουργίες και με μεγάλο θεωρητικό ενδιαφέρον, ιδιαίτερα για την καθιέρωση πολυωνυμικής πολυπλοκότητας χρόνου μερικών συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης.
- Μέθοδος μειωμένης κλίσης (Frank-Wolfe) για την κατά προσέγγιση ελαχιστοποίηση των ειδικά δομημένων προβλημάτων με γραμμικούς περιορισμούς, ειδικά με τα δίκτυα

κυκλοφορίας. Για γενικά απεριόριστα προβλήματα, η μέθοδος αυτή μειώνεται στη μέθοδο κλίσης, η οποία θεωρείται ξεπερασμένη (για σχεδόν όλα τα προβλήματα).

- Οι μέθοδοι τετραγωνικού Νεύτωνα: Επαναληπτικές μέθοδοι για μεσαίου μεγέθους προβλήματα (π.χ.  $N < 1000$ ).
- Συγχρονική στοχαστική προσέγγιση προσέγγισης (SPSA) για στοχαστική βελτιστοποίηση. Χρησιμοποιεί την τυχαία (αποτελεσματική) προσέγγιση κλίσης.
- Μέθοδοι που αξιολογούν μόνο τις τιμές λειτουργιών: Εάν ένα πρόβλημα είναι συνεχώς διαφοροποιήσιμο, τότε οι κλίσεις μπορούν να προσεγγιστούν χρησιμοποιώντας πεπερασμένες διαφορές, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος με κλίση.
- Μέθοδοι παρεμβολής
- Οι μέθοδοι αναζήτησης μοτίβων

### **Εφαρμογή προβλημάτων βελτιστοποίησης σε αντικείμενα εργασίας**

- Μηχανική: Τα προβλήματα της άκαμπτης δυναμικής του σώματος (ιδιαίτερα η αρθρωτή άκαμπτη δυναμική του σώματος) συχνά απαιτούν τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού, αφού μπορείτε να δείτε την άκαμπτη δυναμική του σώματος σαν να προσπαθείτε να λύσετε μια συνηθισμένη διαφορική εξίσωση σε μια πολλαπλή δέσμευση.
- Τα οικονομικά συνδέονται στενά με τη βελτιστοποίηση των παραγόντων ότι ένας σημαντικός ορισμός περιγράφει σχετικώς την οικονομική επιστήμη ως την «μελέτη της ανθρώπινης συμπεριφοράς ως σχέση μεταξύ άκρων και σπανίων μέσων» με εναλλακτικές χρήσεις. Η σύγχρονη θεωρία βελτιστοποίησης περιλαμβάνει την παραδοσιακή θεωρία βελτιστοποίησης αλλά και τις επικαλύψεις με τη θεωρία των παιγνίων και τη μελέτη της οικονομικής ισορροπίας.
- Στη μικροοικονομία, το πρόβλημα μεγιστοποίησης της χρησιμότητας, το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης των δαπανών, είναι προβλήματα οικονομικής βελτιστοποίησης. Στο βαθμό που συμπεριφέρονται με συνέπεια, οι καταναλωτές αναμένεται να μεγιστοποιήσουν τη χρησιμότητά τους, ενώ οι επιχειρήσεις συνήθως αναμένεται να μεγιστοποιήσουν το κέρδος τους. Επίσης, οι πράκτορες συχνά υποδεικνύονται ότι αντιμετωπίζουν κίνδυνο, προτιμώντας έτσι να αποφύγουν τον κίνδυνο. Οι τιμές των περιουσιακών στοιχείων διαμορφώνονται επίσης χρησιμοποιώντας τη θεωρία βελτιστοποίησης, αν και τα υποκείμενα μαθηματικά βασίζονται στη βελτιστοποίηση των στοχαστικών διαδικασιών και όχι στη στατική βελτιστοποίηση. Η θεωρία του εμπορίου χρησιμοποιεί επίσης τη βελτιστοποίηση για να εξηγήσει τα εμπορικά πρότυπα μεταξύ των εθνών. Η βελτιστοποίηση των χαρτοφυλακίων της αγοράς είναι ένα παράδειγμα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων στα οικονομικά.
- Ενέργεια: Ορισμένες κοινές εφαρμογές τεχνικών βελτιστοποίησης στην ηλεκτρική μηχανική περιλαμβάνουν ενεργό σχεδιασμό φίλτρων, περιορισμό πεδίου στα υπεραγωγικά συστήματα αποθήκευσης μαγνητικής ενέργειας, σχεδιασμό χωροταξικού σχεδιασμού δομών μικροκυμάτων, κεραίες φορητών ακουστικών, σχεδιασμός με βάση

ηλεκτρομαγνητικά. Η ηλεκτρομαγνητικά επικυρωμένη βελτιστοποίηση σχεδιασμού των μικροκυμάτων και των κεραιών έχει κάνει εκτεταμένη χρήση ενός κατάλληλου φυσικού ή εμπειρικού υποκατάστατου μοντέλου και μεθοδολογιών χωρικής χαρτογράφησης από την ανακάλυψη της χωρικής χαρτογράφησης.

- Πολιτική μηχανική: Η βελτιστοποίηση έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην πολιτική μηχανική. Τα πιο κοινά προβλήματα πολιτικού μηχανικού που επιλύονται από τη βελτιστοποίηση είναι η κοπή και πλήρωση δρόμων, η ανάλυση κύκλου ζωής των δομών και υποδομών, η εξομάλυνση των πόρων και η βελτιστοποίηση του χρονοδιαγράμματος.
- Επιχειρησιακή έρευνα: Ένα άλλο πεδίο που χρησιμοποιεί εκτενώς τις τεχνικές βελτιστοποίησης είναι η διεξαγωγή έρευνας. Η ερευνητική δραστηριότητα χρησιμοποιεί επίσης στοχαστική μοντελοποίηση και προσομοίωση για τη στήριξη της βελτίωσης της λήψης αποφάσεων. Όλο και περισσότερο, η επιχειρησιακή έρευνα χρησιμοποιεί στοχαστικό προγραμματισμό για να διαμορφώσει δυναμικές αποφάσεις που προσαρμόζονται στα γεγονότα. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να επιλυθούν με μεθόδους βελτιστοποίησης μεγάλης κλίμακας και στοχαστικής βελτιστοποίησης.
- Μηχανική ελέγχου: Η μαθηματική βελτιστοποίηση χρησιμοποιείται σε πολύ σύγχρονο σχεδιασμό ελεγκτή. Οι ελεγκτές υψηλού επιπέδου, όπως το πρότυπο έλεγχο μοντέλου (MPC) ή η βελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο (RTO), χρησιμοποιούν μαθηματική βελτιστοποίηση. Αυτοί οι αλγόριθμοι λειτουργούν σε απευθείας σύνδεση και επανειλημμένα καθορίζουν τιμές για μεταβλητές απόφασης, όπως ανοίγματα τσοκ σε ένα εργοστάσιο διεργασίας, με την εξαντλητική επίλυση ενός μαθηματικού προβλήματος βελτιστοποίησης που περιλαμβάνει περιορισμούς και ένα μοντέλο του συστήματος που πρόκειται να ελεγχθεί.
- Γεωφυσική: Οι τεχνικές βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται τακτικά σε προβλήματα γεωφυσικής εκτίμησης παραμέτρων. Δεδομένου ενός συνόλου γεωφυσικών μετρήσεων, π.χ. Σεισμικές εγγραφές, είναι κοινή η επίλυση για τις φυσικές ιδιότητες και τα γεωμετρικά σχήματα των υποκείμενων πετρωμάτων και υγρών.
- Μοριακή μοντελοποίηση: Οι μη γραμμικές μέθοδοι βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται ευρέως στην ανάλυση διαμόρφωσης.

Στη διαχείριση ενός ηλεκτρικού δικτύου με τη χρήση τηλεπικοινωνιακών μέσων, πρέπει να είμαστε σε τέτοια θέση, ώστε οι διαθέσιμοι πόροι να παρέχονται με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο, πάντα έχοντας κατά νου ότι πρέπει να επιτευχθεί ο τελικός στόχος. Ένα ηλεκτρικό δίκτυο είναι ένα δίκτυο κόμβων/ζυγών που είναι διασυνδεδεμένοι και αλληλεξαρτώμενοι μεταξύ τους και στην περίπτωση τηλεπικοινωνιακής σύνδεσης συνεργάζονται για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου στόχου. Το γεγονός ότι τα καθήκοντα εκτελούνται από ένα σύνολο πεπερασμένων πόρων σημαίνει ότι η βελτιστοποίηση της αλληλουχίας των καθηκόντων είναι θέμα μεγάλης πολυπλοκότητας.

### 2.3 Αλγόριθμοι κατανομής πόρων

Στην οικονομία, η κατανομή των πόρων είναι η ανάθεση των διαθέσιμων πόρων σε διάφορες/ποικίλες χρήσεις. Στο πλαίσιο μιας ολόκληρης οικονομίας, οι πόροι μπορούν να διατεθούν με διάφορα μέσα, όπως οι αγορές ή ο κεντρικός προγραμματισμός. Η διαχείριση έργων, η κατανομή πόρων ή η διαχείριση των πόρων είναι ο προγραμματισμός των δραστηριοτήτων και των πόρων που απαιτούνται από αυτές τις δραστηριότητες, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τόσο τη διαθεσιμότητα των πόρων όσο και τον χρόνο εκτέλεσης του έργου. Ο τομέας των οικονομικών ασχολείται με τρεις ευρείς τομείς: τη μακροοικονομική σταθεροποίηση, τη διανομή του εισοδήματος και του πλούτου και την κατανομή των πόρων. Μεγάλο μέρος της μελέτης της κατανομής των πόρων είναι αφιερωμένο στην εξεύρεση των συνθηκών υπό τις οποίες οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί κατανομής των πόρων οδηγούν σε αποτελεσματικά αποτελέσματα, όπου καμία κατάσταση του συμβαλλόμενου μέρους δεν μπορεί να βελτιωθεί χωρίς να βλάψει την κατάσταση ενός άλλου μέρους.

Στον στρατηγικό σχεδιασμό, η κατανομή των πόρων είναι ένα σχέδιο για τη χρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων για την επίτευξη στόχων για το μέλλον. Είναι η διαδικασία κατανομής σημαντικών πόρων μεταξύ των διαφόρων έργων ή επιχειρηματικών μονάδων. Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για την επίλυση προβλημάτων κατανομής πόρων, π.χ. Οι πόροι μπορούν να διατεθούν με χειροκίνητη προσέγγιση, μια αλγοριθμική προσέγγιση, ή ένας συνδυασμός και των δύο.

Η κατανομή των πόρων μπορεί να αποφασιστεί με τη χρήση προγραμμάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών που εφαρμόζονται σε συγκεκριμένο τομέα για την αυτόματη και δυναμική διανομή πόρων στους αιτούντες. Αυτό είναι ιδιαίτερα κοινό στις ηλεκτρονικές συσκευές που είναι αφιερωμένες στη δρομολόγηση και στην επικοινωνία. Για παράδειγμα, η κατανομή του καναλιού στην ασύρματη επικοινωνία μπορεί να αποφασιστεί από έναν σταθμό πομποδέκτη βάσης χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλο αλγόριθμο. Μια τάξη πόρων με την οποία οι υποψήφιοι υποβάλλουν προσφορές για τους καλύτερους πόρους ανάλογα με το υπόλοιπο των "χρημάτων" τους, όπως σε ένα μοντέλο επιχειρηματικών δημοπρασιών. Σε ένα έγγραφο σχετικά με την κατανομή του χρονικού διαστήματος ένας αλγόριθμος δημοπρασίας συγκρίνει με αναλογικό τρόπο τον προγραμματισμό των μεριδίων. Μπορεί να υπάρχουν μηχανισμοί έκτακτης ανάγκης όπως η κατάταξη προτεραιότητας των στοιχείων που εξαιρούνται από ένα συγκεκριμένο σχέδιο. Μία τέτοια κατάταξη θα δείχνει ποια στοιχεία θα χρηματοδοτηθούν εάν θα πρέπει να διατεθούν περισσότεροι πόροι και την προτεραιότητα ορισμένων στοιχείων που περιλαμβάνονται στο σχέδιο.

Η κατανομή πόρων είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται στη διοίκηση επιχειρήσεων για τον προγραμματισμό παραγγελιών σε μια αλυσίδα εφοδιασμού. Δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να ορίζει συγκεκριμένες παραμέτρους ελέγχου απογραφής (όπως ένα απόθεμα ασφαλείας) και να υπολογίζει τις χρονικά διαβαθμισμένες απαιτήσεις απογραφής. Αυτή η διαδικασία αναφέρεται επίσης ως σχεδιασμός απαιτήσεων διανομής.

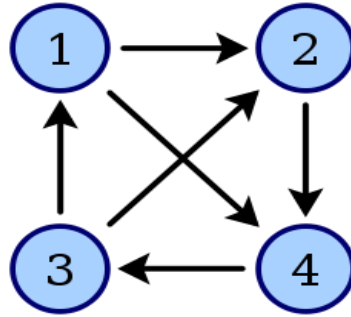
Η κατανομή πόρων χρησιμοποιεί πολλές μεταβλητές:

- Την απαιτούμενη ποσότητα προϊόντος που απαιτείται στην αρχή μιας περιόδου
- Την περιορισμένη ποσότητα προϊόντος που είναι διαθέσιμη στην αρχή μιας περιόδου
- Η συνιστώμενη ποσότητα παραγγελίας στην αρχή μιας περιόδου
- Την αναδρομική ζήτηση στο τέλος μιας περιόδου
- Την απογραφή στο τέλος της περιόδου
- Ζήτηση σε μια μελλοντική περίοδο
- Τα προγραμματισμένα έσοδα στην αρχή μιας περιόδου
- Το απόθεμα στην αρχή της περιόδου
- Την απαίτηση για αποθέματα ασφαλείας για μια περίοδο

Όμως όλες οι παραπάνω μεταβλητές χρησιμοποιούνται και για αντικείμενα όπως ο σχεδιασμός πρωτοκόλλων και αλγορίθμων ώστε και εκεί να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή κατανομημένη διαχείριση πόρων για τον έλεγχο και τη λήψη αποφάσεων. Για αυτό το λόγο έχει δημιουργηθεί μεγάλο ενδιαφέρον από την κοινότητα της επιστήμης των υπολογιστών, επικοινωνιών και συστημάτων ελέγχου. Η χρησιμοποίηση του αλγορίθμου εφαρμόζεται σε συστήματα που απαιτούν πόρους για να λειτουργήσουν. Οι πόροι μπορεί να μην συνδέονται απευθείας με όλα τα στοιχεία του συστήματος αλλά με ένα περιορισμένο αριθμό γειτόνων. Το ποσό του πόρου που μπορεί να διατεθεί στο στοιχείο του συστήματος περιορίζεται από ένα πάνω και κάτω όριο. Επίσης η ανάγκη του στοιχείου του συστήματος σε πόρους μπορεί να είναι μικρή οπότε η ανάθεση πόρων σε αυτό κρίνεται μη αναγκαία. Ένα πρόβλημα κατανομής πόρων έχει ως στόχο να υπολογίσει και να διανείμει κατάλληλα τους πόρους σύμφωνα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Οι κανόνες που διέπουν το πρόβλημα είναι οι εξής:

- Να μην υπερβαίνουν οι δυνατότητες της προσφοράς των πόρων που μας παρέχει το σύστημα.
- Όλες οι απαιτήσεις του συστήματος σε πόρους να καλύπτονται
- Εάν δεν υπάρχει βέλτιστη λύση θα πρέπει οι κόμβοι που μας παρέχουν τους πόρους να αντιλαμβάνονται ότι δεν μπορούν να προσφέρουν παραπάνω.

Στη δική μας μελέτη τα στοιχεία του συστήματος θα πρέπει να θεωρηθούν ως κόμβοι οι οποίοι μπορούν να μεταδώσουν και να λάβουν πληροφορία από τους γειτονικούς κόμβους. Η ανταλλαγή πληροφοριών δεν θα πρέπει να θεωρηθεί αμφίδρομη. Για παράδειγμα στην επόμενη εικόνα ακολουθεί ένα γράφημα που εμφανίζει τις συσχετίσεις των κόμβων.



Εικόνα 2.2 Δίκτυο συσχετίσεων

Κάθε κόμβος  $j$  μπορεί να προσφέρει στο σύστημα  $\pi_j \geq 0$  πόρους έχοντας υπόψη το ανώτατο ( $\pi_j^{\max}$ ) και το κατώτατο ( $\pi_j^{\min}$ ) όριο του. Η δυσκολία είναι να κατανεμηθούν έτσι οι πόροι ώστε συλλογικά να καλυφθεί το σύνολο του προκαθορισμένου και απαιτούμενου πόρου που χρειάζεται το σύστημα για να λειτουργήσει, το οποίο ισούται με:

$$p_d = \sum_{j=1}^n \pi_j$$

## 2.4 Αλγόριθμοι συναίνεσης

Ένα θεμελιώδες πρόβλημα στα κατανεμημένα συστήματα υπολογιστών και στα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων είναι η επίτευξη συνολικής αξιοπιστίας του συστήματος παρουσία ορισμένων ελαττωματικών διαδικασιών. Αυτό συχνά απαιτεί διαδικασίες να συμφωνούν σε κάποια τιμή δεδομένων που απαιτείται κατά τον υπολογισμό. Με τον όρο συναίνεση εννοούμε την επιτάχυνση της σύγκλιση μιας ορισμένης ποσότητας σε μια τιμή. Παραδείγματα εφαρμογών συναίνεσης περιλαμβάνουν το αν πρέπει να πραγματοποιηθεί μια συναλλαγή σε μια βάση δεδομένων, να συμφωνηθεί η ταυτότητα ενός ηγέτη, η αναπαραγωγή μηχανογραφικού μηχανήματος και οι ατομικές εκπομπές. Οι πραγματικές εφαρμογές του κόσμου περιλαμβάνουν συγχρονισμό ρολογιού, PageRank, σχηματισμό γνώμης, έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα, εκτίμηση κατάστασης, έλεγχο των UAV, εξισορρόπηση φορτίου και άλλα. Το πρόβλημα της συναίνεσης απαιτεί συμφωνία μεταξύ μιας σειράς διαδικασιών (ή παραγόντων) για μια ενιαία τιμή δεδομένων. Ορισμένες από τις διαδικασίες (πράκτορες) μπορεί να αποτύχουν ή να είναι αναξιόπιστες, έτσι τα πρωτόκολλα συναίνεσης πρέπει να είναι ανεκτικά σε βλάβες ή ανθεκτικοί. Οι διαδικασίες πρέπει κατά κάποιο τρόπο να εκθέσουν τις υποψήφια αξίες τους, να επικοινωνήσουν μεταξύ τους και να συμφωνήσουν σε μια ενιαία αξία συναίνεσης. Το πρόβλημα της συναίνεσης είναι ένα θεμελιώδες πρόβλημα στον έλεγχο των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων. Μια προσέγγιση για τη δημιουργία συναίνεσης είναι για όλες τις διαδικασίες (πράκτορες) να συμφωνήσουν σε μια πλειοψηφική αξία. Σε αυτό το πλαίσιο, η πλειοψηφία απαιτεί τουλάχιστον μία περισσότερο από τις μισές διαθέσιμες ψήφους (όπου σε κάθε διαδικασία δίνεται η ψήφος). Εντούτοις, μία ή περισσότερες ελαττωματικές

διαδικασίες μπορεί να παραβλέψουν το αποτέλεσμα που προκύπτει, ώστε να μην επιτευχθεί συναίνεση ή να επιτευχθεί εσφαλμένα.

Για παράδειγμα τα πρωτόκολλα που επιλύουν συναινετικά προβλήματα σχεδιάζονται για να αντιμετωπίσουν περιορισμένους αριθμούς ελαττωματικών διαδικασιών. Αυτά τα πρωτόκολλα πρέπει να πληρούν ορισμένες απαιτήσεις για να είναι χρήσιμες. Για παράδειγμα, ένα κοινό πρωτόκολλο θα μπορούσε να έχει όλες τις διεργασίες εξόδου δυαδική τιμή 1. Αυτό δεν είναι χρήσιμο και έτσι η απαίτηση αυτή τροποποιείται έτσι ώστε η έξοδος πρέπει κατά κάποιο τρόπο να εξαρτάται από την είσοδο. Δηλαδή, η τιμή εξόδου ενός πρωτοκόλλου συναίνεσης πρέπει να είναι η τιμή εισόδου κάποιας διαδικασίας. Μια άλλη απαίτηση είναι ότι μια διαδικασία μπορεί να αποφασίσει και να παραγάγει μία αξία μόνο μία φορά και αυτή η απόφαση είναι αμετάκλητη. Μια διαδικασία ονομάζεται σωστή σε μια εκτέλεση, αν δεν παρουσιάσει μια αποτυχία. Ένα πρωτόκολλο συναίνεσης που ανεχτεί τις αποτυχίες στάσης πρέπει να ικανοποιεί κάποιες συγκεκριμένες ιδιότητες.

Αυτό μεταφράζεται ότι υπάρχει ένα πολυπρακτορικό σύστημα το οποίο δουλεύει με σκοπό να συγκλίνει σε μια βέλτιστη τιμή η οποία θα ελαχιστοποιεί μια δεδομένη αντικειμενική συνάρτηση. Με τον όρο πολυπρακτορικό σύστημα εννοούμε ένα δικτυωμένο σύστημα που συγκροτείται από οντότητες οι οποίες διαθέτουν αισθητήριες και υπολογιστικές συσκευές. Ως εκ τούτου θα έχουν την ικανότητα να επικοινωνούν να αλληλοεπιδρούν τοπικά. Παράλληλα θα εξελίσσονται σε ένα περιβάλλον το οποίο θα αντιλαμβάνονται και εντός του οποίου θα έχουν την δυνατότητα να δρουν. Κάθε πράκτορας ενός συστήματος διαθέτει κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως αυτονομία, τοπική επισκόπηση ( εννοώντας πως κανένας πράκτορας δεν έχει συνολική εικόνα του συστήματος) και τέλος είναι αποκεντρωμένος καθώς κανένας πράκτορας δεν ελέγχει συνολικά το σύστημα. Αυτά τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά είναι που δίνουν την καταλληλότητα στα πολυπρακτορικά συστήματα να επιλύουν καταναμεμημένα προβλήματα.

Στο δίκτυο που μελετάται οι πράκτορες αναγνωρίζουν και ελέγχουν τις πηγές ενέργειας (φωτοβολταϊκά) και τις καταναλώσεις φορτιών. Η αλληλεπίδραση των πρακτόρων αυτών αποτελεί και το δρόμο για τη λύση του προβλήματος. Έχει επιλεγεί ως μεταβλητή συναίνεσης η περικοπή ισχύος του φωτοβολταϊκού. Αυτό σημαίνει ότι θα λαμβάνει χώρα ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των πρακτόρων σε τοπικό επίπεδο και αντίστοιχα θα προσαρμόζουν την λειτουργική τους συμπεριφορά με τελικό στόχο να οδηγηθεί το σύστημα στη βέλτιστη τιμή περικοπής ισχύος. Η προσέγγιση του μοντέλου συναίνεσης γίνεται παραδοσιακά μέσω ενός απλού κανόνα συντονισμού των πρακτόρων τοπικά, ο οποίος οδηγεί σε συμφωνία το σύστημα. Για το σκοπό αυτό δεν υφίσταται ανάγκη για κεντρικό έλεγχο και κεντρική οργάνωση. Επίσης δεν είναι απαραίτητη η οικουμενική πληροφόρηση, αφενός λόγω της καταναμεμημένης προσέγγισης και αφετέρου λόγω της ευκολίας επεκτασιμότητας των αλγορίθμων συναίνεσης. Αυτά βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορα προβλήματα, όπως ο συγχρονισμός, η οργάνωση και η συνενόηση των πρακτόρων.

Στο σχήμα εμφανίζεται ένα απλό δίκτυο συναίνεσης (consensus) σε μορφή μοντέλου. Τα μέρη που ελέγχονται είναι ένα σύνολο ηλεκτρονικών υπολογιστών που ανταλλάσσουν πληροφορίες. Στο παράδειγμα του εικόνα 2.2 υπάρχει μια ομάδα 4 πρακτόρων. Υπάρχει μια συνεχής ροή πληροφοριών, από τον τοπικό στον διαχειριστή συναίνεσης, οι οποίες αφορούν την σύγκλιση σε κοινή απόφαση. Ο διαχειριστής έρχεται σε διαπραγμάτευση με τους γειτονικούς πράκτορες χρησιμοποιώντας το δίκτυο επικοινωνίας. Κατόπιν ο διαχειριστής προσδιορίζει το αποτέλεσμα που έχει προκύψει και μεταφέρει την απόφασή του στον τοπικό ελεγκτή. Αυτός τότε κατευθύνει τις ενέργειές του με βάση το αποτέλεσμα της συναίνεσης και ενημερώνει για τη νέα του κατάσταση τον διαχειριστή. Πρόκειται προφανώς για μια επαναληπτική διαδικασία.

### Consensus as a network service



Εικόνα 2.3 Δίκτυο συναίνεσης ηλεκτρονικών υπολογιστών

Η δομή επίλυσης και εφαρμογής που ακολουθείται από τον αλγόριθμο είναι πολύ απλή. Έστω, ότι υπάρχει ένας κόμβος  $i$  του συστήματος και είναι σε μια εσωτερική κατάσταση με τιμή  $x_i \in \mathbb{R}$ , η οποία τιμή μπορεί να απεικονίζει οποιαδήποτε φυσική ποσότητα του συστήματος, όπως η παραγομένη ισχύς, η κατανάλωση ισχύος, κτλ. Υποθέτοντας ότι η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του συστήματος λαμβάνει χώρα σε συγκεκριμένο χρόνο και η αναπαράσταση του χρόνου γίνεται μέσω της μεταβλητής  $k$ . Για να βεβαιωθεί ότι στο σύστημα, στην περίπτωση μας ηλεκτρικό δίκτυο, παρουσιάστηκε συναίνεση μεταξύ των κόμβων θα πρέπει όλοι οι κόμβοι του να είναι πεπερασμένοι σε τιμή και να έχουν ικανοποιήσει τις απαιτήσεις που έθεσαν αρχικά. Κάθε κόμβος έχει την ικανότητα να ανταλλάσσει πληροφορίες μόνο με αυτούς που γειτνιάζει, δηλαδή μόνο με κόμβους που συνδέονται μέσω μιας γραμμής. Έτσι, ο κανόνας που διέπει την ανανέωση της κατάστασης του κάθε κόμβου θα είναι σύμφωνος με τον πίνακα γειτνίασης  $A$ , όπως ορίστηκαν στην παράγραφο 2.1.



## 2.5 Αλγόριθμος διπλής επανάληψης

Ο γράφος της εικόνας 2.2 απεικονίζει ένα τυχαίο κατευθυνόμενο δίκτυο συσχετίσεων, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για να περιγραφθεί ο αλγόριθμος διπλής επανάληψης. Αρχικά θεωρούμε ένα σύστημα δικτύου με αρκετά στοιχεία τα οποία συσχετίζονται ή συνδέονται μεταξύ τους. Ο κόμβος  $j$  έχει τον ρόλο του παραλήπτη (receiver) και ο κόμβος  $i$  του αποστολέα (sender). Η ποσότητα της πληροφορίας που ανταλλάσσεται μεταξύ των δύο κόμβων επηρεάζει την εσωτερική τους κατάσταση. Για κάθε έναν από τους δυο επαναληπτικούς αλγορίθμους που θα αναλύσουμε παρακάτω κάθε κόμβος επανυπολογίζει την εσωτερική του κατάσταση, ώστε να είναι γραμμικός συνδυασμός της εσωτερικής του κατάστασης στην προηγούμενη επανάληψη και του αθροίσματος της διαφοράς της εσωτερικής κατάστασης των γειτονικών του κόμβων, όπως φαίνεται στη σχέση 2.1. Μία υπόθεση είναι ότι τα μηνύματα μετάδοσης από τον κόμβο  $i$  είναι δηλωμένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αναγνωρίζεται η ταυτότητα του αποστολέα, έτσι ώστε ο κόμβος που λαμβάνει πληροφορία να μπορεί να προσδιορίσει ποιος κόμβος τα έστειλε.

Για τον πρώτο επαναληπτικό αλγόριθμο,  $y_j[k]$  είναι η εσωτερική κατάσταση του κόμβου  $j$  σε μία δεδομένη στιγμή  $k$ .  $\mu_{lj}[k]$  η συνολική ποσότητα πληροφορίας που έχει μεταδοθεί από τον κόμβο  $j$  σε όλους τους γείτονες του, και  $v_{ji}[k]$  η συνολική ποσότητα πληροφορίας που έχει παραληφθεί από τον κόμβο  $j$  από τους γείτονες του. Παρόμοια ο  $z_{ji}[k]$  συμβολίζει την εσωτερική κατάσταση του κόμβου  $j$  σε μία δεδομένη στιγμή  $k$ ,  $\sigma_{lj}[k]$  την συνολική ποσότητα πληροφορίας που έχει μεταδοθεί από τον κόμβο  $j$  σε όλους τους γείτονες του, και  $\tau_{ji}[k]$  την συνολική ποσότητα πληροφορίας που έχει παραληφθεί από τον κόμβο  $j$  από τους γείτονες του.

Με αυτό τον τρόπο περιγράφεται με μαθηματικές εξισώσεις ο παρακάτω επαναληπτικός αλγόριθμος:

$$y_j[k+1] = \frac{1}{D_j^+} y_j[k] + \sum_{i \in N_j^-} (v_{ji}[k] - v_{ji}[k-1]), \quad k \geq 0 \quad (2.1)$$

$$\mu_{lj}[k] = \mu_{lj}[k-1] + \frac{1}{D_j^+} y_j[k] = \sum_{i=0}^k \frac{1}{D_j^+} y_i[i], \quad k \geq 0 \quad (2.2)$$

$$v_{ji}[k] = \begin{cases} \mu_{ji}[k], & \text{if } (j, i) \in E[k], \\ v_{ji}[k-1], & \text{if } (j, i) \notin E[k], \end{cases} \quad k \geq 0 \quad (2.3)$$

όπου:

$N_j^-$  είναι το πλήθος των κόμβων που αποτελούν γείτονες του κόμβου  $j$ ,  
 $D_j^+$  είναι ο αριθμός των κόμβων που μπορεί να στείλει πληροφορία ο κόμβος  $j$ .

Για τον δεύτερο επαναληπτικό αλγόριθμο ισχύουν τα παρακάτω:

$$z_j[k+1] = \frac{1}{D_j^+} z_j[k] + \sum_{i \in N_j^-} (\tau_{ji}[k] - \tau_{ji}[k-1]), \quad k \geq 0 \quad (2.4)$$

$$\sigma_{ij}[k] = \sigma_{ij}[k-1] + \frac{1}{D_j^+} z_j[k] = \sum_{i=0}^k \frac{1}{D_j^+} z_i[i], \quad k \geq 0 \quad (2.5)$$

$$\tau_{ji}[k] = \begin{cases} \sigma_{ji}[k], & \text{if } (j, i) \in E[k], \\ \tau_{ji}[k-1], & \text{if } (j, i) \notin E[k], \end{cases} \quad k \geq 0 \quad (2.6)$$

όπου  $E[k]$  είναι το κατευθυνόμενο δίκτυο συσχετίσεων σε μία στιγμή  $k$ .

Για ένα πρόβλημα κατανομής πόρων, οι αρχικές συνθήκες για την (2.1) τίθενται ως  $y_j[0] = p_d/m - \pi_j^{\min}$ , εάν φυσικά ο  $j$  επικοινωνεί με γειτονικό κόμβο, αλλιώς οι αρχικές συνθήκες για την (2.4) τίθενται  $z_j[0] = \pi_j^{\max} - \pi_j^{\min} > 0$ . Επίσης οι αρχικές συνθήκες για τον αλγόριθμο κατανομής πόρων τίθενται  $\mu_{ji}[-1] = 0$  και  $v_{ji}[-1] = 0$  για  $(j, i) \in E[k]$ ,  $\sigma_{ji}[-1] = 0$ , και  $\tau_{ji}[-1] = 0$  για  $(j, i) \in E[k]$ .

Σαν αποτέλεσμα μπορεί να αποδειχθεί ότι με την προτεινόμενη μέθοδο διπλής επανάληψης, παρά την παρουσία τηλεπικοινωνιακών σφαλμάτων (σε κάθε βήμα επανάληψης του αλγορίθμου, σε κάθε  $(j, i) \in E[k]$ , και για  $z_j[k > 0]$  η ακριβής λύση για το πρόβλημα κατανομής πόρων μπορεί να εξαχθεί από:

$$\pi_j = \lim_{k \rightarrow \infty} \left( \pi_j^{\min} + \frac{y_j[k]}{z_j[k]} (\pi_j^{\max} - \pi_j^{\min}) \right) \quad (2.7)$$

$$p_d = \sum_{j=1}^n \pi_j \quad (2.8)$$

### 3. Περιγραφή προβλήματος - Μεθοδολογία

Στην διπλωματική αυτή το πολυπρακτορικό σύστημα που μας ενδιαφέρει είναι ένα δίκτυο χαμηλής τάσης με οικίες με φωτοβολταϊκά και το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο μεταξύ τους το οποίο μπορεί να αναπαρασταθεί μέσω ενός γράφου. Η συναίνεση που πρέπει να επιτευχθεί για τη βέλτιστη περικοπή ισχύος σε κρίσιμες ώρες από τους κόμβους του γράφου αποτελεί μέρος του προβλήματος βελτιστοποίησης. Χρησιμοποιώντας τελικά τον αλγόριθμο διπλής επανάληψης θα υπολογιστεί η περικοπή ισχύος των φωτοβολταϊκών. Συνοψίζοντας για να υπάρξει ένα αποκεντρωμένος έλεγχος και χειρισμός της παραγωγής ισχύος των φωτοβολταϊκών θα αξιοποιήσουμε τους αλγορίθμους που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2.

Η μεγάλη διείσδυση διασπαρμένης παραγωγής σε ένα δίκτυο διανομής μπορεί να προκαλέσει πολλά προβλήματα υπερτάσεων. Φωτοβολταϊκά συστήματα σε οικίες, ηλεκτρικά οχήματα, υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα αυξάνονται σε πλήθος μέρα με τη μέρα. Στην διπλωματική θα εφαρμοστεί ένας αλγόριθμος κατανομής πόρων με ενεργή περικοπή ισχύος (APC). Το σύστημα ελέγχου είναι έτσι σχεδιασμένο ώστε όλες οι οικίες ή κόμβοι να ελέγχουν την τάση του φωτοβολταϊκού. Με  $V_{c_i}$  συμβολίζεται είναι η τρέχουσα τάση και με  $V_{max}$  η μέγιστη ανεκτή τιμή τάσης.

$$\text{κατάσταση}_i \begin{cases} \text{φυσιολογικά επίπεδα τάσης } V_{c_i} \leq V_{max} \\ \text{απαιτείται διόρθωση τάσης } V_{c_i} > V_{max} \end{cases} \quad (3.1)$$

Η κατάσταση διόρθωσης γίνεται μόνο σε περίπτωση που έχει γίνει ο παραπάνω έλεγχος. Αν ένας κόμβος/οικία μπει σε κατάσταση διόρθωσης, όταν δηλαδή οι τάσεις βγουν εκτός των επιτρεπόμενων ορίων, τότε και οι γείτονες-κόμβοι αυτού μπαίνουν σε κατάσταση διόρθωσης. Έτσι περικοπή ισχύος των φωτοβολταϊκών είναι αρμονικά διαμοιρασμένη. Για τον υπολογισμό της περικοπής ισχύος χρησιμοποιείται ο πίνακας Jacobi όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Η επίδραση της αέργου ισχύος στην τάση θεωρείται αμελητέα στα δίκτυα ΧΤ καθώς  $\frac{\theta V}{\theta Q} \ll \frac{\theta V}{\theta P}$

$$\Delta|V| = C * \Delta P \quad (3.4)$$

όπου:

$\Delta|V|$  είναι η μεταβολή της τάσης

$\Delta P$  είναι η μεταβολή της ενεργού ισχύος

Τελικά υπολογίζεται η ισχύς που πρέπει να κοπεί ότι

$$P_{curt_i} = \frac{V_{c_i} - V_{max}}{n_i * C_{ii}} \quad (3.5)$$

όπου  $n_i$  είναι το πλήθος των γειτονικών κόμβων

Παρουσιάζονται τα βήματα που θα ακολουθηθούν για την εφαρμογή και επίλυση του αλγορίθμου διπλής επανάληψης.

- 1) Εισαγωγή δεδομένων ζήτησης και παραγωγής ισχύος ανά ώρα από αρχείο excel στο εργαλείο του Matpower-Matlab
- 2) Υπολογισμός πίνακα  $C$  όπως έχει περιγραφθεί παραπάνω (σχέση 3.4)
- 3) Δημιουργία πίνακα συσχετίσεων ή πίνακα γειτνίασης με βάση τον τηλεπικοινωνιακό γράφο του δικτύου (*Communication\_matrix*)
- 4) Εύρεση ζυγών που παρουσιάζουν υπερτάσεις και φωτοβολταϊκών που είναι ικανά να περικόψουν την παραγωγή ισχύος τους
- 5) Υπολογισμός μέγιστης περικοπής ισχύος ανά ώρα και ανά φωτοβολταϊκό
- 6) Υπολογισμός πλήθους γειτόνων ανά οικία (*number\_of\_connections*)
- 7) Εισαγωγή παραγωγή ισχύος από τα φωτοβολταϊκά ανά ώρα σε μια τυχαία μεταβλητή (*pj\_max*)
- 8) Ως αρχική τιμή σε μια μεταβλητή  $z$  εισάγονται οι μέγιστες παραγωγές ισχύος που παρουσιάζονται σε μία μέρα σε κάθε οικία
- 9) Ως αρχική τιμή μία μεταβλητής  $y$  εισάγονται οι τιμές που προκύπτουν από τη διαίρεση της μεταβλητής *pj\_max* και το πλήθος των γειτόνων κάθε οικίας
- 10) Έλεγχος ποια φωτοβολταϊκά είναι ικανά να περικόψουν την παραγωγή ισχύος τους (capable for APC)
- 11) Οι μεταβλητές  $v, \mu, \sigma, \tau$  στην πρώτη επανάληψη ορίζονται μηδενικά (σχέσεις 2.2, 2.3, 2.5, 2.6)
- 12) Πρώτη διαδικασία του αλγορίθμου είναι να υπολογίσει όλες τις τιμές της μεταβλητής  $v$  για κάθε πιθανή σύνδεση που έχει το δίκτυο. Ελέγχουμε αν υπάρχει σύνδεση μιας οικίας με μία οποιαδήποτε άλλη και διαιρούμε την τιμή της μεταβλητής  $y$  της αντίστοιχης οικίας με το πλήθος των γειτόνων που έχει. Το αποτέλεσμα της πράξης το

προσθέτουμε με του προηγούμενη τιμή του  $\nu$  ώστε τελικά να προκύψει το  $\nu$  της υφιστάμενης επανάληψης. Όλα τα προηγούμενα θα συμβούν μόνο αν υπάρχει σύνδεση μεταξύ των οικιών.

- 13) Δεύτερη διαδικασία του αλγορίθμου είναι να υπολογίσει όλες τις μεταβλητές  $\tau$  για κάθε πιθανή σύνδεση που έχει το δίκτυο. Ελέγχουμε αν υπάρχει σύνδεση μιας οικίας με μία οποιαδήποτε άλλη και διαιρούμε την τιμή της μεταβλητής  $z$  της οικίας με το πλήθος των γειτόνων που έχει. Το αποτέλεσμα της πράξης το προσθέτουμε με του προηγούμενη τιμή του  $\tau$  ώστε τελικά να προκύψει το  $\tau$  της υφιστάμενης επανάληψης. Όλα τα προηγούμενα θα συμβούν μόνο αν υπάρχει σύνδεση.
- 14) Υπολογισμός τυχαίων μεταβλητών  $\nu$ ,  $\tau$  ανά οικία και επανάληψη έχοντας ως κανόνα και οδηγό τον πίνακα γειτνίασης. Δημιουργούνται δυο βοηθητικές μεταβλητές για την εύρυθμη λειτουργία του αλγορίθμου (*add\_first*, *add\_second*)
- 15) Επαναυπολογίζεται η τιμή της μεταβλητής  $y$  για κάθε οικία για την επόμενη επανάληψη (σε περίπτωση που χρειαστεί διότι μπορεί να έχει επιτευχθεί η ακρίβεια που επιδιώκεται) αθροίζοντας τη τιμή της μεταβλητής *add\_first* με τη διαίρεση της τιμής  $y$  (της προηγούμενης επανάληψης) με τον αριθμό των γειτόνων της αντίστοιχης οικίας
- 16) Επαναυπολογίζεται η τιμή της μεταβλητής  $z$  για κάθε οικία για την επόμενη επανάληψη (σε περίπτωση που χρειαστεί διότι μπορεί να έχει επιτευχθεί η ακρίβεια που επιδιώκεται) αθροίζοντας τη τιμή της μεταβλητής *add\_second* με τη διαίρεση της τιμής  $z$  (της προηγούμενης επανάληψης) με τον αριθμό των γειτόνων της αντίστοιχης οικίας
- 17) Υπολογισμός της μεταβλητής  $\pi$  που αφορά την περικοπή ισχύος ανά φωτοβολταϊκό μέσω του πολλαπλασιασμού της μεταβλητής  $y$  και *pi\_max* και στη συνέχεια διαιρώντας το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού με τη μεταβλητή  $z$
- 18) Μηδενισμός των μεταβλητών *add\_first*, *add\_second* σε περίπτωση που χρειαστεί και άλλη επανάληψη για μεγαλύτερη ακρίβεια
- 19) Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν η προστιθέμενη αξία από την ανανέωση της πληροφορίας είναι μικρότερη από μια ελάχιστη τιμή που έχουμε ορίσει ( $10^{-6}$ ) και άρα η προσφορά της είναι αμελητέα.

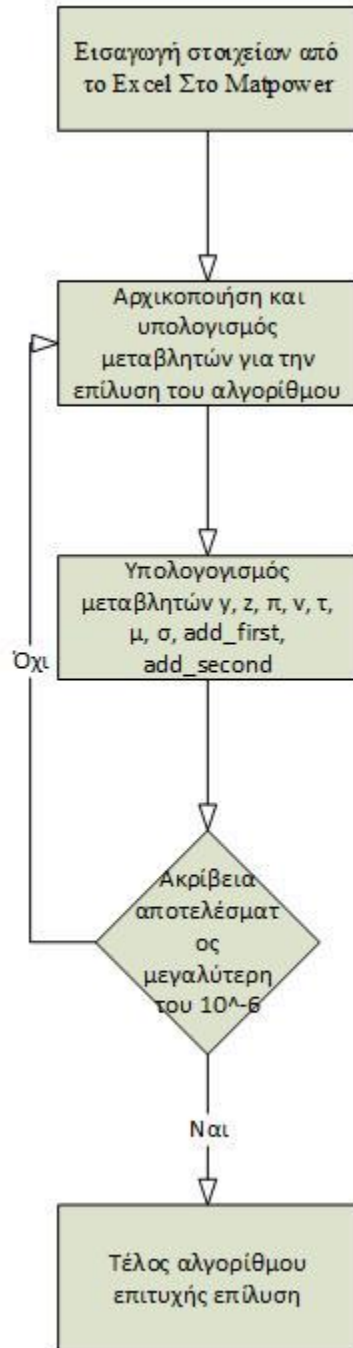
Στις επόμενες παραγράφους ακολουθεί μια πιο λεπτομερή περιγραφή των παραπάνω βημάτων εκτέλεσης εφαρμογής και επίλυσης του αλγορίθμου διπλής επανάληψης. Θα δημιουργηθεί ένα δίκτυο συσχετίσεων μεταξύ των οικιών-ζυγών-κόμβων. Με αυτό τον τρόπο θα ξεχωριστεί ποιες οικίες είναι ικανές να περικόψουν την ισχύ των φωτοβολταϊκών τους ανά ώρα ανάλογα με την τάση και την παραγωγή του φωτοβολταϊκού την αντίστοιχη ώρα (APC). Επίσης θα υπολογιστεί η συνολική ισχύς που πρέπει να περικοπεί ανά ώρα, έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη εποπτεία στα αποτελέσματα μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου.

Για την εκτέλεση του αλγορίθμου διπλής επανάληψης θα χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 που έχουν αναλυθεί στο κεφάλαιο 2.5. Πρώτα θα χρειαστεί να υπολογιστεί το πλήθος των γειτόνων μιας οικίας-κόμβου. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό μέσω του δικτύου συσχετίσεων που έχει αναπτυχθεί παραπάνω. Έπειτα αρχικοποιούμε κατάλληλα τις μεταβλητές του αλγορίθμου διπλής επανάληψης. Η  $z_j[k]$  μεταβλητή για κάθε οικία λαμβάνει για αρχική τιμή τη μέγιστη παραγωγή ισχύος που παρουσιάζεται σε μία μέρα. Η μεταβλητή  $\pi_j^{\min}$  τίθεται 0. Η μεταβλητή  $\pi_j^{\max}$  λαμβάνει την παραγωγή ισχύος ανά ώρα κάθε φωτοβολταϊκού. Η μεταβλητή  $y_j[k]$  (εξίσωση 2.2) υπολογίζεται διαιρώντας την παραγωγή ισχύος ανά ώρα κάθε φωτοβολταϊκού ( $\pi_j^{\max}$ ) με το πλήθος των γειτόνων που έχει το αντίστοιχο φωτοβολταϊκό.

- $y_j[k]$  συμβολίζει την παραγωγή ισχύος ενός φωτοβολταϊκού  $j$  σε μία τυχαία επανάληψη  $k$  (εξίσωση 2.1)
- $z_j[k]$  συμβολίζει την μέγιστη παραγωγή ισχύος ενός φωτοβολταϊκού  $j$  σε μία τυχαία επανάληψη  $k$  (εξίσωση 2.4)
- $v_{ji}[k]$ ,  $\tau_{ji}[k]$  είναι μεταβλητές όπου χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις 2.1, 2.4 για τον υπολογισμό των  $y_j[k]$ ,  $z_j[k]$  αντίστοιχα. Επίσης μέσω του γράφου/πίνακα γειτνίασης που έχει δημιουργηθεί  $E[k]$  ορίζονται οι τιμές των  $v_{ji}[k]$ ,  $\tau_{ji}[k]$  (βλέπε εξισώσεις 2.3, 2.6)
- $\mu_{ij}[k]$ ,  $\sigma_{ij}[k]$  είναι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις 2.2, 2.3, 2.5, 2.6 για την εύρυθμη λειτουργία του αλγορίθμου διπλής επανάληψης

Έχοντας ξεχωρίσει ποιες οικίες μπορούν να περικόψουν την παραγωγή ισχύος του φωτοβολταϊκού τους ανά ώρα, είναι σε θέση να αρχίσει η υλοποίηση («τρέξιμο») του αλγορίθμου. Οι επαναλήψεις του αλγορίθμου σταματούν όταν έχει επιτευχθεί η απαραίτητη ακρίβεια και σύγκλιση στα αποτελέσματα. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές  $v$ ,  $\tau$  εξετάζοντας πρώτα τους γειτονικούς κόμβους κάθε οικίας σύμφωνα με το δίκτυο συσχετίσεων. Σε περίπτωση που μία οικία δεν συνδέεται με ένα συγκεκριμένο κόμβο τότε οι μεταβλητές  $v$ ,  $\tau$  λαμβάνουν τις τιμές της προηγούμενης επανάληψης. Για να εξαχθούν τα  $y_j[k]$  της επόμενης επανάληψης για μία τυχαία οικία θα πρέπει να αθροιστούν οι τιμές  $v$  με τις αντίστοιχες τιμές  $y_j[k]$  της προηγούμενης επανάληψης διαιρώντας το με το πλήθος των γειτόνων της αντίστοιχης οικίας. Αντίστοιχα, για να υπολογιστούν οι τιμές  $z_j[k]$  της επόμενης επανάληψης μιας τυχαίας οικίας θα πρέπει να αθροιστούν οι τιμές της μεταβλητής  $t$  με οι τιμές της μεταβλητής  $z_j[k]$  της προηγούμενης διαιρώντας το με το πλήθος των γειτόνων της αντίστοιχης οικίας. Η τελική τιμή υπολογισμού περικοπής παραγωγής ισχύος ανά ώρα και οικία για κάποια δεδομένη επανάληψη δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$\pi_j[k] = \frac{y_j[k]}{z_j[k]} \pi_j^{\max} \quad (3.6)$$



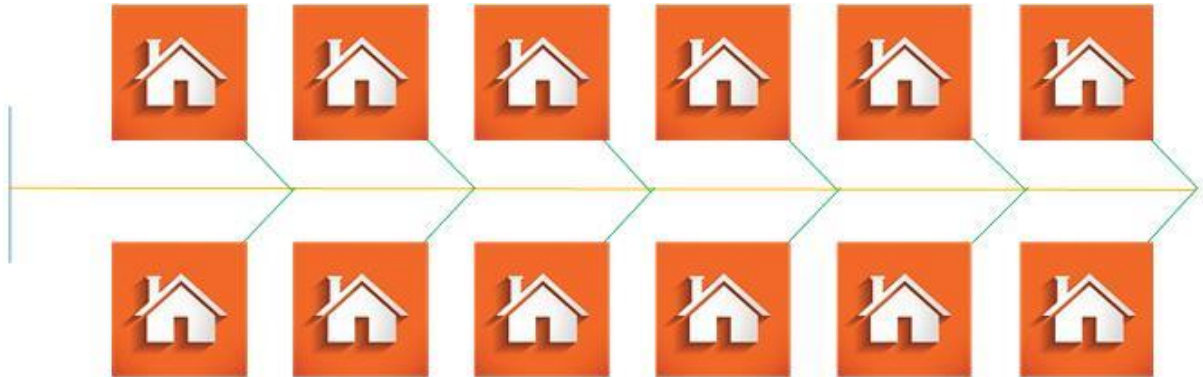
Σχήμα 3.1 Γραφική ροή επίλυσης αλγορίθμου





## 4. Εφαρμογή σε δίκτυο ΧΤ

### 4.1 Περιγραφή δικτύου ΧΤ



Εικόνα 4.1 Ηλεκτρικό δίκτυο οικιών-φωτοβολταϊκών

Για την εφαρμογή του αλγορίθμου στη ΧΤ, χρησιμοποιήθηκε το δίκτυο που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.1. Όπως φαίνεται, το δίκτυο είναι ακτινικό και σε κάθε οικία υπάρχει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Ένα μέρος της παραγόμενης φωτοβολταϊκής ισχύος καταναλώνεται για τις ανάγκες του σπιτιού. Τα χαρακτηριστικά του δικτύου παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά γραμμών δικτύου φωτοβολταϊκών

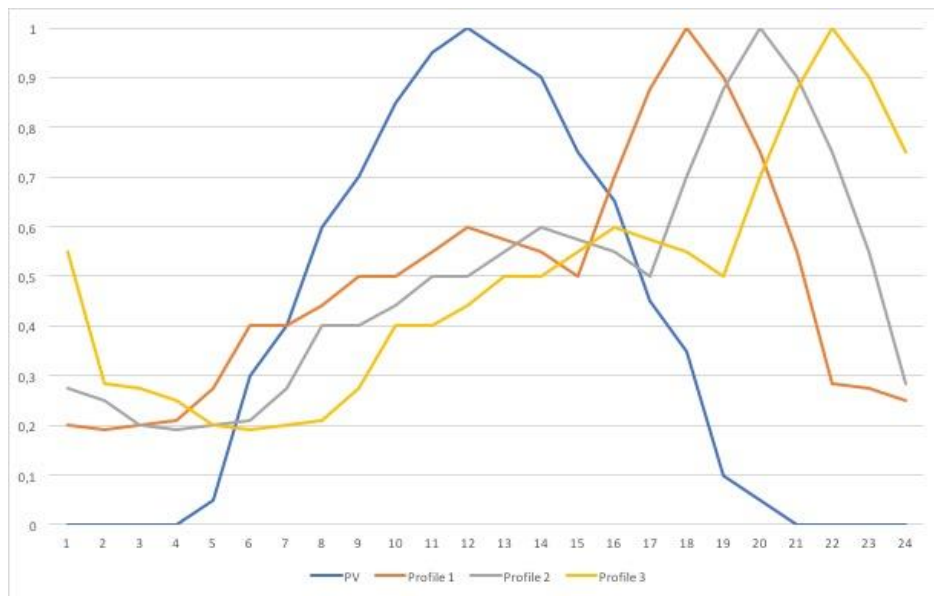
	Sbase (MW)	Z(p.u.)	C(p.u.)	Zbase( $\Omega$ )	Vbase(V)
Συνδέσεις μεταξύ σπιτιών	0.075	$(14.21 + 2.48j) 10^{-3}$	$(2.249) 10^{-5}$	0,768	240
Συνδέσεις μεταξύ κύριας γραμμής και κόμβων		$(20.96 + 1.967j) 10^{-3}$	$(589) 10^{-9}$	0,768	240

Στον επόμενο πίνακα φαίνεται η μέγιστη ισχύς που καταναλώνεται από το κάθε σπίτι αλλά και η εγκατεστημένη ισχύς κάθε φωτοβολταϊκού. Ο κάθε τύπος κατανάλωσης αντιστοιχεί στο αντίστοιχο προφίλ ζήτησης του σχήματος 4.1.

Πίνακας 4.2 Κατανάλωση και παραγωγή ισχύος ανά οικία

Οικίες	Τύπος κατανάλωσης ισχύος	Μέγιστη κατανάλωση ισχύος (KW)	Ισχύς Φωτοβολταϊκού (KW)
1	1	9	8
2	2	6	10
3	3	6	6
4	1	4,5	8
5	2	3	10
6	3	6	6
7	1	9	8
8	2	6	10
9	3	4,5	6
10	1	3	8
11	2	6	10
12	3	9	6

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι κυματομορφές για τις τιμές κατανάλωσης και παραγωγής ανά ώρα. Χρησιμοποιήθηκε η ίδια τυπική καμπύλη για την φωτοβολταϊκή παραγωγή, ενώ τα προφίλ για τη ζήτηση παρουσιάζουν μεταξύ τους μια χρονική μετατόπιση. Για παράδειγμα η κυματομορφή 1 (profile 1) παρουσιάζει μέγιστη κατανάλωση την 18ώρα(6μ.μ.).



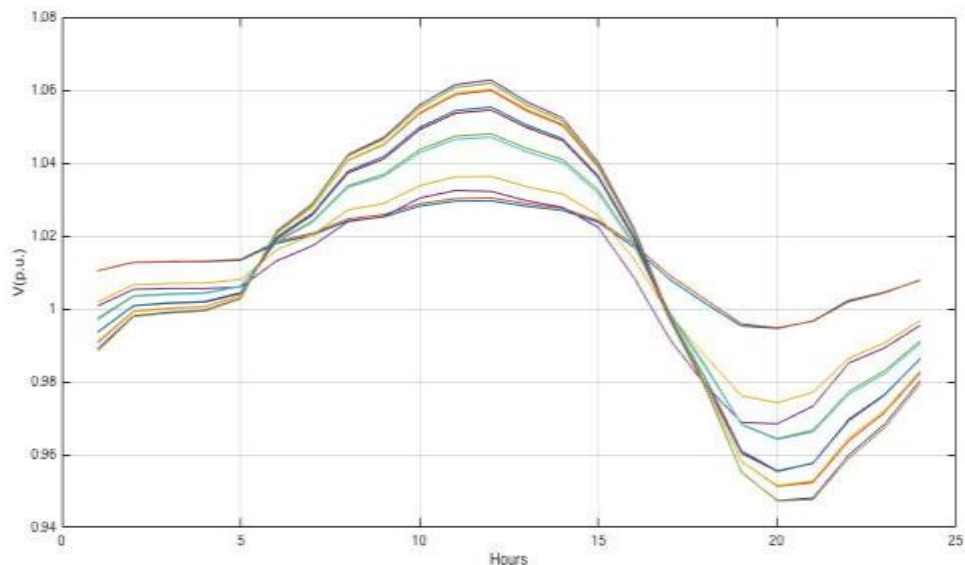
Σχήμα 4.1 Κυματομορφές φωτοβολταϊκών και κατανάλωσης

Τελικά για να υπολογιστεί η εκάστοτε παραγωγή και κατανάλωση συνδυάστηκαν τα παραπάνω δεδομένα. Για παράδειγμα, η οικία 1 παρουσιάζει μέγιστη κατανάλωση στις 18(6μ.μ.) αφού ανήκει στο profile 1 με 9kW και μέγιστη παραγωγή στις 12μ.μ. με τιμή 8kW.

Στην συνέχεια θα εξεταστεί το ίδιο δίκτυο υποθέτοντας ότι κάποια από τα φωτοβολταϊκά δεν επικοινωνούν με τα υπόλοιπα λόγω τηλεπικοινωνιακής βλάβης μεταξύ τους προκειμένου να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου. Στην ερχόμενη εικόνα παρουσιάζεται η περίπτωση τηλεπικοινωνιακής απώλειας των οικιών - φωτοβολταϊκών 5,6. Στο κεφάλαιο 4.3 θα γίνει η μελέτη και επεξεργασία του νέου δικτύου. Παρατηρούμε ότι στο «νέο» δίκτυο η επικοινωνία μεταξύ των φωτοβολταϊκών 3-5, 4-6, 5-6, 5-7, 6-8 χάνεται.

Θα διεξαχθούν παρόμοιες προσομοιώσεις του δικτύου κάνοντας αλλαγές στις συνδέσεις μεταξύ των τηλεπικοινωνιακών γραμμών των οικιών. Μία από αυτές τις προσομοιώσεις θα είναι να η δημιουργία ενός δικτύου συνδέσεως σε αστέρα. Ουσιαστικά προσομοιώνουμε 2 ξεχωριστά δίκτυα σε σύνδεση αστέρα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με τις οικίες 5,7. Στη συνέχεια εξετάζουμε την περίπτωση ύπαρξης διασύνδεσης μεταξύ των οικιών 5,7 οπότε τα τελικώς γίνονται δύο αυτοτελή δίκτυα συνδέσεως σε αστέρα. Θα υπάρξει άλλη μία προσομοίωση σε συνδεσμολογία κεντρικών κόμβων (σε μία γειτονιά).

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η κυματομορφή της τάσης, όπως προέκυψε από τη ροή φορτίου, για τους ζυγούς που βρίσκονται οι οικίες. Η επίλυση και εξαγωγή των γραφημάτων έχει γίνει μέσω του εργαλείου Matpower-Matlab. Παρατηρείται ότι σε ορισμένους ζυγούς τις ώρες με μεγάλη παραγωγή, οι τάσεις υπερβαίνουν το όριο του 1,05p.u. Για το σκοπό αυτό θα εφαρμοστεί ο αλγόριθμος διπλής επανάληψης.



Σχήμα 4.2 Κυματομορφή τάσης πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου διπλής επανάληψης

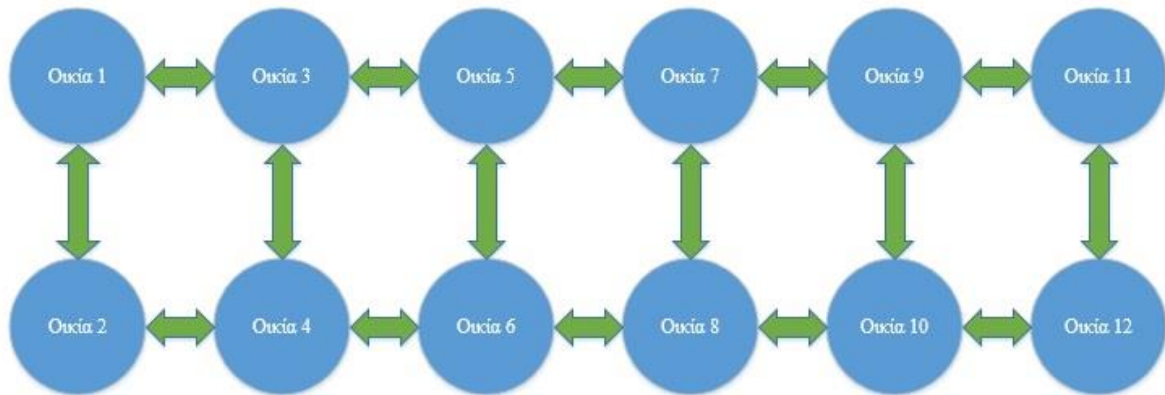
Στον επόμενο πίνακα παρατίθενται ποιοι ζυγοί και σε ποιες ώρες της ημέρας μπορούν να περικόψουν την ισχύ που παράγουν από το φωτοβολταϊκό τους.

Πίνακας 4.3 Ζυγοί με δυνατότητα περικοπής ισχύος

Ζυγοί/Σπίτια	10 hour	11 hour	12 hour	13 hour	14 hour
7	0	1	1	0	0
8	0	1	1	0	0
9	1	1	1	1	0
10	1	1	1	1	0
11	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1

#### 4.2 Χωρίς απώλεια σύνδεσης

Στην εικόνα 4.2 παρατηρείται ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Στις άκρες αυτού οι οικίες 1,2,11,12 έχουν μόνο δύο γείτονες ενώ όλες οι υπόλοιπες οικίες έχουν τρεις γείτονες.



Εικόνα 4.2 Δίκτυο οικιών – φωτοβολταϊκών

Ο παρακάτω πίνακας εμφανίζει πόσες συνδέσεις έχει ο κάθε κόμβος-οικία με τους γειτονικούς του κόμβους.

Πίνακας 4.4 Αριθμός γειτόνων ανά οικία

Ζυγοί	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Συνδέσεις	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3

Η ισχύς του κάθε φωτοβολταϊκού του παρακάτω πίνακα εμφανίζει τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να κοπεί από κάθε φωτοβολταϊκό ανά ώρα.

Πίνακας 4.5 Ισχύς που μπορεί να κοπεί

Ζυγοί/Σπίτια	10 hour	11 hour	12 hour	13 hour	14 hour
7	0	0,0074	0,0092	0	0
8	0	0,0088	0,0108	0	0
9	0,0059	0,0146	0,0165	0,0072	0
10	0,0065	0,0153	0,0172	0,0079	0
11	0,0106	0,0204	0,0227	0,0120	0,0041
12	0,0092	0,0190	0,0212	0,0104	0,0027

Για μία πιο περιεκτική απεικόνιση εμφανίζεται το άθροισμα της ισχύος ανά ώρα που μπορεί να κοπεί.

Πίνακας 4.6 Συνολική ισχύς που μπορεί να κοπεί ανά ώρα

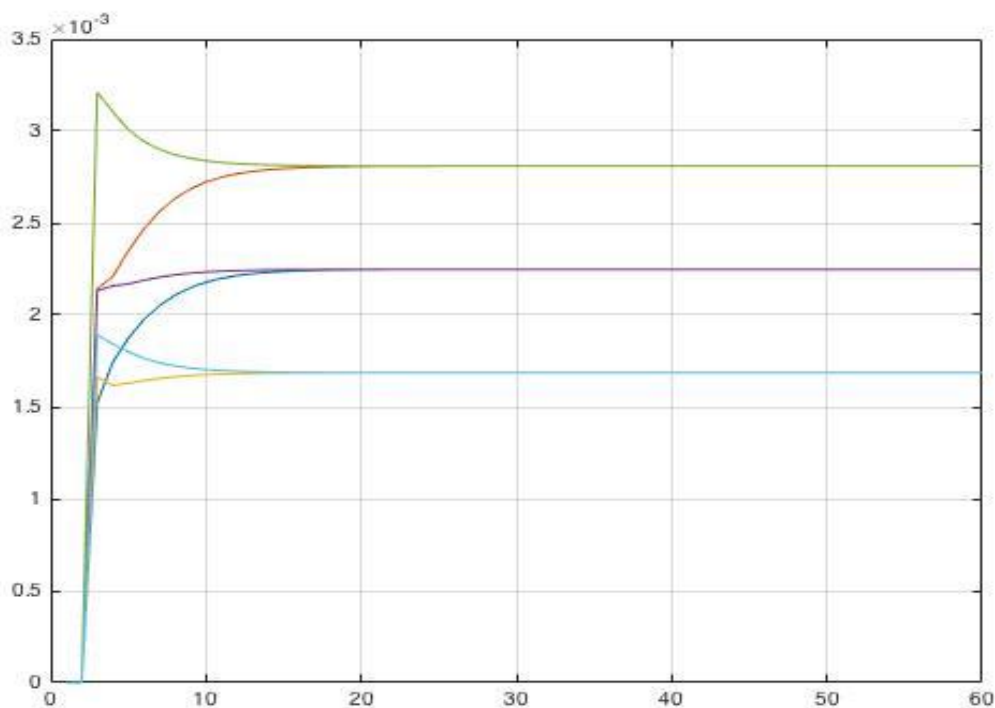
Ωρα	10 hour	11 hour	12 hour	13 hour	14 hour
Συνολική περικοπτόμενη ισχύς	0,0321	0,0856	0,0976	0,0375	0,0068

Τελικώς μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου double iteration υπολογίζεται η ισχύς για κάθε φωτοβολταϊκό που πρέπει να περικοπεί. Κατόπιν τούτου πρέπει να περιοριστεί-μειωθεί η παραγωγή ισχύος την σωστή στιγμή αλλά και στο σωστό χρόνο όπως μας υποδεικνύεται από τον αλγόριθμο διπλής επανάληψης ώστε τελικώς να μην παρουσιάζονται υπερτάσεις στις οικίες.

Πίνακας 4.7 Η ισχύς για κάθε φωτοβολταϊκό ανά ώρα της κάθε οικίας-φωτοβολταϊκού που πρέπει να μειωθεί

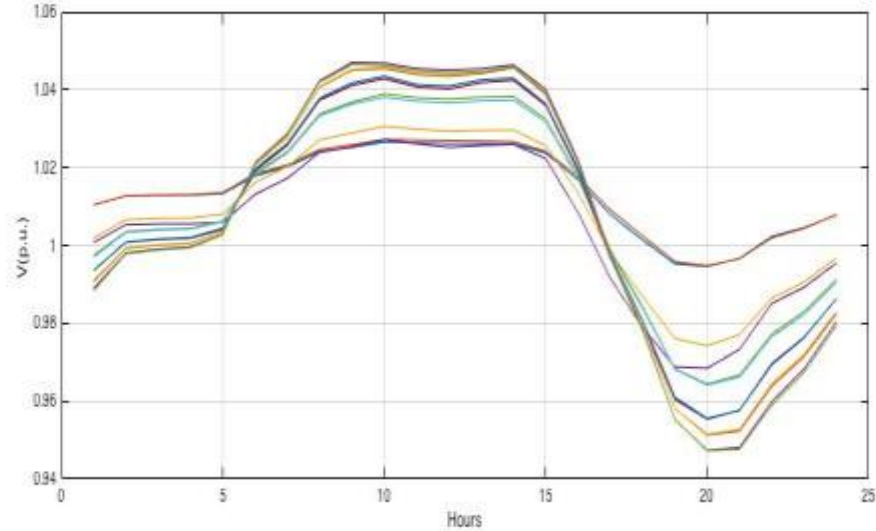
Ζυγοί/Σπίτια	10hour	11hour	12hour	13hour	14hour
7		0.0020	0.0022		
8		0.0025	0.0028		
9	0.0012	0.0015	0.0017	0.0015	
10	0.0016	0.0020	0.0022	0.0020	
11	0.0020	0.0025	0.0028	0.0025	0.0022
12	0.0012	0.0015	0.0017	0.0015	0.0013

Το επόμενο σχήμα παρουσιάζει τη σύγκλιση του αλγορίθμου στην ποσότητα ισχύος που πρέπει να περικοπεί τελικά σε κάθε ζυγό. Παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος έχει σταθεροποιήσει τα αποτελέσματα του μετά την 18η επανάληψη. Έτσι μας δίνεται η δυνατότητα να υπάρχει καλύτερη εποπτεία ως προς ποιοι ζυγοί-κόμβοι-οικίες πρέπει να μειώσουν την παραγωγή τους αλλά και πόσο θα χρειαστεί να μειώσουν.



Σχήμα 4.3 Περικοπής ισχύος στις 12μ.μ

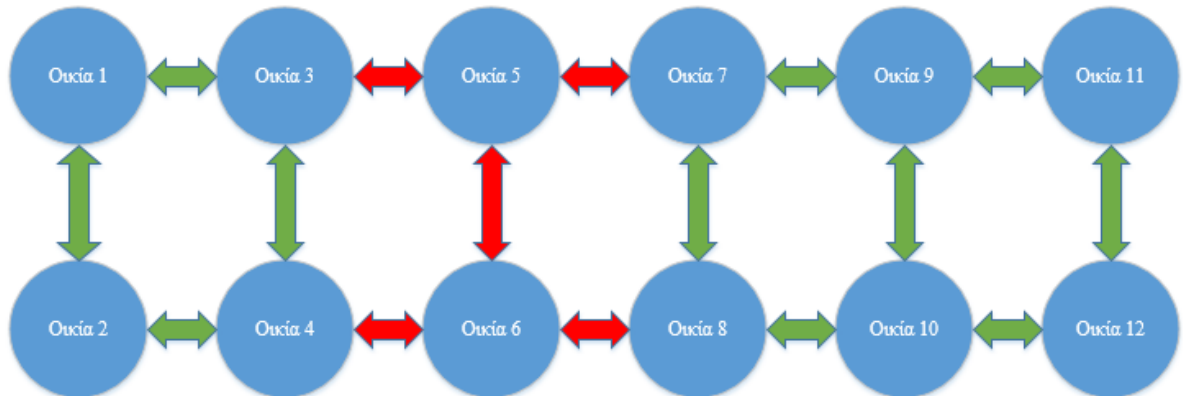
Όπως επιβεβαιώνεται από το γράφημα του επόμενου σχήματος κανένας ζυγός δεν ξεπερνά τα όρια του 1.05p.u., αλλά και κανένα δεν είναι κάτω από το όριο του 0.95p.u. πράγμα που καθιστά την εφαρμογή του αλγορίθμου επιτυχή.



Σχήμα 4.4 Κυματομορφή της τάσης μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου διπλής επανάληψης

### 4.3 Με απώλεια σύνδεσης οικιών

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται μία διαφορετική μελέτη περίπτωσης δηλαδή (όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2) οι οικίες-φωτοβολταϊκά 5-6 βγαίνουν εκτός του υπόλοιπου τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Μελετάται μία πιθανή περίπτωση όταν υπάρχουν τηλεπικοινωνιακές βλάβες στις γραμμές-διασυνδέσεις 3-5, 5-7, 4-6, 6-8, 5-6.



Εικόνα 4.3 Δίκτυο οικιών – φωτοβολταϊκών (με απώλεια σύνδεσης οικιών 5,6)

Η κατανομή της τάσης δεν έχει αλλάξει, καθώς οι αλλαγές αφορούν μόνο την τηλεπικοινωνιακή σύνδεση, άρα το σχήμα 4.2 μπορεί να θεωρηθεί δεδομένο για αυτή τη μελέτη περίπτωσης. Επίσης παρατηρείται σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση ότι η

δυνατότητα των φωτοβολταϊκών να περικλύουν την παραγωγή ισχύος την κατάλληλη ώρα παρέμεινε αμετάβλητη. Οπότε ο πίνακας 4.3 είναι ίδιος και για την περίπτωση απώλειας σύνδεσης των οικιών 5,6 με το υπόλοιπο δίκτυο. Όμως παρατηρούμε ότι ο αριθμός των γειτόνων μειώθηκε για κάποιες από τις οικίες-φωτοβολταϊκά όπως και είναι λογικό καθώς οι οικίες 5,6 έχασαν την επικοινωνιακή σύνδεση με τις υπόλοιπες οικίες του δικτύου.

Πίνακας 4.8 Αριθμός γειτόνων ανά οικία (με απώλεια σύνδεσης οικιών 5,6)

Ζυγοί	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Συνδέσεις	3	3	3	3	1	1	3	3	4	4	3	3

Έτσι με την απουσία-έλλειψη των γειτόνων καλούνται κάποιοι άλλοι ζυγοί να καλύψουν τις απαιτήσεις για την περικοπή ισχύος. Ο αλγόριθμος διπλής επανάληψης έχει προβλέψει και υπολογίσει αντίστοιχα τα ανώτατα όρια περικοπής ισχύος στις αντίστοιχες ώρες. Τα ανώτατα όρια περικοπής ισχύος των οικιών-φωτοβολταϊκών παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα και είναι ελαφρώς επαυξημένα σε σχέση με τον πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.9 Ισχύς που μπορεί να περικοπεί (με απώλεια σύνδεσης οικιών 5,6)

Ζυγοί/Σπίτια	10 hour	11 hour	12 hour	13 hour	14 hour
7	0	0,0093	0,0115	0	0
8	0	0,0110	0,0135	0	0
9	0,0059	0,0146	0,0165	0,0072	0
10	0,0065	0,0153	0,0172	0,0079	0
11	0,0106	0,0204	0,0227	0,0120	0,0041
12	0,0092	0,0190	0,0212	0,0104	0,0027

Επομένως η ανώτατη ισχύς που μπορεί να κοπεί εμφανίζεται στις ώρες 11, 12 επαυξημένη διότι σε εκείνες τις ώρες υπάρχουν φωτοβολταϊκά που έχουν χάσει την τηλεπικοινωνιακή τους σύνδεση με το υπόλοιπο δίκτυο.

Πίνακας 4.10 Συνολική ισχύς που μπορεί να περικοπεί ανά ώρα (με απώλεια σύνδεσης οικιών 5,6)

Ωρα	10 hour	11 hour	12 hour	13 hour	14 hour
Συνολική περικοπτόμενη ισχύς	0,0321	0,0897	0,1026	0,0375	0,0068

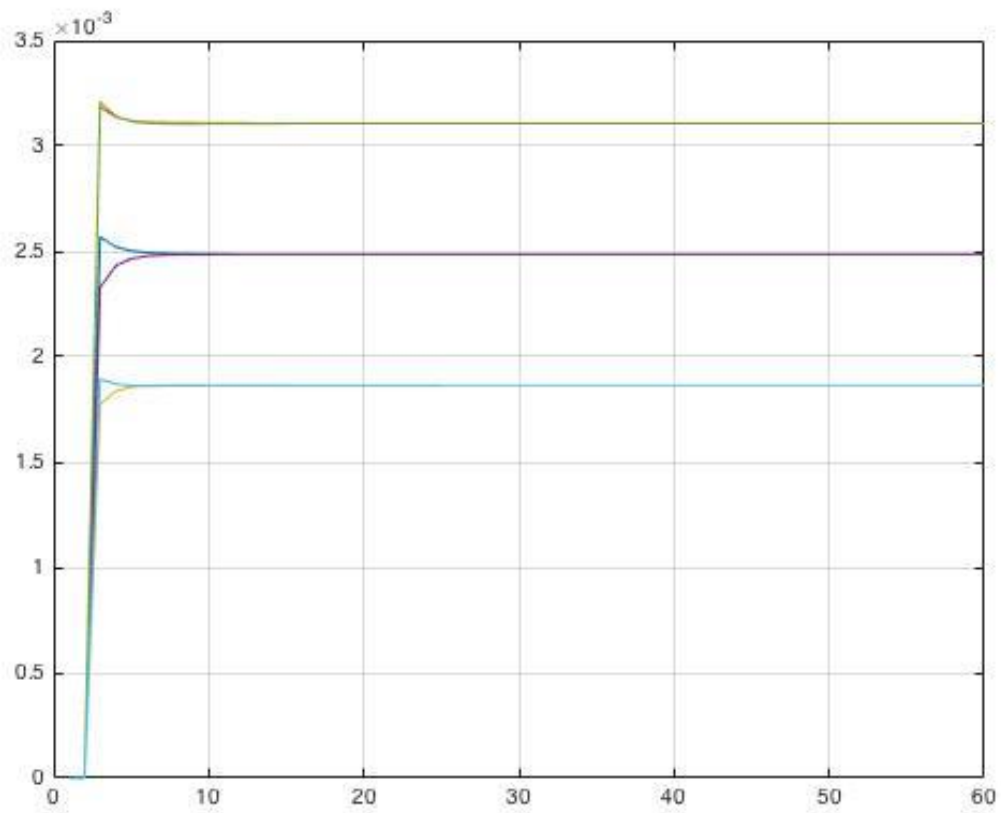


Τελικώς μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου double iteration υπολογίζονται πόσο και ποια φωτοβολταϊκά πρέπει να περιορίσουν την ισχύ τους. Κατόπιν τούτου πρέπει περιοριστεί-μειωθεί η παραγωγή ισχύος την κατάλληλη στιγμή όπως μας υποδεικνύεται από τον αλγόριθμο ώστε τελικώς να μην παρουσιάζονται υπερτάσεις στο δίκτυο. Οι διαφορές με τον αντίστοιχο πίνακα της προηγούμενης ενότητας παρατηρούνται για τις ώρες 11, 12. Αυτό αιτιολογείται από το γεγονός ότι καλούνται λιγότεροι κόμβοι να περικόψουν από τη συνολική ισχύ που χρειάζεται ώστε τα φωτοβολταϊκά να επανέλθουν σε ανεκτά επίπεδα τάσεων. Επομένως και η ισχύς ανά ώρα κάθε ζυγού που πρέπει να περιοριστεί είναι διαφορετική. Ο αλγόριθμος προσπάθησε επιτυχώς να ισομοιράσει ανά ζυγό-οικία-φωτοβολταϊκό την επιπλέον ανάγκη για περικοπή ισχύος.

Πίνακας 4.11 Η ισχύς ανά ώρα της κάθε οικίας-φωτοβολταϊκού που πρέπει να μειωθούν (με απώλεια σύνδεσης οικιών 5,6)

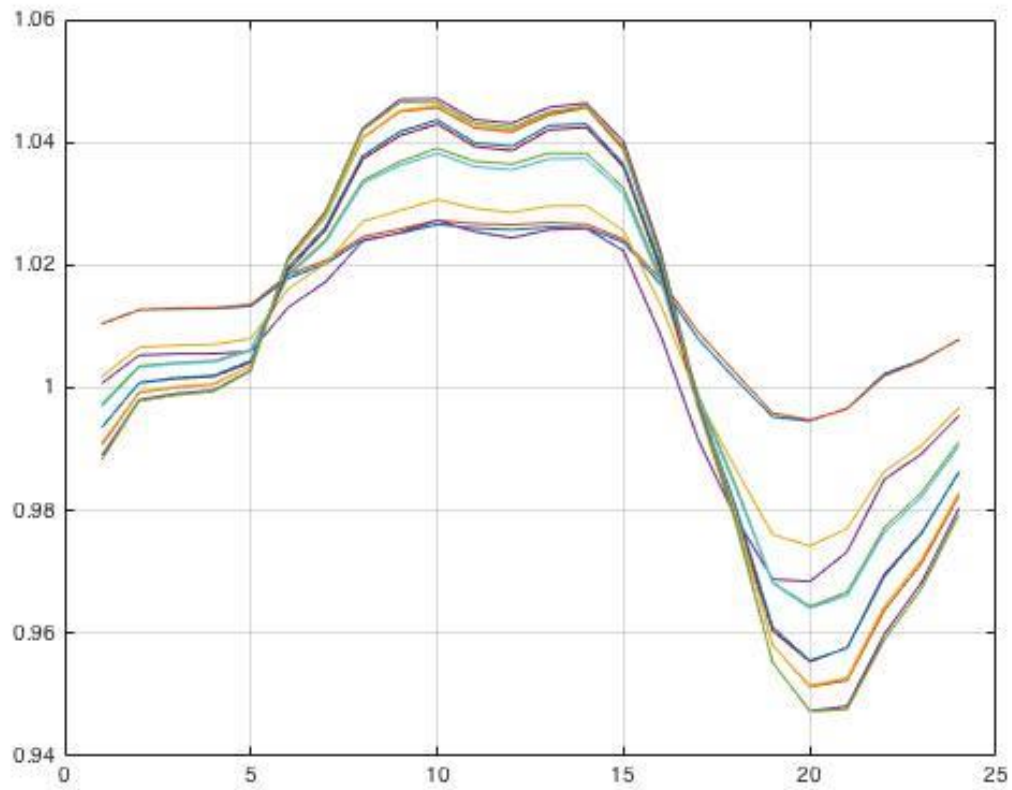
Ζυγοί/Σπίτια	10 hour	11 hour	12 hour	13 hour	14 hour
7		0.0022	0.0025		
8		0.0028	0.0031		
9	0.0012	0.0017	0.0019	0.0015	
10	0.0016	0.0022	0.0025	0.0020	
11	0.0020	0.0028	0.0031	0.0025	0.0022
12	0.0012	0.0017	0.0019	0.0015	0.0013

Το επόμενο σχήμα παρουσιάζει το πως συγκλίνει αλλά και σε ποια τιμή η ποσότητα παραγόμενης ισχύος που πρέπει να περικοπεί σε κάθε ζυγό. Παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος έχει σταθεροποιήσει τα αποτελέσματα του μετά την 7η επανάληψη. Έτσι μας δίνεται η δυνατότητα να υπάρχει καλύτερη εποπτεία ως προς ποιοι ζυγοί-φωτοβολταϊκά-οικίες πρέπει να μειώσουν την παραγωγή τους αλλά και πόσο θα χρειαστεί να μειώσουν. Χρειάστηκαν λιγότερες επαναλήψεις διότι είχε λιγότερες συνδέσεις γειτνίασης το δίκτυο. Άρα η σύγκλιση επιταχύνθηκε.



Σχήμα 4.5 Περικοπή ισχύος ανά οικία (με απώλεια σύνδεσης οικιών 5,6)

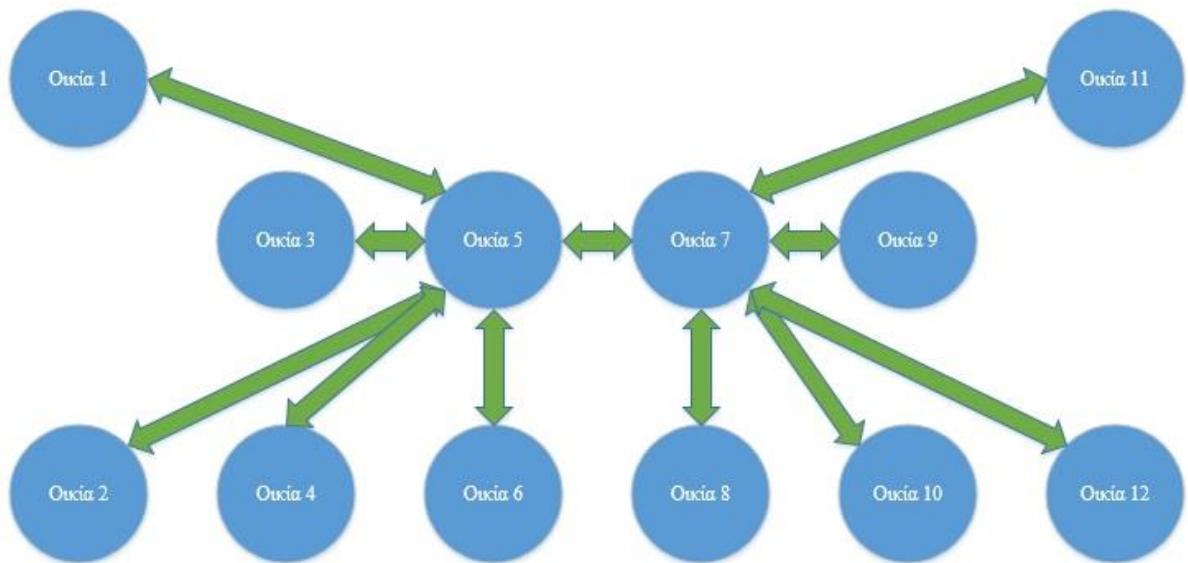
Όπως επιβεβαιώνεται από το γράφημα του επόμενου σχήματος κανένας ζυγός δεν ξεπερνά τα όρια του 1.05p.u. και του 0.95p.u., πράγμα που καθιστά την εφαρμογή του αλγορίθμου επιτυχή. Άρα ο αλγόριθμος μπορεί να λειτουργήσει ακόμα και όταν παρουσιάζεται σφάλμα στην επικοινωνία μεταξύ των οικιών-φωτοβολταϊκών.



Σχήμα 4.6 Κυματομορφή της τάσης μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου διπλής επανάληψης (με απώλεια σύνδεσης οικιών 5,6)

#### 4.4 Δίκτυο με συνδεσμολογία δύο αστερών

Στην επόμενη μελέτη περίπτωσης εφαρμόζεται ένα εντελώς διαφορετικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν 2 κεντρικοί κόμβοι-οικίες-φωτοβολταϊκά (5, 7) οι οποίοι μπορούν να θεωρηθούν ως κεντρικοί κόμβοι ενός δικτύου σε συνδεσμολογία αστέρα. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3 όλοι οι κόμβοι-οικίες-φωτοβολταϊκά συνδέονται με τις οικίες 5-7 και οι υπόλοιπες οικίες έχουν ως μοναδικό γείτονα κάποιες από τις οικίες 5 ή 7.



Εικόνα 4.4 Δίκτυο σε συνδεσμολογία αστέρα

Η κατανομή της τάσης δεν άλλαξε διότι ακόμα δεν έχει λειτουργήσει ακόμα ο double iteration αλγόριθμος. Το αντίστοιχο μπορεί να δειχθεί στο σχήμα 4.2. Επίσης παρατηρείται σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση ότι η δυνατότητα των φωτοβολταϊκών να περικόψουν την παραγωγή ισχύος την κατάλληλη ώρα παρέμεινε αμετάβλητη. Οπότε ο πίνακας 4.3 είναι ίδιος και για την περίπτωση συνδέσεως σε αστέρα.

Το πλήθος γειτόνων ανά οικία παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα για συνδεσμολογία αστέρα. Όπως φαίνεται από τον επόμενο πίνακα μόνο οι ζυγοί 5 και 7 έχουν παραπάνω από δύο διασυνδέσεις πράγμα λογικό διότι αποτελούν κέντρα των δύο υποδικτύων αστέρα.

Πίνακας 4.12 Αριθμός γειτόνων ανά οικία (με συνδεσμολογία αστέρα)

Ζυγοί	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Συνδέσεις	2	2	2	2	7	2	7	2	2	2	2	2

Στην συνέχεια υπολογίζεται το ανώτατο όριο περικοπής ισχύος ανά οικία και ώρα. Μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου πρέπει να ελεγχθεί αν ξεπερνάμε τα όρια του παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.13 Ισχύς που μπορεί να περικοπεί (με συνδεσμολογία αστέρα)

Ζυγοί/Σπίτια	10 hour	11 hour	12 hour	13 hour	14 hour
7	0	0,0046	0,0058	0	0
8	0	0,0147	0,0180	0	0
9	0,0098	0,0244	0,0275	0,0120	0
10	0,0108	0,0254	0,0286	0,0132	0
11	0,0141	0,0272	0,0303	0,0160	0,0055
12	0,0122	0,0254	0,0282	0,0139	0,0036

Υπολογίζουμε το συνολικό όριο περικοπής ισχύος για όλες τις οικίες-φωτοβολταϊκά που έχουν δυνατότητα να κόψουν από την παραγωγή ισχύος για τις ώρες 10,11,12,13,14.

Πίνακας 4.14 Συνολική ισχύς που μπορεί να περικοπεί ανά ώρα (με συνδεσμολογία αστέρα)

Ωρα	10 hour	11 hour	12 hour	13 hour	14 hour
Συνολική περικοπτόμενη ισχύς	0,0470	0,1218	0,1385	0,0551	0,0091

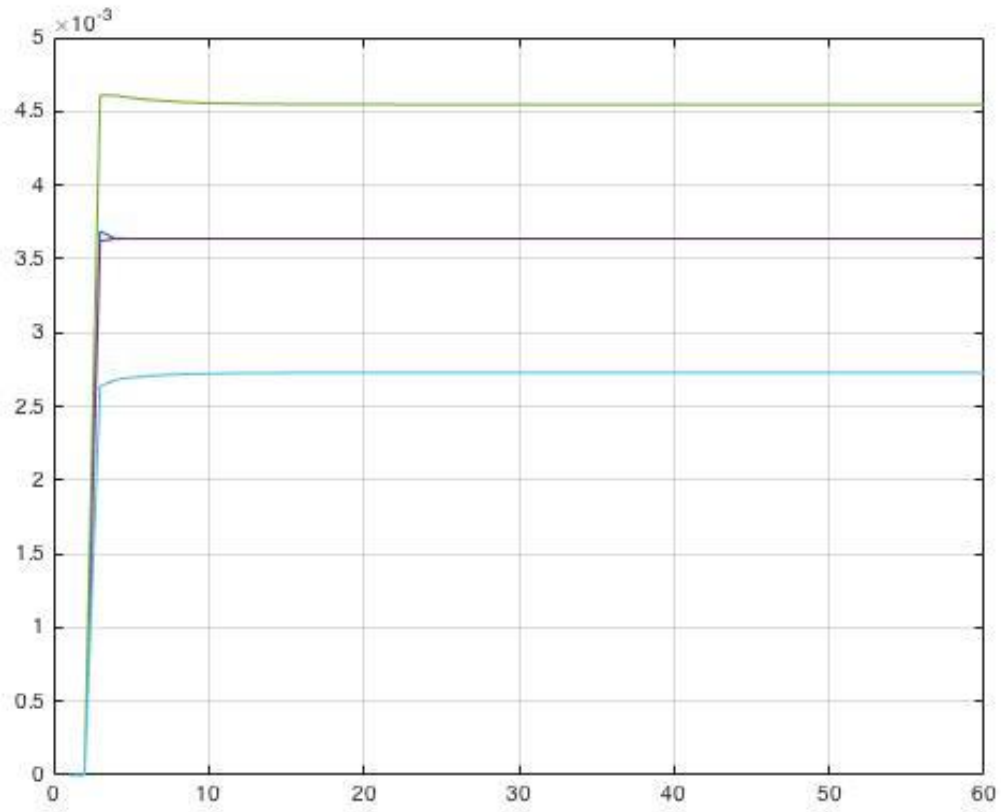
Μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου διπλής επανάληψης εξάγουμε τις τιμές που μας ενδιαφέρουν. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται η ισχύς ανά ώρα για κάθε οικία-φωτοβολταϊκό που πρέπει να μειωθεί ώστε τελικά η τάση να βρίσκεται εντός επιτρεπτών ορίων.

Πίνακας 4.15 Η ισχύς ανά ώρα της κάθε οικίας-φωτοβολταϊκού που πρέπει να μειωθούν (με συνδεσμολογία αστέρα)

Ζυγοί/Σπίτια	10 hour	11 hour	12 hour	13 hour	14 hour
7		0.0033	0.0036		
8		0.0041	0.0045		
9	0.0018	0.0024	0.0027	0.0023	
10	0.0025	0.0033	0.0036	0.0032	
11	0.0032	0.0041	0.0045	0.0040	0.0036
12	0.0018	0.0024	0.0027	0.0023	0.0020

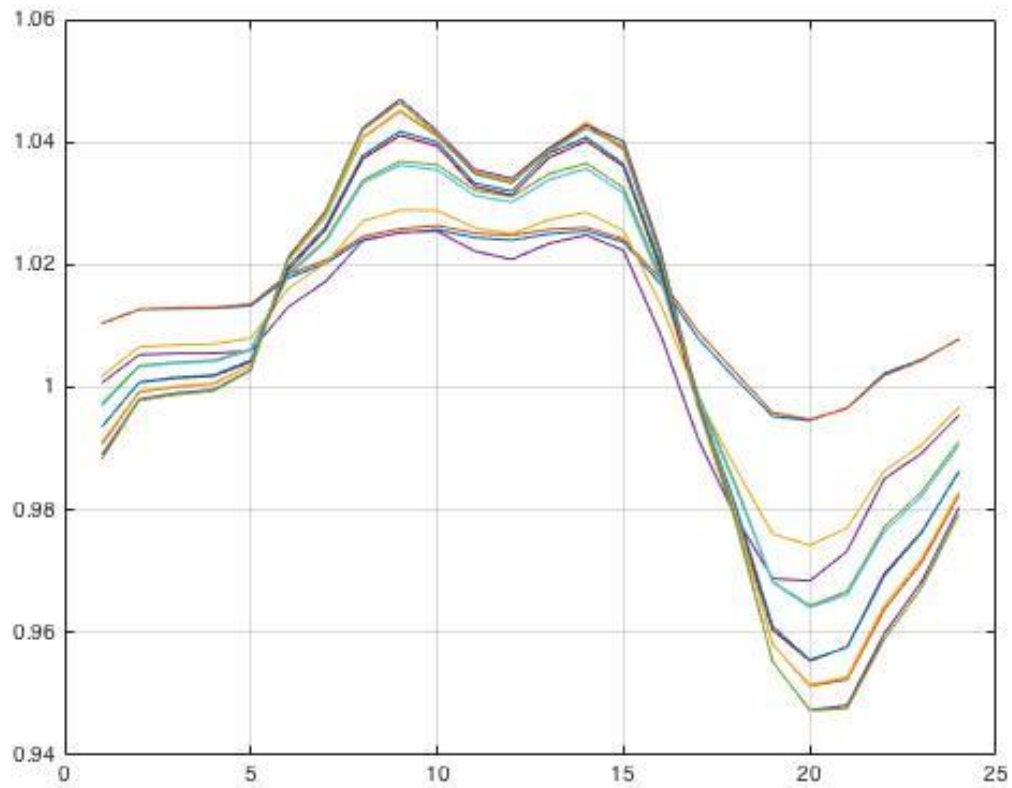
Η σύγκλιση των τιμών περικοπής ισχύος στα φωτοβολταϊκά συμβαίνει πολύ γρήγορα λόγω μικρού αριθμού συνδέσεων μεταξύ των οικιών-φωτοβολταϊκών. Μετά την 12<sup>η</sup> επανάληψη

έχουν συγκλίνει οι τιμές περικοπής ισχύος ανά οικία. Η σύγκλιση ισχύος των φωτοβολταϊκών που παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα αφορά την ώρα 12μ.μ..



Σχήμα 4.7 Περικοπή ισχύος ανά οικία στις 12μ.μ. (με συνδεσμολογία αστέρα)

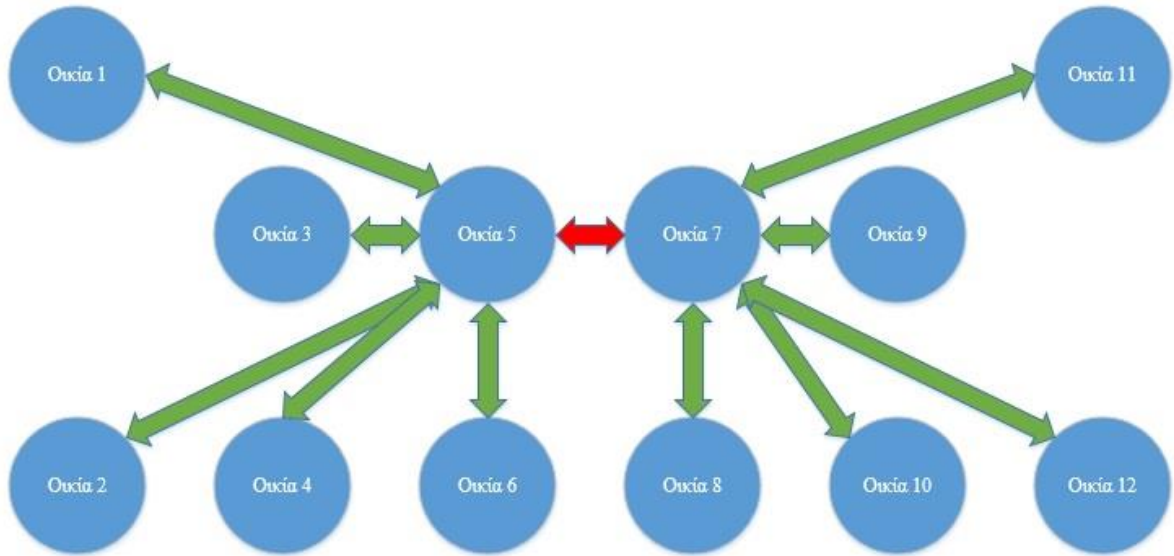
Τελικώς αφού εισάγουμε τα αποτελέσματα του πίνακα 4.15 στο εργαλείο Matpower. Παρατηρείται ότι οι όποιες υπερτάσεις είχαν παρουσιαστεί εξαλείφθηκαν και όλες οι τάσεις των φωτοβολταϊκών βρίσκονται ανάμεσα στα όρια του 1.05p.u. και 0.95p.u.. Μία νέα απεικόνιση των τάσεων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8 Κυματομορφή της τάσης μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου διπλής επανάληψης

#### 4.5 Δίκτυο με συνδεσμολογία δύο αστέρων και απώλεια επικοινωνίας

Έχοντας επιτύχει (μείωση της τάσης των φωτοβολταϊκών σε ανεκτά επίπεδα) στην προηγούμενη μελέτη περίπτωσης συνδεσμολογίας σε αστέρα, προσομοιώνεται μία νέα μελέτη περίπτωσης κάνοντας αλλαγές στο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Στην επόμενη εικόνα 4.4 παρουσιάζεται η νέα μελέτη περίπτωσης με τις αλλαγές στο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Σε αυτό το δίκτυο η διασύνδεση μεταξύ των οικιών 5-7 έχει χαθεί λόγω τηλεπικοινωνιακής βλάβης.



Εικόνα 4.5 Δίκτυο σε συνδεσμολογία αστέρα (με απώλεια σύνδεσης οικιών 5-7)

Η κατανομή της τάσης παρέμεινε ίδια διότι ακόμα δεν έχει λειτουργήσει ακόμα ο double iteration αλγόριθμος, οπότε υπάρχουν φωτοβολταϊκά που βρίσκονται σε μη ανεκτά επίπεδα τάσης. Το αντίστοιχο μπορεί να δειχθεί στο σχήμα 4.2. Οπότε ο πίνακας 4.3 είναι ίδιος και για την περίπτωση συνδέσεως σε αστέρα όπου οι οικίες 5-7 παρουσιάζουν βλάβη επικοινωνίας.

Ο αριθμός των γειτόνων ανά οικία παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα. Στις οικίες 5,7 μειώνεται κατά ένα το πλήθος των γειτόνων διότι έχει χαθεί η επικοινωνία μεταξύ τους.

Πίνακας 4.16 Αριθμός γειτόνων ανά οικία (με συνδεσμολογία αστέρα και απώλεια σύνδεσης μεταξύ των οικιών 5-7)

Ζυγοί	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Συνδέσεις	2	2	2	2	6	2	6	2	2	2	2	2

Στην συνέχεια υπολογίζεται το όριο περικοπής ισχύος ανά οικία-φωτοβολταϊκό και ώρα. Μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου πρέπει να ελεγχθεί αν ξεπερνάμε τα όρια του παρακάτω πίνακα. Παρατηρείται ότι υπάρχει μία μικρή αύξηση του ανώτατου ορίου περικοπής ισχύος για τις ώρες 11, 12, πράγμα λογικό διότι τα φωτοβολταϊκά 5,7 μείωσαν κατά μία τις τηλεπικοινωνιακές διασυνδέσεις τους.



Πίνακας 4.17 Ισχύς που μπορεί να περικοπεί (με συνδεσμολογία αστέρα και απώλεια σύνδεσης μεταξύ των οικιών 5-7)

Ζυγοί/Σπίτια	10 hour	11 hour	12 hour	13 hour	14 hour
7	0	0,0053	0,0066	0	0
8	0	0,0147	0,0180	0	0
9	0,0098	0,0244	0,0275	0,0120	0
10	0,0108	0,0254	0,0286	0,0132	0
11	0,0141	0,0272	0,0303	0,0160	0,0055
12	0,0122	0,0254	0,0282	0,0139	0,0036

Υπολογίζουμε το συνολικό όριο περικοπής ισχύος για όλες τις οικίες που είναι δυνατό να κοπεί για τις ώρες 10,11,12,13,14. Στις ώρες 11,12 παρουσιάζεται μία μικρή αύξηση στο ανώτατο όριο περικοπής ισχύος και ο λόγος που γίνεται αυτό είναι ο ίδιος που γράφτηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Πίνακας 4.18 Συνολική ισχύς που μπορεί να περικοπεί (με συνδεσμολογία αστέρα και απώλεια σύνδεσης μεταξύ των οικιών 5-7)

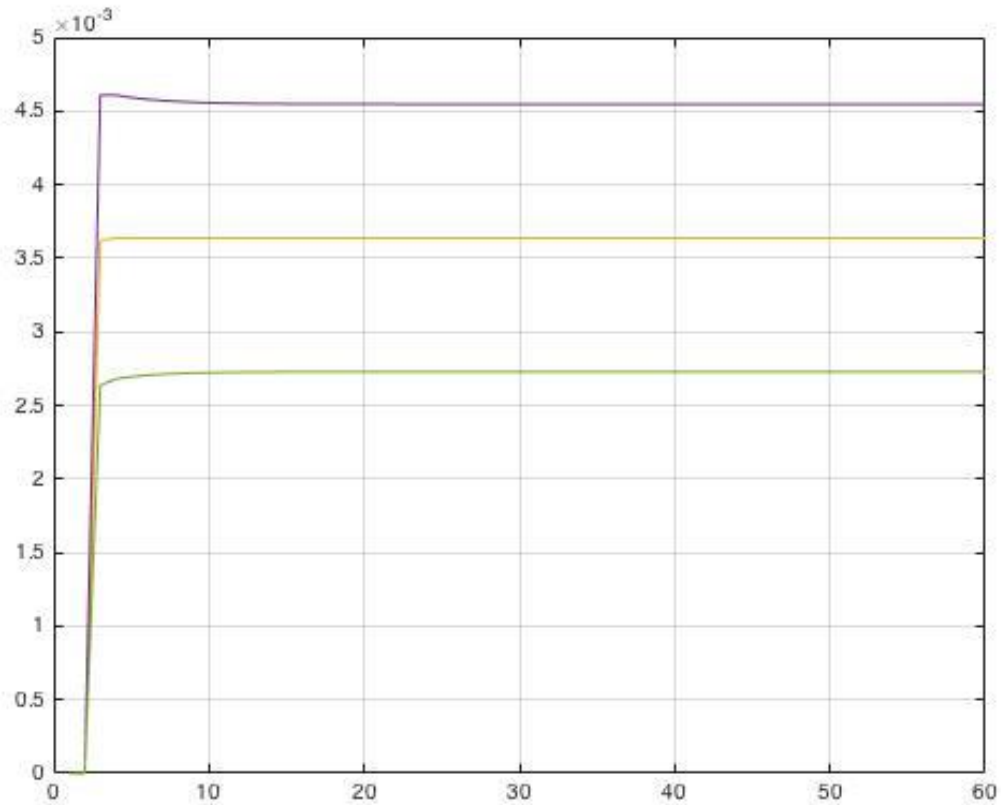
Ωρα	10 hour	11 hour	12 hour	13 hour	14 hour
Συνολική περικοπτόμενη ισχύς	0,0470	0,1224	0,1393	0,0551	0,0091

Μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου διπλής επανάληψης εξάγουμε τις τιμές που μας ενδιαφέρουν. Οι τιμές περικοπής ισχύος είναι αυξημένες για τις ώρες 11, 12 διότι δεν υφίσταται τηλεπικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ των φωτοβολταϊκών 5-7. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται αναλυτικά η ισχύς ανά ώρα και οικία που πρέπει να μειωθεί ώστε να μειωθούν σε ανεκτά επίπεδα τάσης τα φωτοβολταϊκά των οικιών.

Πίνακας 4.19 Η ισχύς ανά ώρα της κάθε οικίας-φωτοβολταϊκού που πρέπει να μειωθούν

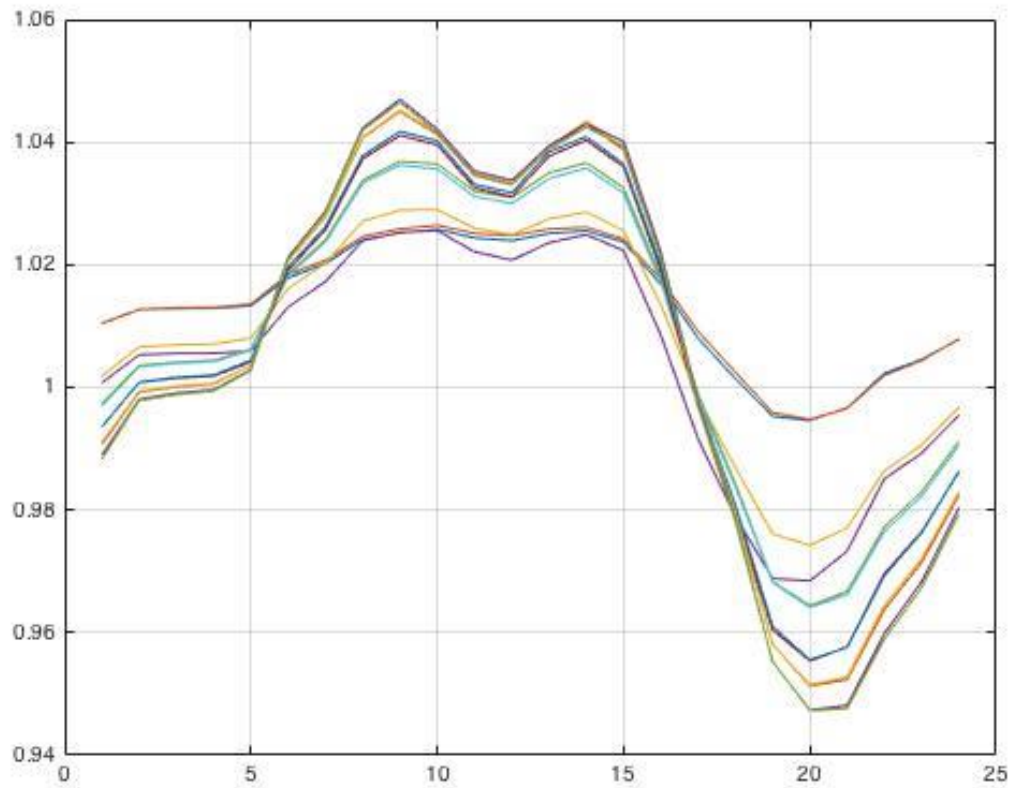
Ζυγοί/Σπίτια	10 hour	11 hour	12 hour	13 hour	14 hour
7		0.0033	0.0036		
8		0.0041	0.0045		
9	0.0018	0.0025	0.0027	0.0022	
10	0.0025	0.0033	0.0036	0.0031	
11	0.0032	0.0041	0.0045	0.0040	0.0036
12	0.0018	0.0025	0.0027	0.0022	0.0020

Η σύγκλιση των τιμών περικοπής ισχύος στα φωτοβολταϊκά συμβαίνει πολύ γρήγορα λόγω μικρού αριθμού συνδέσεων μεταξύ οικιών. Ήδη στην 10<sup>η</sup> επανάληψη έχει υπάρξει σύγκλιση στις τιμές περικοπής ισχύος.



Σχήμα 4.9 Περικοπή ισχύος ανά οικία στις 12μ.μ. (με συνδεσμολογία αστέρα και απώλεια επικοινωνίας 5-7)

Τελικώς αφού εισάγουμε τα αποτελέσματα του πίνακα 4.19 στο εργαλείο Matpower. Παρατηρείται ότι οι όποιες υπερτάσεις είχαν παρουσιαστεί εξαλείφθηκαν. Μία νέα απεικόνιση των τάσεων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.10. Όντως όπως φαίνεται οι τάσεις των φωτοβολταϊκών έχουν περιοριστεί και επανέλθει σε φυσιολογικά επίπεδα (κάτω του 1.05p.u. και άνω του 0.95p.u.).

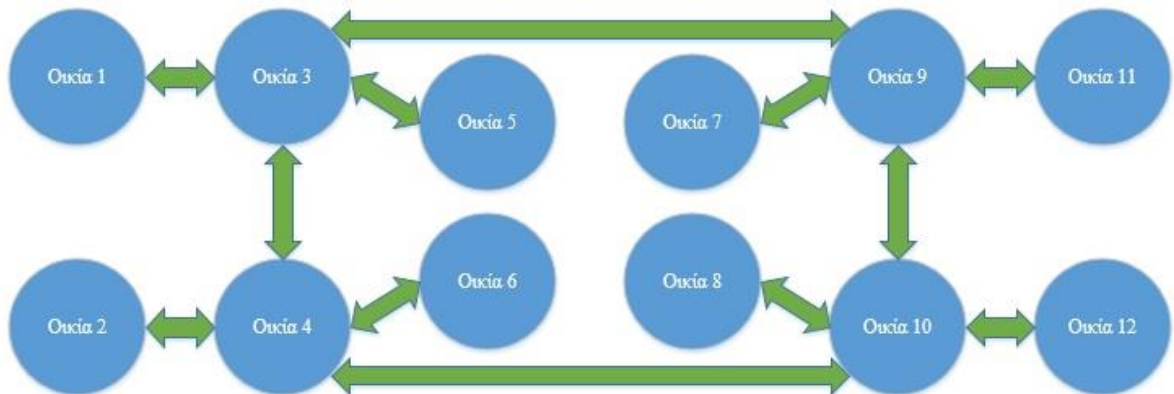


Σχήμα 4.10 Κυματομορφή της τάσης μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου διπλής επανάληψης

Από τα παραπάνω παρατηρείται ότι η θεωρητική ισχύς που μπορεί να κοπεί ανά ώρα και φωτοβολταϊκό, η συνολική περικοπτόμενη ισχύς που μπορεί να κοπεί ανά ώρα και η ισχύς που υποδεικνύεται από τον αλγόριθμο διπλής επανάληψης είναι ίδια με τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου (πίνακας 4.16, σχήμα 4.7, σχήμα 4.8). Αυτό συμβαίνει διότι στη προκειμένη περίπτωση οι οικίες 1-6 δεν είναι εκτός ορίων άρα δεν μπορούν και δεν χρειάζεται να κόψουν από την παραγωγή ισχύος για οποιαδήποτε ώρα της ημέρας. Οι μόνες οικίες που παίζουν σημαντικό ρόλο στην προσομοίωση και επίλυση του αλγορίθμου διπλής επανάληψης είναι οι οικίες 7-12. Στην πραγματικότητα στην προηγούμενη παράγραφο παρόλο που οι οικίες 5-7 ήταν διασυνδεδεμένες επειδή η οικία 5 δεν συμμετείχε στον αλγόριθμο διπλής επανάληψης, τελικά διαμορφώνονταν δύο ξεχωριστά δίκτυα αστέρα 1-6, 5-7, όπου και ο πρώτος αστέρας δεν συμμετείχε καθόλου. Με αυτή λογική επιβεβαιώνεται και η ομοιότητα των αποτελεσμάτων σε αυτή την παράγραφο, όπου παρουσιάζεται τηλεπικοινωνιακή βλάβη μεταξύ των οικιών 5-7.

#### 4.6 Δίκτυο με κεντρικούς κόμβους

Στην συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης εφαρμόζεται μία διαφορετική προσέγγιση τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Υπάρχουν 4 κεντρικοί κόμβοι σε κάθε γειτονιά όπου σε αυτούς συνδέονται οι γείτονες τους. Αναλυτικότερα οι κεντρικοί κόμβοι είναι οι 3, 4, 9, 10, ο κόμβος 3 συνδέεται με τους 1, 5, ο κόμβος 4 με τους 2,6, ο κόμβος 9 με τους 7, 11, ο κόμβος 10 με τους 8, 12. Επίσης οι κόμβοι 3, 4, 9, 10 συνδέονται μεταξύ τους για να ολοκληρώσουν το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Μία γραφική απεικόνιση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου φαίνεται στην εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.6 Δίκτυο συνδεσμολογίας με κεντρικούς κόμβους

Η κατανομή της τάσης δεν έχει αλλάξει. Επίσης παρατηρείται σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση ότι η δυνατότητα των φωτοβολταϊκών να περικόψουν την παραγωγή ισχύος την κατάλληλη ώρα παρέμεινε αμετάβλητη. Αυτό εξηγείται διότι οι παραγωγές και οι καταναλώσεις ισχύος από τα φωτοβολταϊκά και τις οικίες αντίστοιχα δεν έχουν αλλάξει.

Ο αριθμός των γειτόνων ανά οικία παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα. Οι κεντρικοί όπως αναμενόταν έχουν το μεγαλύτερο πλήθος γειτόνων.

Πίνακας 4.20 Αριθμός γειτόνων ανά οικία σε συνδεσμολογία με κεντρικούς κόμβους

Ζυγοί	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Συνδέσεις	2	2	5	5	2	2	2	2	5	5	2	2

Στην συνέχεια υπολογίζεται το όριο περικοπής ισχύος ανά οικία και ώρα. Αποτελεί μία νέα προσέγγιση στην προσομοίωση που πραγματοποιείται και παρουσιάζουν ενδιαφέρον οι ανώτατες τιμές ισχύος. Το ενδιαφέρον έγκειται στο πως θα διαμορφωθούν οι τιμές περικοπής ισχύος όταν το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο έχει κεντρικούς κόμβους. Μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου πρέπει να ελεγχθεί αν ξεπερνάμε τα όρια του παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.21 Ισχύς που μπορεί να περικοπεί σε συνδεσμολογία με κεντρικούς κόμβους

Ζυγοί/Σπίτια	10 hour	11 hour	12 hour	13 hour	14 hour
7	0	0,0124	0,0154	0	0
8	0	0,0147	0,0180	0	0
9	0,0049	0,0122	0,0138	0,0060	0
10	0,0054	0,0127	0,0143	0,0066	0
11	0,0141	0,0272	0,0303	0,0160	0,0055
12	0,0122	0,0254	0,0282	0,0139	0,0036

Υπολογίζουμε το συνολικό όριο περικοπής ισχύος για όλες τις οικίες που είναι δυνατό να κοπεί για τις ώρες 10,11,12,13,14.

Πίνακας 4.22 Η ισχύς ανά ώρα της κάθε οικίας-φωτοβολταϊκού που πρέπει να μειωθούν σε συνδεσμολογία με κεντρικούς κόμβους

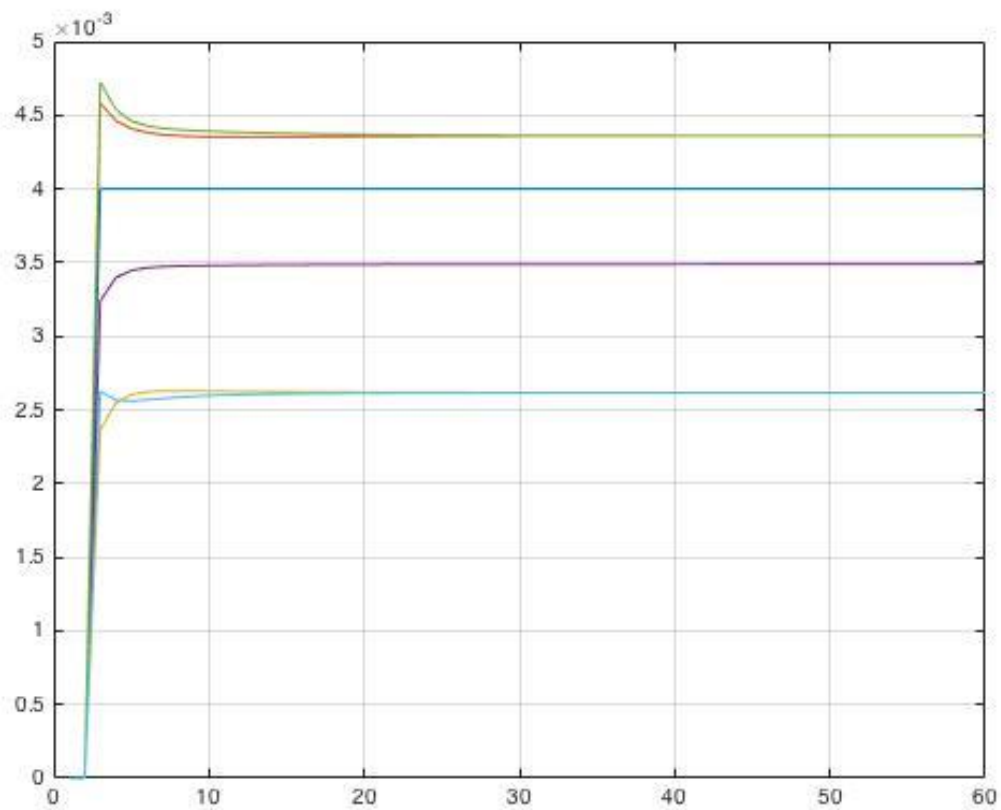
Ωρα	10 hour	11 hour	12 hour	13 hour	14 hour
Συνολική περικοπόμενη ισχύς	0,0366	0,1046	0,1200	0,0425	0,0091

Μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου διπλής επανάληψης εξάγονται οι τιμές περικοπής ισχύος από τα φωτοβολταϊκά. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται η ισχύς ανά ώρα και οικία-φωτοβολταϊκό που πρέπει να μειωθεί-περιοριστεί ώστε τελικά να επανέλθουν σε ανεκτά επίπεδα τάσης τα φωτοβολταϊκά των οικιών.

Πίνακας 4.23 Η ισχύς ανά ώρα της κάθε οικίας-φωτοβολταϊκού που πρέπει να μειωθούν σε συνδεσμολογία με κεντρικούς κόμβους

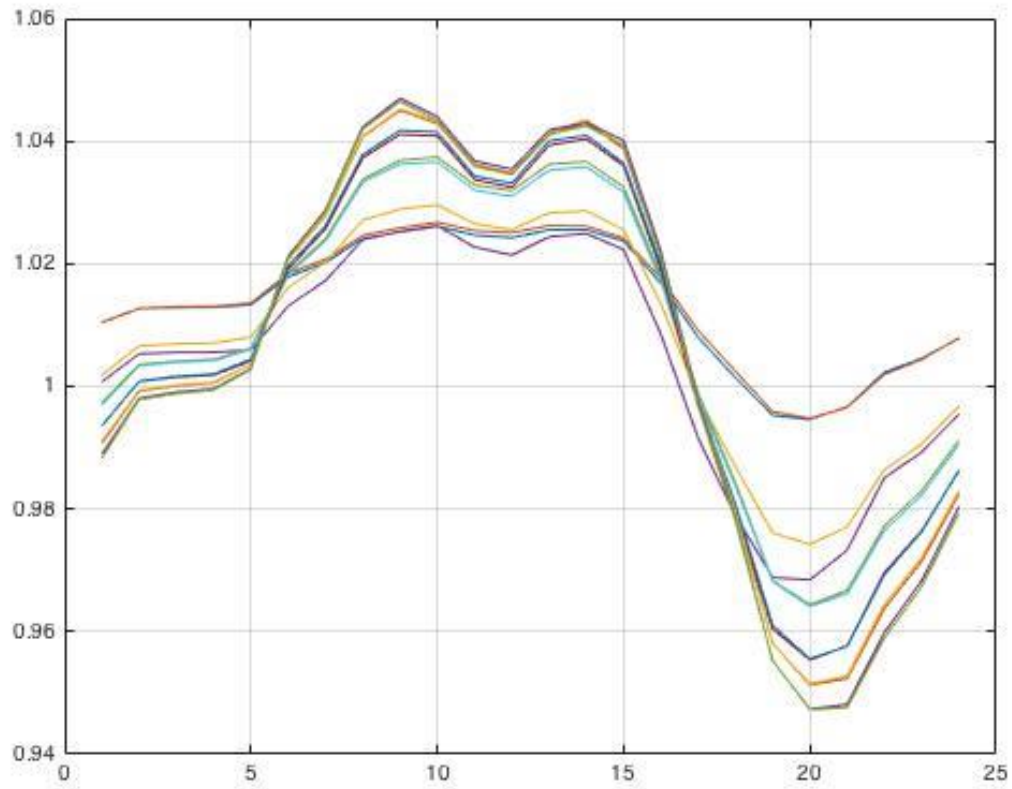
Ζυγοί/Σπίτια	10 hour	11 hour	12 hour	13 hour	14 hour
7		0.0031	0.0034		
8		0.0039	0.0043		
9	0.0016	0.0023	0.0026	0.0020	
10	0.0021	0.0031	0.0034	0.0027	
11	0.0027	0.0039	0.0043	0.0033	0.0036
12	0.0016	0.0023	0.0026	0.0020	0.0019

Η σύγκλιση των τιμών περικοπής ισχύος στα φωτοβολταϊκά δεν συμβαίνει πολύ γρήγορα αυτή τη φορά διότι το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο είναι πιο περίπλοκο λόγω των διασυνδέσεων των κόμβων-οικιών-φωτοβολταϊκών. Στην 35<sup>η</sup> επανάληψη επιτυγχάνεται η βέλτιστη σύγκλιση των τιμών περικοπής ισχύος των φωτοβολταϊκών.



Σχήμα 4.11 Περικοπή ισχύος ανά οικία στις 12μ.μ. σε συνδεσμολογία με κεντρικούς κόμβους

Τελικώς αφού εισάγουμε τα αποτελέσματα του πίνακα 4.23 στο εργαλείο Matpower. Παρατηρείται ότι οι όποιες υπερτάσεις είχαν παρουσιαστεί εξαλείφθηκαν. Μία νέα απεικόνιση των τάσεων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.12. Όντως καμία τάση φωτοβολταϊκού δεν ξεπερνά το άνω όριο του 1.05p.u. και το κάτω όριο του 0.95p.u..



Σχήμα 4.12 Κυματομορφή της τάσης μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου διπλής επανάληψης σε συνδεσμολογία με κεντρικούς κόμβους





## 5. Συμπεράσματα

Όπως παρατηρήθηκε από τα παραπάνω αποτελέσματα των προσομοιώσεων η εφαρμογή του αλγορίθμου διπλής επανάληψης ήταν επιτυχής. Μπόρεσε να διορθώσει όλες τις υπερτάσεις που προκλήθηκαν από την παραγωγή ισχύος των φωτοβολταϊκών. Μάλιστα για να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία του αλγορίθμου δημιουργήθηκαν διαφορετικά σενάρια τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Ο στόχος ήταν να εξεταστεί ο αλγόριθμος σε περιπτώσεις αποτυχίας ή βλάβης μεταξύ των τηλεπικοινωνιακών διασυνδέσεων των φωτοβολταϊκών. Είναι σημαντικό να αποτυπωθούν οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των σεναρίων προσομοίωσης και να επισημανθούν οι αιτίες που διαφοροποίησαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να χωριστούν σε 3 διαφορετικές κατηγορίες έχοντας ως γνώμονα το εκάστοτε τηλεπικοινωνιακό δίκτυο και στο τέλος να γίνει μία γενικότερη αξιολόγηση των παραπάνω κατηγοριών.

Στις παραγράφους 4.2, 4.3 παρουσιάστηκαν δύο «τετραγωνισμένα» τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Το δίκτυο της παραγράφου 4.2 δεν παρουσίαζε βλάβη στις τηλεπικοινωνιακές διασυνδέσεις του ενώ στο δίκτυο της παραγράφου 4.3 υπήρχαν τηλεπικοινωνιακές βλάβες γύρω από τις οικίες-φωτοβολταϊκά 5, 6. Οι διαφορές τους παρουσιάζονται παρακάτω:

- Συγκλίνουν πιο γρήγορα οι περικοπές ισχύος των φωτοβολταϊκών όταν υπάρχει βλάβη μεταξύ των διασυνδέσεων.
- Η τιμές περικοπών ισχύος των φωτοβολταϊκών είναι αυξημένες όταν υπάρχει βλάβη μεταξύ των διασυνδέσεων.

Στις παραγράφους 4.4, 4.5 παρουσιάστηκαν δύο τηλεπικοινωνιακά δίκτυα σε συνδεσμολογία αστέρα. Το δίκτυο της παραγράφου 4.4 δεν παρουσίαζε βλάβη στις τηλεπικοινωνιακές διασυνδέσεις του ενώ στο δίκτυο της παραγράφου 4.5 υπήρχε τηλεπικοινωνιακή βλάβη μεταξύ των οικιών-φωτοβολταϊκών 5, 7. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται παρακάτω:

- Όμοιες περικοπές ισχύος επειδή οι υπερτάσεις παρουσιάζονται στα δίκτυα 7-12 (βλέπε τέλος ενότητας 4.5)

Στην παράγραφο 4.6 παρουσιάστηκε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο σε συνδεσμολογία κεντρικών κόμβων σε μία γειτονιά. Στο συγκεκριμένο δίκτυο δεν παρουσιαζόταν κάποια βλάβη στις τηλεπικοινωνιακές διασυνδέσεις. Τα κύρια χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η σύγκλιση των τιμών-περικοπών ισχύος των φωτοβολταϊκών καθυστερεί πολύ να πραγματοποιηθεί σε σχέση με τα υπόλοιπα δίκτυα.

- Οι τιμές περικοπών ισχύος των φωτοβολταϊκών είναι μειωμένες σε σχέση με το δίκτυο σε συνδεσμολογία αστέρα (παράγραφοι 4.4, 4.5) αλλά αυξημένες σε σχέση με το «τετραγωνισμένο» δίκτυο (παράγραφοι 4.2, 4.3).

Τα κυριότερα πορίσματα που βγαίνουν από την έρευνα και την προσομοίωση των αποτελεσμάτων είναι τα παρακάτω:

- Η γρήγορη ή αργή σύγκλιση των περικοπών ισχύος των φωτοβολταϊκών εξαρτάται από την πολυπλοκότητα και το πλήθος των διασυνδέσεων κάθε κόμβου. Αν υπάρχουν λίγες διασυνδέσεις μεταξύ των κόμβων η σύγκλιση πραγματοποιείται γρήγορα ενώ αν έχουμε πολλές διασυνδέσεις με μεγάλη πολυπλοκότητα καθυστερεί η σύγκλιση.
- Οι τιμές περικοπής ισχύος εξαρτώνται από την πολυπλοκότητα και το πλήθος των διασυνδέσεων των κόμβων. Λίγες διασυνδέσεις παρουσιάζουν υψηλές τιμές περικοπής ισχύος, μεγάλη πολυπλοκότητα διασυνδέσεων μικρές τιμές περικοπής ισχύος.

## 6. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ο αλγόριθμος διπλής επανάληψης μπορεί να επεκταθεί σε δίκτυα μέσης τάσης (MT) δηλαδή σε μεγάλες μονάδες παραγωγής όπως φωτοβολταϊκά πάρκα και ανεμογεννήτριες. Επίσης στη προσέγγιση και στη προσομοίωση που ακολουθείται στην διπλωματική υπάρχει μία παραδοχή ότι τα φωτοβολταϊκά είναι παραγωγοί μόνο ενεργού ισχύος. Θα μπορούσε να επεκταθεί ο αλγόριθμος προσθέτοντας του νέες δυνατότητες όπως τη διαχείριση και της άεργου ισχύος. Τέλος αξίζει να διερευνηθεί η ικανότητα του αλγορίθμου στη διαχείριση δικτύων ΧΤ όπου κάποιες οικίες ή βιομηχανικές κατασκευές είναι αποκλειστικά καταναλωτές και δεν έχουν φωτοβολταϊκά άρα κατ' επέκταση δεν είναι παραγωγοί ηλεκτρικής ισχύος. Διαφορετικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα μπορεί να επηρεάσουν διαφορετικά τον αλγόριθμο που χρησιμοποιήσαμε άρα θα μπορούσε να διερευνηθεί και η περίπτωση διαφορετικών τύπων τηλεπικοινωνιακών δικτύων όπως ασύρματα (WIFI, Bluetooth),



## 7. Βιβλιογραφία

- 1) MIX. Π. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
- 2) Distributed Resource Coordination in Networked Systems Described by Digraphs Alejandro D. Dominguez-Garcia, Christoforos N. Hadjicostis
- 3) Επίλυση του Προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτιού με Κατανεμημένο Αλγόριθμο ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ του ΠΑΥΛΟΥ ΣΧΟΙΝΑ Αθήνα, Ιούνιος 2015
- 4) Ανάπτυξη Κατανεμημένων Αλγορίθμων για Κατανεμημένη Οικονομική Κατανομή Φορτιού ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Όλγα Κάγιαλη
- 5) A Distributed Control Based Coordination Scheme of Household PV Systems for Overvoltage Prevention Darcy Reeves, Ghavameddin Nourbakhsh, Ghassem Mokhtari, Arindam Ghosh,
- 6) Distributed Algorithms for Consensus and Coordination in the Presence of Packet-Dropping Communication Links Alejandro D. Dominguez-Garcia, Christoforos N. Hadjicostis, Nitin H. Vaidya
- 7) Environmental Commissioner of Ontario: The smart grid: The next step for our electrical grid
- 8) Holmberg, David G. and Bushby, Steven T.: BACnet and the smart grid
- 9) Ziang Zhang: Incremental Cost Consensus Algorithm in a Smart Grid Environment, Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE
- 10) Wei Ren, Randal W. Beard and Ella M. Atkins: A survey of consensus problems in multivalent coordination, 2005 American Control Conference June 8-10, 2005. Portland, OR, USA
- 11) Reza Olfati, Saber and Richard M. Murray: Consensus problems in networks of agents with switching topology and time delay, IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, VOL. 49, NO. 9, SEPTEMBER 2004
- 12) Ilsr.org. (2011). The Challenge of Reconciling a Centralized v. Decentralized Electricity System. [online] Available at: <https://ilsr.org/challenge-reconciling-centralized-v-decentralized-electricity-system/>
- 13) Smartgrids.eu. (2016). News 2014 and before | Smart Grids. [online] Available at: [http://www.smartgrids.eu/News\\_2014\\_and\\_before](http://www.smartgrids.eu/News_2014_and_before)
- 14) Grainger, J., Stevenson, W. and Stevenson, W. (1994). Power system analysis.
- 15) Zhu, J. (2009). Optimization of power system operation. Piscataway, N.J.: Wiley-IEEE.
- 16) Matpower 6.0b2 User's Manual Ray D. Zimmerman Carlos E. Murillo-Sanchez November 1,

2016

- 17) Gensollen, N., Gauthier, V., Marot, M. and Becker, M. (2013). Modeling and optimizing a distributed power network: A complex system approach of the prosumer management in the smart grid. Cornell University. [online] Available at: <https://arxiv.org/abs/1305.4096>
- 18) <https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/202>
- 19) J. Paidipati *et al.* (2008, February). Rooftop Photovoltaics Market Penetration Scenarios [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42306.pdf>
- 20) Australian Energy Market Operator. (2012). Rooftop PV Information Paper [Online]. Available: <http://www.aemo.com.au/Reports-and-Documents/Information-Papers/Rooftop-PV-Information-Paper-National-Electricity-Forecasting>
- 21) AECOM. (2011, May 6). Forecast Uptake and Economic Evaluation of Electric Vehicles in Victoria [Online]. Available: [http://www.transport.vic.gov.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0010/33499/Economic-Viability-of-Electric-Vehicles-in-Victoria-rev-C-final-issued.pdf](http://www.transport.vic.gov.au/__data/assets/pdf_file/0010/33499/Economic-Viability-of-Electric-Vehicles-in-Victoria-rev-C-final-issued.pdf)
- 22) F. Nemry and M. Brons. (2010, June). Plug-in Hybrid and Battery Electric Vehicles Market penetration scenarios of electric drive vehicles [Online]. Available: [http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC58748\\_TN.pdf](http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC58748_TN.pdf)
- 23) K. Yabe *et al.*, "Market penetration speed and effects on CO2 reduction of electric vehicles and plug-in hybrid electric vehicles in Japan," *Energy Policy*, vol. 45, pp. 529-540, June 2012.
- 24) K. Turitsyn, et al., "Distributed control of reactive power flow in a radial distribution circuit with high photovoltaic penetration," in *Power and Energy Society General Meeting*, 2010 IEEE, 2010, pp. 1-6.
- 25) A. D. Dominguez-Garcia and C. N. Hadjicostis, "Coordination and Control of Distributed Energy Resources for Provision of Ancillary Services," in *Smart Grid Communication (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on*, 2010, pp. 537-542.
- 26) R. Tonkoski *et al.*, "Impact of High PV Penetration on Voltage Profiles in Residential Neighborhoods," *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 3, pp. 518-527, July 2012.
- 27) R. Tonkoski, L.A.C. Lopes, and T.H.M El-Fouly, "Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention," *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol. 2, pp. 139- 147, 2011.
- 28) Qiang Yang *et al.*, "Communication Infrastructures for Distributed Control of Power Distribution Networks," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 2, pp. 316-327, May 2011.

- 29) Huanhai Xin *et al.*, "A distributed control for multiple photovoltaic generators in distribution networks," *American Control Conference (ACC)*, 2011, vol., no., pp.1063-1068, June 29 2011-July 1 2011.
- 30) S. Stüdli *et al.*, "A flexible distributed framework for realising electric and plug-in hybrid vehicle charging policies," *International Journal of Control*, vol. 85, no. 8, pp. 1130-1145, 2012.
- 31) G. Mokhtari, "Effective Voltage Rise Reduction in LV Smart Grid Using Mixed Distributed & Decentralised Coordination Algorithms," unpublished.
- 32) Ortega, J. M.; Rheinboldt, W. C. (2000). Iterative solution of nonlinear equations in several variables. Classics in Applied Mathematics. 30 (Reprint of the 1970 Academic Press ed.). Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM)
- 33) Richard S. Varga 2002 Matrix Iterative Analysis, Second ed. (of 1962 Prentice Hall edition), Springer-Verlag.
- 34) David M. Young, Jr. Iterative Solution of Large Linear Systems, Academic Press, 1971. (reprinted by Dover, 2003)
- 35) Abraham Berman, Robert J. Plemmons, Nonnegative Matrices in the Mathematical Sciences, 1994, SIAM. ISBN 0-89871-321-8.
- 36) Murty, Katta G. (1983). "16 Iterative methods for linear inequalities and linear programs (especially 16.2 Relaxation methods, and 16.4 Sparsity-preserving iterative SOR algorithms for linear programming)". Linear programming. New York: John Wiley & Sons Inc. pp. 453–464. ISBN 0-471-09725-X. MR 720547.
- 37) Goffin, J.-L. (1980). "The relaxation method for solving systems of linear inequalities". Math. Oper. Res. 5 (3): 388–414. doi:10.1287/moor.5.3.388. JSTOR 3689446. MR 594854.
- 38) Minoux, M. (1986). Mathematical programming: Theory and algorithms. Egon Balas (foreword) (Translated by Steven Vajda from the (1983 Paris: Dunod) French ed.). Chichester: A Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons, Ltd. pp. xxviii+489. ISBN 0-471-90170-9. MR 868279. (2008 Second ed., in French: Programmation mathématique: Théorie et algorithmes. Editions Tec & Doc, Paris, 2008. xxx+711 pp. ISBN 978-2-7430-1000-3. MR2571910).
- 39) Yousef Saad, Iterative Methods for Sparse Linear Systems, 1st edition, PWS, 1996.
- 40) William L. Briggs, Van Emden Henson, and Steve F. McCormick (2000), A Multigrid Tutorial (2nd ed.), Philadelphia
- 41) Quentin R. Skrabec, The 100 Most Significant Events in American Business: An Encyclopedia, ABC-CLIO - 2012, page 86

- 42) Berly, J. (1880-03-24). "Notes on the Jablochhoff System of Electric Lighting". *Journal of the Society of Telegraph Engineers. Institution of Electrical Engineers*. **IX** (32): 143. Retrieved 2009-01-07.
- 43) Garrison, Webb B. (1983). *Behind the headlines: American history's schemes, scandals, and escapades*. Stackpole Books. p. 107.
- 44) Parke Hughes, Thomas (1993). *Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930*. JHU Press. pp. 120–121.
- 45) Garud, Raghu; Kumaraswamy, Arun; Langlois, Richard (2009). *Managing in the Modular Age: Architectures, Networks, and Organizations*. John Wiley & Sons. p. 249.
- 46) "Power Transmission and Distribution | Hydro-Québec". [www.hydroquebec.com](http://www.hydroquebec.com). Retrieved 2016-03-08.